

---

This is the **published version** of the master thesis:

Farinha, María Isabel [et al.]. *Explorando el potencial de la teledetección para evaluar el impacto de la sequía en las turberas de alta montaña.* (Universitat Autònoma de Barcelona), 2025 (Màster Universitari en Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica). 61 pàg.

---

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/325350>

under the terms of the  license.

# EXPLORANDO EL POTENCIAL DE LA TELEDETECCIÓN PARA EVALUAR EL IMPACTO DE LA SEQUÍA EN LAS TURBERAS DE ALTA MONTAÑA

Autor/es: María Isabel Farinha (farinha.mai@gmail.com)

Directores del trabajo: Lluís Gómez<sup>1</sup>, Cristina Domingo<sup>2</sup>, Lluís Pesquer<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> IDAEA-<sup>2</sup> GRUMETS CREAF

## RESUMEN

La teledetección mediante índices espectrales derivados de imágenes satelitales representa una vía prometedora para el seguimiento de humedales de alta montaña. Este estudio analiza la aplicabilidad de datos satelitales (Sentinel-2) en turberas alpinas del Pirineo catalán occidental durante el periodo 2015 – 2025, con el objetivo de evaluar la respuesta espectral de la vegetación de estos ecosistemas ante variaciones hidrometeorológicas, con especial atención a los episodios de sequía. Los índices espectrales de vegetación muestran una dinámica estacional, donde el NDVI y NDWI\_v alcanzan sus máximos en verano, por otro lado, estos índices, en conjunto con NDDI permiten identificar la dinámica interanual permitiendo diferenciar años más secos (2016, 2017, 2022) de años más húmedos (2018, 2020). Se identifican correlaciones estacionales entre variables del suelo e índices como NDVI, NDWI\_v y NDDI, destacando su sensibilidad diferencial frente a la humedad y temperatura del suelo. Los resultados evidencian señales útiles de estrés hídrico, aunque moduladas por la cobertura nival y la topografía local. El trabajo subraya limitaciones y fortalezas metodológicas relevantes para futuros estudios, y contribuye al diseño de estrategias de monitorización remota en ecosistemas vulnerables de alta montaña, además de su utilidad para estudiar las turberas a escalas más amplias, especialmente en zonas aún desconocidas o de difícil acceso, así como para el seguimiento de estos ecosistemas en el contexto del cambio climático.

Palabras claves: Turberas, teledetección, sequía, índices espectrales.

## 1. Introducción

### 1.1. Turberas: importancia ecológica y amenazas

Las turberas son formaciones naturales que actúan de transición entre un ecosistema terrestre y uno acuático, son humedales que se caracterizan específicamente por producir y acumular turba y no por tener suelo mineral; la turba es material orgánico que se encuentra en diferentes estados de descomposición anaeróbica (Vega D., et al., 2021) y que es almacenada durante largos periodos de tiempo; de hasta incluso 5000 años (Roa M., et al., 2016), alcanzando así hasta 100 cm de espesor. Las turberas representan aproximadamente la mitad de los humedales del mundo y se estima que cubren el 3% de la superficie terrestre (Ramsar, 2018).

Actualmente, las turberas tienen gran importancia a nivel mundial, y aunque en algunos países es una importancia comercial, se destaca su gran valor ambiental, ya que estos ecosistemas capturan y almacenan carbono. A pesar de su porcentaje reducido de cobertura en la superficie terrestre, las turberas contienen el doble de carbono que toda la biomasa forestal del mundo (Ramsar, 2018), por lo que

desempeñan un papel global fundamental ya que ayudan a mitigar el calentamiento global, no solo al almacenar el carbono sino al regular el ciclo del agua y sustentar gran biodiversidad. Estos ecosistemas actúan como reservorios hídricos, pues al ser una estructura esponjosa pueden liberar de manera paulatina el agua precipitada durante lluvias intensas (Cordero J, 2013).

A pesar del gran interés en la conservación de las turberas, estas no se encuentran exentas de estar amenazadas. En muchos países existe la explotación y comercialización del musgo y la turba, sin tener en consideración la lenta tasa de renovación de este recurso, ocasionando, por ejemplo, una perdida casi total de las turberas en los Países Bajos, del 90 % en Reino Unido, del 82 % en Irlanda y un 77 % en el suroeste asiático (Cordero J, 2013). La demanda de la turba ha aumentado de 768 a 3621 toneladas desde 2009 al 2016, y según su grado de descomposición se usa con diferentes fines: horticultura, tratamiento de aguas residuales y combustible; en cuanto al musgo *Sphagnum, sp.*, es un recurso popular en el embalaje y transporte de frutas y flores, además del uso a nivel decorativo (Monsalve E., et al 2021).

A estas amenazas, se pueden sumar otras: la explotación hidroeléctrica que al modificar los cursos de agua superficiales modifican las condiciones de humedad, el pastoreo de ganado que suele frecuentar zonas húmedas, el turismo que suele transitar senderos que transcurren por arroyos y estanques e incluso el cambio climático que se manifiesta con sequías cada vez más frecuentes (Pérez A., et al., 2019).

Estas sequías prolongadas pueden ocasionar que una turbera pase de actuar de sumidero de carbono a una fuente de este (Roa M., et al., 2016). Además, las turberas de alta montaña son más sensibles a los cambios climáticos que las turberas de altitudes más bajas, debido a la inconsistencia en los patrones del calentamiento global, que por ejemplo han ocasionado una pérdida de aproximadamente el 10% de los humedales en la meseta Qinghai-Tibet, China, en los últimos 40 años (Yin T., et al., 2022). En Cataluña, los períodos de sequía estival facilitan la invasión de árboles, lo que eventualmente se traduce en una reducción de la superficie de la turbera (Colomer J., et al. 2019; Pladevall E., 2022).

Todas estas amenazas, tendrían como consecuencia que la turba quede expuesta al aire y, a través de la descomposición microbiana de la vegetación, se libera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Cordero J., 2013). El problema empeora con el aumento del riesgo de sufrir incendios de turba y, para el caso de turberas costeras, el riesgo de inundación e intrusión salina. De cualquier modo, la alteración de una turbera implica la pérdida de su biodiversidad particular y su capacidad de almacenamiento de carbono, por ello la importancia de conservar estos espacios con la correcta identificación y delimitación (Ramsar, 2018).

En España, las turberas se desarrollan en condiciones ambientales muy variadas, desde litorales hasta alta montaña y todas contienen una importante biodiversidad, con especies altamente especializadas y adaptadas a condiciones particulares, incluso, de carácter pionero. Estos hábitats ocupan extensiones reducidas y en ocasiones puntuales, así que son hábitats frágiles, fragmentados y poco estudiados, y los que han sido estudiados raramente se han observado considerando la complejidad de los factores biofísicos involucrados (Martínez A., et al., 2009).

La mayoría de las turberas del Pirineo tienen superficies reducidas e irregulares, ya que normalmente siguen pequeños cursos de agua y, por tanto, tienen fisiografía muy compleja y abrupta, ocupando así superficies reducidas. Específicamente en el Parque Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (PNAESM), el estado de conservación de los humedales es bueno. Estos se encuentran restringidos a la alta montaña, entre 1000 – 2500 m de elevación, siendo más frecuentes en el piso altitudinal subalpino. (Pérez A., et al., 2019).

Este trabajo monitoriza las turberas a partir de la teledetección, y tiene tres objetivos principales: (a) Caracterizar las turberas seleccionadas (alta montaña en los Pirineos catalanes), a través de diferentes variables estáticas (altitud, pendiente, orientación, superficie) y climáticas (SPEI); (b) Implementar imágenes de Sentinel-2 y sus índices espectrales (NDVI, NDSI, NDWI...) para evaluar el efecto de las sequías en las turberas; y (c) Validar el impacto de la sequía con datos de campo.

En este orden de ideas, se procede a realizar un estudio multitemporal de las variables generadas y su correlación.

## 1.2. Cartografía de turberas

En la actualidad, no existe un estándar uniforme para la definición de turbera, marisma y ciénaga; de manera que la definición de humedal es un poco ambigua, por lo que, según la definición, los límites pueden variar y por tanto su clasificación también varía (Yin T., et al., 2022). Además, los desafíos de la cartografía de turberas son mayores cuando estas se encuentran en alta montaña, ya que sus dimensiones al ser reducidas se suelen combinar con otros tipos de humedales en una misma categoría. Si se emplean imágenes satelitales ópticas para la cartografía, estas tienen dos desventajas: por un lado, la nubosidad persistente típica de las regiones montañosas; por otro, la presencia de vegetación similar a la de las turberas en zonas que no lo son, lo que puede inducir a errores en la clasificación (Hribljan J., et al. 2017).

Aun cuando no se dispone de una cartografía oficial de turberas de alta montaña en la península ibérica, se puede encontrar referencia a muchas de estas en estudios realizados en los Pirineos Catalanes (Pérez A., et al., 2019; Rodríguez J., 2024; Colomer J., et al. 2019; Pladevall E., 2022), en el inventario de las zonas húmedas y fichas descriptivas (Generalitat de Catalunya. s.f.), en el mapa de cubiertas del suelo (CREAF. s.f.) y en sitios webs de diferentes proyectos como LIFE RESQUE ALPYR y LIFE + LIMNOPIRINEUS. Además, en algunos trabajos se han establecido los hábitats más comúnmente relacionados a estas turberas, los cuales suelen distribuirse de forma dispersa y conformar un mosaico complejo de ecosistemas (Pérez A., et al., 2019).

## 1.3. Uso de imágenes satelitales en turberas

Existen diversos antecedentes del uso de la teledetección en el mapeo de turberas. Por ejemplo, en Ecuador se generó un mapa clasificado de cubiertas de suelo en donde las turberas eran una categoría; se evidenció que, al utilizar únicamente imágenes ópticas, se sobreestimaba su área debido a la proximidad con vegetación similar, pero al aplicar un enfoque

multitemporal que combinaba Landsat, TPI, RADARSAT-1 y PALSAR, se logró un aumento de la precisión general (90%), permitiendo incluso distinguir entre diferentes tipos de turberas. (Hribljan J., et al. 2017).

En la meseta tibetana, se generó una cartografía de turberas, basada únicamente en imágenes de Landsat, pero que logró una precisión en la clasificación del 98.9 % (precisión de 90.9 % en la validación de campo) al usar un método de clasificación de árbol de decisión orientado a objetos (Yin T., et al., 2022). En la meseta tibetana, también se realizó un análisis de la evolución espacial-temporal de los humedales entre 1990 y 2020 con el uso de imágenes satelitales ópticas; en donde los índices espectrales NDVI y NDWI, además de otras variables, permitieron establecer un patrón dinámico: el centrode de los humedales se desplazó y cambio de dirección, y la extensión de los humedales disminuyó en un 25.4 % como consecuencia del aumento de las temperaturas y la evapotranspiración (Jiang, R., et al. 2023).

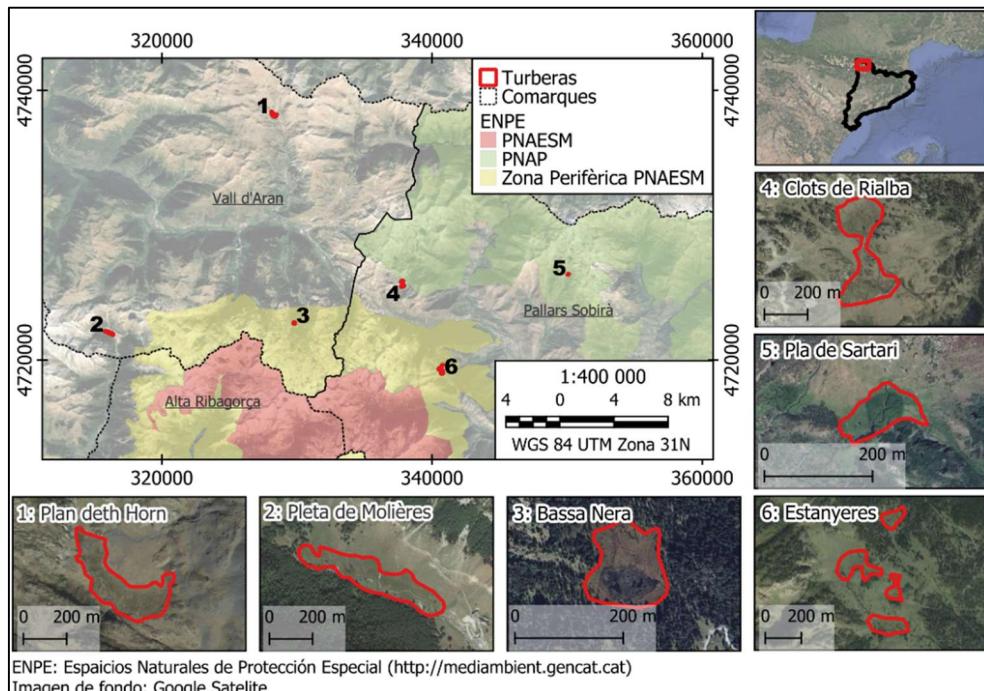
En los Alpes franceses, se utilizaron imágenes satelitales de Sentinel, que junto con la metodología de desmezcla espectral lineal (fotografías aéreas de 50 cm de resolución) permitió cuantificar la variación estacional de la superficie de agua en diversos humedales, encontrándose que las variables más significativas en el riesgo de sequía eran las temperaturas de verano y la duración de la capa de nieve de la cuenca hidrográfica (Carlson D., et al. 2020).

Actualmente, se tiene libre acceso a imágenes satelitales que permiten hacer seguimiento de los ecosistemas montañosos; en concreto, la misión Sentinel-2, es una constelación que actualmente cuenta con 3 satélites en órbita (A, B, C), el 2A fue puesto en órbita en el 2015, el 2B en el 2017 y el 2C en el 2025; esta misión tiene una resolución espacial de 10 m en muchas de sus bandas espectrales, un tiempo se revisita menor a 5 días, y una resolución espectral de 10 bandas (VIS-SWIR).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Ámbito de estudio

Ante la falta de cartografía oficial, se procedió a ubicar aquellas turberas de las que se disponía información geográfica; y con el uso de cartografía de hábitats, además de fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución e imágenes históricas de Google Earth, se digitalizó manualmente un perímetro aproximado en las turberas de estudio, teniendo en cuenta los códigos de interés de CORINE Land Cover (CLC) y su correspondencia con los Hábitats de Interés Comunitario (HIC) y las Unidades Cartográficas de los Hábitats de Cataluña (CHC). Posteriormente, se hizo una preselección de aquellas turberas que disponían de un área mínimo de 0.8 ha, además de abarcar un gradiente variado en elevación, latitud y longitud. En la Figura 1, se muestra un mapa con el ámbito de estudio y detalle de cada turbera.



**Fig. 1.** Ámbito de estudio: El panel principal muestra la localización de las seis turberas analizadas (en rojo) en el sector axial del Pirineo catalán, superpuestas a una imagen satelital y a la delimitación de espacios naturales protegidos (ENPE). En el panel superior derecho se indica la ubicación del área de estudio dentro del territorio catalán. Los recuadros inferiores muestran, la forma y extensión aproximada de cada turbera, cuyos perímetros fueron digitalizados manualmente mediante fotointerpretación.

La zona de estudio se encuentra localizada en los Pirineos centrales, al norte de la península ibérica (Figura 1). Esta zona se caracteriza por tener un clima de alta montaña, en donde los inviernos son largos y rigorosos, e incluso la nieve suele estar presente en gran parte del año; por el contrario, los veranos son cortos y con temperaturas suaves, incluso con noches frías.

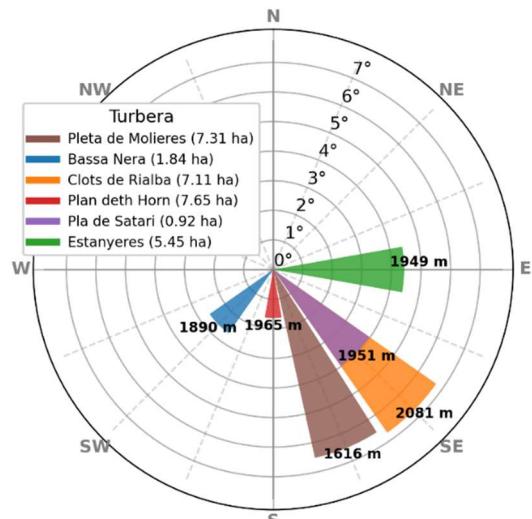
Los factores geográficos y morfológicos tienen un gran impacto en la climatología local, ya que la orientación de los valles ocasiona microclimas diferentes, de manera que si los valles están abiertos al Norte y al Oeste se tendrá una mayor influencia del Océano Atlántico y por tanto se tendrá un clima más húmedo y con precipitaciones más abundantes. Por el contrario, los valles abiertos al Sur y al Este tendrán mayor influencia del Mar Mediterráneo, lo que implica climas más secos en verano y precipitaciones irregulares y menos abundantes (Rodríguez J., 2024).

Las turberas seleccionadas (Fig.1) están ubicadas en las comarcas de Vall d'Aran y Pallars Sobirà; algunas incluso pertenecen a espacios naturales protegidos: Parc Natural de l'Alt Pirineu (PNAP) y la zona periférica de protección del Parque Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (PNAESM). En la Tabla 1, se muestra un resumen de las turberas seleccionadas.

**Tabla 1.** Ubicación y características de las turberas analizadas. Se indica para cada turbera: la región en la que se ubica, sus coordenadas geográficas (latitud y longitud en grados decimales con sistema de referencia geodésico WGS84) y su superficie estimada en hectáreas (ha).

Lugar de Estudio	Región	Latitud (°)	Longitud (°)	Superficie (ha)
Plan deth Horn	Vall d'Aran	42.776	0.902	7.65
Pleta de Molières	Vall d'Aran	42.628	0.760	7.31
Bassa Nera	PNASM	42.639	0.924	1.84
Clots de Rialba	PNAP	42.666	1.021	7.11
Pla de Sartari	PNAP	42.675	1.170	0.92
Estanyeres	PNASM	42.610	1.056	5.45

En la Figura 2, se observa que todas las turberas trabajadas tienen orientaciones que varían desde el E (Estanyeres) hasta el SO (Bassa Nera), y con pendiente que varía entre 1.6 ° (Plan deth Horn) y 6.7 ° (Clots de Rialba). En cuanto al gradiente de elevación, la turbera con menor altitud es Pleta de Molières (1616 m) y la de mayor es Clots de Rialba (2081 m). Además, las turberas con menores dimensiones son Pla de Sartari y Bassa Nera (0.92 ha y 1.84 ha respectivamente), mientras que las de mayor superficie son Clots de Rialba, Pleta de Molières y Plan deth Horn (7.11 ha, 7.31 ha y 7.65 ha respectivamente).



**Fig. 2.** Análisis morfométrico de las turberas. El gráfico muestra la orientación de cada turbera en coordenadas polares, junto con su elevación. El radio expresa el grado de inclinación del terreno, y el área de cada turbera (en hectáreas) se indica en la leyenda.

## 2.2. Fuentes y procesamiento de datos

En cuanto a la metodología seguida para el presente trabajo, con el uso de los softwares QGIS, MiraMon y códigos de Python, se elaboró un diagrama de flujo (Apéndice I), que describe el procedimiento para la preparación, filtrado, procesamiento y análisis de imágenes Sentinel-2 (nivel L2A) correspondientes a la hoja T31TCH, entre 2015 y 2025.

El proceso comienza con la descarga de las imágenes y la preparación de un archivo BAT que automatiza la ejecución de los procesos (se descargaron 1695 imágenes). Luego, se verifica si cada imagen descargada corresponde a la versión más reciente del procesado, ya que el proveedor (Copernicus/ESA) puede publicar múltiples versiones de una misma escena en diferentes fechas a medida que se actualiza el procesamiento. En caso de existir versiones duplicadas, se conserva únicamente la de fecha de procesado más reciente, eliminando las anteriores (reduciendo el conjunto a 1303 imágenes). Posteriormente, las imágenes válidas se importan a MiraMon, donde se evalúa si la escena cubre completamente la zona de estudio; aunque todas las imágenes pertenecen a la hoja T31TCH, en algunas fechas específicas, la cobertura espacial puede ser parcial, de modo que la zona de interés queda fuera del área realmente observada por el satélite. En esos casos, las imágenes son descartadas (quedando 618 imágenes para el análisis). Las escenas que sí cubren adecuadamente el área de estudio se recortan y se utilizan para calcular los índices espectrales.

Ambos procesos alimentan, de forma paralela y sincronizada, la generación de máscaras (explicado más adelante), que a su vez se guardan como conjunto

de datos. Posteriormente, se aplica una máscara específica sobre los índices espectrales, generando índices enmascarados. Paralelamente, se realiza la digitalización manual de los perímetros de las turberas a partir de imágenes de Google Earth, generando polígonos representativos de las zonas de estudio. Estos polígonos son enriquecidos con estadísticas zonales derivadas de los índices espectrales enmascarados por fecha, produciendo una base de datos con información estadística por turbera.

El desglose anual de imágenes y fechas utilizadas se presenta en el Anejo I. Finalmente, se elaboraron: gráficos de series temporales (Apéndice II) y variables derivadas, permitiendo un análisis multitemporal y multiespectral de cada turbera.

### 2.3. Cálculo de índices espectrales

Para cada escena de Sentinel-2 (2015-2025), se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI), el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), el índice de agua de diferencia normalizada para humedad de la vegetación (NDWI\_v) y el índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), con las ecuaciones mostradas en la tabla 2. En donde *green* se corresponde con la banda 3, SWIR es el infrarrojo de onda corta (Banda 11), NIR es la reflectancia en el infrarrojo cercano (Banda 8 y 8A) y el *red* se corresponde con la reflectancia de la banda 4. La resolución de las bandas 8A y 11 es de 20 m, por lo que

**Tabla 2.** Índices utilizados, sus fórmulas de reflectancia, la forma en que fueron enmascarados y las variables derivadas obtenidas a partir de ellos. Los índices se calcularon sobre imágenes Sentinel-2 (L2A) tras un proceso de filtrado y recorte al área de estudio. En el caso del índice NDDI, este se calcula a partir de NDVI y NDWI\_v ya enmascarados.

Índice	Nombre	Ecuación de reflectancia	Ecuación índice enmascarado	Variable derivada
NDSI	índice de nieve de diferencia normalizada	$\frac{(R_{GREEN} - R_{SWIR})}{(R_{GREEN} + R_{SWIR})}$	$NDSI * Mask_{base} * Mask_2$	Snow in Snow off Duración del periodo nivoso Persistencia nival
NDVI	índice de vegetación de diferencia normalizada	$\frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED})}$	$NDVI * Mask_{base} * Mask_1$	Media anual Fecha de máx. valor Máximo valor
NDWI	índice de agua de diferencia normalizada	$\frac{(R_{GREEN} - R_{NIR})}{(R_{GREEN} + R_{NIR})}$	$NDWI * Mask_{base}$	-
NDWI_v	índice de agua de diferencia normalizada para humedad de la vegetación	$\frac{(R_{NIR} - R_{SWIR})}{(R_{NIR} + R_{SWIR})}$	$NDWI\_v * Mask_{base}$	Media anual Desviación estándar anual
NDDI	índice de sequía de diferencia normalizada	$\frac{(NDVI - NDWI_v)}{(NDVI + NDWI_v)}$	-	Media mensual Media anual
SPEI 3 y 12	índice estandarizado de evapotranspiración y precipitación	-	-	Media mensual Media anual Fecha de mín. valor anual Mínimo valor anual

los índices que usan estas bandas (NDSI y NDWI\_v) tienen dicha resolución, mientras que los otros índices tienen resolución de 10 m (NDVI y NDWI).

Según el índice espectral a trabajar, se requiere de la aplicación de una máscara específica; en el Apéndice I se muestra el subprocesso que describe la construcción de cada máscara. El proceso se separa en dos vertientes paralelas: la primera genera máscaras a partir de los índices espectrales NDSI y NDWI calculados para cada imagen, mientras que la segunda se basa en el ráster de clasificación proporcionado por cada imagen Sentinel-2.

En la primera rama, según los índices, el proceso se divide en la generación de dos máscaras: una de nieve ( $NDSI > 0.4$ ) y otra de cuerpos de agua ( $NDWI > 0$ ). Estas máscaras se combinan para formar la máscara A.

Paralelamente, en la segunda rama, según el ráster de clasificación, el proceso se ramifica en tres máscaras mediante procesos independientes: la máscara B, la máscara base y la máscara 2. Cada una de estas máscaras contemplan diferentes categorías clasificadas como, por ejemplo: nubes, pixeles deteriorados, sombras, entre otras. La máscara A y la máscara B se combinan para generar la máscara 1 ( $A \times B$ ).

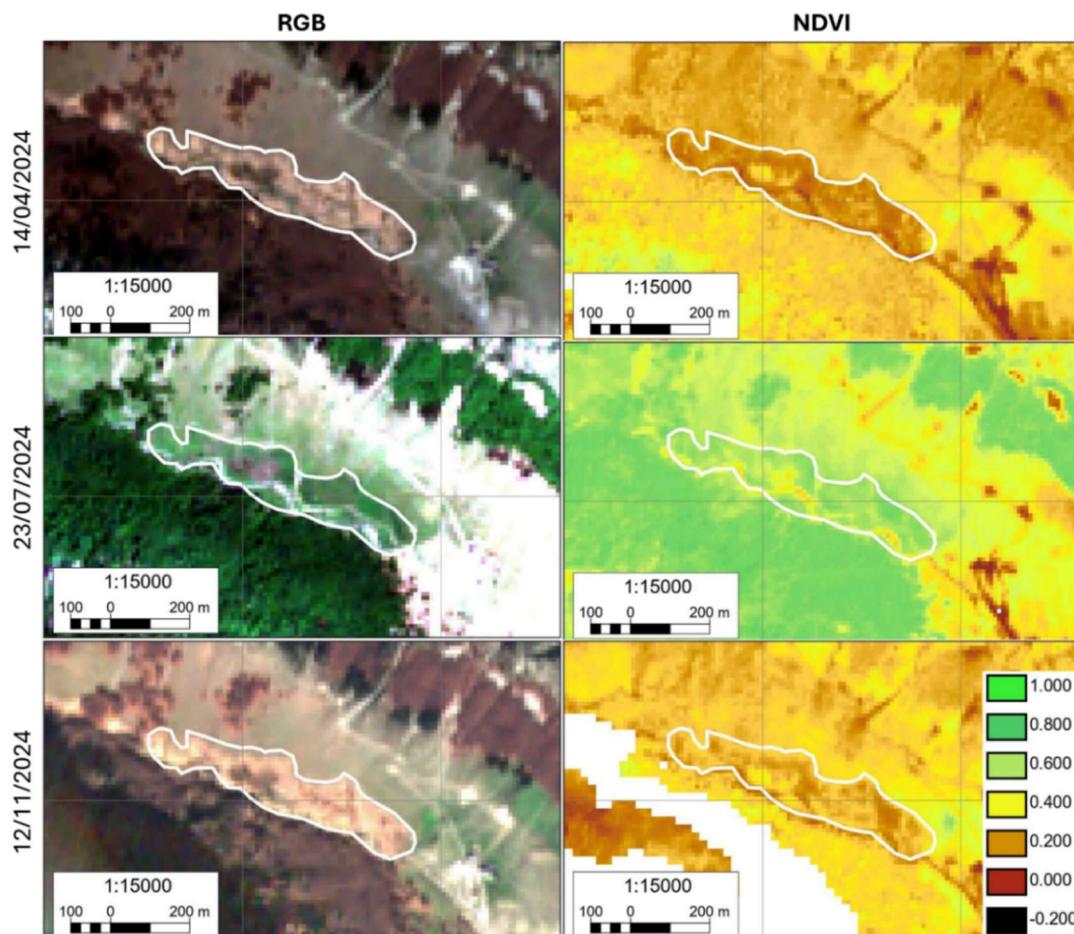
Finalmente, se tienen las máscaras resultantes: máscara 1, máscara base y máscara 2, tal que se usan según lo mostrado en la tabla 2.

La ecuación de NDSI depende de una de las bandas del visible y del SWIR; en este caso, el verde es muy útil para discriminar nieve, ya que esta tiene una reflectividad muy alta en el visible. No obstante, dicha reflectividad depende de su frescura, la cantidad de impurezas, densidad y profundidad de la capa nivosa e incluso del tamaño de grano de la nieve. Por otro lado, el SWIR es absorbido en mayor medida por la nieve (Chuvieco E., 2019). Para el NDSI se utilizó un umbral de 0.4 para evaluar la presencia o ausencia de nieve (Carlson D., et al. 2020). Posteriormente se derivaron las siguientes variables (tabla 2): inicio del periodo de nieve (snow in), final del periodo de nieve (snow off), la duración del periodo nivo (número de días transcurridos entre snow in y snow off) y la persistencia de nieve durante el periodo nivo (es decir, cuán frecuente o estable fue esa cobertura dentro de ese periodo).

La ecuación de NDVI se basa en el hecho de que la clorofila absorbe el rojo, impactando en el pigmento de la hoja, mientras que la estructura celular de la vegetación refleja el NIR; en este sentido, los valores negativos serían indicativo de ausencia de vegetación

mientras que los valores cercanos a 1 indicarían vegetación activa (Pettorelli N., et al., 2005; Chuvieco E., 2019). En la Figura 3 se muestra, a modo de ejemplo, la turbera de Pleta de Molières en tres fechas distintas del año 2024, donde se observa la respuesta del NDVI en relación con la imagen satelital en composición de color natural (RGB). En el Apéndice III se incluye una secuencia temporal más completa de esta turbera, con imágenes satelitales y fotografías tomadas in situ.

En cuanto a las series temporales del NDVI, se procedió a estudiar en detalle los valores atípicos identificados en el año 2024, asociados a días con condiciones nubosas. Aunque algunos estudios (Pettorelli et al., 2005) recomiendan suavizar la serie temporal para reconstruir correctamente el perfil del índice, en este caso no se aplicó ninguna suavización matemática ni se eliminaron dichos valores, ya que se consideró importante conservar la señal original para reflejar las condiciones reales observadas. Por otro lado, se derivaron las siguientes variables para el NDVI (tabla 2): la media anual, la fecha en la que sucede el máximo valor de NDVI y el valor máximo.



**Fig. 3.** Evolución temporal en Pleta de Molières. La Figura muestra la evolución estacional de la turbera de Pleta de Molières en tres fechas representativas del año 2024. En la columna izquierda se presentan composiciones RGB en color real obtenidas con Sentinel-2, mientras que en la columna derecha se muestran los mapas del índice de vegetación NDVI para las mismas fechas. El perímetro de la turbera está delimitado en blanco.

La ecuación de NDWI, usa la banda del verde y del NIR, considerando que el agua absorbe casi en su totalidad las longitudes de onda mayores como el NIR, en este sentido el índice permite asumir que los valores mayores a cero representarían superficies acuáticas (McFeeters S., 2013; Chuvieco E., 2019). En este sentido, se descartó la generación de variables derivadas del NDWI porque prácticamente todos los valores fueron negativos. Y el umbral de cuerpos de agua es  $NDWI > 0$ .

En cuanto a la ecuación de NDWI\_v, ésta considera las bandas del NIR y del SWIR, teniendo en cuenta que el 50 % de los cambios observados en el SWIR se deben al contenido de agua en la vegetación; tal que, a más contenido de agua, más absorción en esta banda. Este índice es muy útil para detectar cambios de humedad en la vegetación y por consiguiente determinar períodos de crecimiento vegetativo (Chen D., et al., 2005; Chuvieco E., 2019). Las variables derivadas de NDWI\_v calculadas son (tabla 2): la media anual, la desviación estándar anual y el índice derivado NDDI.

El índice NDDI es muy útil como indicador sensible de la sequía estival (Gu Y., et al., 2007). Los valores cercanos a 1 indican vegetación estresada por falta de agua y valores cercanos a cero indicaría vegetación en equilibrio. Este índice debe interpretarse como un indicador compuesto de carácter general y no como un valor estrictamente coherente a nivel de píxel ya que fue calculado con NDVI de resolución de 10 m y NDWI\_v de 20 m; como precaución, se han filtrado los valores fuera del rango teórico [-1 a 1], para evitar interpretaciones erróneas. Además, se generó la media del NDDI mensual y anual (tabla 2).

Para cada escena y turbera, se generó una única mediana de los índices espectrales, construyéndose las series temporales 2015 – 2025 (Apéndice II). Durante este proceso se identificaron algunos valores atípicos, los cuales fueron filtrados aplicando un umbral mínimo del 10 % de píxeles válidos por turbera.

#### 2.4. Obtención de índices de sequía

En relación con los índices climáticos, se utilizó el índice estandarizado de evapotranspiración y precipitación (SPEI) (Vicente-Serrano et al. 2017), calculado a partir de las estaciones meteorológicas de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología); los datos fueron obtenidos de <https://monitordesequia.csic.es/>. Este SPEI refleja las anomalías climáticas considerando la precipitación y evapotranspiración de la serie temporal 1961 – 2023, además evidencia diferentes tipos de sequía según su escala temporal; así que fue analizado, desde dos enfoques: (a) Descriptivo con escala de 1 y 24 meses (SPEI1 y SPEI24). Ya que estas serían capaces de reflejar las sequías meteorológicas e hidrológicas para cada turbera; permitiendo así identificar patrones

comunes o por el contrario identificar que turberas eran afectadas en diferente proporción en episodios específicos de sequía. (b) Numérico con intervalo de tiempo de SPEI3 y SPEI12. Sus variables derivadas fueron: la media mensual y anual, la fecha en la que sucede el mínimo valor (sequía) y su valor (tabla 2).

#### 2.5. Obtención de variables auxiliares

Se utilizó los datos del modelo de elevación de Cataluña de 5m de resolución, (BT-5M v2.0) obtenido de <http://www.icc.cat>. Posteriormente se procedió a generar los modelos derivados: pendiente y orientación. En vista de que cada turbera tiene un perímetro particular, se procedió a calcular las estadísticas zonales para cada una de ellas, obteniendo así una única mediana de elevación, mediana de pendiente y moda de orientación. En el caso de Estanyeres, compuesta por cuatro unidades espaciales, se integraron las estadísticas zonales de cada unidad en un único valor mediante la media de las cuatro medianas (para elevación y pendiente), y la media circular en el caso de la orientación; esta última se obtuvo transformando los ángulos a coordenadas cartesianas ( $\cos(\theta)$ ,  $\sin(\theta)$ ), promediando las componentes vectoriales resultantes y convirtiendo el vector promedio nuevamente a grados.

#### 2.6. Análisis estadístico

##### 2.6.1. Análisis de las variables predictoras

Las variables predictoras consideradas fueron los indicadores de sequía y nieve. Se realizó una caracterización inicial de cada turbera en función de los índices SPEI (1 y 24 meses), un análisis estadístico de SPEI3 y SPEI12, y posteriormente se analizó estadísticamente la evolución temporal de las variables relacionadas con la nieve (duración y persistencia del período nivoso), considerando tanto la variabilidad estacional como interanual en el período 2015–2025.

##### 2.6.2. Análisis de las variables respuesta

Las variables respuesta fueron los índices espectrales NDVI, NDWI\_v y NDDI. En primer lugar, se graficaron sus series temporales para describir la dinámica interanual y estacional. Posteriormente, se representaron las variables derivadas de cada índice, lo que permitió detectar patrones anuales que diferenciaban unas turberas de las otras. Y, por último, se elaboró un gráfico por turbera que muestra la respuesta de los índices a lo largo de un ciclo anual, incluyendo una curva suavizada que representa la media de los nueve años analizados.

### 2.6.3. Relaciones entre predictoras y respuesta

Para explorar las relaciones entre condiciones ambientales (nieve y sequía) y los índices espectrales, se elaboraron gráficos de dispersión que combinan variables predictoras y de respuesta (por ejemplo, persistencia nival vs NDWI\_v), incorporando información adicional como año o turbera mediante colores, símbolo o anotaciones. Asimismo, se generaron gráficos de dispersión entre variables respuesta (como NDWI\_v vs. NDVI), diferenciados por turbera e integrando los índices de sequía. En algunos casos, se utilizaron representaciones con doble eje Y, por turbera, para facilitar la visualización simultánea de variables con escalas distintas, por ejemplo: NDDI y SPEI. Finalmente, se aplicaron análisis de correlación (coeficiente de Spearman) para evaluar la intensidad y dirección de la asociación entre variables.

### 2.6.4 Validación de índices con datos de campo

La validación de los índices espectrales se llevó a cabo únicamente en la turbera de Pleta de Molières, por ser la única con datos de campo disponibles, aunque con una serie temporal limitada (09/2023 a 06/2025). Se disponía de mediciones de humedad y temperatura de suelo y nivel piezométrico; además de datos meteorológicos de una estación cercana (temperatura del aire, humedad relativa y luz incidente). Para el análisis, se compararon las series temporales de variables de suelo y meteorológicas mediante gráficos de doble eje Y, y gráficos de dispersión.

Asimismo, se exploraron posibles correlaciones entre las variables de suelo y los índices espectrales, aplicando el coeficiente de Spearman y representaciones graficas. Por ejemplo, se consideró la posibilidad de un modelo lineal significativo entre la temperatura del suelo y el NDVI (ambas variables sincronizadas), ya que temperaturas más altas en el suelo suelen anticipar el inicio de la temporada de crecimiento vegetal (Mortier S., et al, 2023).

## 3. Resultados

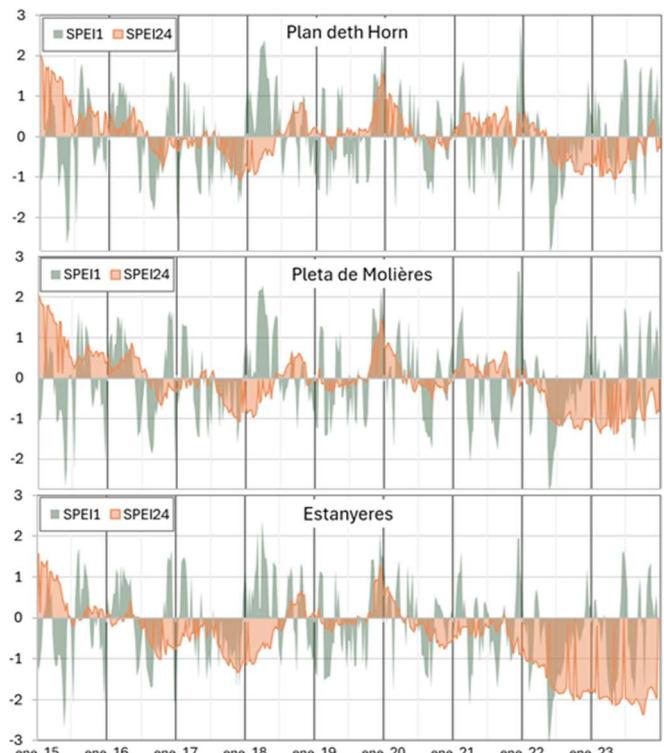
### 3.1. Descripción de la dinámica de las sequías

En la Figura 4 se muestra la comparativa entre tres turberas con diferentes valores de sequía registrados, las demás turberas están en el Apéndice II:

(a) En SPEI1 se observa una alta intercalación de fenómenos puntuales. Se identifican dos eventos de sequía y tres de humedad en el período analizado y que se presentan en todas las turberas. Los períodos de sequía alcanzan valores de hasta -3.1 en las turberas Clots de Rialba, Estanyeres, Bassa Nera y Pla de Sartari, mientras que para Pleta de Molières y Plan deth

Horn alcanza valores de -2.8. En cuanto a los períodos de humedad, los mayores valores se corresponden a Pleta de Molières y Plan deth Horn (2.7 – 2.8) y el resto de las turberas ronda los valores de 2.3 – 2.4.

(b) En SPEI24 todas las turberas presentan dos períodos con valores positivos elevados: a inicios de 2015 y durante la transición 2019 – 2020. En ambos casos, Pleta de Molières y Plan deth Horn mostraron los valores más altos (2.0 en el primer período y 1.5 en el segundo). También se observan dos períodos con valores bajos: durante la transición entre 2017 – 2018, las turberas más afectadas fueron Clots de Rialba, Estanyeres y Bassa Nera (alcanzando valores de -1.3); y en los años 2022 – 2023 con mínimos de -2.4 en Clots de Rialba, Estanyeres, Bassa Nera y Pla de Sartari, mientras que en las otras turberas fue de -1.0 a -1.4.



**Fig. 4.** Dinámica temporal de la sequía. Plan deth Horn, Pleta de Molières y Estanyeres. Se observa que la variabilidad y magnitud de los eventos de sequía difieren entre turberas según la escala temporal considerada.

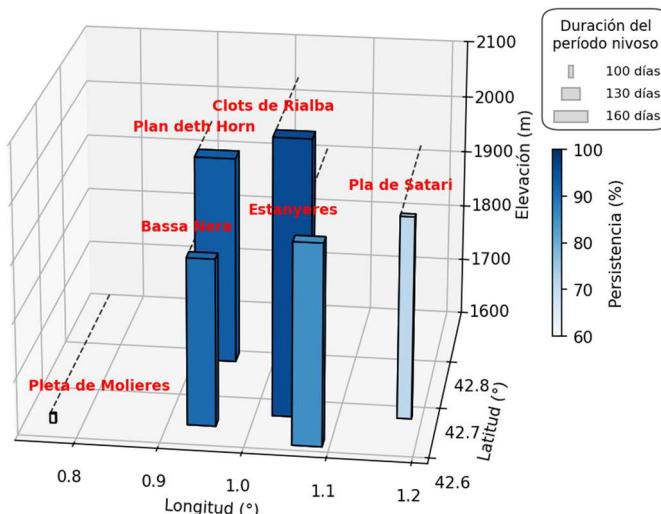
La comparación conjunta de SPEI 1 y SPEI 24 permite evaluar la trayectoria de recuperación o el estrés acumulado en las turberas. Por ejemplo, en 2018, ambos índices se contraponen: SPEI 1 indica condiciones húmedas, mientras que SPEI 24 refleja una sequía prolongada previa. En este caso, la turbera podría estar en proceso de recuperación. En cambio, en 2022, tanto SPEI 1 como SPEI 24 presentan valores negativos (el primero de forma más intensa; el segundo de forma sostenida en el tiempo), lo que sugiere una sequía aguda superpuesta a una prolongada; Esta combinación podría intensificar el deterioro del sistema al encontrarse ya debilitado.

### 3.2. Descripción de la dinámica nival

El NDSI y todas sus variables derivadas se utilizaron para establecer los períodos nevados en los que no tendría sentido calcular otros índices espectrales al estar cubierta la vegetación. Además, estas variables permitieron caracterizar las turberas a lo largo de toda la serie temporal.

Las turberas con un periodo nivoso mayor son Plan deth Horn, Clots de Rialba, Estanyeres y Bassa Nera con aproximadamente una media de 150 días de presencia de nieve, y registrando valores máximos de hasta 200 días de nieve específicamente en Plan deth Horn (temporada 2020 – 2021 y 2021 – 2022). En cuanto a la persistencia nival de toda la serie temporal, ésta es máxima en Clots de Rialba (100 % en 2015 – 2019, 2021 – 2022 y 2023 – 2024) y mínima en Pleta de Molières (29 % en 2019 – 2020); las temporadas invernales, en las que la persistencia fue muy constante y común entre la mayoría de las turberas, fueron: 2015 – 2016 y 2021 – 2022.

En la Figura 5, se muestra la media de las variables derivadas de NDSI a lo largo de toda la serie temporal analizada (2015 – 2025).



**Fig. 5.** Análisis NDSI (2015 – 2025). Representación tridimensional de las turberas según su localización geográfica (latitud y longitud), elevación (eje vertical), persistencia nival media (color de las barras) y duración del periodo nival medio (ancho de barra). Los valores corresponden al periodo 2015–2025.

La serie temporal de NDSI permite visualizar la evolución de los períodos nivosos a lo largo del tiempo, evidenciando variaciones marcadas entre turberas y entre temporadas (Apéndice IV (pág. 1)). Por ejemplo, Pla de Sartari presentó un periodo nivoso muy corto (30 días) durante el invierno 2023 – 2024, en contraste con los 155 días registrados en 2020 – 2021. Por su parte, Pleta de Molières tuvo una duración reducida (35 días) en 2020 – 2021, mientras que en la temporada 2017 – 2018 alcanzó los 145 días.

### 3.3. Dinámica interanual y estacional de los índices de vegetación y humedad

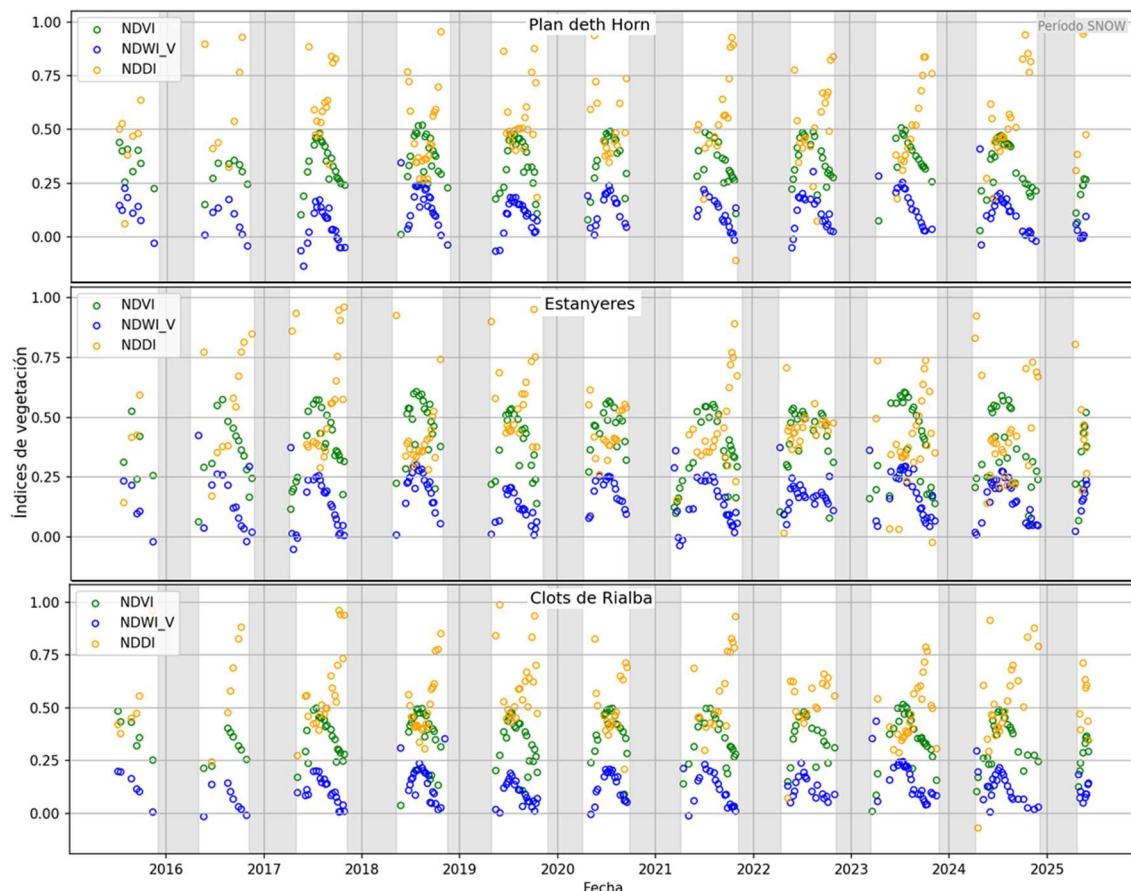
La serie temporal de NDVI presenta un patrón estacional, con un NDVI mayor en los meses de verano (Figura 6). Las turberas con mayor valor medio a lo largo de toda la serie temporal son: Pla de Sartari (0.42), Estanyeres (0.39) y Pleta de Molières (0.37). Además, estas tres turberas registraron sus máximos de NDVI (0.53 – 0.62) en fechas tempranas (junio- julio). Por otro lado, las turberas Bassa Nera, Clots de Rialba y Plan deth Horn registraron valores medios (0.31, 0.35 y 0.37) y valores máximos de NDVI más bajos que el resto de turberas, sin superar los 0.52 y siendo más tardíos (julio-agosto) (Apéndice IV (pág. 2)).

Al analizar la serie temporal generada en todas las turberas con el índice NDWI se observó que solo un par de datos era mayor a cero (Apéndice II), por lo que se descartó generar variables derivadas.

Las series temporales de NDWI\_v también mostraron una marcada dinámica estacional en todas las turberas (Figura 6). No obstante, Pla de Sartari (0.16), Estanyeres (0.16) y Pleta de Molières (0.15) mostraron un mayor contenido de humedad en su vegetación comparado con el resto de turberas a lo largo de toda la serie temporal. Estas mismas turberas también presentan los mayores valores de desviación estándar anual. Pero al analizar la evolución temporal de esta última variable, destacan comportamientos diferentes; por ejemplo, Pleta de Molières es la turbera que, aunque tiene mayores diferencias estacionales ( $\sigma = 0.11$ ), es constante en el tiempo, indicativo de que todos los años tiene una variabilidad muy similar. Por el contrario, Estanyeres tiene grandes oscilaciones de desviación estándar ( $\sigma$  entre 0.06 y 0.13), en comparación con las otras turberas. En cuanto a las turberas con mayor estabilidad interanual serían Bassa Nera y Plan deth Horn (Apéndice IV (pág. 3)).

En relación con NDDI, y su variable derivada (media anual) se tienen valores  $> 0.6$ , indicativos de vegetación estresada por falta de agua ( $\approx 0$  es vegetación en equilibrio), en los años 2016, 2017 y 2019, siendo Clots de Rialba la turbera común en estos episodios, mientras que las otras también son afectadas, pero en menor medida. En los años 2015, 2021 y 2022 se reportan NDDI próximos a 0.5 y las turberas más afectadas suelen ser Clots de Rialba, Pla de Sartari y Plan deth Horn, aunque en proporciones diferentes cada año (Apéndice IV (pág. 4)).

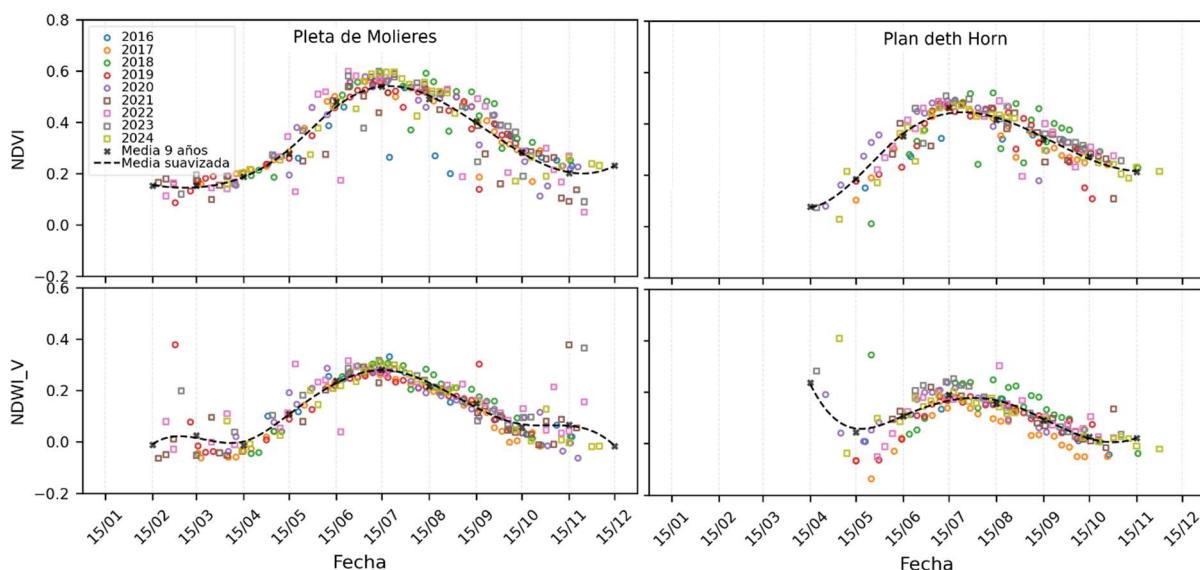
En la Figura 6, se observa los tres índices de vegetación utilizados a lo largo de la serie temporal 2015 – 2025, mostrando como ejemplo las turberas Plan deth Horn, Estanyeres y Clots de Rialba; el resto de las turberas están disponibles en el Apéndice II. Esta Figura permite visualizar la dinámica interanual de los índices, permitiendo identificar variaciones entre años.



**Fig. 6.** Serie temporal interanual de los índices de vegetación para las turberas Plan deth Horn, Estanyeres y Clots de Rialba durante el período 2015–2025. Los puntos representan los valores observados para cada fecha.

En la Figura 7 se muestra la dinámica estacional de los índices NDVI y NDWI\_v para las turberas Pleta de Molieres y Plan deth Horn, junto con su media multianual (2016–2024), los datos muestran alta

dispersión interanual, y en este caso, la línea de media no separa los años de sequía de los húmedos como lo hace cuando se estudian pastizales (Gu Y., et al., 2007).



**Fig. 7.** Serie temporal estacional de los índices NDVI y NDWI\_v para las turberas Pleta de Molieres (izquierda) y Plan deth Horn (derecha), durante 2016 – 2024. Los puntos corresponden a los valores disponibles por año, mientras que las líneas negras representan la media diaria para los nueve años en su versión suavizada. Las otras turberas están disponibles en el Apéndice IV (pág. 7), en la pág. 8 de este mismo apéndice se presenta NDDI con su curva suavizada de 9 años.

En la Figura 8, se presenta la correlación entre los índices NDWI\_v vs NDVI, utilizando tres turberas a modo de ejemplo; las restantes se encuentran disponibles en el Apéndice IV (pág. 16). Esta Figura revela patrones relevantes: al calcular una mediana anual, se observa que los años 2018 (verde) y 2020 (lila) tienden a ubicarse sistemáticamente en el extremo derecho del gráfico para todas las turberas, lo que

indica una mayor humedad (NDWI\_v) y mayor actividad vegetal (NDVI). Este comportamiento coincide con los valores positivos de SPEI3 y SPEI12 reportados en la misma Figura. Por otro lado, la dispersión de los puntos anuales en cada gráfico varía según la turbera: Pleta de Molieres y Estanyeres muestran una mayor dispersión en sus puntos anuales, indicando mayor variabilidad en las condiciones ambientales entre años.

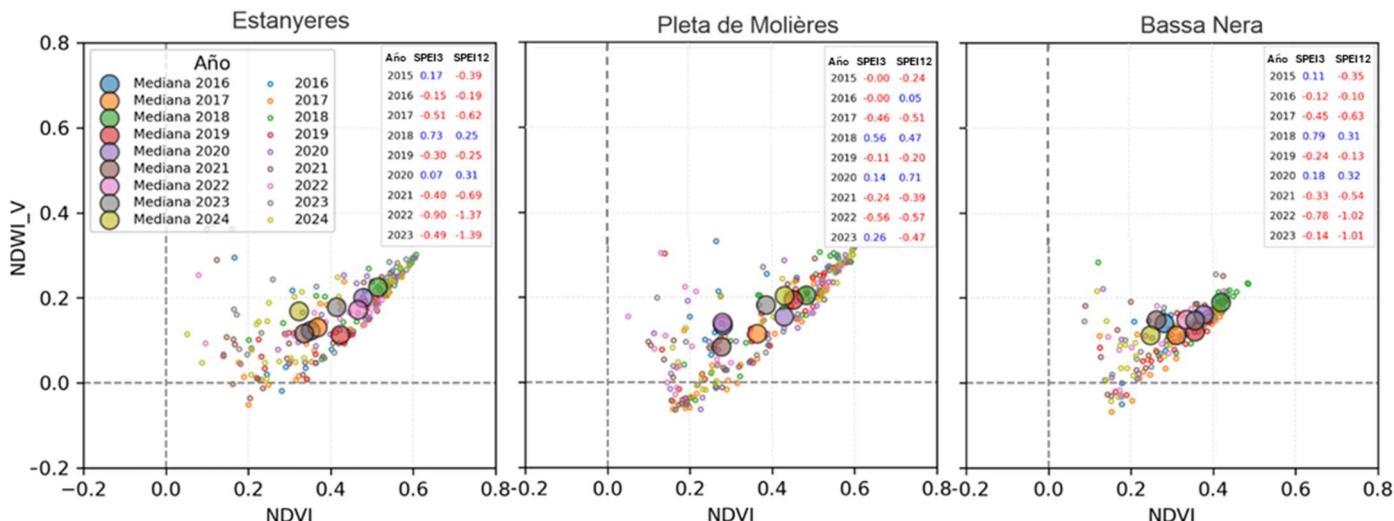


Fig. 8. Relación entre NDVI y NDWI\_v para cada año (2016 – 2024) en las turberas de Estanyeres, Pleta de Molieres y Bassa Nera. Cada punto representa los valores disponibles por año, y los círculos grandes indican la mediana anual. La tabla insertada muestra los valores anuales del índice SPEI a 3 y 12 meses para cada turbera (Rojo: valores negativos (sequías); azul: valores positivos).

### 3.4. Sequías y su impacto en la vegetación

Los índices de sequía (3 y 12 meses), tienen valores puntuales de sequía extrema; por ejemplo, para el 2022, todas las turberas presentaron valores de SPEI3 entre -2.51 y -2.71 el 16 - 23 de julio, y de SPEI12 entre -1.55 y -2.23 entre diciembre 2022 y enero 2023. Por otro lado, los gráficos de media anual indicaron que los años de peor sequía fueron para SPEI3: 2017 (-0.51 Estanyeres) y 2022 (-0.90 Estanyeres); y para SPEI12: 2022 (-1.34 Estanyeres) y 2023 (-1.39 Estanyeres). (Apéndice IV (pág. 5 y 6)).

Tal como se mostró previamente en la Figura 8, los años 2018 y 2020, con valores más altos de NDVI y NDWI\_v, son los años con SPEI3 y SPEI12 más altos. Por el contrario, 2016 y 2017, con índices espectrales más bajos, se corresponden con valores negativos de SPEI3 y SPEI12.

Al correlacionar las variables NDDI y SPEI, se observa una tendencia general en la que valores negativos de SPEI se asocian con valores altos de NDDI, aunque con una notable dispersión de los datos. Al comparar, por ejemplo, Plan deth Horn con Pleta de Molieres (Figura 9) se aprecia que, tanto para las escalas de 3 como de 12 meses, los años más extremos fueron 2017 (verde), 2018 (rojo) y 2020 (rosa): el año 2017 se caracterizó por

mínimos en SPEI y máximos en NDDI, mientras que 2018 y 2020 presentaron SPEI más altos y NDDI más bajos. En particular, 2020 mostró valores elevados de SPEI12, pero no así en SPEI3, lo que pone de manifiesto las diferencias que pueden existir entre escalas temporales al evaluar sequías.

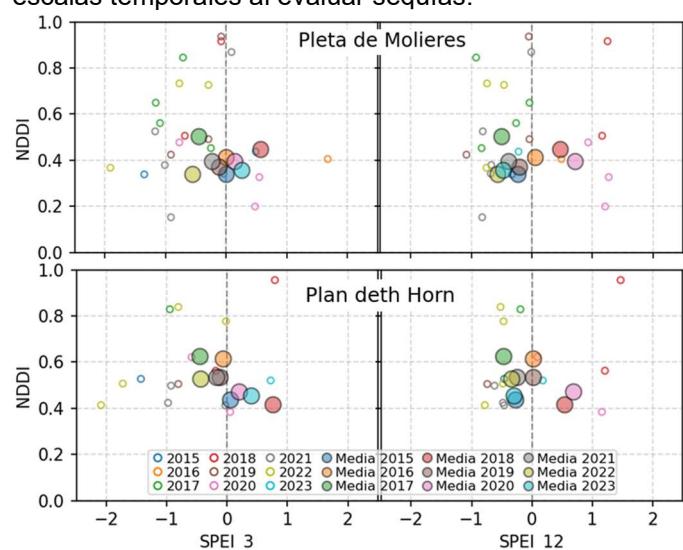


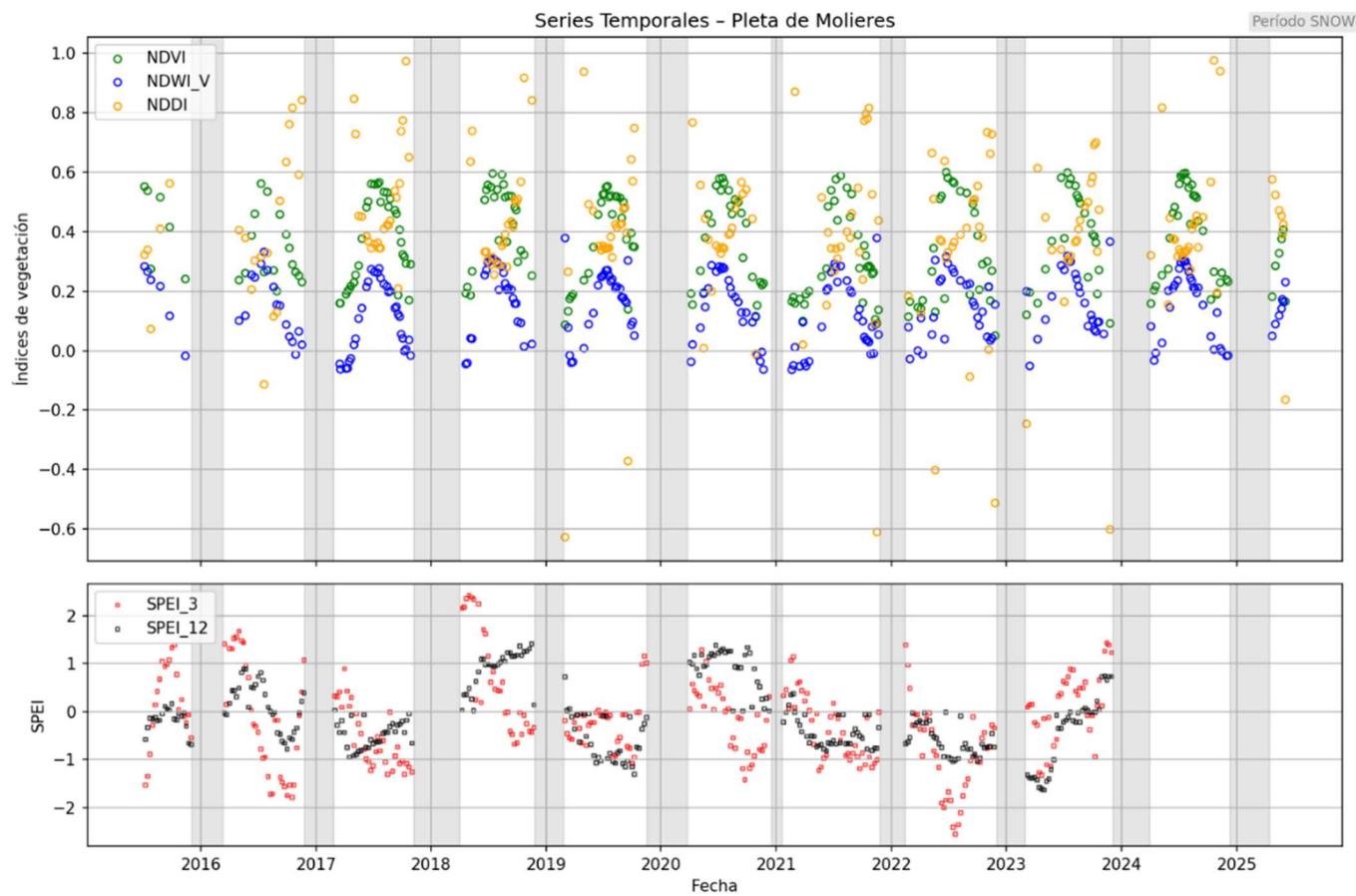
Fig. 9. Relación entre NDDI y SPEI para cada año (2015 – 2023) en las turberas Pleta de Molieres (arriba) y Plan deth Horn (abajo). Cada punto representa los valores disponibles por año, y los círculos grandes indican la mediana anual (Las otras turberas en el Apéndice IV (pág. 23-24)).

Al analizar la evolución temporal de esta correlación para cada turbera, destaca una sincronía temporal (más fácil de interpretar a escala anual), ya que los picos de humedad de SPEI a menudo coinciden con mínimos valores de NDDI (Apéndice IV (pág. 14)); por ejemplo, todas las turberas coinciden en comportamiento similar en el 2018 donde la vegetación muestra equilibrio hídrico para valores de SPEI3 húmedos; por el contrario, en los años 2017, 2019, y 2022 se tiene que todas las turberas coinciden en vegetación estresada e índices negativos de SPEI3. Esta sincronía temporal también se intuye en SPEI12, pero sin ser tan clara.

En la Figura 10, se muestra la serie temporal de los índices espectrales y de sequía para Pleta de Molieres (las otras turberas se presentan en Apéndice II (pág. 5-7)); se observa una fuerte estacionalidad en los índices espectrales, así como variaciones interanuales asociadas a los eventos hidrológicos registrados por el SPEI; por ejemplo, en el 2018, los valores de NDDI

indican equilibrio hídrico (amarillo,  $\approx 0$ ) en respuesta al aumento de humedad reportado por SPEI3 (rojo,  $> 2$ ). Por otro lado, se observa altos valores de NDDI en respuesta a la sequía de 2016.

Pasando a la correlación realizada con Spearman, se encontró patrones diferenciados por turbera, tal que Plan deth Horn (-0.78), Bassa Nera (-0.28) y Clots de Rialba (-0.23) presentan correlaciones negativas con SPEI3, lo que indica una mayor sensibilidad del NDDI a sequías recientes. En contraste, otras turberas como Estanyeres (0.67), Pleta de Molieres (0.32) y Pla de Sartari (0.17) muestran correlaciones positivas con SPEI12. Estos resultados sugieren que, aunque el NDDI es sensible a condiciones de sequías, su interpretación debe considerar las particularidades ecohidrológicas de cada turbera.



**Fig. 10.** Serie temporal de índices espectrales y SPEI en la turbera de Pleta de Molieres (2015–2024). El panel superior muestra la evolución de los índices espectrales NDVI, NDWI\_V y NDDI, que reflejan la actividad y el estado hídrico de la vegetación. El panel inferior presenta el comportamiento del SPEI a 3 meses (SPEI3) y 12 meses (SPEI12), indicando condiciones de sequía de corto y largo plazo, respectivamente. Las franjas grises representan los períodos de cobertura nival.

### 3.5. Nieve y su respuesta en la vegetación

Se realizó una correlación entre las variables derivadas del NDSI y los índices NDVI, NDWI\_v y NDDI (Apéndice IV (pág. 10-13 y 17-19)). El tamaño muestral fue de 9 observaciones por turbera (9 años). Según la evolución temporal en cada turbera, los resultados indican que:

(a) NDVI: en algunas turberas, como Bassa Nera, se observó que aumentos en la duración o persistencia nival se asociaron con valores medios y máximos más altos de NDVI. Por otro lado, en esta misma turbera se observa un patrón cíclico tal que cuando la persistencia y/o duración nival disminuye, los máximos de NDVI ocurren en fechas más tempranas. La correlación de Spearman indica que la correlación es más fuerte con la duración del periodo nivo especialmente en Pleta de Molières, Plan deth Horn y Estanyeres (0.51, 0.41 y 0.34 respectivamente). Con la persistencia nival se tiene correlaciones mixtas, donde Bassa Nera es positiva (0.39) pero Pla de Sartari negativa (-0.46).

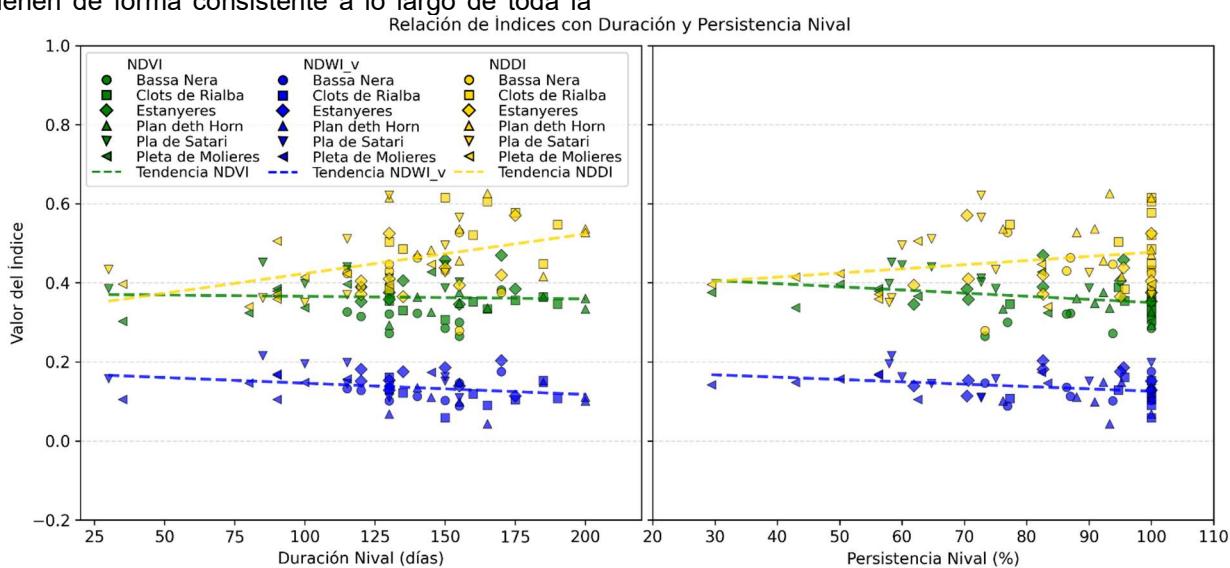
(b) NDWI\_v: en Bassa Nera, Plan deth Horn, Pleta de Molières y Estanyeres, se detectaron aumentos de NDWI\_v asociados a mayores valores de duración y persistencia nival; de igual forma se mantiene la relación con las disminuciones de estas variables. La correlación de Spearman sugiere que la relación entre estas variables no siempre es positiva, ni tan directa, como los casos de: Pla de Sartari y Clots de Rialba respecto a la duración de la nieve (-0.54 y -0.35) y respecto a la persistencia (-0.38 y -0.21).

(c) NDDI: en algunas turberas y períodos específicos se observó una relación inversa entre la duración o persistencia nival y los valores de NDDI; un ejemplo notable es Bassa Nera durante el periodo 2016 – 2020. Sin embargo, estos patrones no se mantienen de forma consistente a lo largo de toda la

serie temporal, presentando incluso relaciones opuestas en algunos años, lo que impide establecer una tendencia clara. Los coeficientes de correlación de Spearman refuerzan esta falta de consistencia: en turberas como Pla de Sartari, Clots de Rialba y Estanyeres, el NDDI no refleja un equilibrio hídrico claro, aun cuando se registran altas duraciones o persistencias de nieve (valores de 0.59, 0.44 y 0.37 para la duración; y 0.21, 0.38 y 0.17 para la persistencia, respectivamente).

En general, se observó una alta variabilidad en las correlaciones. Al evaluar cada turbera por separado, Bassa Nera registró un aumento NDVI y NDWI\_v asociado a una mayor duración de la nieve, además de una disminución en NDDI. En contraste, Plan de Sartari mostró un patrón diferente, sin una tendencia clara. (Apéndice IV pág. (20-22)).

En la Figura 11 se representa la tendencia de los índices de vegetación en función de las variables de nieve para todas las turberas de estudio. Se identifican algunas relaciones significativas: la duración de la nieve explica un 18 % de la varianza del NDDI ( $R^2 = 0.180$ ,  $p = 0.001$ ); asimismo, se observan relaciones débiles, pero estadísticamente significativas entre la persistencia nival y el NDVI ( $R^2 = 0.091$ ,  $p = 0.026$ ), entre la persistencia y el NDWI\_v ( $R^2 = 0.085$ ,  $p = 0.033$ ), y entre la duración nival y el NDWI\_v ( $R^2 = 0.077$ ,  $p = 0.042$ ). Las demás combinaciones resultaron no significativas. Estos resultados indican que la relación entre nieve y vegetación presenta alta variabilidad y no sigue necesariamente un patrón lineal o uniforme, sino que puede estar influenciada por otros factores, como la topografía local de las turberas (orientación...), su altitud relativa al Mar u otros fenómenos climáticos locales.



**Fig. 11.** Índices de vegetación respecto a las variables duración del periodo y persistencia nival. Se representa la relación entre tres índices espectrales (NDVI, NDWI\_V y NDDI) y dos variables nivales: duración (izquierda) y persistencia (derecha) del periodo nivo. Cada punto corresponde a una media anual por turbera, diferenciadas por forma y color. Las líneas segmentadas muestran las tendencias lineales por índice, permitiendo observar patrones generales en función de las condiciones nivales.

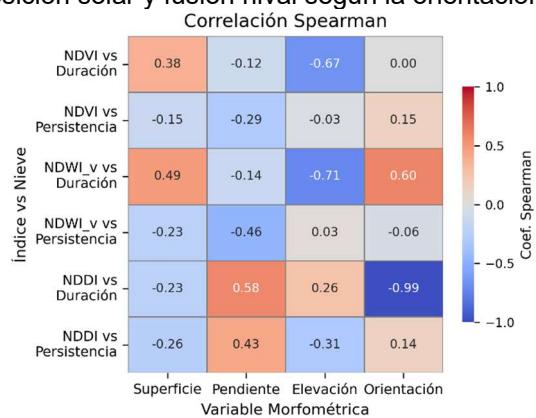
Dado el interés en explorar posibles vínculos entre las características físicas de las turberas y la sensibilidad de la vegetación al régimen nival, se analizaron los coeficientes de Spearman (Figura 12), relacionando variables morfométricas con las pendientes de las regresiones lineales entre duración/persistencia nival e índices espectrales. Los resultados más destacados fueron:

(a) La superficie se correlaciona positivamente con los índices NDVI y NDWI\_v según la duración (0.38 y 0.49) y, negativamente con el NDDI según la persistencia (-0.26). Estos patrones podrían reflejar una tendencia general de mayor respuesta de la vegetación en turberas de mayor tamaño durante períodos nivosos prolongados.

(b) La pendiente se correlaciona negativamente con NDVI y NDWI\_v (-0.29 y -0.46) y positivamente con el NDDI (0.58 y 0.43) para la duración y persistencia. Este patrón podría indicar que en turberas más inclinadas la acumulación o permanencia de nieve no se traduce necesariamente en un aumento del verdor o la humedad, e incluso podría asociarse con mayor estrés hídrico.

(c) La elevación mostró una correlación negativa destacada con NDVI y NDWI\_v y la duración nival (-0.67 y -0.71 respectivamente) y positiva para NDDI (0.26). Este patrón sugiere que, en áreas de mayor elevación, la vegetación responde menos a la persistencia nival.

(d) Debido a que el intervalo de orientaciones no atraviesa el punto de discontinuidad angular ( $0^\circ/360^\circ$ ), se aplica un tratamiento lineal aproximado de la variable. Dentro de este rango ( $88^\circ - 225^\circ$ ), se identificó una correlación positiva (0.60) entre la orientación y la duración nival en relación con el NDWI\_v, y una correlación negativa muy fuerte (-0.99) entre la orientación y el NDDI asociado a la duración. Estos patrones podrían estar asociados a diferencias en la exposición solar y fusión nival según la orientación.

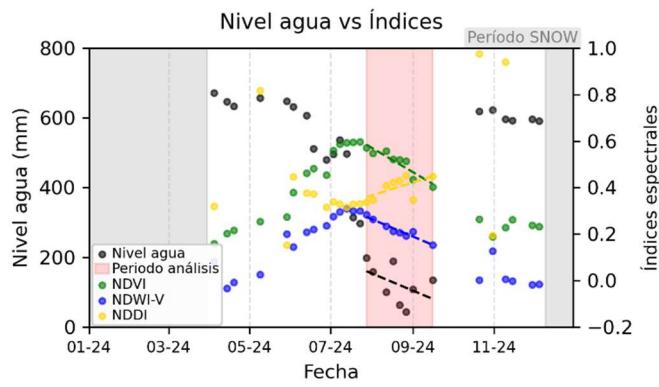


**Fig. 12.** Matriz de correlación de Spearman entre los valores de los índices frente a la duración del período y persistencia nival, y su relación con variables morfométricas. Los valores indican el coeficiente de correlación, y el gradiente de color refleja su intensidad y signo (rojo positivo y azul negativo).

### 3.6. Validación con datos de campo

En el análisis de las variables meteorológicas en relación con las variables del suelo, se observó que la humedad atmosférica presenta una gran dispersión a lo largo de la serie temporal, sin un patrón claro respecto al contenido hídrico del suelo o al nivel freático. No obstante, a nivel estacional, sí se aprecia una disminución común de estas variables durante el verano. Por otro lado, la temperatura del suelo presenta una tendencia concordante con la radiación solar y presenta además una relación positiva consistente con la temperatura del aire (Apéndice V (pág. 1)).

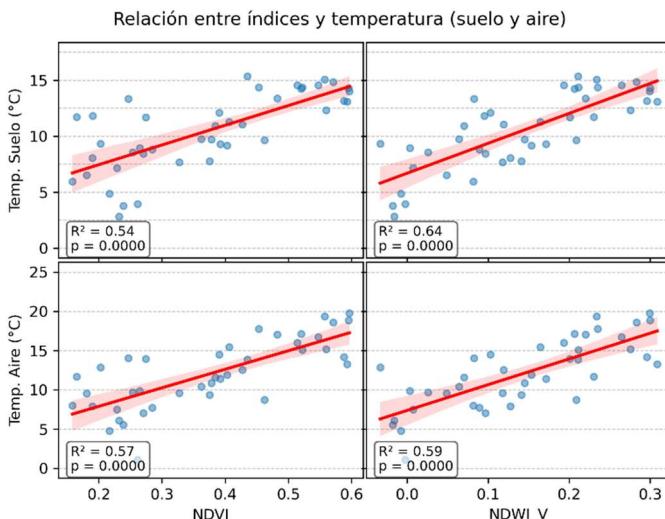
En cuanto al análisis de las variables del suelo en relación con los índices espectrales de vegetación, únicamente fue posible establecer correlaciones y patrones de comportamiento para un ciclo anual (el correspondiente al año 2024), presentado en la Figura 13. En este análisis, se observa que los índices NDVI y NDWI\_v tienen sus máximos en verano, lo que coincide con la disminución progresiva de la humedad del suelo y del nivel freático; básicamente se observa una respuesta por parte de los índices espectrales a la disminución de agua/humedad en el suelo. Entre el 28/07/2024 y el 16/09/2024, se registraron correlaciones de Spearman positivas entre la humedad del suelo y el nivel freático respecto a NDVI y NDWI\_v. La correlación más alta fue de 0.62 entre nivel freático y NDWI\_v. Al considerar todo el ciclo de 2024, las correlaciones entre estas variables fueron negativas.



**Fig. 13.** Relación entre el nivel freático y los índices espectrales de vegetación (2024). Evolución del nivel freático (línea negra; eje izquierdo) y los índices NDVI, NDWI\_V y NDDI (verde, azul y amarillo; eje derecho). Las franjas grisas indican el período nival, y la rosada el intervalo de análisis detallado. Se observa que el descenso del nivel freático coincide con la disminución de NDWI\_V y NDVI, y el aumento del NDDI, sugiriendo una pérdida de humedad en el sistema.

Al analizar la variable de temperatura de suelo con todos los datos disponibles (09/2023 a 06/2025), se observa que la temperatura del suelo presentó una evolución temporal similar a los índices NDVI y NDWI\_v (Apéndice V (pág. 2)), de forma que a inicios de mayo estas tres variables son mínimas y van aumentando progresivamente, se observa que luego del valor

máximo de NDVI, la temperatura sigue aumentando durante algunos días, y posteriormente las tres variables van disminuyendo hasta alcanzar mínimos en diciembre. En los gráficos de dispersión (Figura 14) se observa una asociación fuerte entre NDWI\_v y la temperatura del suelo, con un  $R^2$  de 0.64 y  $p = 0.0000$ , lo que indica que el modelo lineal explica el 64 % de la varianza en los datos; para el NDVI con la temperatura del suelo, se tiene una relación fuerte y significativa ( $R^2 = 0.54$ ,  $p = 0.0000$ ). Las correlaciones de Spearman son positivas, alcanzando un valor de 0.76 con NDVI y de 0.78 con NDWI\_v.



**Fig. 14.** Relación entre los índices NDVI y NDWI\_V con la temperatura (2024). Regresiones lineales entre los índices de NDVI y NDWI\_v con las temperaturas del suelo (arriba) y del aire (abajo). Cada punto representa una observación individual. Las líneas rojas corresponden al ajuste lineal con su banda de confianza (intervalo del 95 %). Se observa una correlación positiva en todos los casos, especialmente entre NDVI y temperatura del aire.

#### 4. Discusión

El NDWI confirmó que las turberas, aunque se consideran ambientes saturados, no se pueden considerar cuerpos de agua, ya que el umbral para distinguir cuerpos de agua con este índice es  $> 0$  y prácticamente todos los valores de las seis turberas, durante 2015 – 2025, fueron negativos; a excepción de un par de valores, pero que parecieran ser aleatorios en cuanto a fecha y turbera, y con valor prácticamente nulos.

La alta variación de desviación estándar de NDWI\_v en algunas turberas pueden responder parcialmente a la variación del SPEI3; por ejemplo, en Estanyeres los valores extremos de humedad (1.5) en 2016, de sequía (-1.5) en 2019 y (-2.1) en 2023, coinciden con variaciones extremas en la desviación estándar de este índice. Una relación similar se aprecia en Clots de Rialba, donde el valor de SPEI más alto (2.5) en 2018 coincide con una mayor dispersión en los valores del

NDWI\_v. Esto sugiere que los eventos hidrológicos intensos, tanto húmedos como secos, podrían incrementar la heterogeneidad espectral de la vegetación registrada.

En relación con la hipótesis que plantea que una mayor duración del periodo nivoso y/o persistencia nival se asociaaría con un incremento en la humedad de la vegetación, reflejado en valores altos de NDVI y NDWI\_v, y bajos de NDDI, los resultados obtenidos no la respaldan del todo. Las pendientes de las regresiones lineales y sus respectivos  $R^2$  indican relaciones débiles o moderadas, según el número de muestras trabajados (9 años). Las regresiones lineales mostraron cierto grado de varianza explicada. En el caso de la duración nival, se explicó un 18 % de la variabilidad del NDDI, un 7.7 % del NDWI\_v y apenas un 1 % del NDVI. En cuanto a la persistencia, se obtuvo un 9.1 % de varianza explicada en NDVI, 8.5 % en NDWI\_v y 5.1 % en NDDI. Sin embargo, las pendientes observadas en varios casos indicaron relaciones inversas a las esperadas. Es decir, en lugar de observar una reducción del estrés hídrico con mayor cobertura nival, algunos resultados muestran lo contrario: una mayor duración o persistencia de la nieve se asoció con valores más altos de NDDI, lo que contradice la hipótesis inicial.

Esta aparente contradicción sugiere que la influencia de la nieve sobre la vegetación no es necesariamente lineal ni directa, sino que está controlada por otros factores. Por ejemplo, el agua del deshielo puede perderse por escorrentía superficial o drenarse rápidamente en zonas con pendientes pronunciadas, sin llegar a ser aprovechada por la vegetación. Asimismo, elementos como la morfología de las turberas (superficie, orientación), su ubicación respecto a los climas mediterráneo y atlántico, o fenómenos climáticos locales, pueden influir en la respuesta espectral observada.

La pendiente es la variable morfológica que mayor influencia tiene en la modulación de la respuesta de los índices espectrales frente a la duración y persistencia nival. En general, una mayor pendiente se asocia con un incremento del estrés hídrico (mayores valores de NDDI), así como con un menor verdor (NDVI) y menor retención de humedad (NDWI\_v).

Por otro lado, la altitud también actúa como un factor limitante en la respuesta funcional de las turberas. A mayores elevaciones, se observa una menor capacidad de respuesta positiva a la duración de la nieve, es decir, un incremento reducido en NDVI y NDWI\_v, e incluso un aumento del estrés hídrico en algunos casos. Esto sugiere que, en altitudes elevadas, la acumulación de nieve no siempre se traduce en beneficios ecohidrológicos para la vegetación.

Por el contrario, en las turberas de mayor superficie, los resultados indican una disminución más clara del estrés hídrico tras periodos con mayor cobertura nival. En estos casos, tanto el verdor (NDVI) como la humedad relativa (NDWI\_v) tienden a incrementarse más claramente con largos inviernos. Este patrón parece estar más asociado a la duración nival que a la persistencia, la cual parece tener un efecto más difuso o incluso diferente en turberas extensas.

Respecto a la orientación (entre 88 ° y 225 °), se observó que aquellas que están orientadas hacia el sur o suroeste, y que por tanto reciben más radiación solar durante buena parte del año, tienden a mostrar respuestas más marcadas en los índices espectrales cuando la duración del periodo de nieve es mayor. Esta orientación podría favorecer un mayor equilibrio hídrico tras largos inviernos, posiblemente debido a patrones diferenciados de fusión del manto nival. En este sentido, NDWI\_v tiende a aumentar más en turberas orientadas al sur con mayor duración de nieve (Spearman = 0.60), mientras que el NDDI disminuye drásticamente (Spearman = -0.99). Sin embargo, en el caso de la persistencia nival, este patrón no se mantiene de la misma manera, una mayor persistencia de nieve no necesariamente implica una mejora en el estado hídrico o el verdor de la vegetación en las turberas orientadas hacia el sur o suroeste. Esto sugiere que, más allá de cuánto tiempo persiste la nieve sin interrupciones, podría ser más relevante la duración del periodo nival y su interacción con otras variables locales.

Al analizar la curva de NDVI y NDWI\_v y su media de 9 años, se observa que la línea de media no permite distinguir claramente entre años húmedos y años de sequía, a diferencia de lo que ocurre en otros ecosistemas como los pastizales. Este comportamiento puede explicarse por la propia naturaleza ecohidrológica de las turberas: al actuar como esponjas, estos ecosistemas tienen una alta capacidad de retención de agua, lo que les permite amortiguar los efectos de las sequías. Como resultado, su respuestapectral tiende a ser más estable a lo largo del tiempo, haciendo menos evidentes las diferencias entre años secos y húmedos

Los valores medianos de NDWI\_v frente a NDVI indican que 2018 fue un año más húmedo que el resto, lo cual concuerda con los valores positivos registrados en los índices SPEI3 y SPEI12. Por otro lado, la dispersión de los puntos anuales en cada gráfico permite inferir el grado de variabilidad interanual en cada turbera. En este sentido, turberas como Pleta de Molieres y Estanyeres presentan una mayor dispersión en sus puntos, lo que sugiere una respuesta ambiental más variable entre años, posiblemente debido a su sensibilidad a las condiciones hidrológicas o climáticas cambiantes.

Los gráficos de dispersión entre NDDI y los índices SPEI permiten distinguir entre diferentes tipos de sequía. Por ejemplo, el año 2020 se registró como uno de los más húmedos según SPEI12, lo que indica una recuperación hídrica a largo plazo; sin embargo, ese mismo año no presentó valores igualmente altos en SPEI3, lo que sugiere que a corto plazo no fue particularmente húmedo. Esta diferencia evidencia cómo un mismo año puede presentar distintos balances hídricos dependiendo del periodo de acumulación analizado, destacando la utilidad de SPEI en múltiples escalas temporales para interpretar el estrés hídrico reflejado en el NDDI.

En vista de que las imágenes ópticas utilizadas (Sentinel-2) capturan la información relacionada con el estado fisiológico de la vegetación (NDVI, NDWI\_v) y no directamente variables edáficas, una validación más directa habría necesitado de datos de campo relativos a la vegetación (índice de estrés hídrico, contenido de agua foliar, índice de clorofila...). Por el contrario, para evaluar de forma más precisa la humedad del suelo o el nivel freático, a partir de la teledetección, sería necesario utilizar sensores activos como radar de apertura sintética (SAR), estas consideraciones metodológicas marcan un aprendizaje clave de esta investigación sirviendo como base para mejoras futuras en la validación de productos satelitales en ambientes saturados.

## 5. Conclusiones

Las turberas representan ecosistemas de alto valor ecológico, por lo que resulta fundamental avanzar en su cartografía y delimitación, como paso previo indispensable para su monitoreo, gestión y conservación efectiva.

Si bien la respuesta de cada turbera ante eventos meteorológicos está modulada por múltiples factores, en este estudio se identificó un patrón espacial claro: las turberas del noroeste presentan periodos nivosos más prolongados y sequías menos intensas que las del sureste. Esta diferencia parece estar condicionada por su posición relativa entre el Atlántico (más húmedo) y el Mediterráneo (más seco).

El deshielo de nieve acumulada no garantiza una reducción del estrés hídrico en las turberas, ya que su efecto está condicionado por factores como la morfología del terreno o los ciclos de sequía, que pueden limitar la infiltración y el aprovechamiento del agua por la vegetación.

Las turberas de menor tamaño muestran una mayor sensibilidad frente a factores externos como la duración del periodo nival. En cambio, las turberas más extensas tienden a beneficiarse de inviernos prolongados, ya que sus índices de vegetación y humedad responden de

forma más positiva, lo que se traduce en un menor estrés hídrico.

La fecha del máximo valor de NDVI varía cada año, en función de las características del periodo invernal, de los periodos de sequías (meteorológica, hidrológica e incluso de su posible solapamiento) y de variables como temperatura del suelo. Sin embargo, al analizar la curva media de NDVI durante este estudio, destaca que cada turbera tiene una curva característica: algunas más simétricas que otras y con un máximo absoluto, diferenciable entre turberas, que varía entre julio y agosto.

Las características estructurales y funcionales de la vegetación, propia de las turberas, la protegen de los cambios extremos térmicos, ya que favorecen la retención de agua y su liberación gradual; por esta razón los índices espectrales vegetales, por si solos, no permiten diferenciar entre años de sequía de años húmedos. Sin embargo, al analizar las relaciones entre índices, por ejemplo, NDWI\_v frente a NDVI, sí es posible distinguir los años más húmedos de los más secos.

Los índices espectrales reflejan dinámicas reales, pero respecto a las variables usadas en la validación, no se refleja en términos absolutos, sino que se observan con desfase. Se recomienda validar con una serie temporal más larga, con varias turberas e incluso con otras variables que estén más relacionadas con la respuesta vegetativa y no con el suelo.

Para dar continuidad a esta investigación, se proponen varias líneas de trabajo que incluyen tanto ajustes metodológicos como nuevas aproximaciones de análisis:

- En primer lugar, se sugiere suavizar los datos de NDVI aplicando técnicas que permitan reconstruir la serie temporal, especialmente en días con nubosidad, lo que ayudaría a obtener un perfil más representativo del comportamiento vegetativo.
- En cuanto a la validación con datos de campo, sería conveniente incluir otras variables más directamente relacionadas con la respuesta fisiológica de la vegetación, para lograr una validación más robusta. Además de validar varias turberas y con una serie temporal más larga.
- También se propone explorar el uso de datos provenientes de sensores activos (como radar de apertura sintética, SAR) para caracterizar la humedad del suelo y la estructura de las turberas, ampliando así la capacidad de análisis en condiciones nubosas o de baja visibilidad óptica.
- Desde una perspectiva funcional, se plantea contrastar la capacidad de resiliencia de las turberas frente a la sequía comparándolas con otros tipos de hábitats, en las mismas condiciones de altitud, orientación, etc.

- Además, sería fundamental avanzar en la elaboración de una cartografía oficial de turberas en Cataluña, que permita identificar, delimitar y proteger estos ecosistemas de forma más eficaz.

- Por último, se recomienda realizar un análisis detallado de los hábitats específicos presentes en cada turbera, evaluando cómo las diferencias florísticas y estructurales influyen en la respuesta espectral registrada.

## Referencias

- Carreras J., Ferré A., et al., 2014. Cartografia del hàbitats a Catalunya, versió 2. Manual d'interpretació.
- Carreras J., Ferré A., et al., 2015. Manual del hàbitats de Catalunya. Correspondència CORINE-EUNIS-HIC.
- Carlson B., Hébert M., Van Reeth C., Bison M., Laigle I., Delestrade A., 2020. Monitoring the Seasonal Hydrology of Alpine Wetlands in Response to Snow Cover Dynamics and Summer Climate: A Novel Approach with Sentinel-2. <https://doi.org/10.3390/rs12121959>
- Chen, D., Huang, J., Jackson, T., 2005. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. Remote Sensing of Environment. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.008>
- Chuvieco E., 2019. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3era edición. España.
- Colomer J., Pérez-Haase A., Carillo E., Ventura M., Ninot J., 2019. Fine-scale vegetation mosaics in Pyrenean mires are driven by complex hydrological regimes and threatened by extreme weather events. <https://doi.org/10.1002/eco.2070>
- Cordero J., 2013. Identificación y caracterización de las turberas mediante el uso del sensor remoto Landsat TM 5 y verificación en terreno en Valle Exploradores. Región de Aysén, Chile. Seminario de Grado presentado al instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile.
- CREAF. s.f. Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (MCSC). <https://opengis.grumets.cat/MCSC/>

- Generalitat de Catalunya. s.f. Fitxes descriptives de les zones humides de Catalunya. [https://mediambient.gencat.cat/ca/05\\_ambits\\_dactuacio/patrimoni\\_natural/sistemes\\_dinformacio/zones\\_humides/fitxes\\_descriptives/](https://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/patrimoni_natural/sistemes_dinformacio/zones_humides/fitxes_descriptives/)
- Generalitat de Catalunya. s.f. Inventari de zones humides. <https://agricultura.gencat.cat/ca/serveis/cartografia-sig/bases-cartografiques/espais-naturals>
- Gu Y., Brown J., Verdin J., Wardlow B., 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Hribljan J., Suarez E., Bourgeau-Chavez L., Endres S., Lilleskov E., Chimbolema S., Wayson C., Serocki E., Chimner, R., 2017. Multidate, multisensor remote sensing reveals high density of carbon-rich mountain peatlands in the páramo of Ecuador. <https://doi.org/10.1111/gcb.13807>
- ICGC Intitut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. <http://srv.icgc.cat/vissir3/>
- Jiang R., Liu J., Liu W., Zhang D., Hu W., 2023. Changes and driving forces analysis of alpine wetlands in the first meander of the Yellow River based on long-term time series remote sensing data. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1193059>
- LIFE + LIMNOPIRINEUS. s.f. <http://www.lifelimnopirineus.eu/>
- Life RESQUE ALPYR. (s.f). <https://liferesquealpyr.eu>
- Martínez A., García-Rodeja E., 2009. Ficha Grupo 7: Turberas, Turberas bajas y áreas pantanosas. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- McFeeters, S., 2013. Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach. Remote Sensing. <https://doi.org/10.3390/rs5073544>
- Monsalve E., Muñoz-Arriagada R., Bahamonde N., Vidal O. 2021. Caracterización ecológica de una turbera ombrogénica en Magallanes: hacia una propuesta de bioindicadores de monitoreo ambiental. Guayana Botánica. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432021000100038>
- Mortier S., Hamedpour A., Bussmann B., Tchana R., Latré S., Sigurdsson B., Schepper T., Verdonck T., 2023. Inferring the relationship between soil temperature and the normalized difference vegetation index with machine learning. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102730>
- Pérez-Haase A., Ninot J., Batriu E., Pladevall E., Espuny J., Anadon A., Mercadé A., Ferré A., Carrillo E., 2019. Hàbitats d'interès comunitari a les molleres d'aigüestortes i de l'Alt Pallars: distribució, impactes i amenaces. Memòria tècnica LIFE + LIMNOPIRINEUS.
- Pettorelli N., Olav J., Mysterud A., Gaillard J., Tucker C., Stenseth N., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pladevall E., 2022. Alpine vegetation dynamics and conservation: The Pyrenean mires. Tesis doctoral Universitat de Barcelona.
- Ramsar, 2018. Nota Informativa 9: Lineamientos para inventarios de turberas tropicales a fin de facilitar su designación como sitios Ramsar. URL: [https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn9\\_peatland\\_inventory\\_s.pdf](https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn9_peatland_inventory_s.pdf)
- Roa-García M., Brown S., 2016. Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales Andinos en la cuenca alta del Río Barbas (Quindío, Colombia). <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57833>
- Rodríguez J., 2024. Dinàmica del paisatge als Pirineus al llarg dels últims 10.300 anys. Aproximació paleoecològica a les torberes de l'Estany de la Bassa i dels Clots de Rialba (Pallars Sobirà, Lleida). Tesis doctoral Universitat Autònoma de Barcelona.
- Vega D., Domínguez E., 2021. Capítulo 2: Análisis espacial de la distribución geográfica de las Turberas de Sphagnum en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/3c48ac80-16ed-49af-b337-ddad2f849cd9/content>
- Vicente-Serrano S., Tomas-Burguera M., Beguería S., Reig F., Latorre B., Peña-Gallardo M., Luna Y., Morata A., González-Hidalgo J., 2017. A High Resolution Dataset of Drought Indices for Spain. <https://doi.org/10.3390/data2030022>.
- Yin T., Feng Y., Liang S., Wang G., Yuan N., Yan D., Wu P., Kuang X., Wan L., 2022. A suitable method for alpine wetland delineation: An example for the headwater area of the yellow river, Tibetan Plateau. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1062954>

## **Apéndices**

Apéndice I: Diagrama de flujo y registro de imágenes Sentinel-2 utilizadas.

Apéndice II: Series Temporales: NDVI, NDWI, NDWI\_v, NDDI, SPEI1, SPEI3, SPEI12 vs SPEI24.

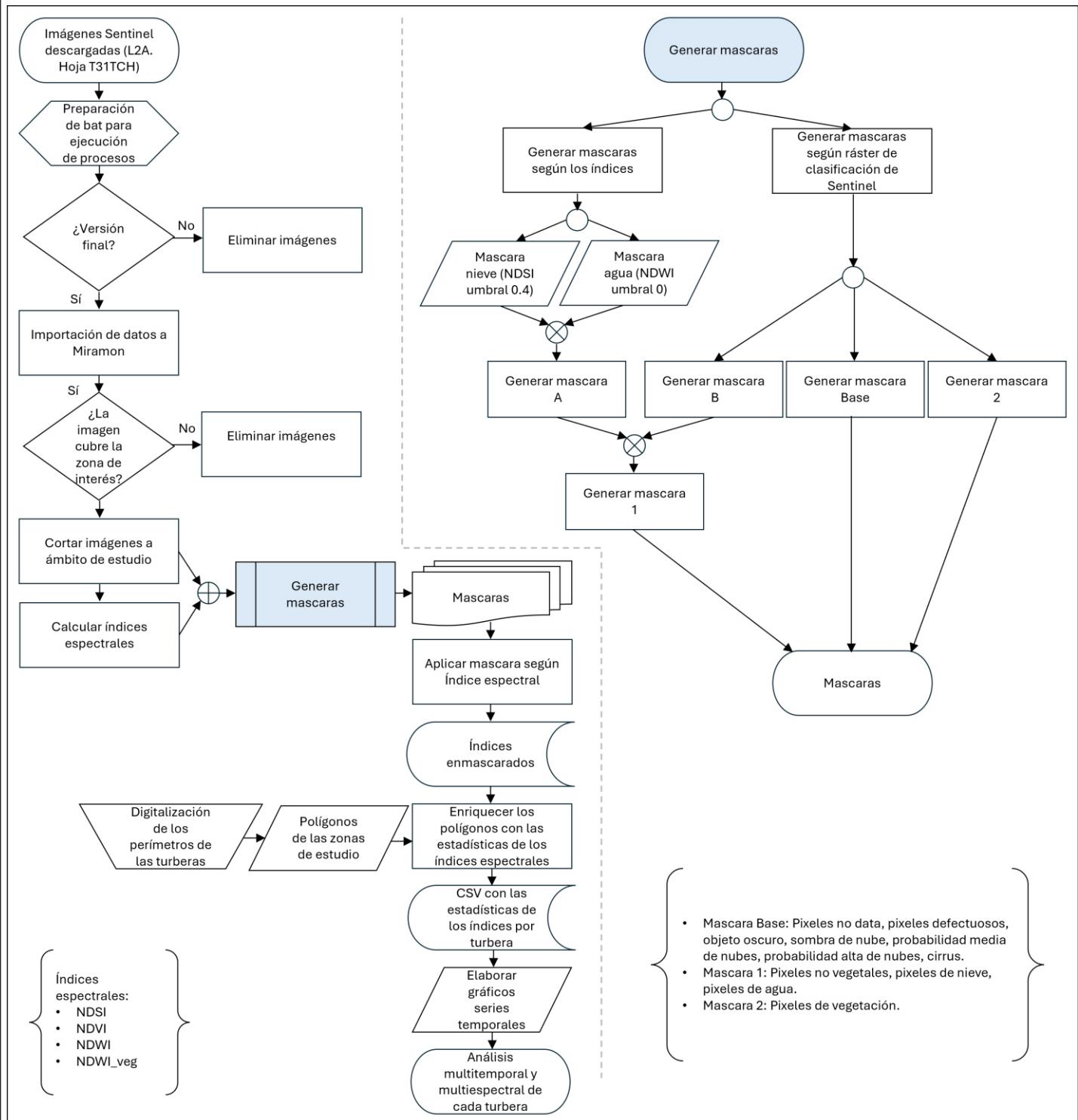
Apéndice III: Evolución temporal de Pleta de Molières: imágenes satelitales vs fotografías.

Apéndice IV: Variables derivadas y correlación entre variables predictoras y variables respuesta.

Apéndice V: Correlación datos de campo.

**Apéndice I:**  
**Diagrama de flujo y registro de imágenes**  
**Sentinel-2 utilizadas.**

## Variables Derivadas de NDSI



## Desglose anual de imágenes y fechas utilizadas

Año	Total de imágenes	Sentinel - 2A	Sentinel - 2B	Sentinel - 2C
2015	13	13	0	0
2016	34	34	0	0
2017	61	33	28	0
2018	71	35	36	0
2019	67	35	32	0
2020	68	33	35	0
2021	63	37	26	0
2022	63	34	29	0
2023	69	35	34	0
2024	69	34	35	0
2025	40	11	15	14

### **Año: 2015**

Fechas de adquisición:

2015-07-06, 2015-07-16, 2015-07-26, 2015-08-05, 2015-08-15, 2015-08-25, 2015-09-04, 2015-09-14, 2015-09-24, 2015-10-04, 2015-11-13, 2015-12-03, 2015-12-23

### **Año: 2016**

Fechas de adquisición:

2016-01-02, 2016-01-12, 2016-01-22, 2016-02-01, 2016-02-11, 2016-02-21, 2016-03-02, 2016-03-12, 2016-03-22, 2016-04-01, 2016-04-11, 2016-05-01, 2016-05-21, 2016-06-10, 2016-06-20, 2016-06-30, 2016-07-10, 2016-07-20, 2016-07-30, 2016-08-09, 2016-08-19, 2016-08-29, 2016-09-08, 2016-09-18, 2016-09-28, 2016-10-08, 2016-10-18, 2016-10-28, 2016-11-07, 2016-11-17, 2016-12-07, 2016-12-17, 2016-12-27

### **Año: 2017**

Fechas de adquisición:

2017-01-16, 2017-01-26, 2017-02-05, 2017-02-15, 2017-02-25, 2017-03-07, 2017-03-17, 2017-03-19, 2017-04-01, 2017-04-06, 2017-04-11, 2017-04-16, 2017-04-21, 2017-04-26, 2017-05-01, 2017-05-06, 2017-05-11, 2017-05-16, 2017-05-21, 2017-05-26, 2017-06-05, 2017-06-10, 2017-06-15, 2017-06-20, 2017-06-25, 2017-06-30, 2017-07-05, 2017-07-10, 2017-07-15, 2017-07-20, 2017-07-25, 2017-07-30, 2017-08-04, 2017-08-09, 2017-08-14, 2017-08-19, 2017-08-24, 2017-08-29, 2017-09-03, 2017-09-08, 2017-09-13, 2017-09-18, 2017-09-23, 2017-09-28, 2017-10-03, 2017-10-08, 2017-10-13, 2017-10-18, 2017-10-23, 2017-10-28, 2017-11-07, 2017-11-12, 2017-11-17, 2017-11-22, 2017-11-27, 2017-12-02, 2017-12-07, 2017-12-12, 2017-12-17, 2017-12-22, 2017-12-27

### **Año: 2018**

Fechas de adquisición:

2018-01-01, 2018-01-06, 2018-01-11, 2018-01-16, 2018-01-21, 2018-01-26, 2018-01-31, 2018-02-05, 2018-02-10, 2018-02-15, 2018-02-20, 2018-02-25, 2018-03-02, 2018-03-07, 2018-03-12, 2018-03-17, 2018-03-22, 2018-03-27, 2018-04-01, 2018-04-06, 2018-04-16, 2018-04-21, 2018-04-26, 2018-05-01, 2018-05-06, 2018-05-11, 2018-05-16, 2018-05-21, 2018-05-26, 2018-05-31, 2018-06-05, 2018-06-10, 2018-06-15, 2018-06-20, 2018-06-25, 2018-06-30, 2018-07-05, 2018-07-10, 2018-07-15, 2018-07-20, 2018-07-25, 2018-07-30, 2018-08-04, 2018-08-09, 2018-08-14, 2018-08-19, 2018-08-24, 2018-08-29, 2018-09-03, 2018-09-08, 2018-09-13, 2018-09-18, 2018-09-23, 2018-09-28, 2018-10-03, 2018-10-13, 2018-10-18, 2018-10-23, 2018-10-28, 2018-11-02, 2018-11-07, 2018-11-12, 2018-11-17, 2018-11-22, 2018-11-27, 2018-12-02, 2018-12-07, 2018-12-12, 2018-12-17, 2018-12-22, 2018-12-27

### **Año: 2019**

Fechas de adquisición:

2019-01-01, 2019-01-06, 2019-01-11, 2019-01-16, 2019-01-21, 2019-01-26, 2019-01-31, 2019-02-05, 2019-02-10, 2019-02-15, 2019-02-20, 2019-02-25, 2019-03-02, 2019-03-07, 2019-03-12, 2019-03-17, 2019-03-22, 2019-03-27, 2019-04-01, 2019-04-06, 2019-04-16, 2019-04-26, 2019-05-01, 2019-05-06, 2019-05-11, 2019-05-16, 2019-05-26, 2019-05-31, 2019-06-05, 2019-06-15, 2019-06-25, 2019-06-30, 2019-07-05, 2019-07-10, 2019-07-15, 2019-07-20, 2019-07-25, 2019-07-30, 2019-08-04, 2019-08-09, 2019-08-14, 2019-08-19, 2019-08-24, 2019-08-29, 2019-09-03, 2019-09-08, 2019-09-13, 2019-09-18, 2019-09-23, 2019-09-28, 2019-10-03, 2019-10-12, 2019-10-17, 2019-10-22, 2019-10-27, 2019-11-02, 2019-11-07, 2019-11-12, 2019-11-17, 2019-11-22, 2019-11-27, 2019-12-02, 2019-12-07, 2019-12-12, 2019-12-17, 2019-12-22, 2019-12-27

**Año: 2020**

Fechas de adquisición:

2020-01-01, 2020-01-06, 2020-01-11, 2020-01-16, 2020-01-21, 2020-01-26, 2020-01-31, 2020-02-05, 2020-02-10, 2020-02-15, 2020-02-20, 2020-02-25, 2020-03-01, 2020-03-06, 2020-03-11, 2020-03-16, 2020-03-21, 2020-03-26, 2020-03-31, 2020-04-05, 2020-04-10, 2020-04-15, 2020-04-25, 2020-04-30, 2020-05-05, 2020-05-15, 2020-05-20, 2020-05-25, 2020-05-30, 2020-06-04, 2020-06-09, 2020-06-14, 2020-06-19, 2020-06-24, 2020-06-29, 2020-07-04, 2020-07-09, 2020-07-14, 2020-07-19, 2020-07-24, 2020-07-29, 2020-08-03, 2020-08-08, 2020-08-13, 2020-08-18, 2020-08-23, 2020-08-28, 2020-09-02, 2020-09-07, 2020-09-12, 2020-09-17, 2020-09-22, 2020-09-27, 2020-10-02, 2020-10-07, 2020-10-12, 2020-10-17, 2020-10-27, 2020-11-01, 2020-11-11, 2020-11-16, 2020-11-21, 2020-11-26, 2020-12-11, 2020-12-16, 2020-12-21, 2020-12-26, 2020-12-31

**Año: 2021**

Fechas de adquisición:

2021-01-05, 2021-01-10, 2021-01-15, 2021-01-20, 2021-01-25, 2021-01-30, 2021-02-04, 2021-02-09, 2021-02-14, 2021-02-19, 2021-02-24, 2021-03-01, 2021-03-06, 2021-03-11, 2021-03-16, 2021-03-21, 2021-03-26, 2021-03-31, 2021-04-05, 2021-04-10, 2021-04-15, 2021-04-25, 2021-05-05, 2021-05-10, 2021-05-15, 2021-05-25, 2021-06-04, 2021-06-09, 2021-06-14, 2021-06-24, 2021-07-04, 2021-07-09, 2021-07-14, 2021-07-24, 2021-08-03, 2021-08-08, 2021-08-13, 2021-08-23, 2021-08-28, 2021-09-02, 2021-09-12, 2021-09-17, 2021-09-22, 2021-09-27, 2021-10-02, 2021-10-07, 2021-10-12, 2021-10-17, 2021-10-22, 2021-10-27, 2021-11-01, 2021-11-06, 2021-11-11, 2021-11-16, 2021-11-21, 2021-11-26, 2021-12-01, 2021-12-06, 2021-12-11, 2021-12-16, 2021-12-21, 2021-12-26, 2021-12-31

**Año: 2022**

Fechas de adquisición:

2022-01-05, 2022-01-10, 2022-01-15, 2022-01-20, 2022-01-25, 2022-01-30, 2022-02-04, 2022-02-09, 2022-02-14, 2022-02-24, 2022-03-01, 2022-03-11, 2022-03-16, 2022-03-21, 2022-03-26, 2022-04-05, 2022-04-10, 2022-04-15, 2022-04-20, 2022-04-30, 2022-05-10, 2022-05-15, 2022-05-20, 2022-05-25, 2022-05-30, 2022-06-04, 2022-06-09, 2022-06-19, 2022-06-24, 2022-06-29, 2022-07-09, 2022-07-14, 2022-07-19, 2022-07-29, 2022-08-08, 2022-08-18, 2022-08-23, 2022-08-28, 2022-09-02, 2022-09-07, 2022-09-12, 2022-09-17, 2022-09-22, 2022-09-27, 2022-10-02, 2022-10-07, 2022-10-12, 2022-10-17, 2022-10-22, 2022-11-01, 2022-11-06, 2022-11-11, 2022-11-16, 2022-11-21, 2022-11-26, 2022-12-01, 2022-12-06, 2022-12-11, 2022-12-16, 2022-12-21, 2022-12-26, 2022-12-31

**Año: 2023**

Fechas de adquisición:

2023-01-05, 2023-01-10, 2023-01-15, 2023-01-20, 2023-01-25, 2023-01-30, 2023-02-04, 2023-02-09, 2023-02-14, 2023-02-19, 2023-02-24, 2023-03-01, 2023-03-06, 2023-03-11, 2023-03-16, 2023-03-21, 2023-03-26, 2023-03-31, 2023-04-05, 2023-04-10, 2023-04-15, 2023-04-20, 2023-05-05, 2023-05-15, 2023-05-20, 2023-05-25, 2023-05-30, 2023-06-04, 2023-06-09, 2023-06-14, 2023-06-19, 2023-06-24, 2023-06-29, 2023-07-04, 2023-07-09, 2023-07-14, 2023-07-19, 2023-07-24, 2023-07-29, 2023-08-03, 2023-08-08, 2023-08-13, 2023-08-18, 2023-08-23, 2023-08-28, 2023-09-02, 2023-09-07, 2023-09-17, 2023-09-22, 2023-09-27, 2023-10-02, 2023-10-07, 2023-10-12, 2023-10-17, 2023-10-22, 2023-10-27, 2023-11-01, 2023-11-06, 2023-11-11, 2023-11-16, 2023-11-21, 2023-11-26, 2023-12-01, 2023-12-06, 2023-12-11, 2023-12-16, 2023-12-21, 2023-12-26, 2023-12-31

**Año: 2024**

Fechas de adquisición:

2024-01-05, 2024-01-10, 2024-01-20, 2024-01-25, 2024-01-30, 2024-02-04, 2024-02-09, 2024-02-14, 2024-02-19, 2024-02-24, 2024-02-29, 2024-03-05, 2024-03-10, 2024-03-15, 2024-03-20, 2024-03-25, 2024-03-30, 2024-04-04, 2024-04-09, 2024-04-14, 2024-04-19, 2024-04-24, 2024-05-04, 2024-05-09, 2024-05-14, 2024-05-19, 2024-05-24, 2024-05-29, 2024-06-03, 2024-06-08, 2024-06-13, 2024-06-18, 2024-06-23, 2024-06-28, 2024-07-03, 2024-07-08, 2024-07-13, 2024-07-18, 2024-07-23, 2024-07-28, 2024-08-02, 2024-08-07, 2024-08-12, 2024-08-17, 2024-08-22, 2024-08-27, 2024-09-01, 2024-09-06, 2024-09-11, 2024-09-16, 2024-09-26, 2024-10-01, 2024-10-06, 2024-10-11, 2024-10-21, 2024-10-26, 2024-10-31, 2024-11-05, 2024-11-10, 2024-11-15, 2024-11-20, 2024-11-25, 2024-11-30, 2024-12-05, 2024-12-10, 2024-12-15, 2024-12-20, 2024-12-25, 2024-12-30

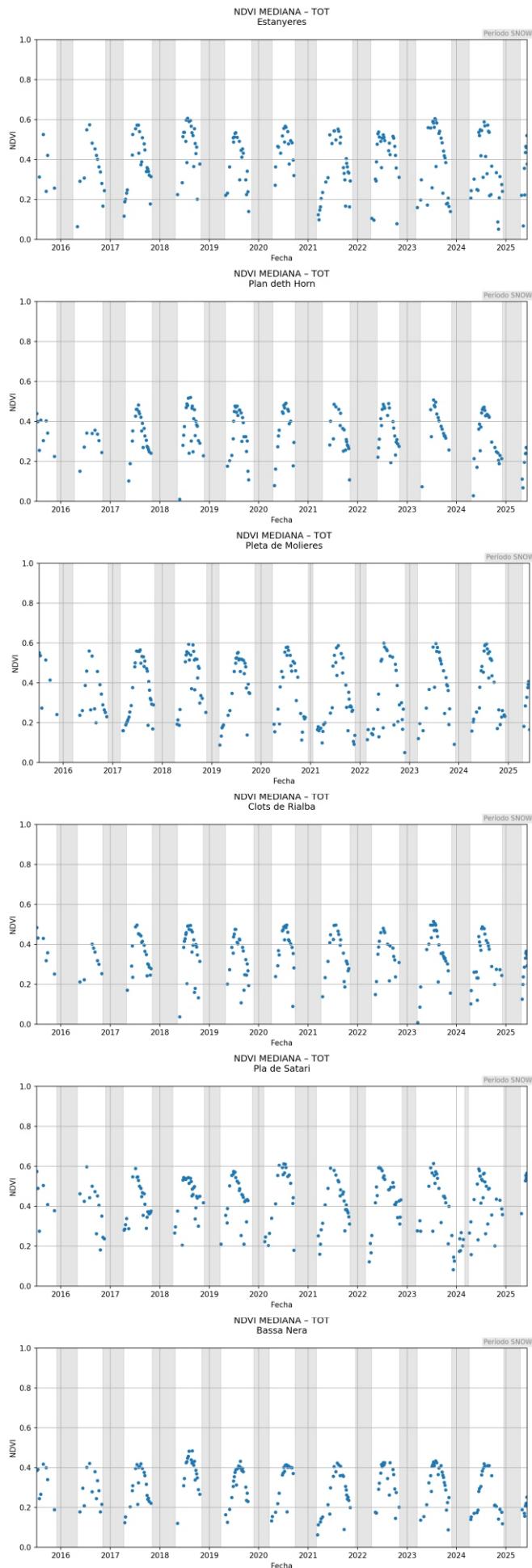
**Año: 2025**

Fechas de adquisición:

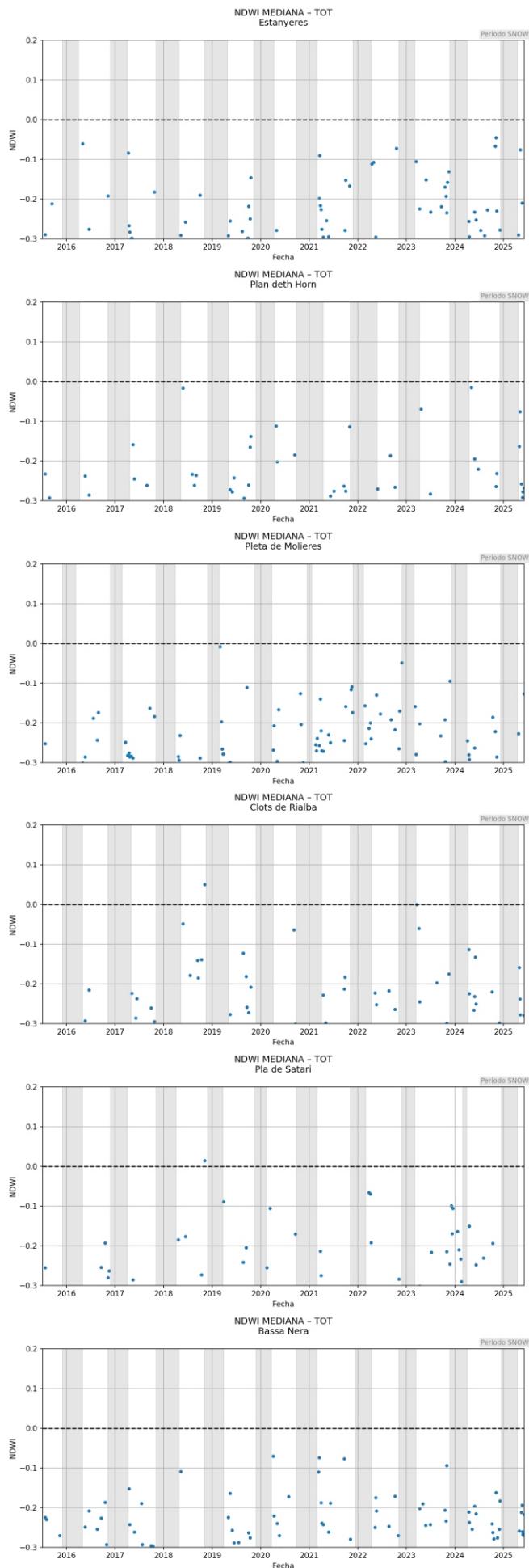
2025-01-04, 2025-01-09, 2025-01-14, 2025-01-19, 2025-01-24, 2025-01-29, 2025-02-03, 2025-02-08, 2025-02-13, 2025-02-18, 2025-02-23, 2025-02-28, 2025-03-05, 2025-03-10, 2025-03-15, 2025-03-17, 2025-03-20, 2025-03-25, 2025-03-27, 2025-03-30, 2025-04-04, 2025-04-06, 2025-04-09, 2025-04-14, 2025-04-16, 2025-04-19, 2025-04-24, 2025-04-26, 2025-04-29, 2025-05-04, 2025-05-06, 2025-05-09, 2025-05-14, 2025-05-16, 2025-05-19, 2025-05-24, 2025-05-26, 2025-05-29, 2025-06-03, 2025-06-05

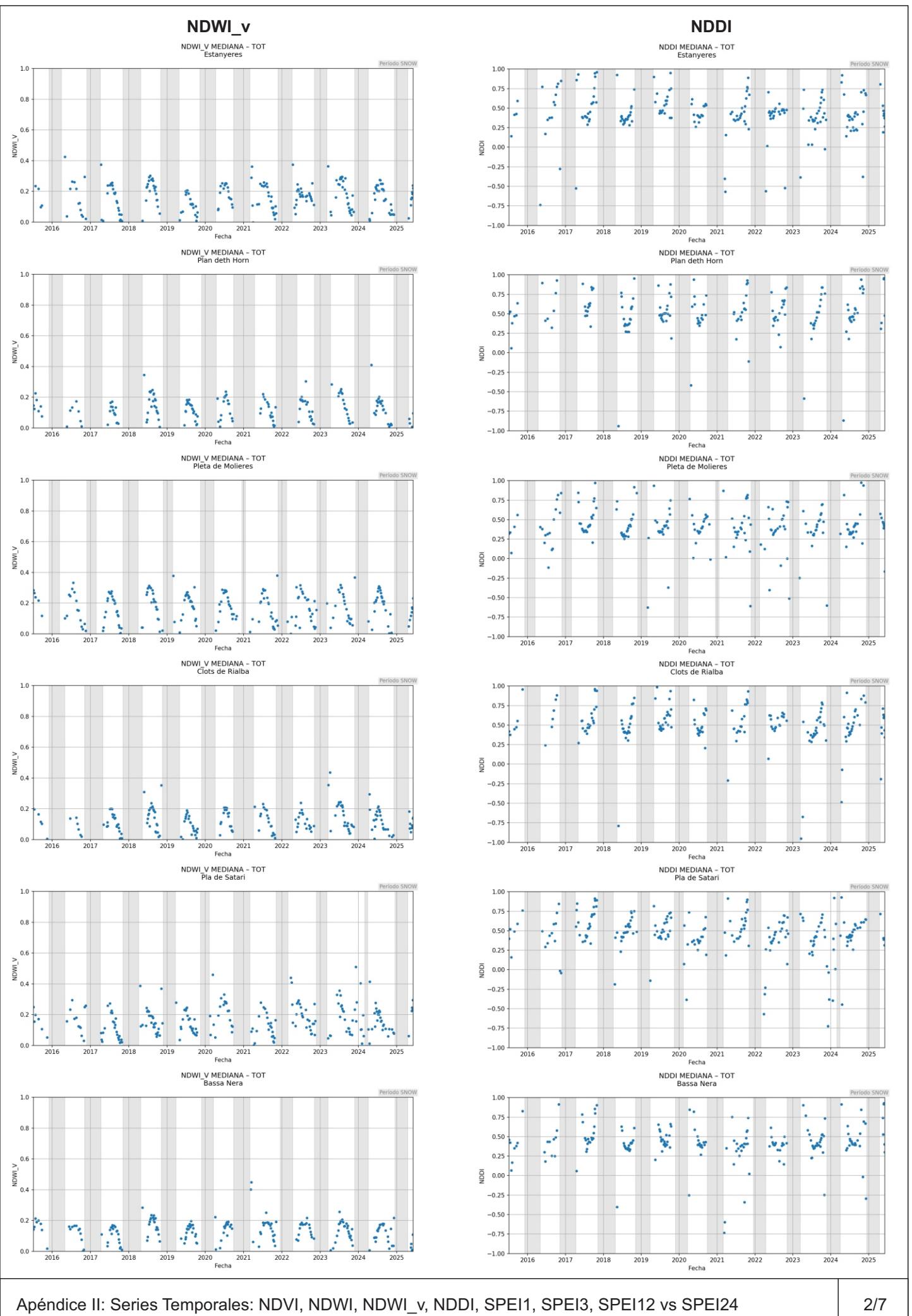
**Apéndice II:  
Series Temporales:  
NDVI, NDWI, NDWI\_v, NDDI,  
SPEI1, SPEI3, SPEI12 vs SPEI24**

## NDVI

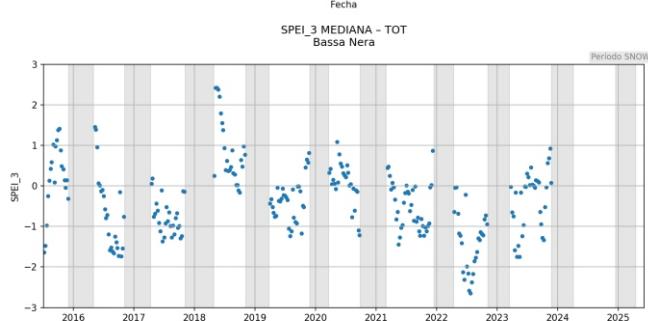
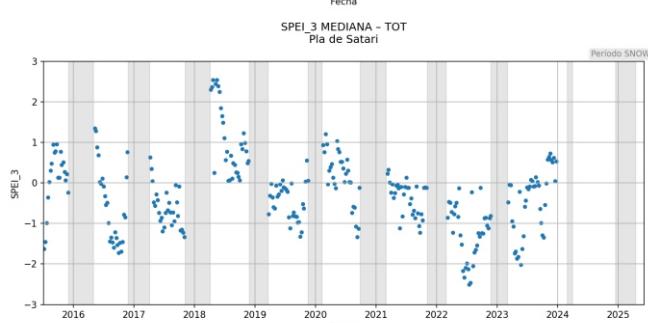
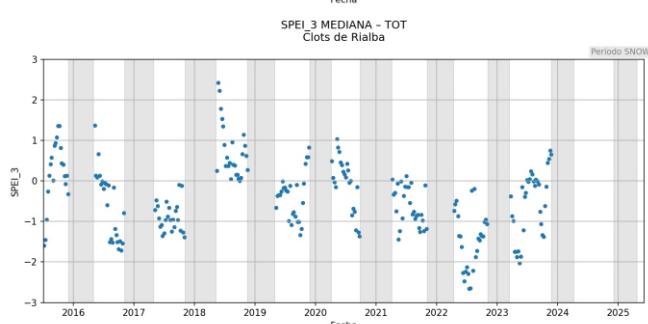
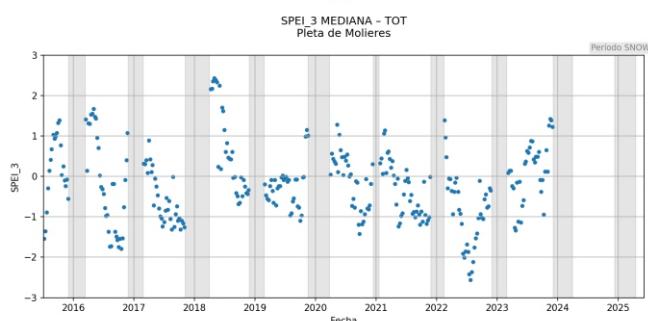
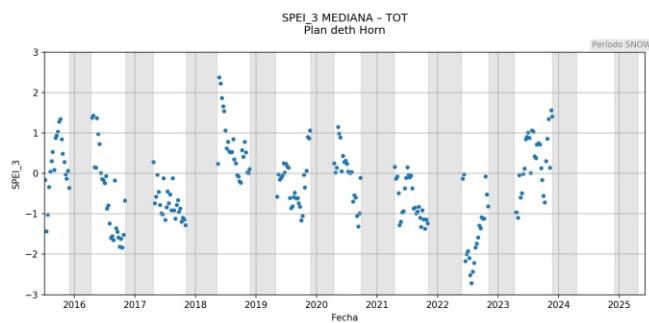
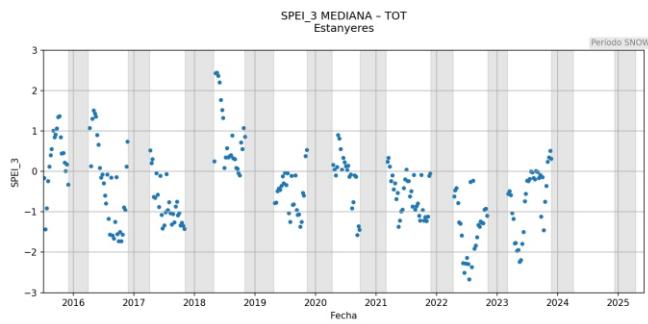


## NDWI

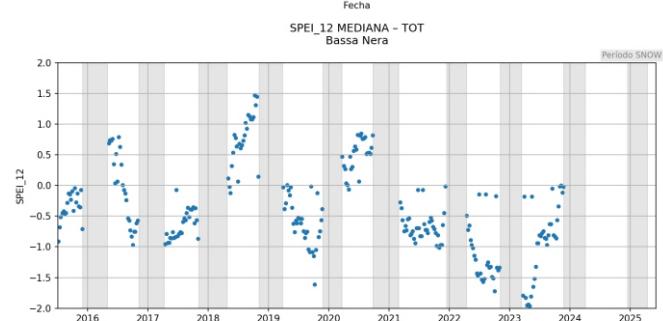
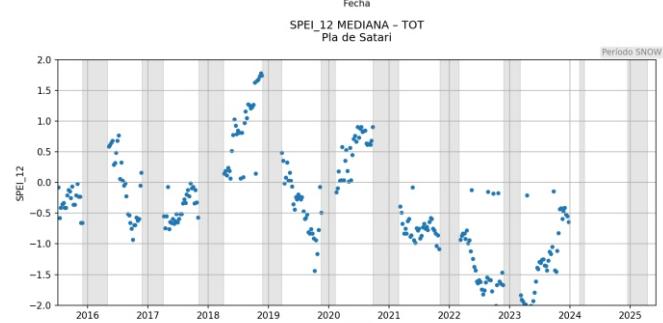
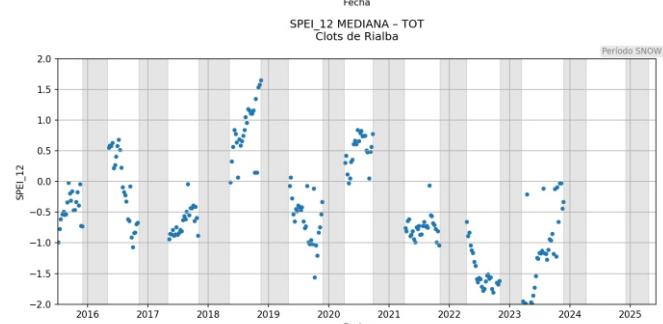
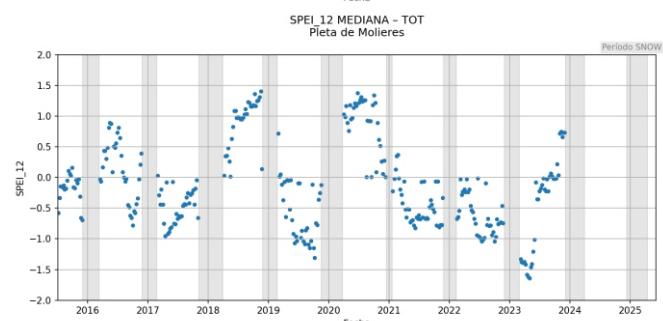
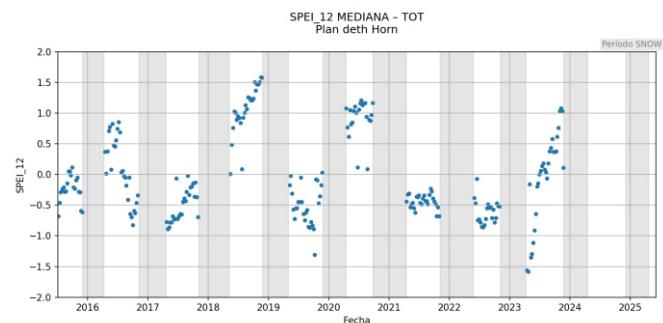
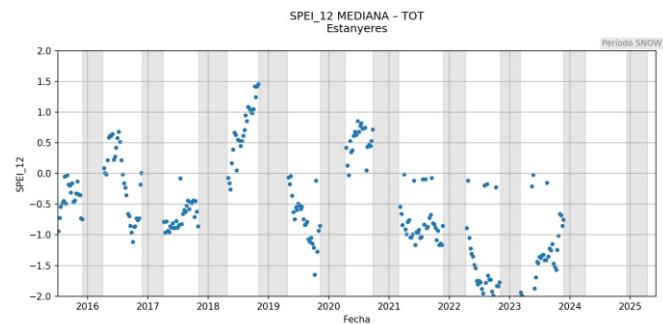




### SPEI-3

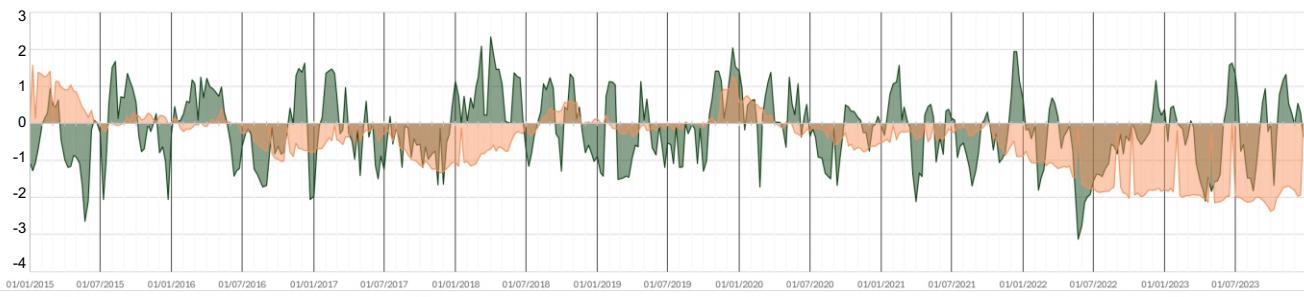


### SPEI12

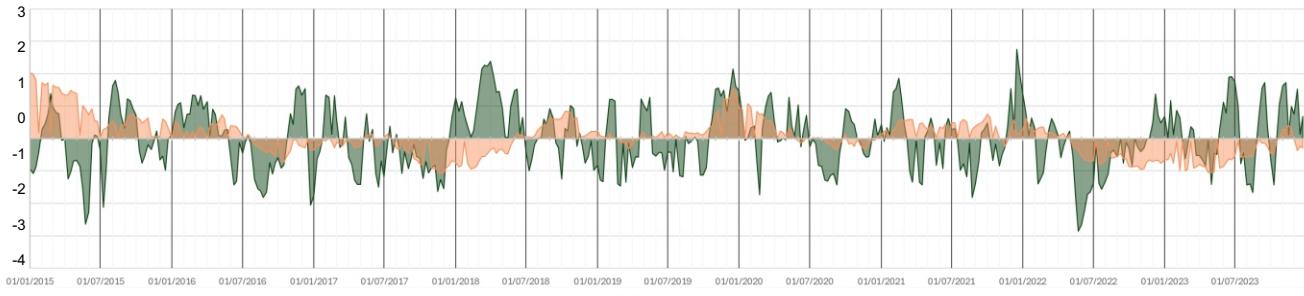


## SPEI-1 y SPEI24

SPEI Estanyeres



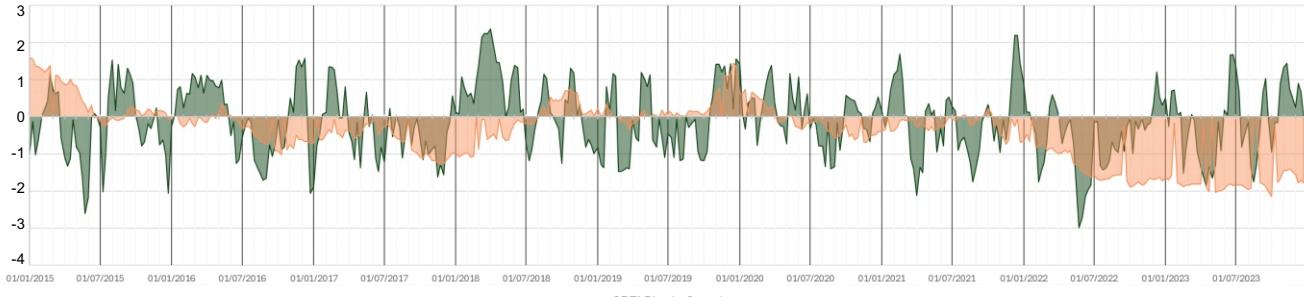
SPEI Plan deth Horn



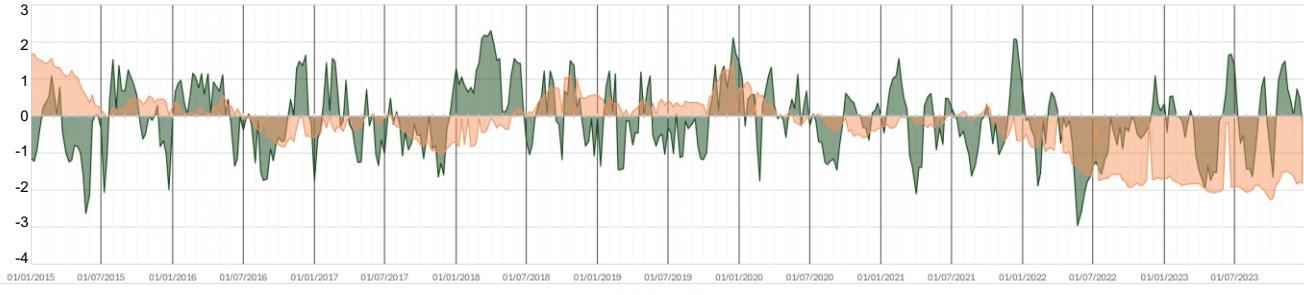
SPEI Pleta Molieres



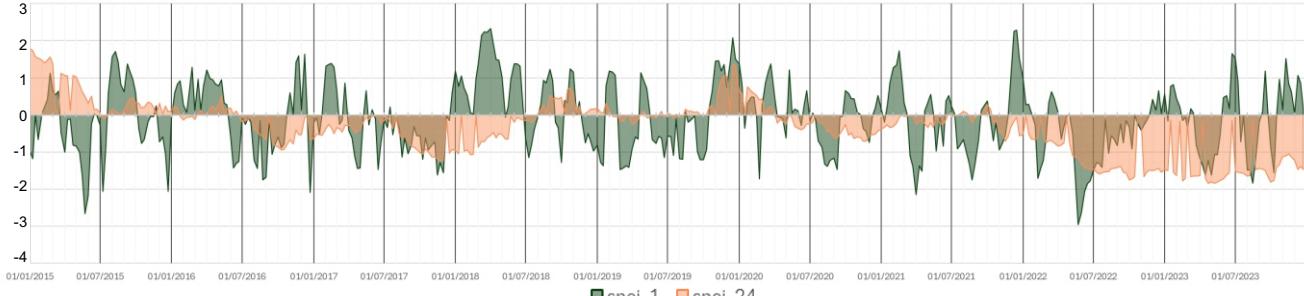
SPEI Clots Rialba



SPEI Pla de Satari

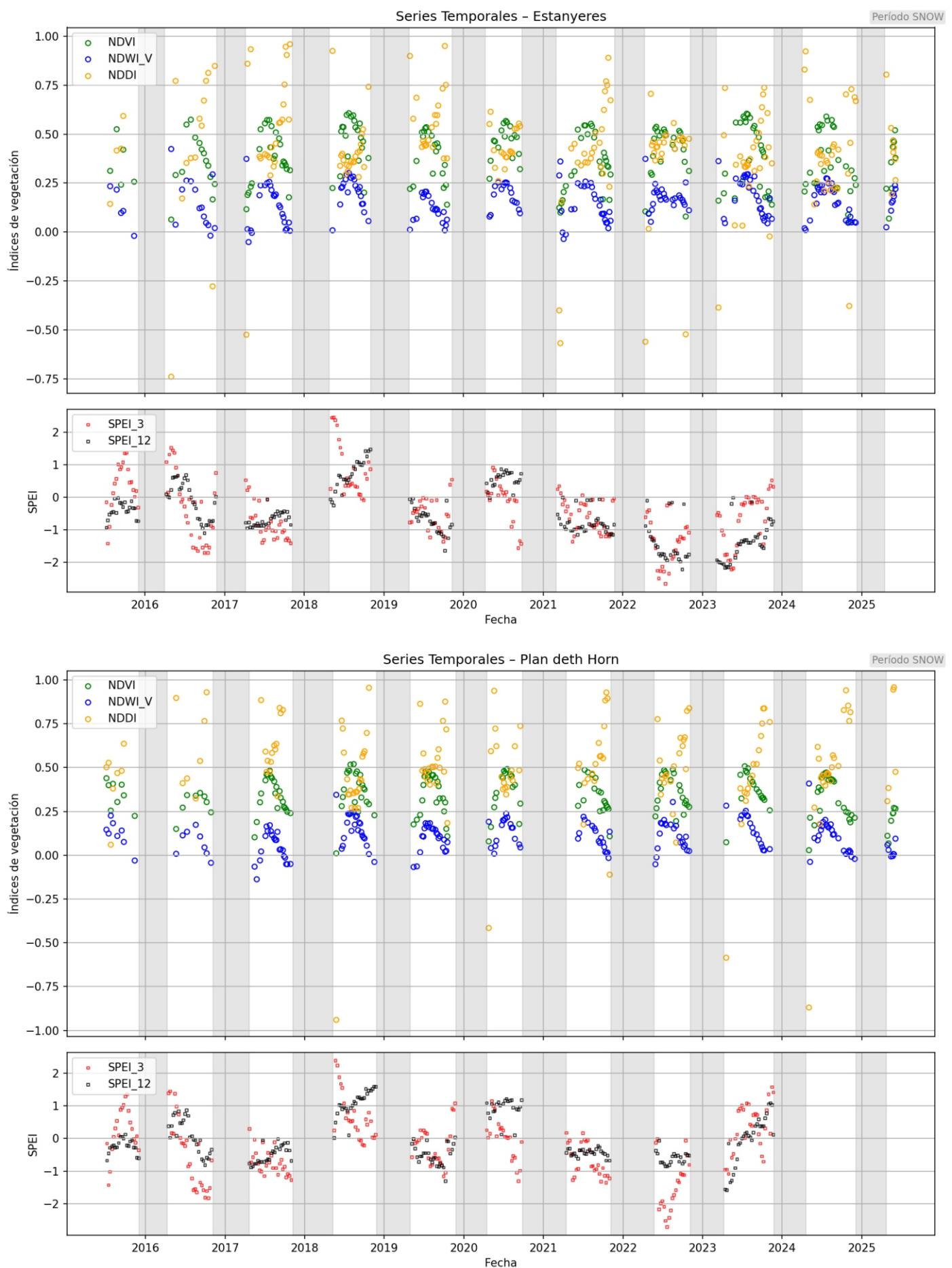


SPEI Bassa Nera

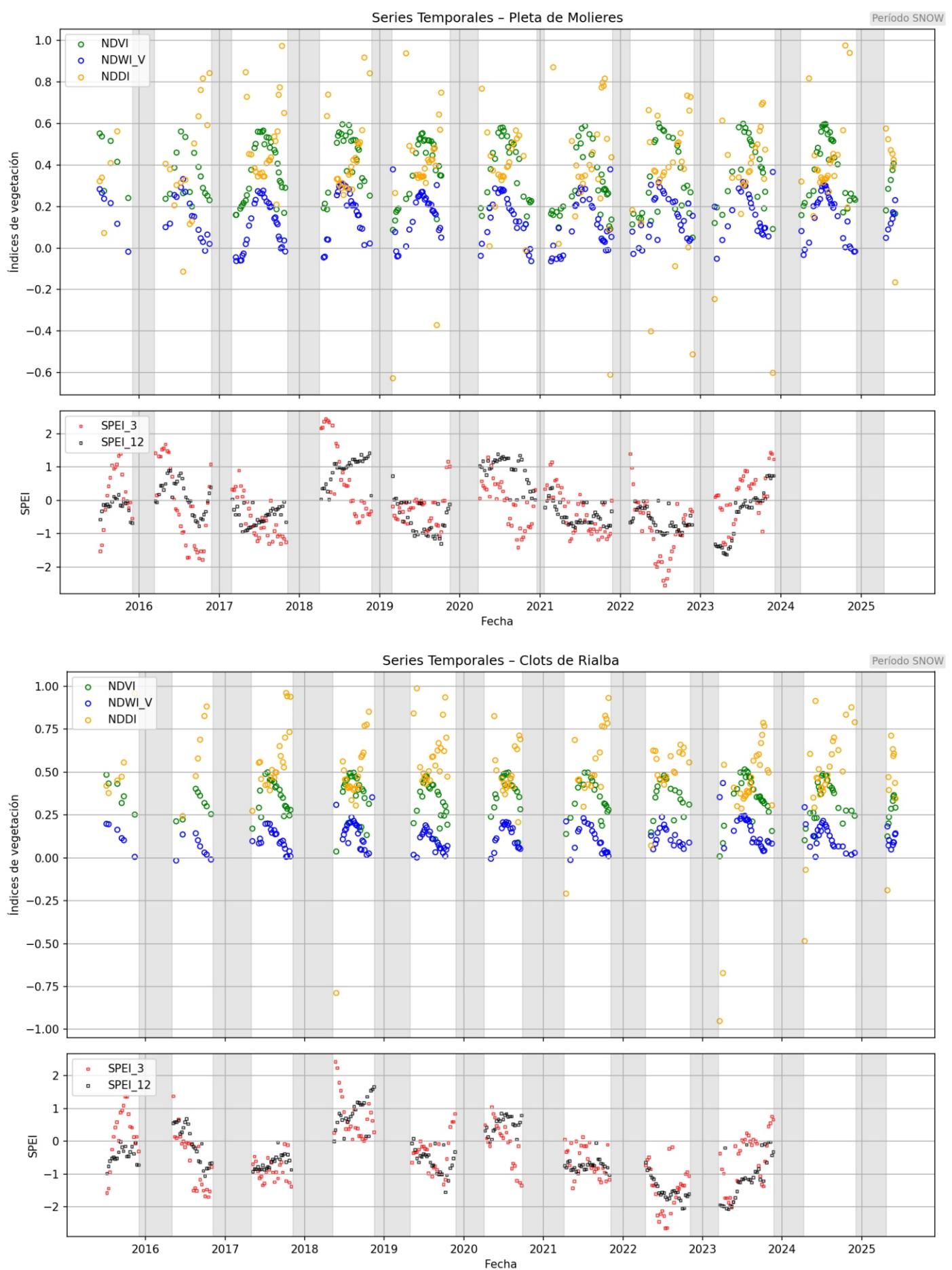


■ spei\_1 ■ spei\_24

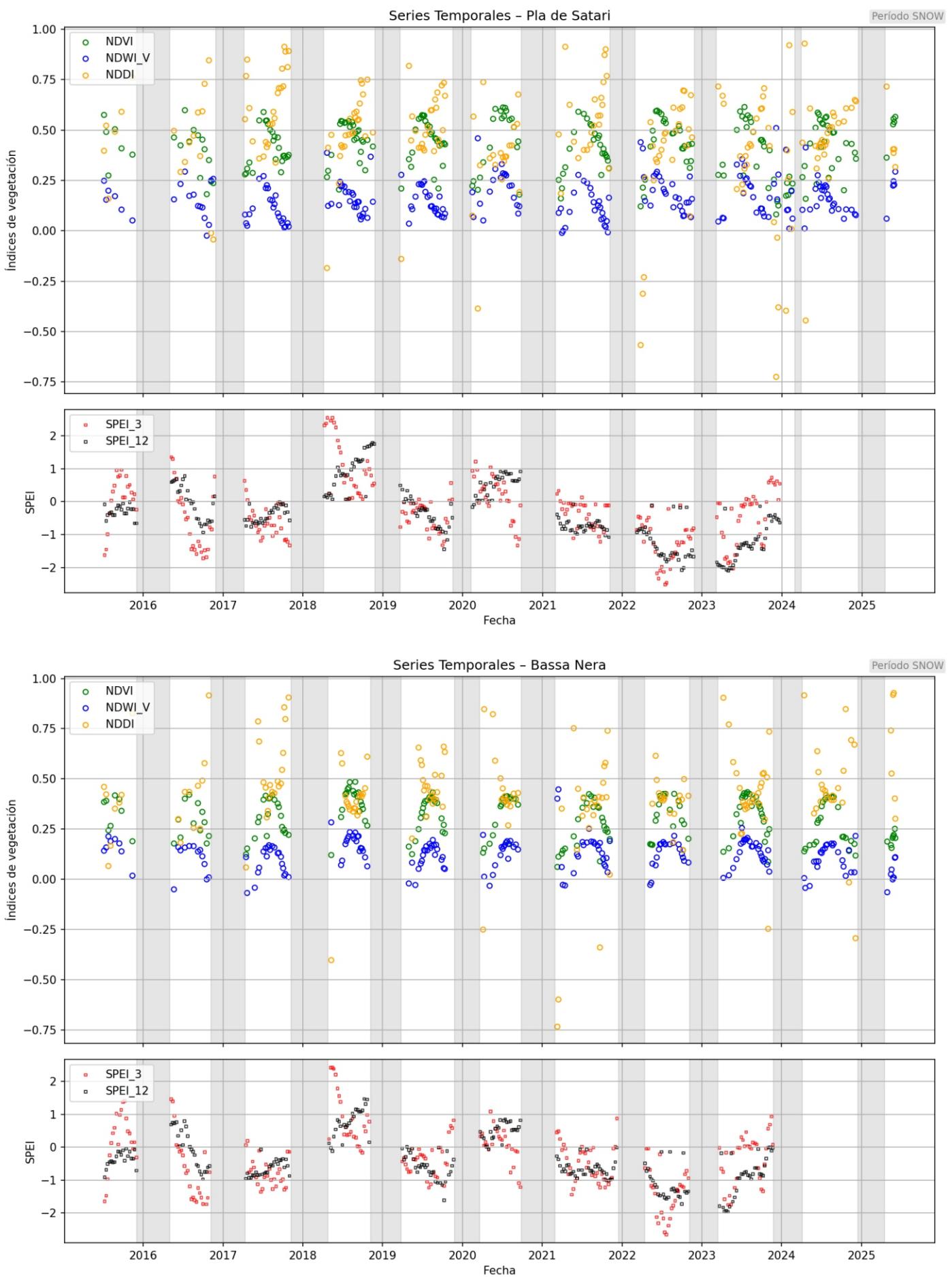
## NDVI, NDWI\_v, NDDI, SPEI3 y SPE12



## NDVI, NDWI\_v, NDDI, SPEI3 y SPE12



## NDVI, NDWI\_v, NDDI, SPEI3 y SPE12

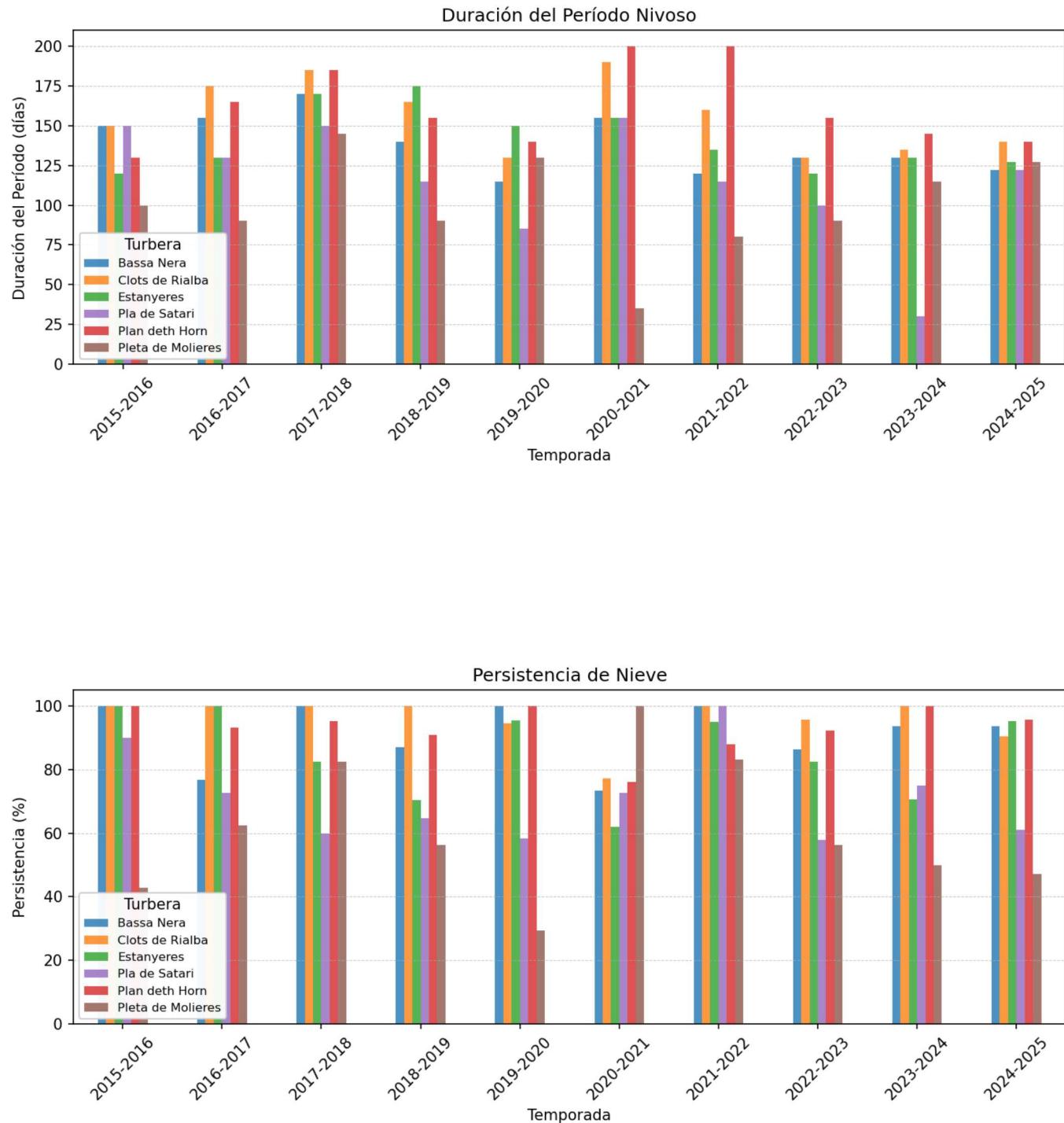


Apéndice III:  
Evolución temporal de Pleta de Molières:  
imágenes satelitales vs fotografías

RGB	Fotografía in situ	Fecha	NDVI	NDWI_V	Temp. MET (°C)	Humedad MET (%)	Nivel agua (mm)	Humedad Suelo (%)	Temp. suelo (°C)
		14/04/2024	0.20	-0.03	12.87	51.62	646.19	58.78	9.33
		03/06/2024	0.38	0.15	10.85	73.71	632.10	59.63	9.70
		08/07/2024	0.59	0.30	14.19	81.68	536.43	50.91	13.14
		23/07/2024	0.60	0.30	19.75	53.73	297.00	44.64	14.00
		22/08/2024	0.52	0.21	17.13	63.15	63.88	24.08	14.22
		15/11/2024	0.26	0.00	1.06	84.83	592.52	53.45	3.94
		05/12/2024	0.23	-0.02	6.06	46.12	590.67	54.93	2.82
		25/12/2024	-	-	8.01	65.10	657.73	56.76	1.57

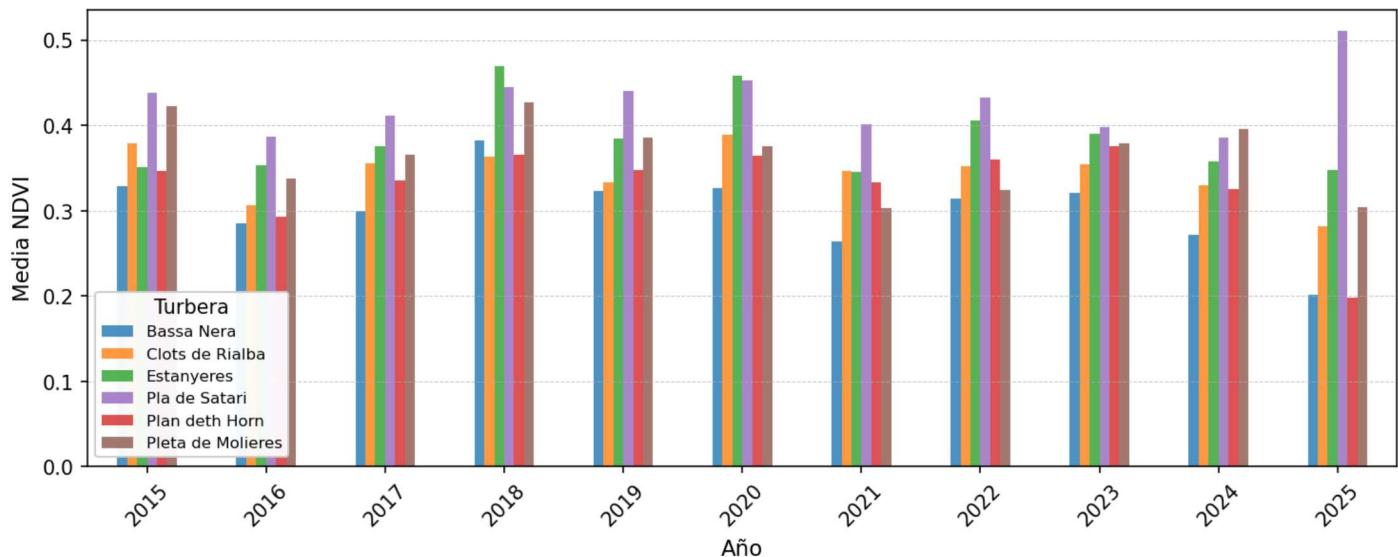
Apéndice IV:  
Variables derivadas y correlación  
entre variables predictoras y variables respuesta

## Variables Dereivadas de NDSI

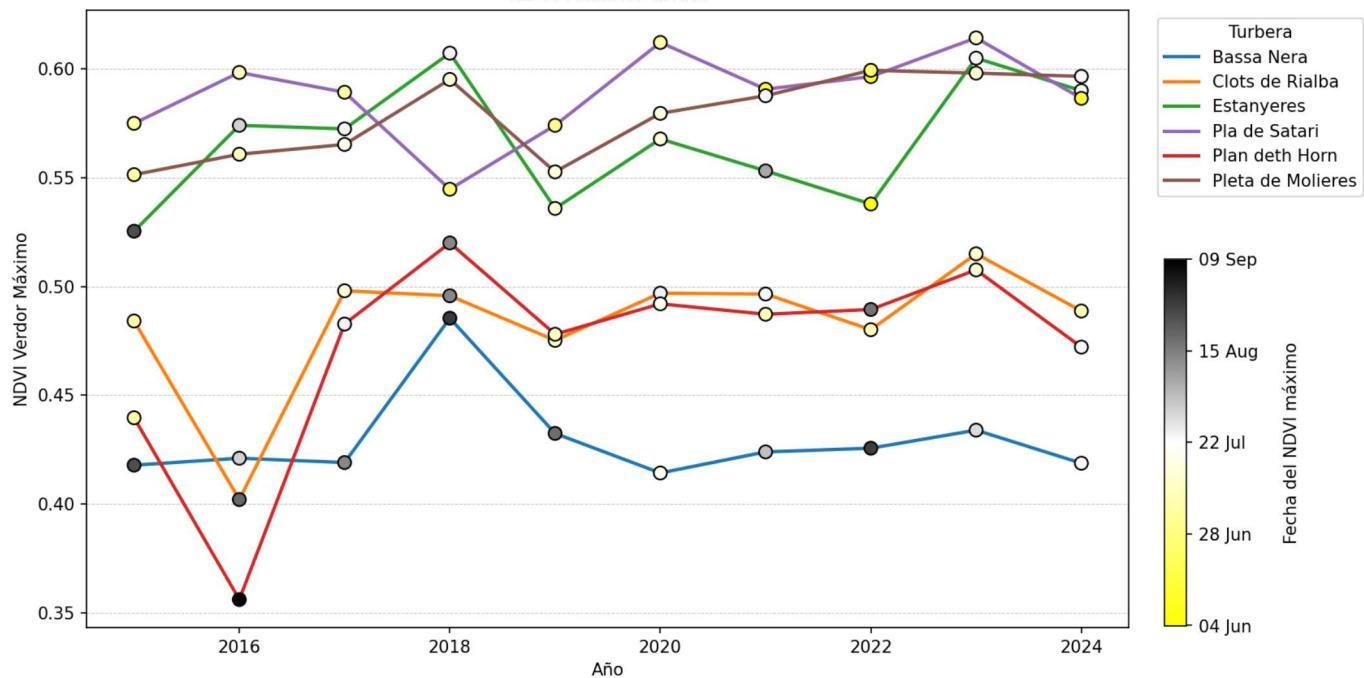


## Variables Dereivadas de NDVI

### Media Anual de NDVI

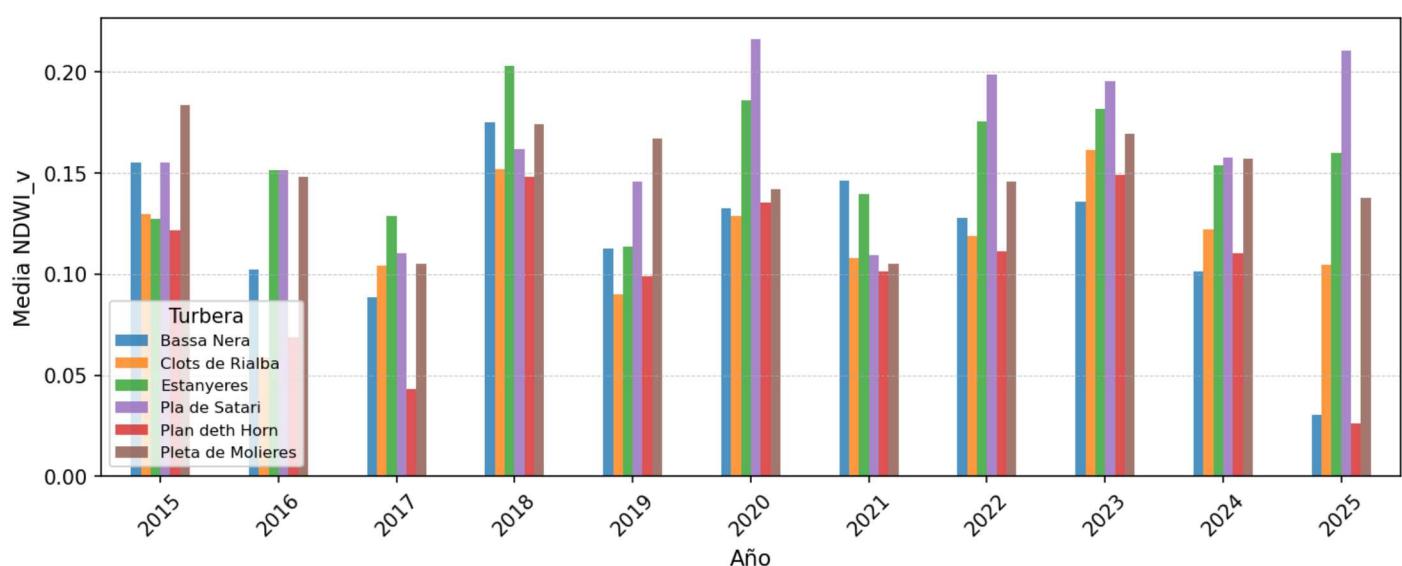


### NDVI Máximo anual

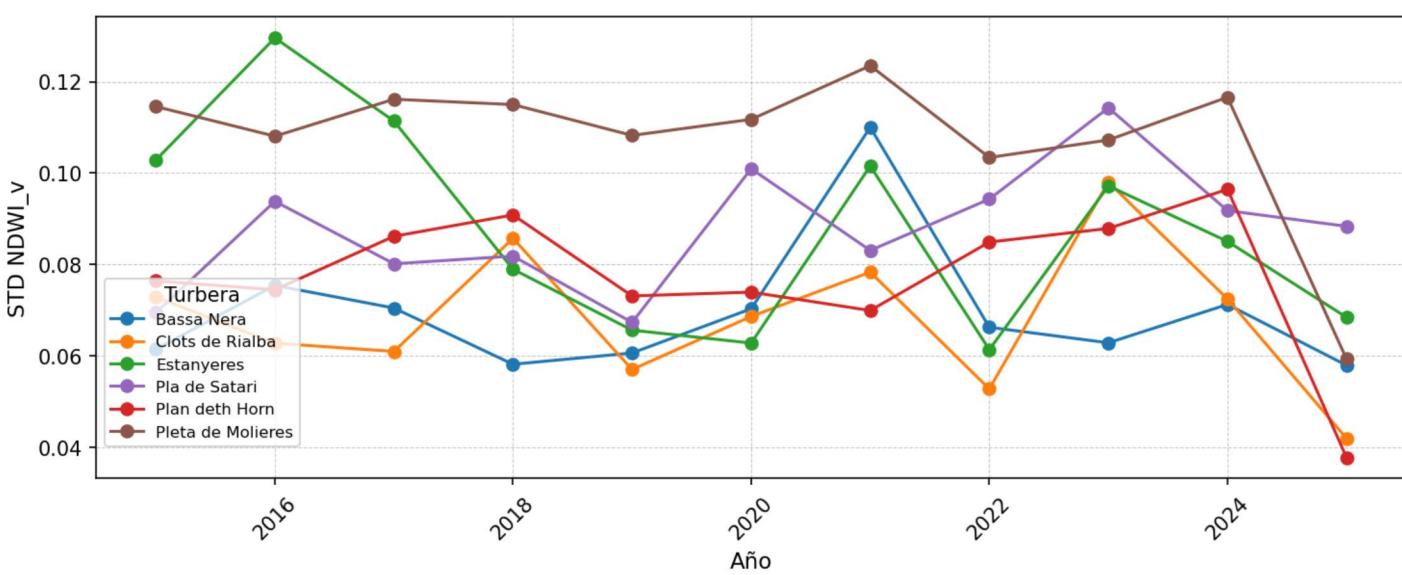


## Variables Derivadas de NDWI\_v

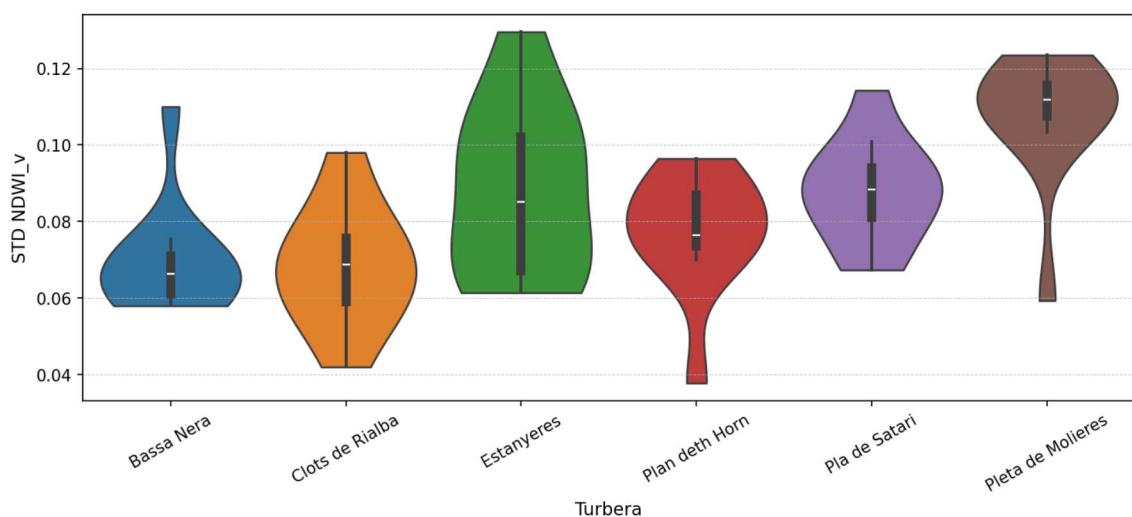
### Media Anual de NDWI\_v



### Desviación Estándar Anual de NDWI\_v

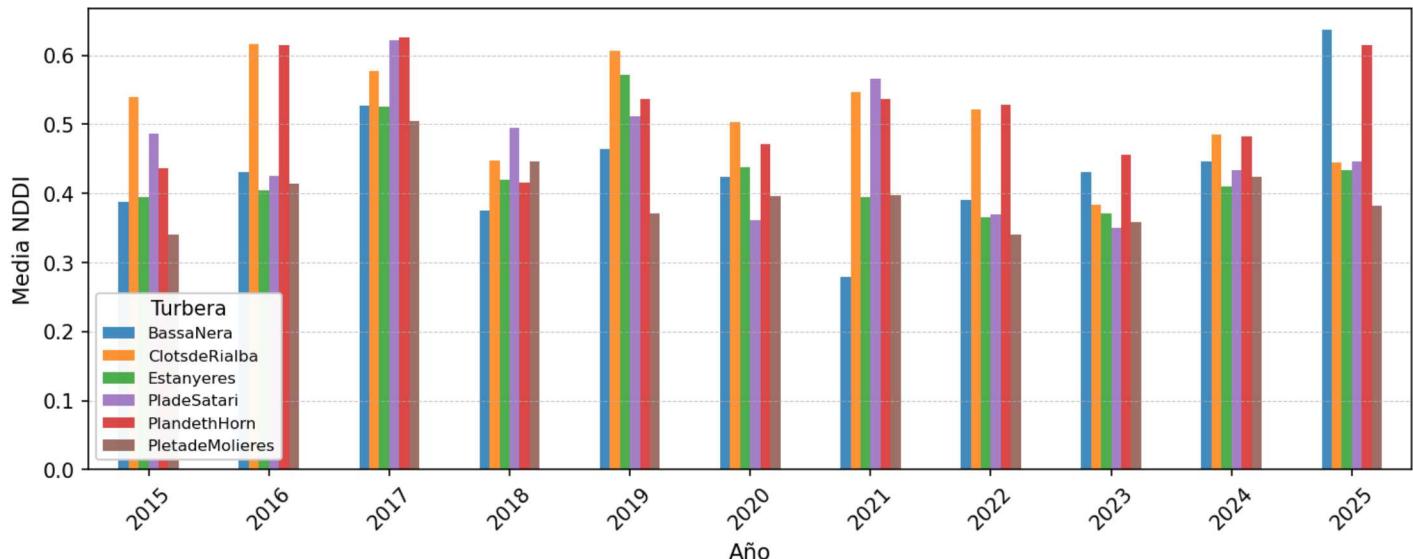


### Distribución de Desviación Estándar Anual de NDWI\_v por Turbera

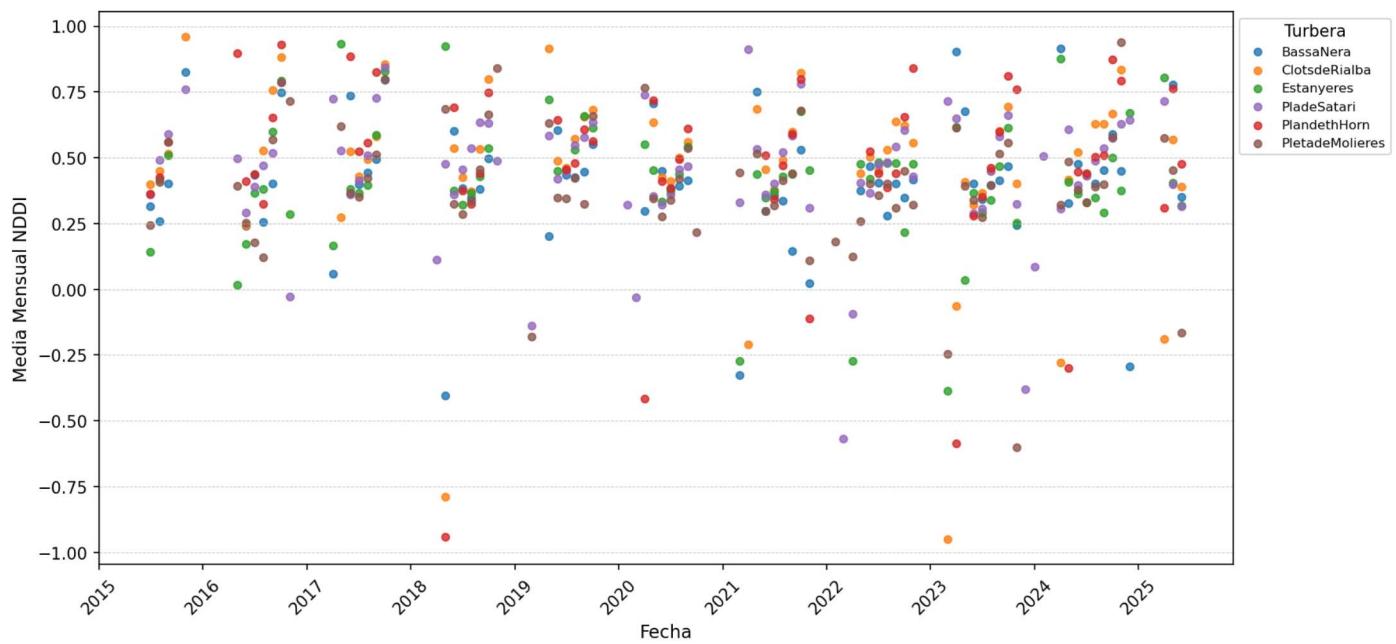


## Variables Dereivadas de NDDI

Media Anual de NDDI por Turbera

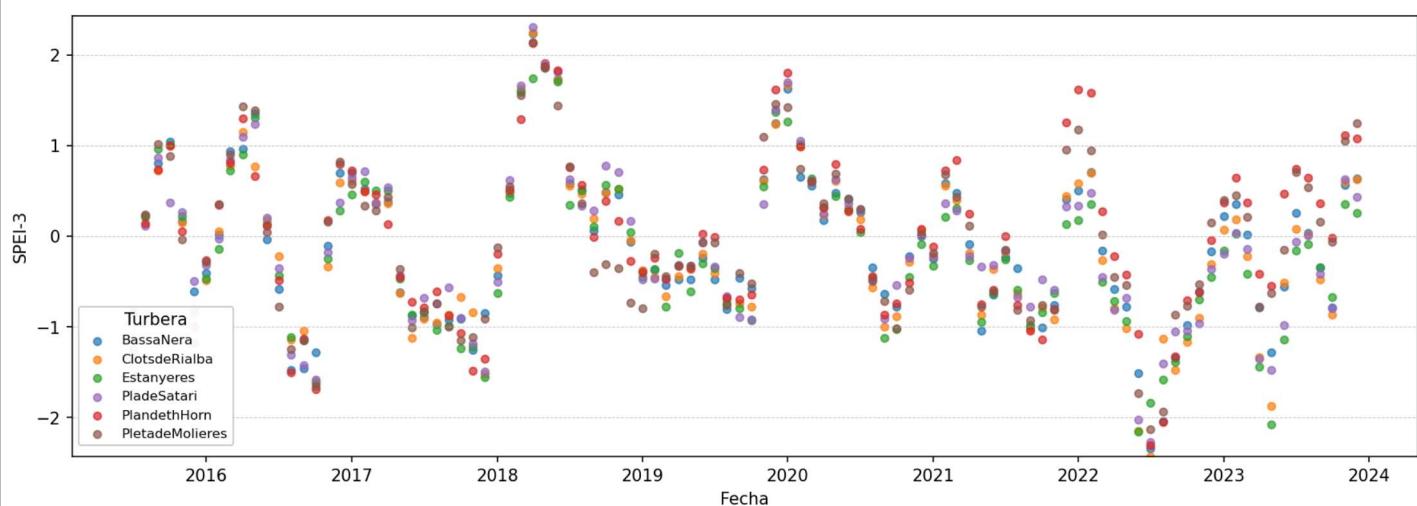


Evolución Mensual del NDDI por Turbera

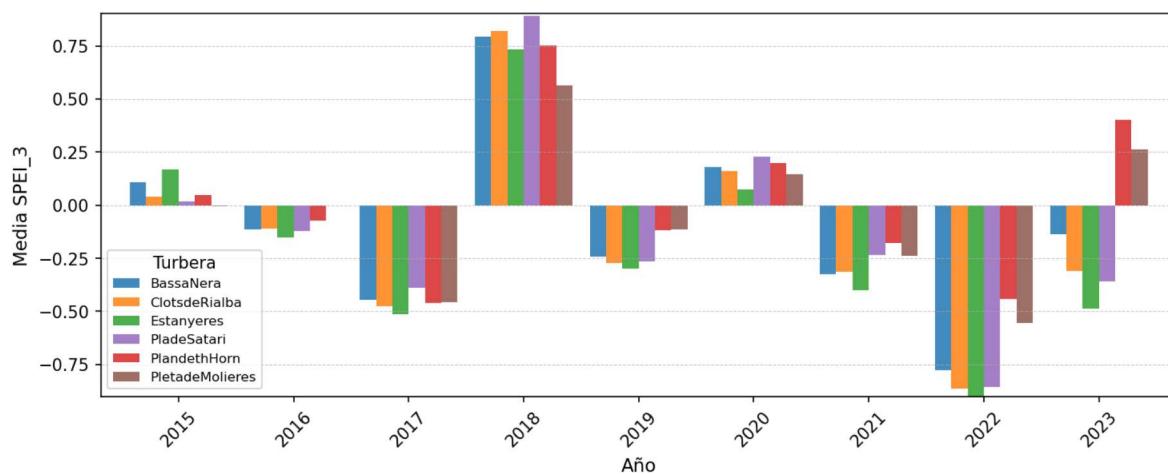


## Variables Derivadas de SPEI3

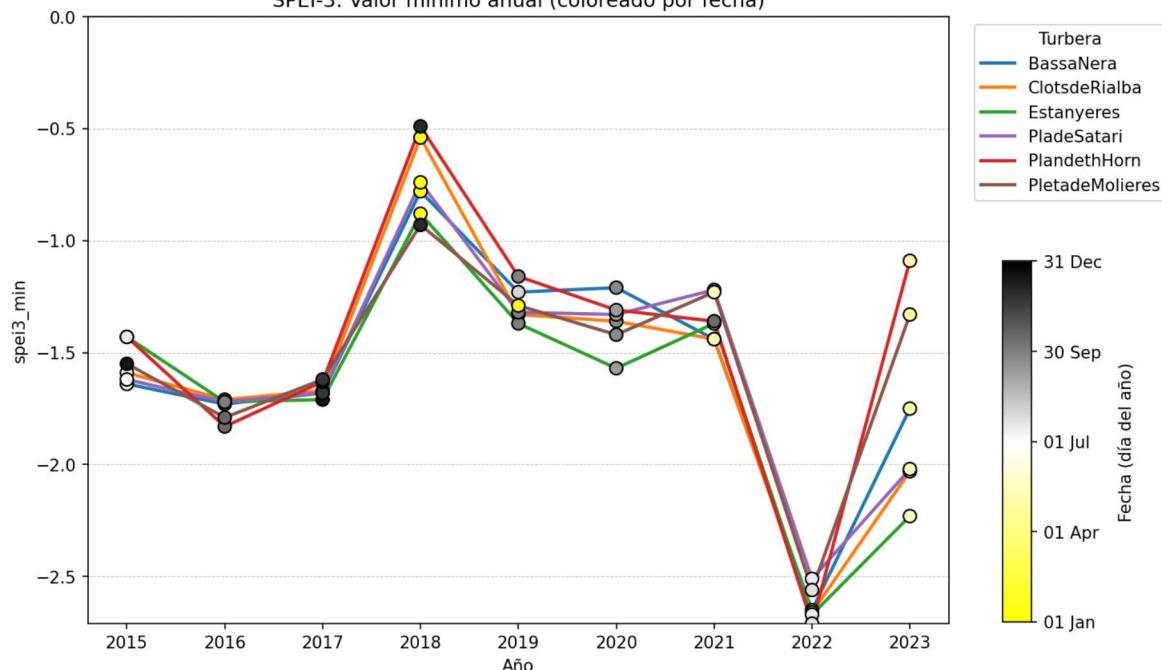
Evolución mensual de SPEI-3



Media anual de SPEI\_3 por turbera

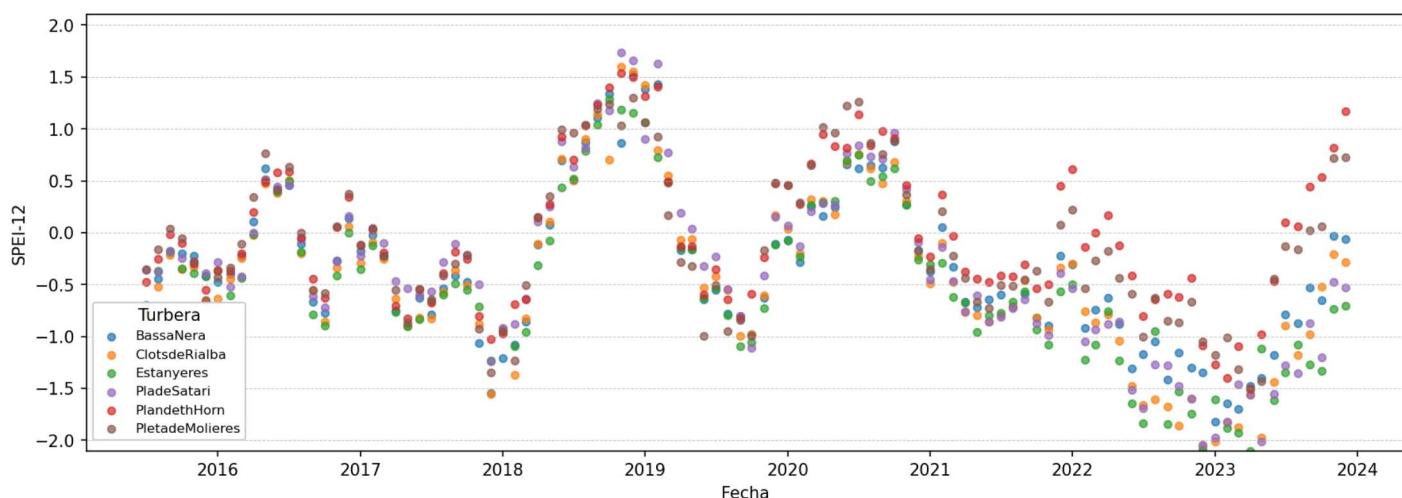


SPEI-3: Valor mínimo anual (coloreado por fecha)

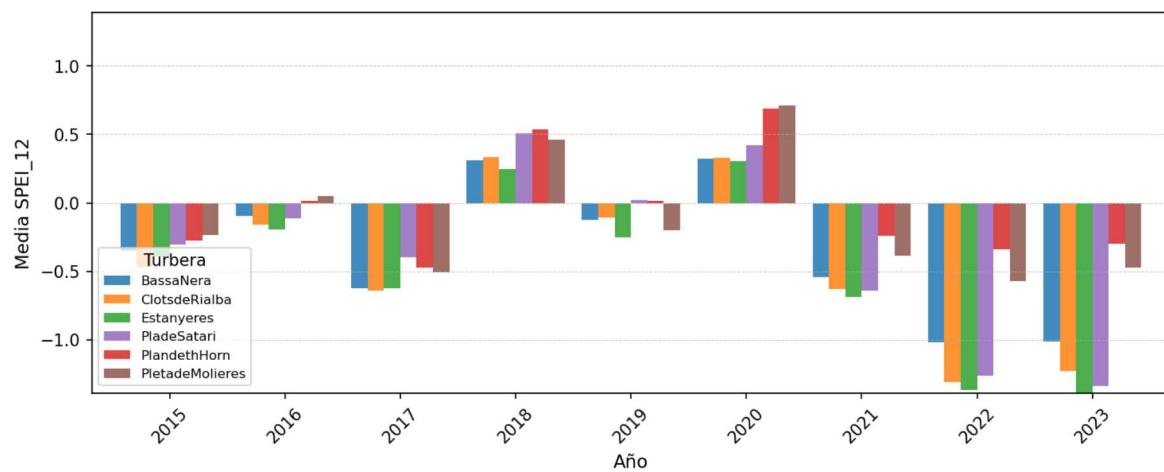


## Variables Derivadas de SPEI12

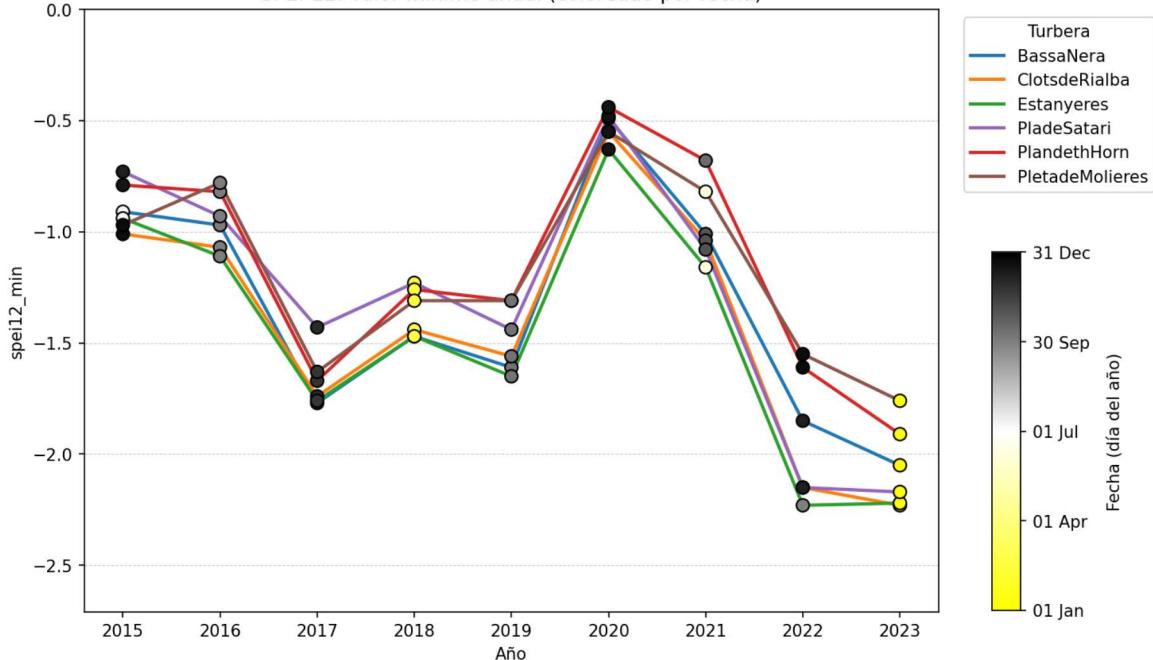
Evolución mensual de SPEI-12



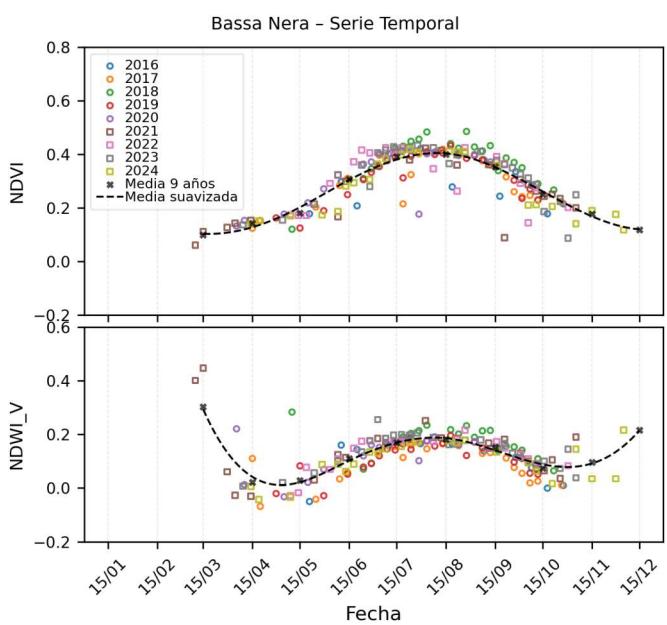
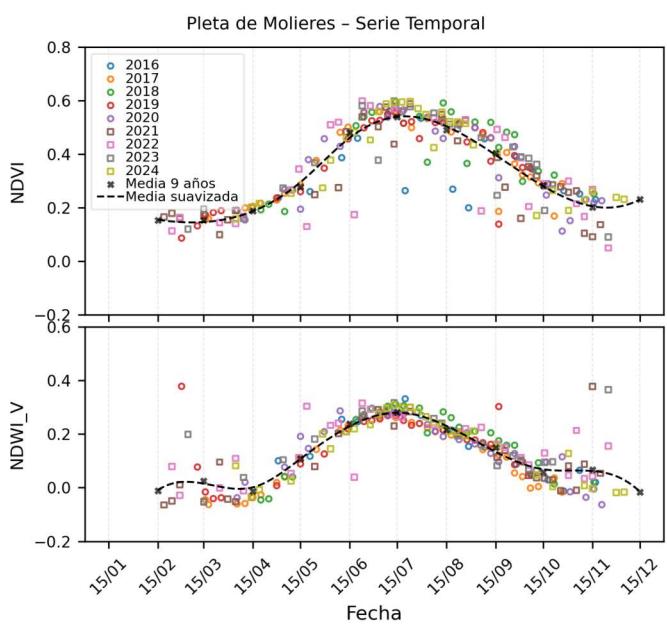
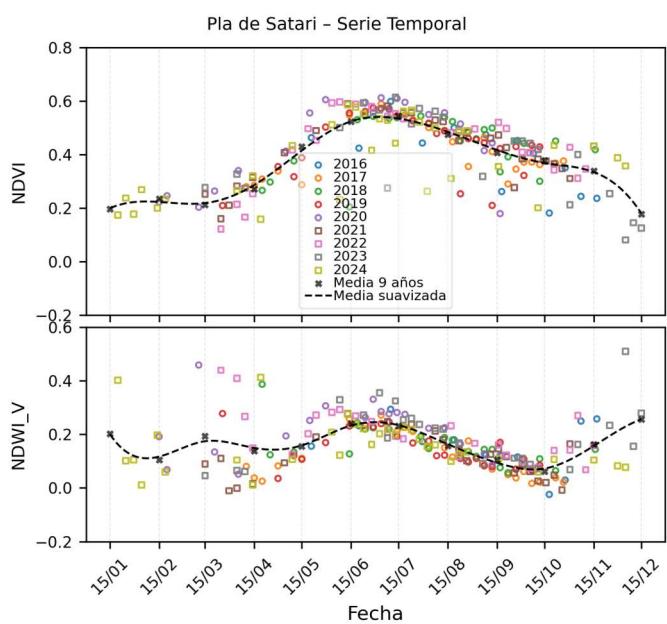
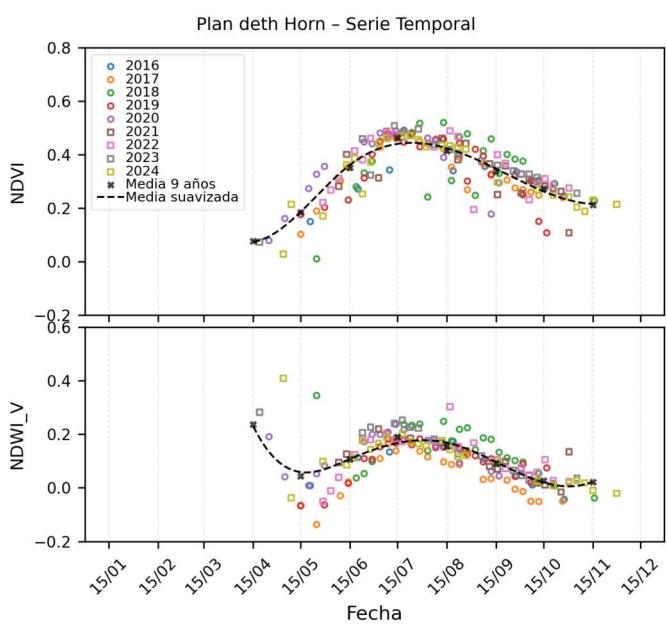
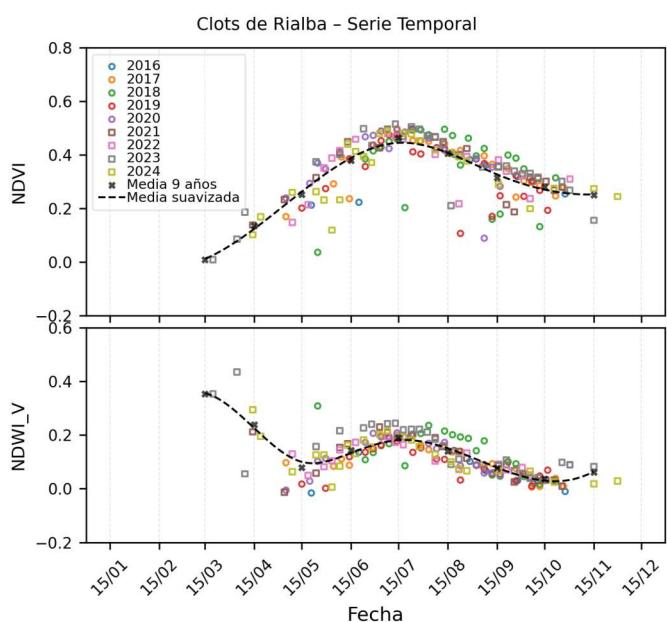
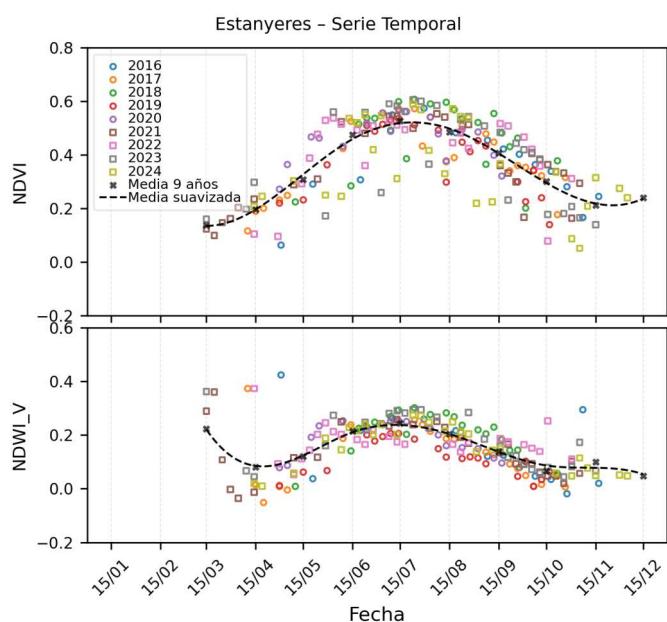
Media anual de SPEI\_12 por turbera



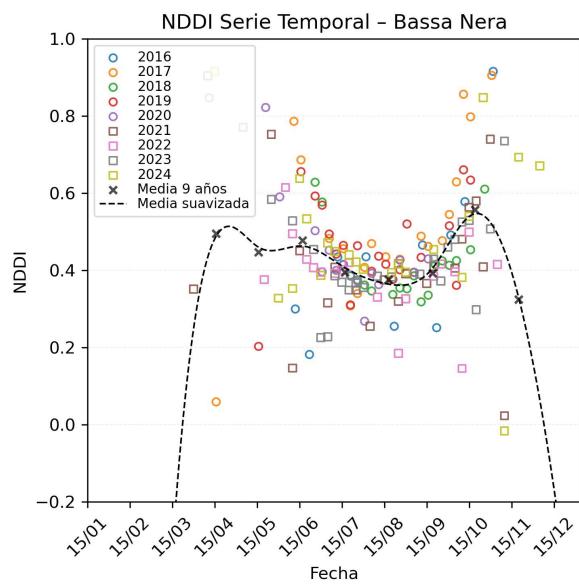
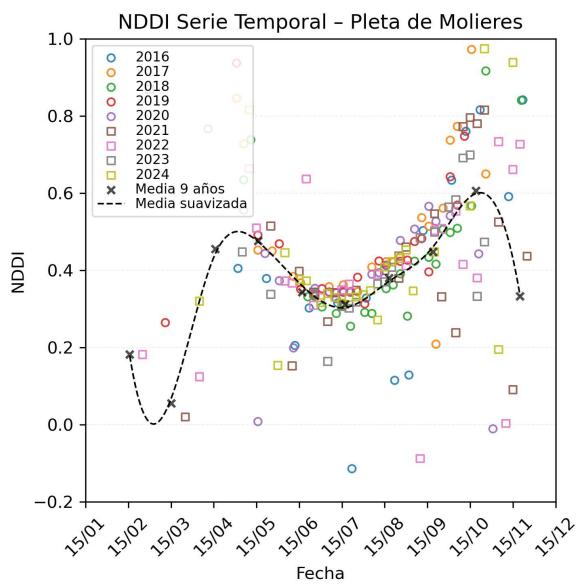
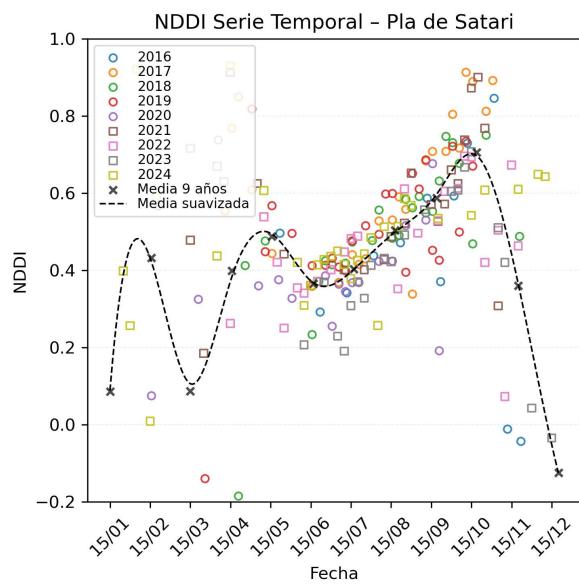
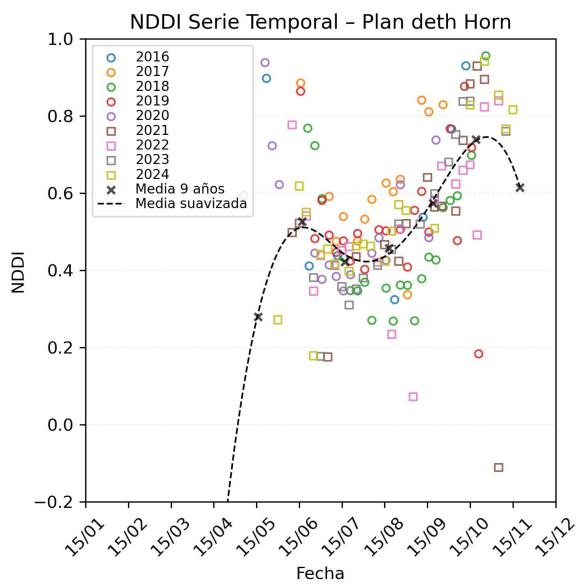
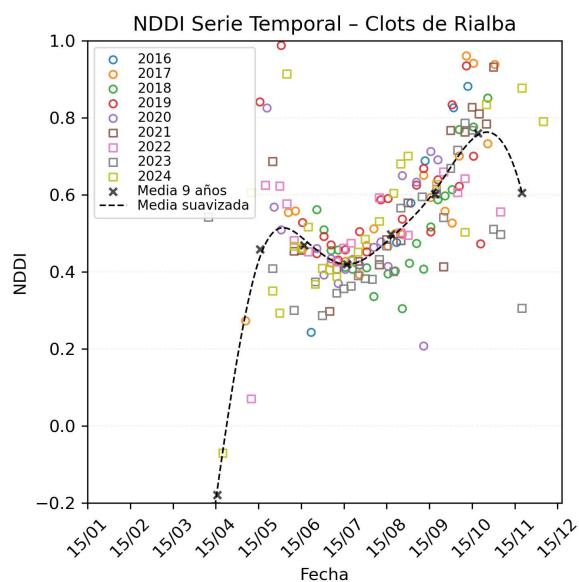
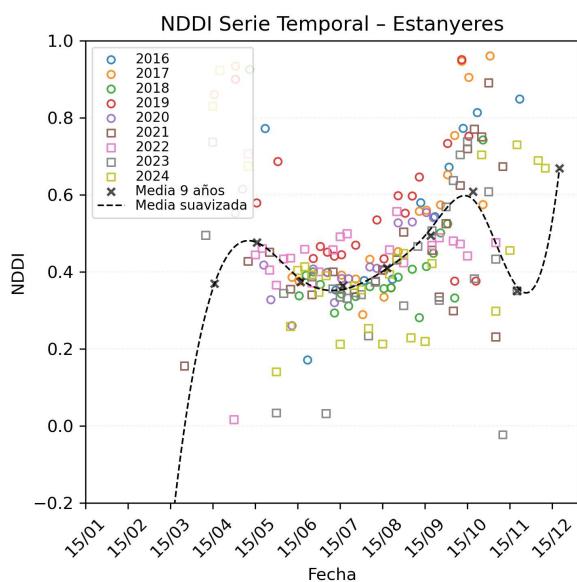
SPEI-12: Valor mínimo anual (coloreado por fecha)



### NDVI y NDWI\_v. Evolución temporal con media de 9 años.



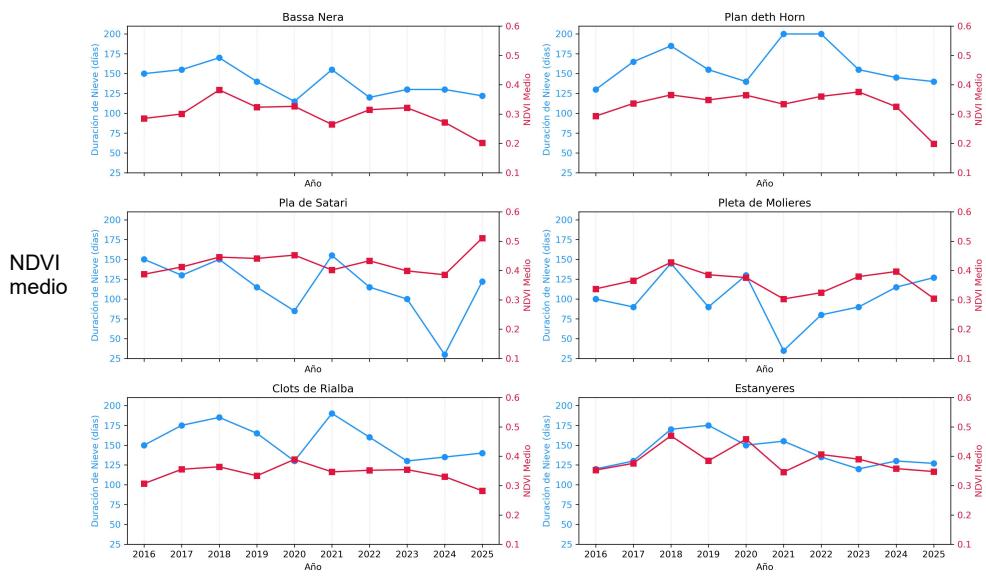
### NDDI. Evolución temporal con media de 9 años.



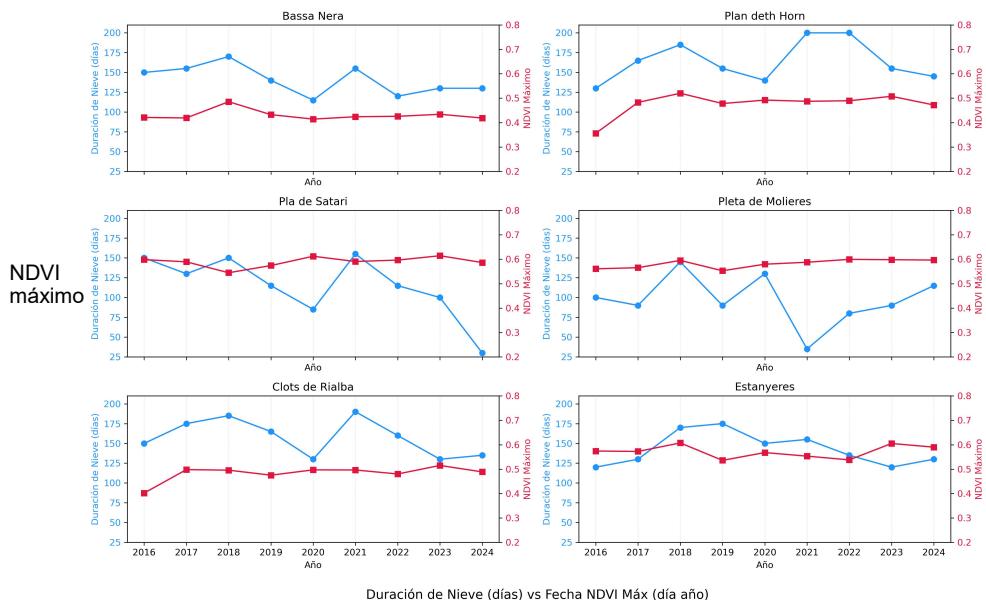
# Correlaciones a doble eje

## Correlaciones a doble eje NDSI (duración de periodo nivoso) vs NDVI

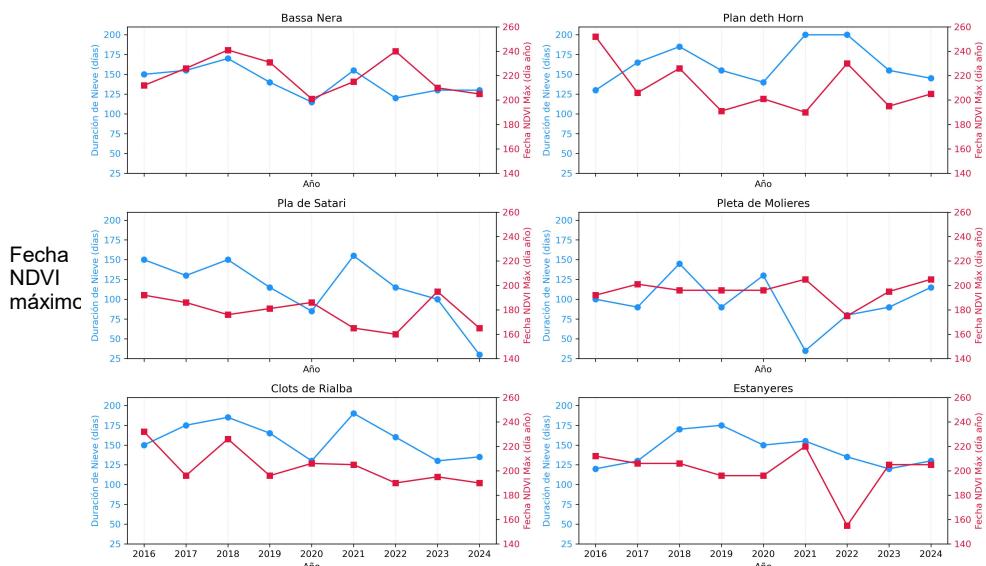
Duración de Nieve (días) vs NDVI Medio



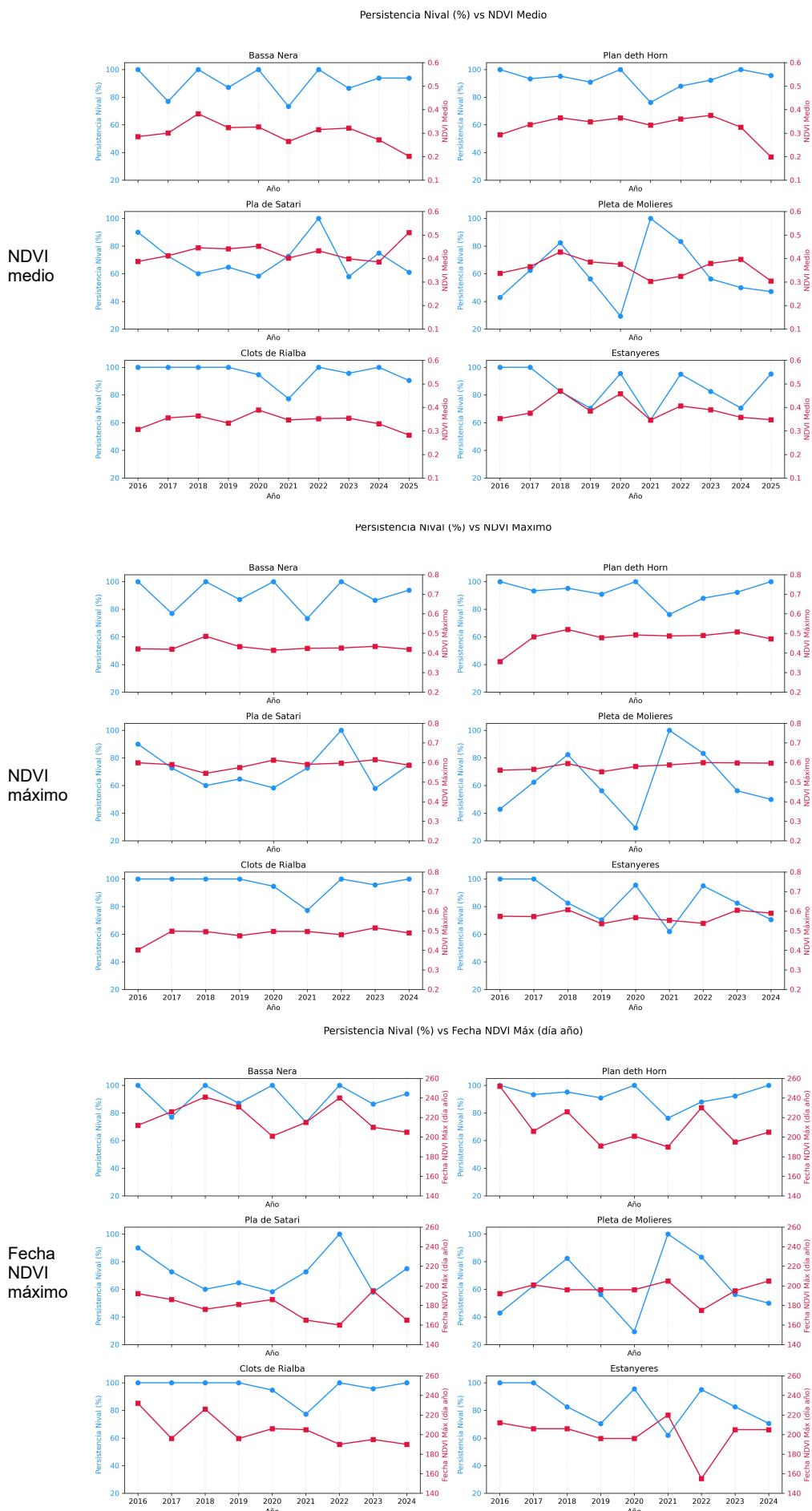
Duración de Nieve (días) vs NDVI Máximo



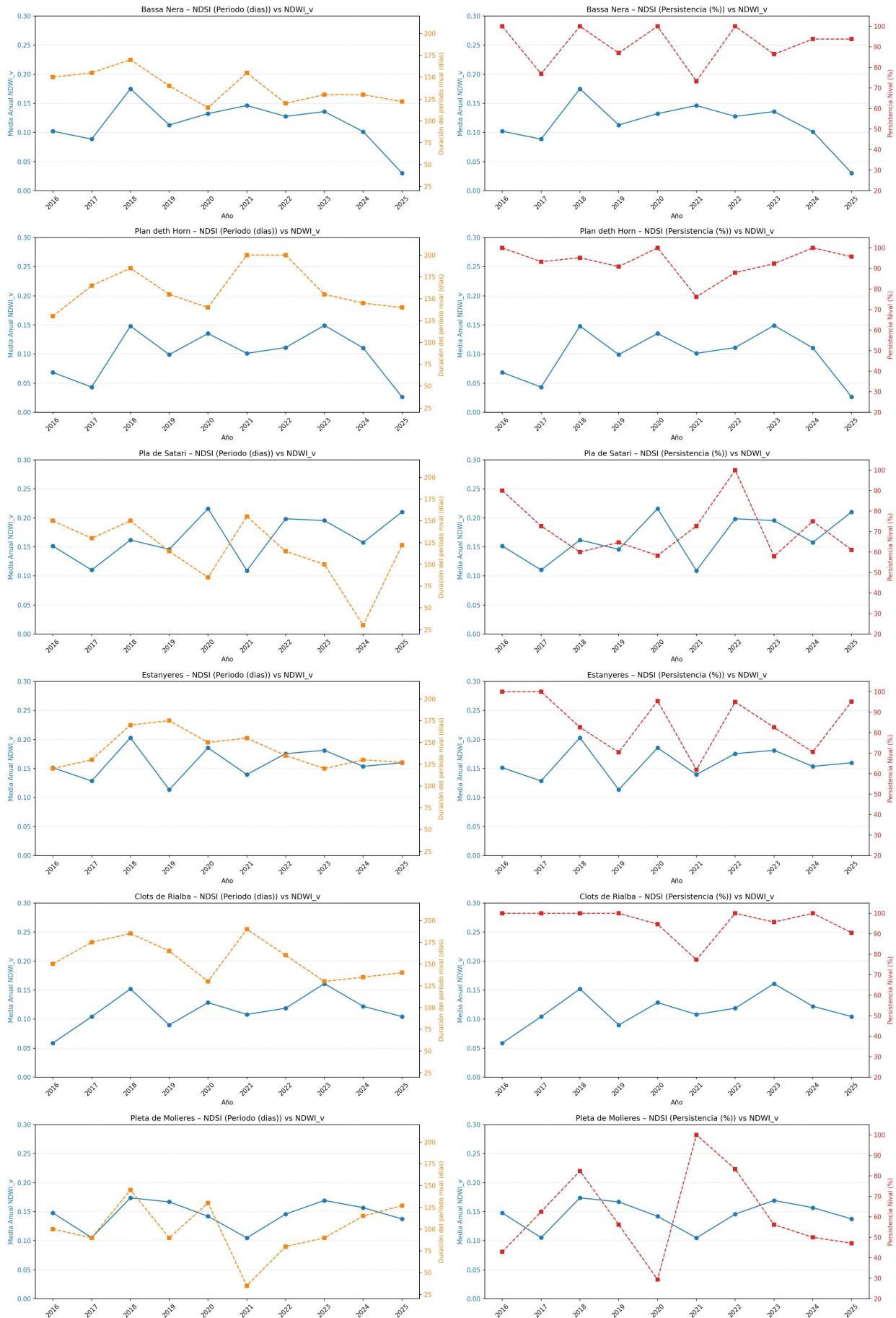
Duración de Nieve (días) vs Fecha NDVI Máx (día año)



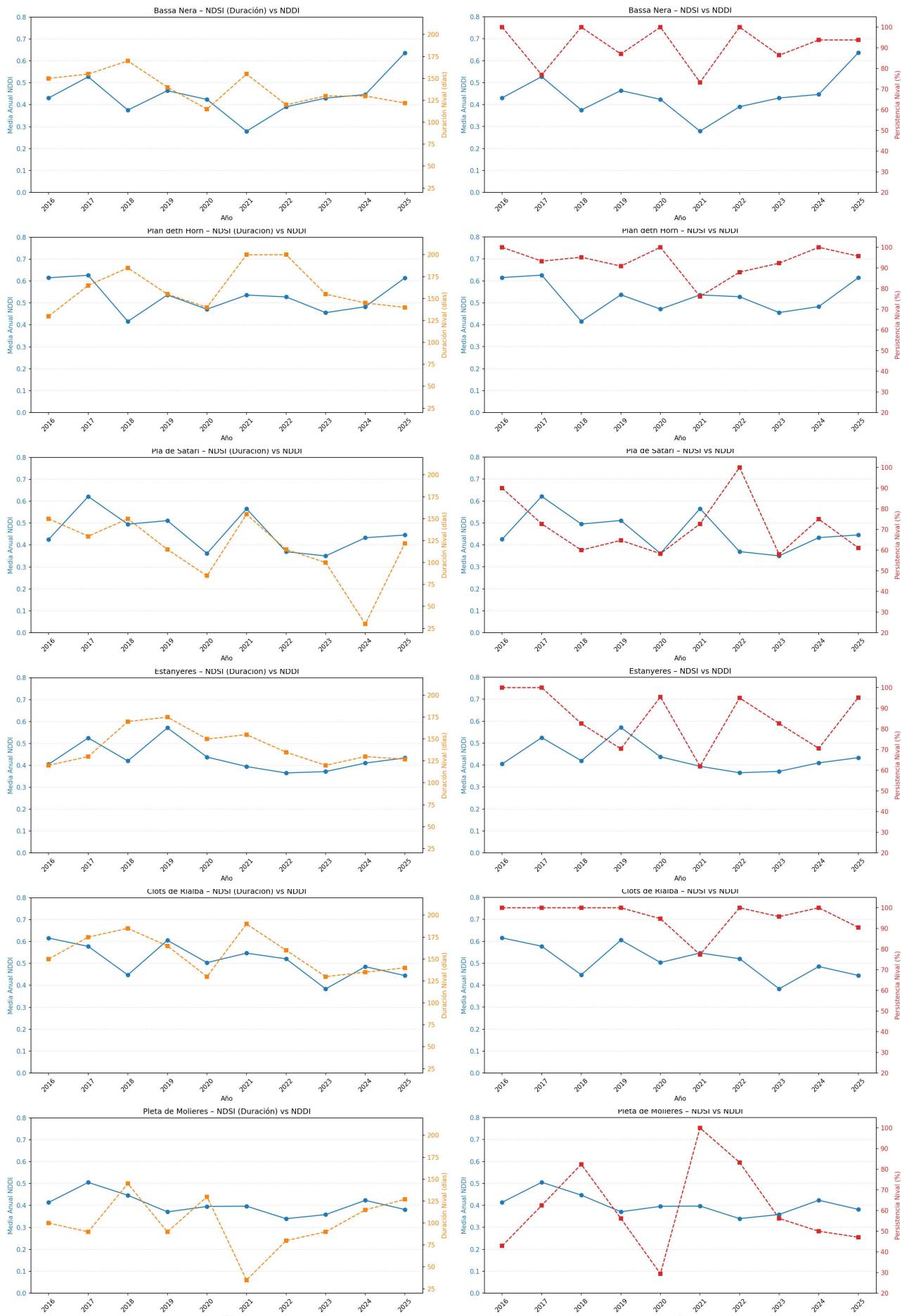
## Correlaciones a doble eje NDSI (Persistencia nival) vs NDVI



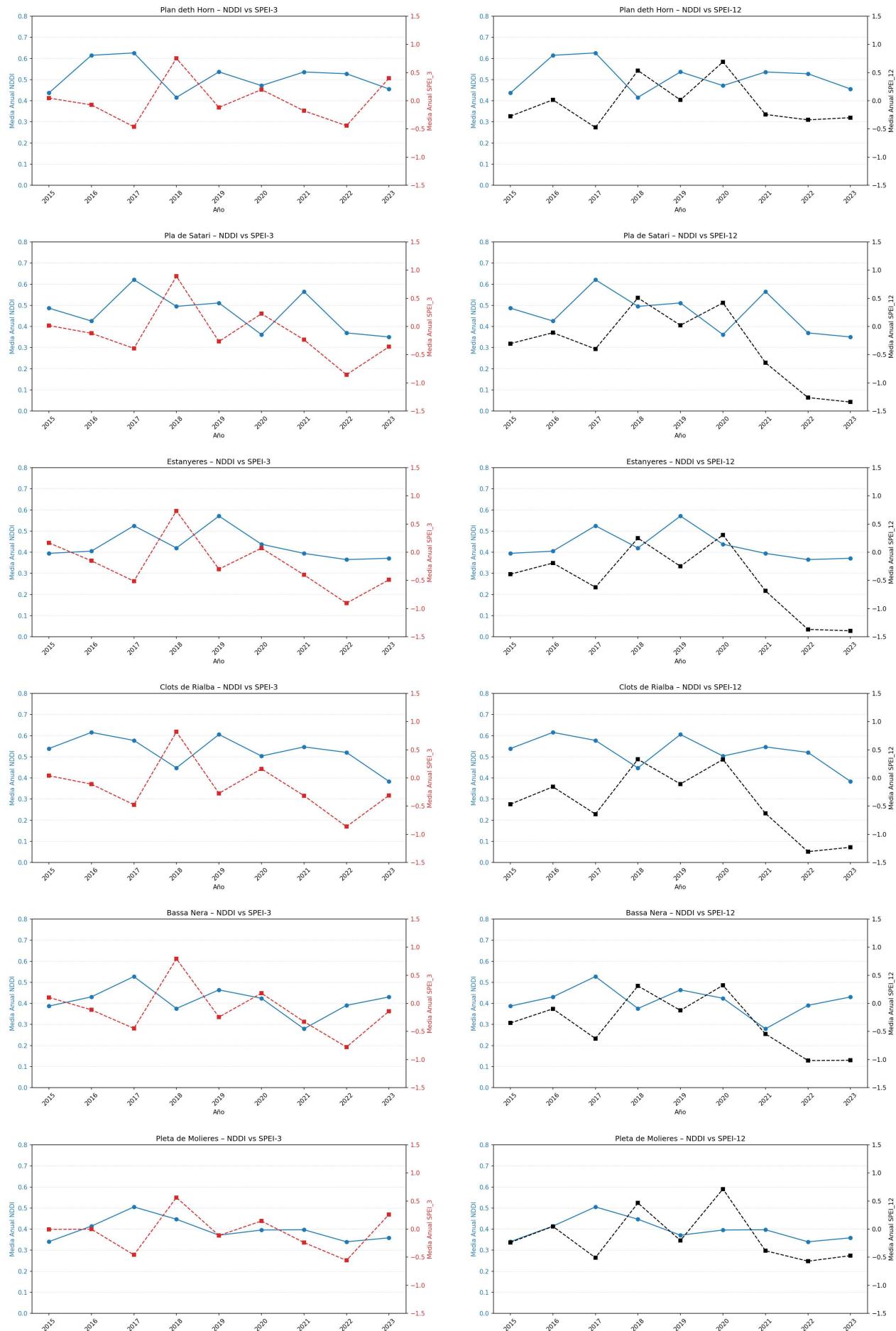
## Correlaciones a doble eje NDSI vs NDWI\_v



## Correlaciones a doble eje NDSI vs NDDI

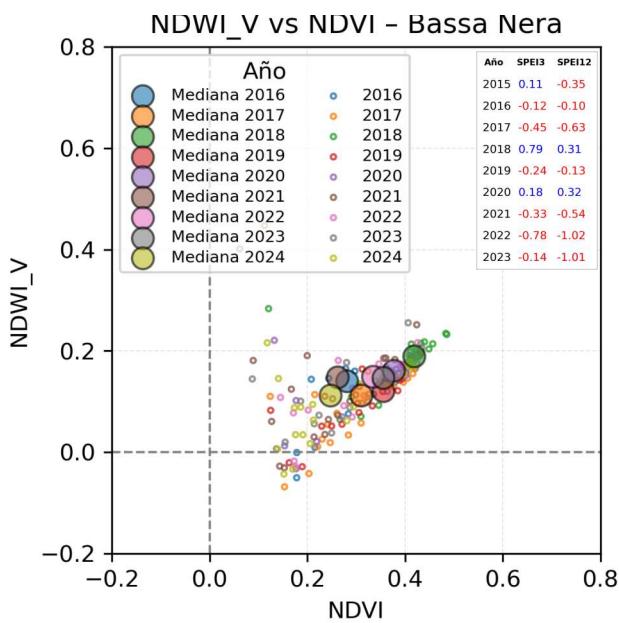
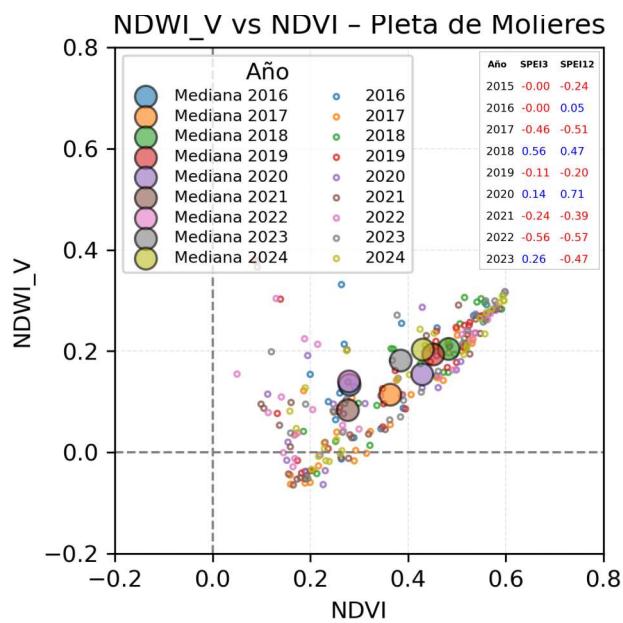
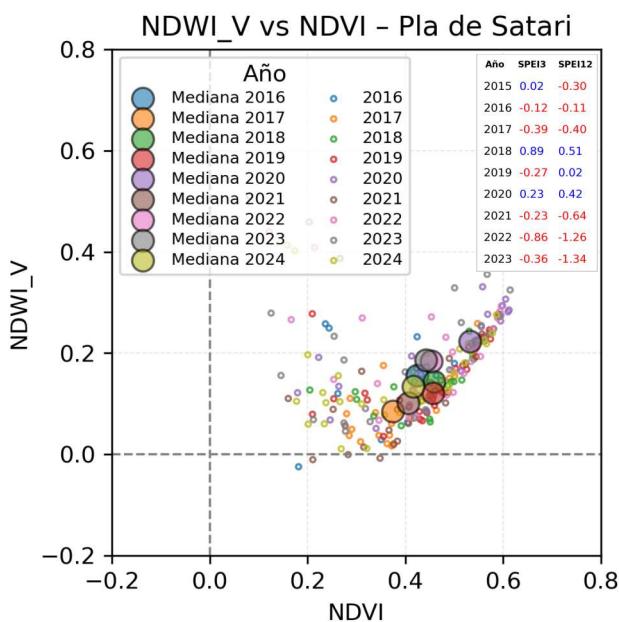
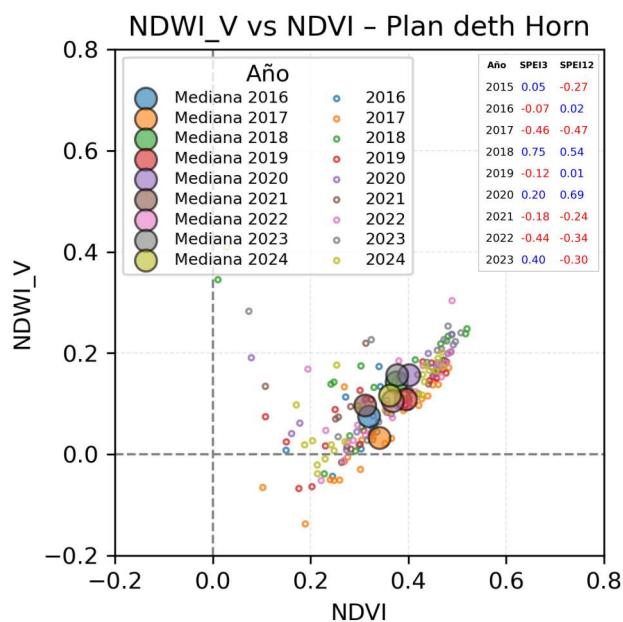
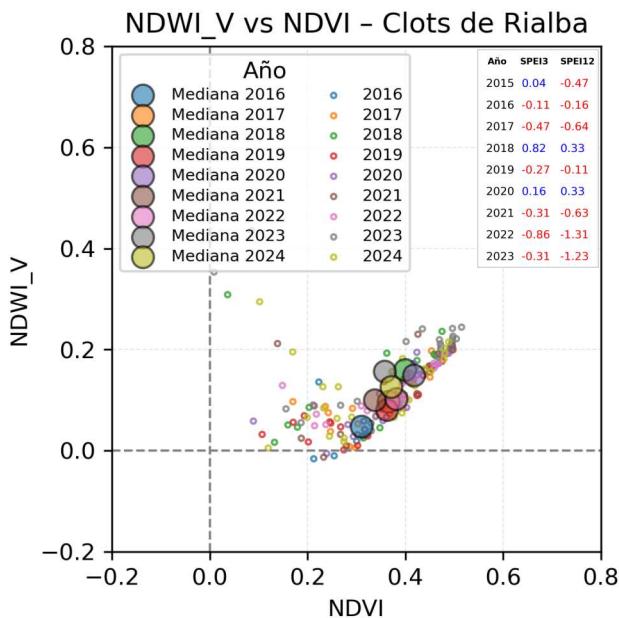
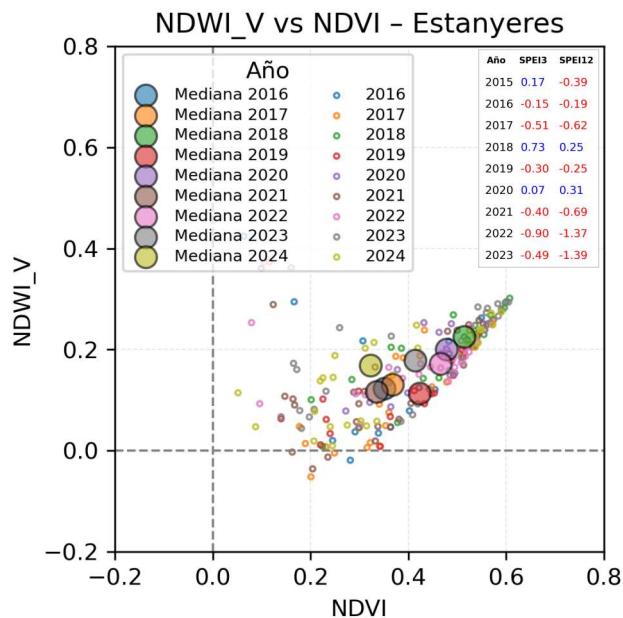


## Correlaciones a doble eje SPEI vs NDDI



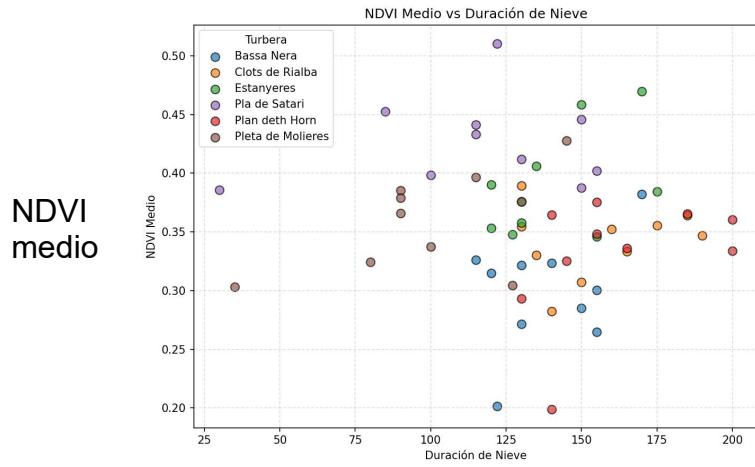
# Correlaciones cruzadas

**Correlaciones**  
**NDWI\_v vs NDVI. (Valor Media anual SPEI)**

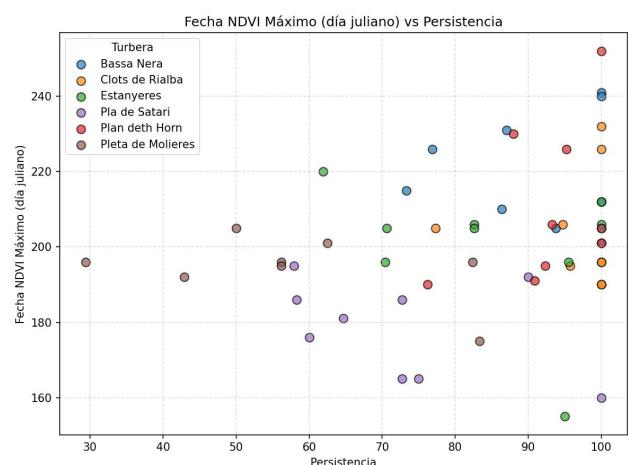
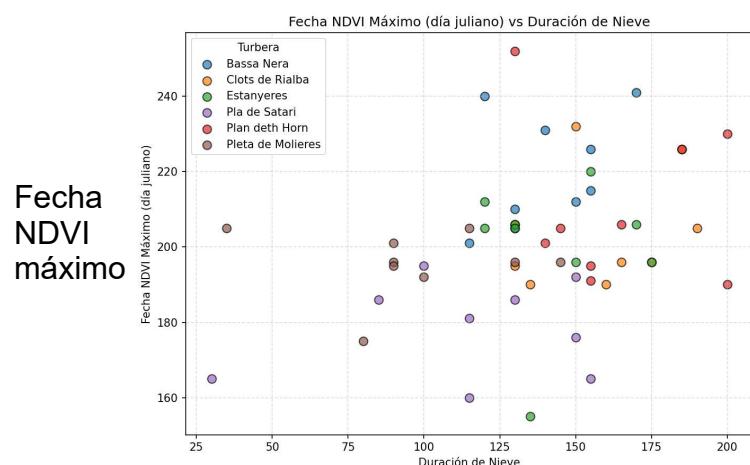
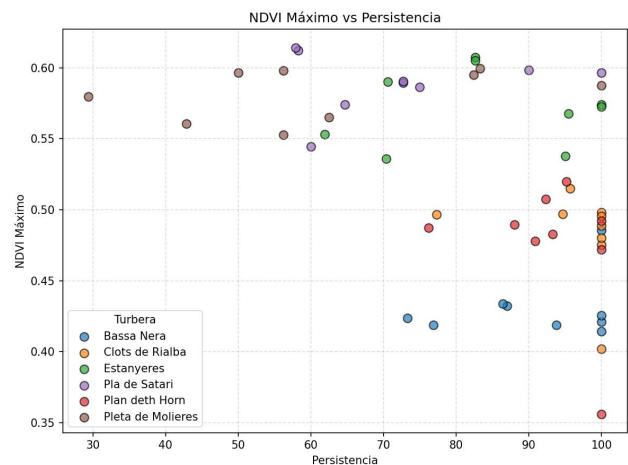
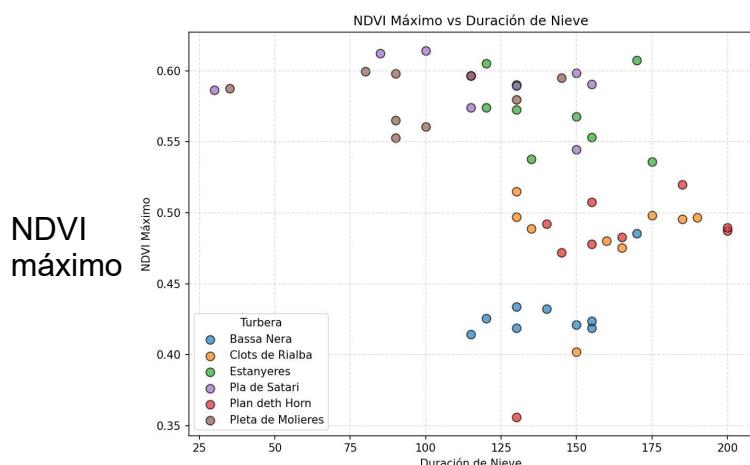
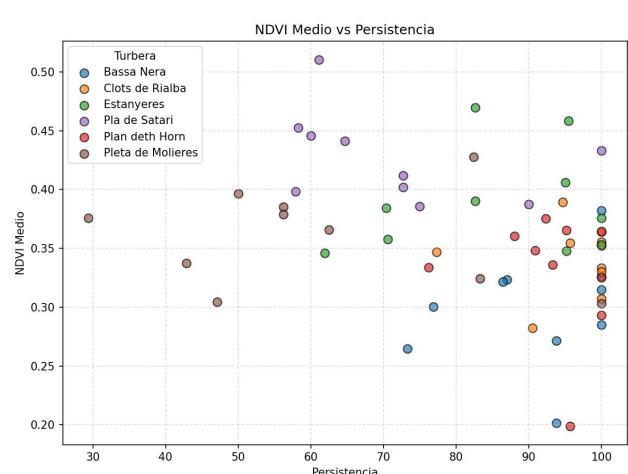


## Correlaciones NDVI vs NDSI

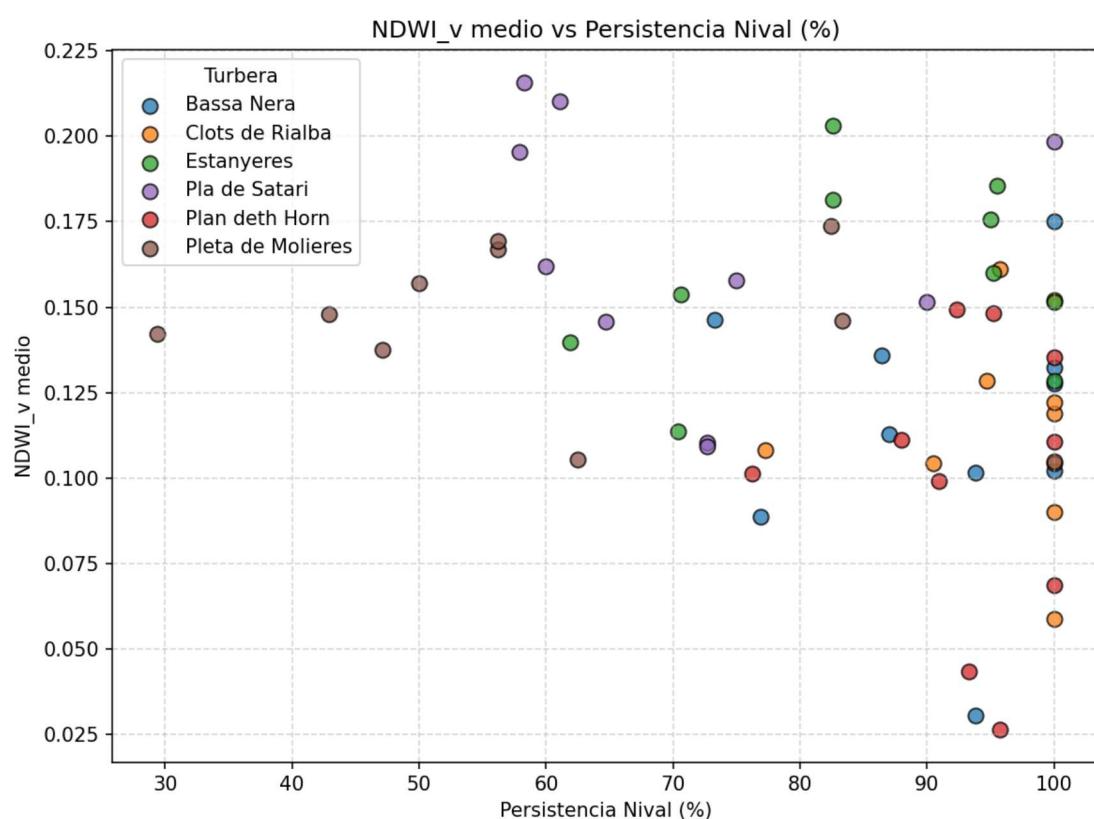
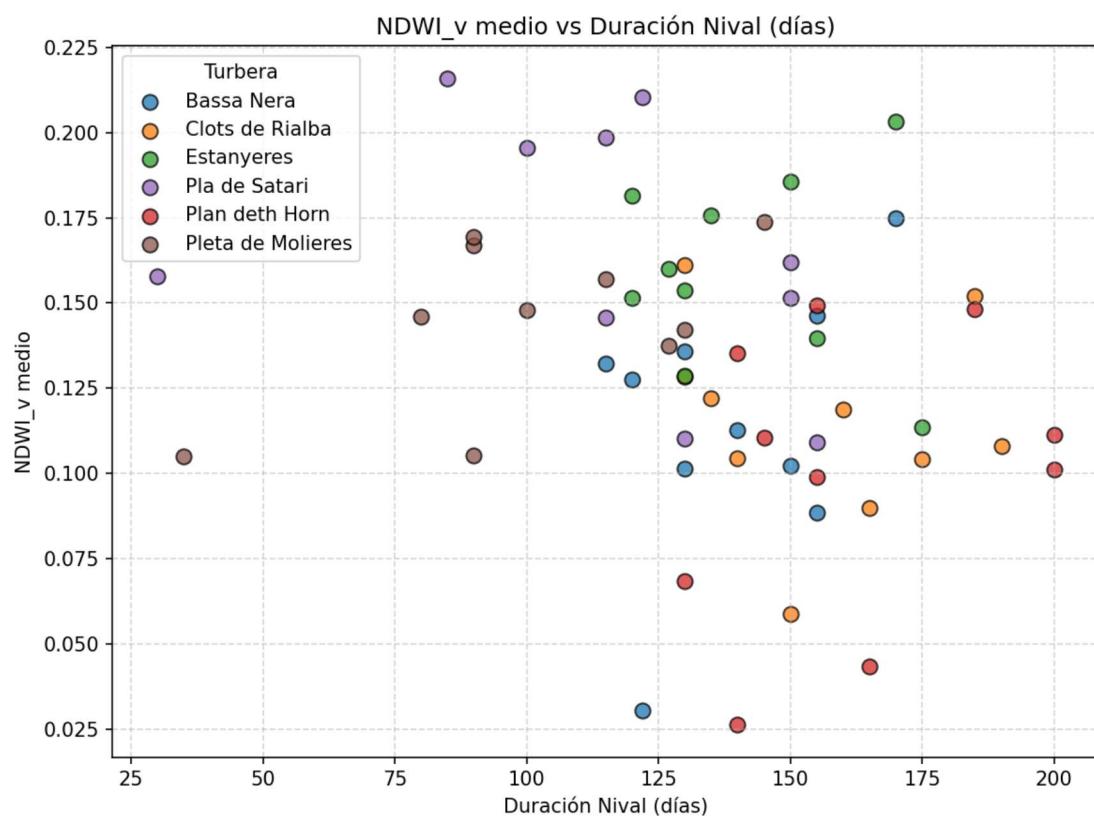
**Duración periodo nivoso**



**Persistencia nival**

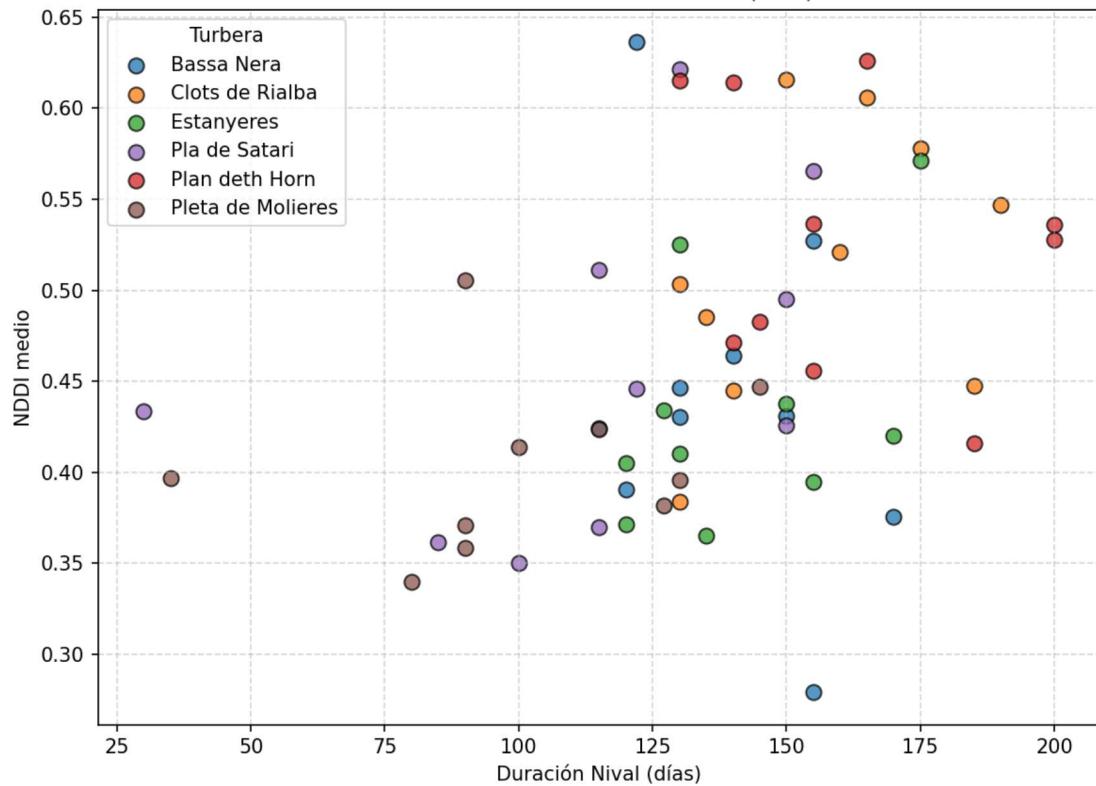


### Correlaciones NDWI\_v vs NDSI

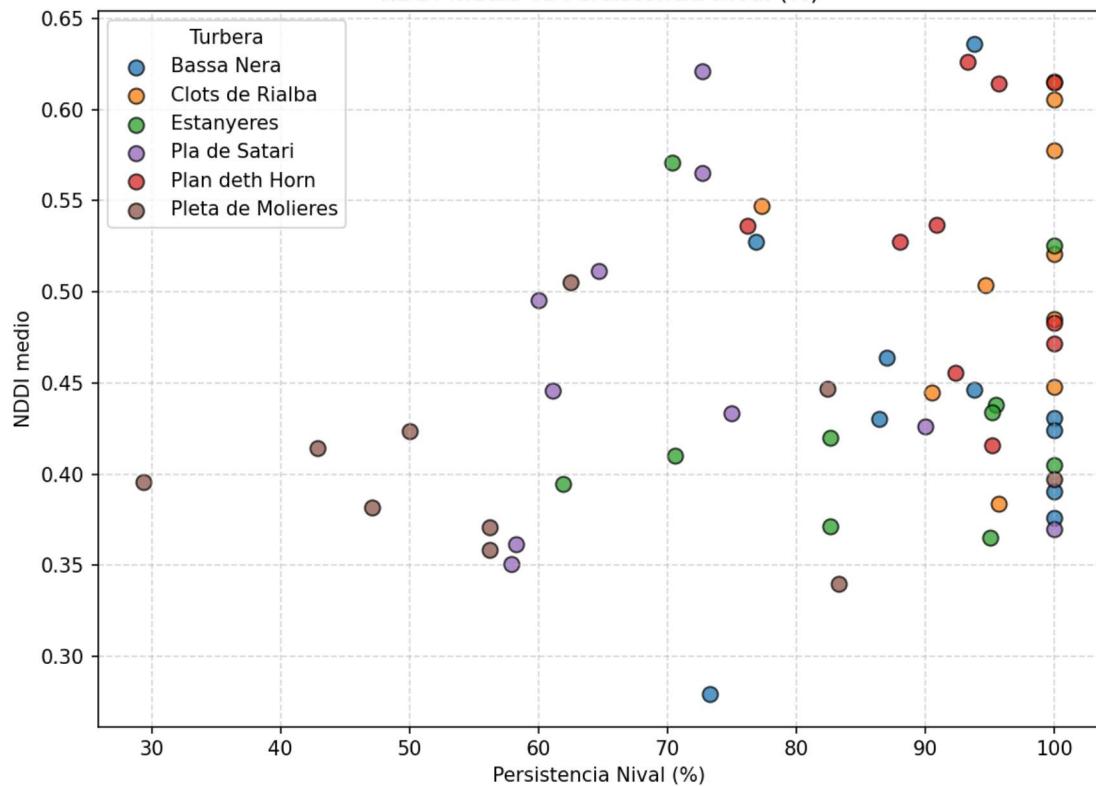


## Correlaciones NDDI vs NDSI

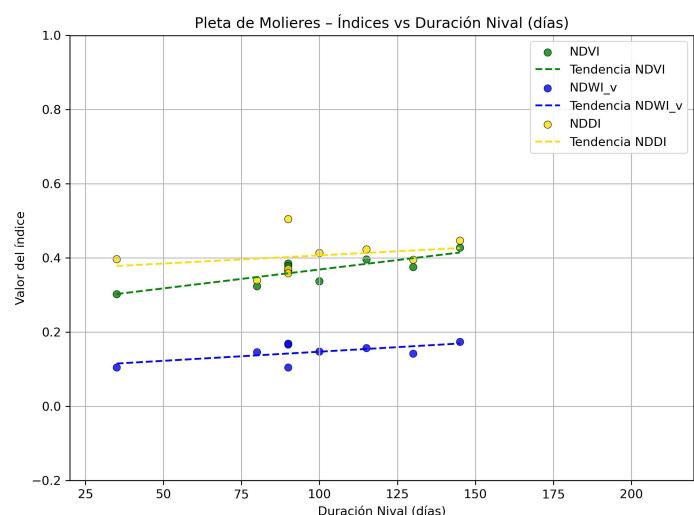
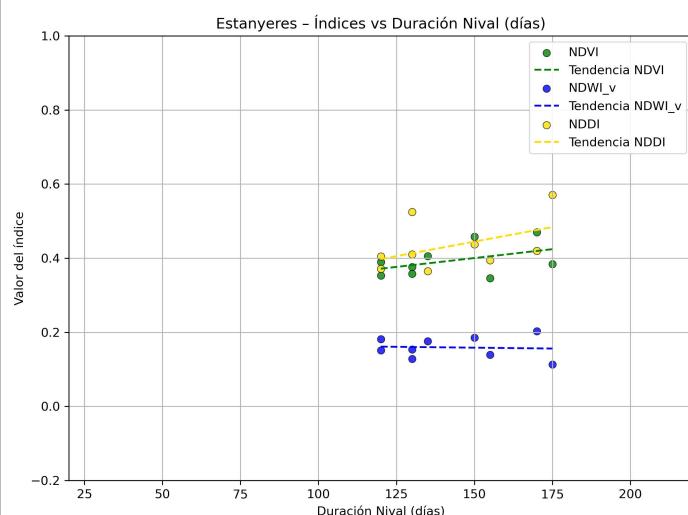
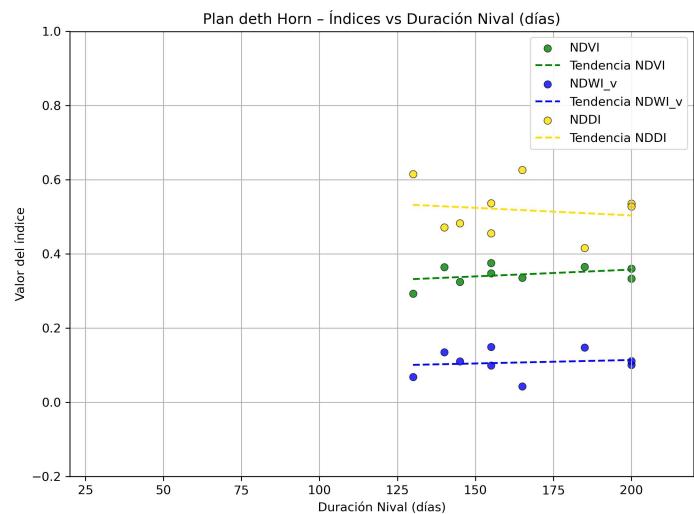
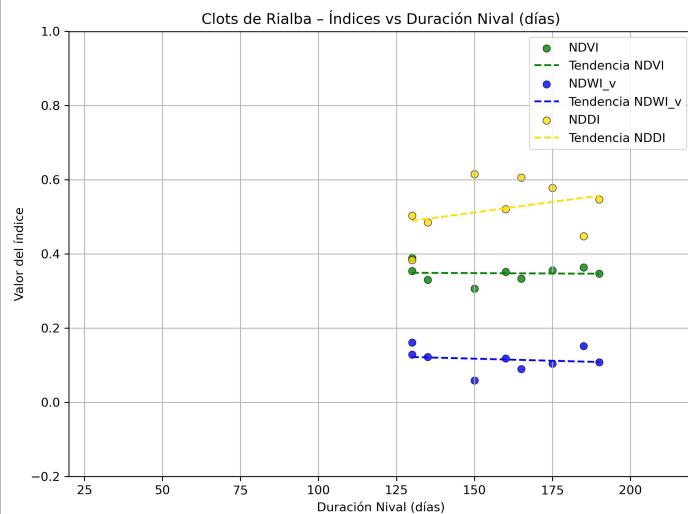
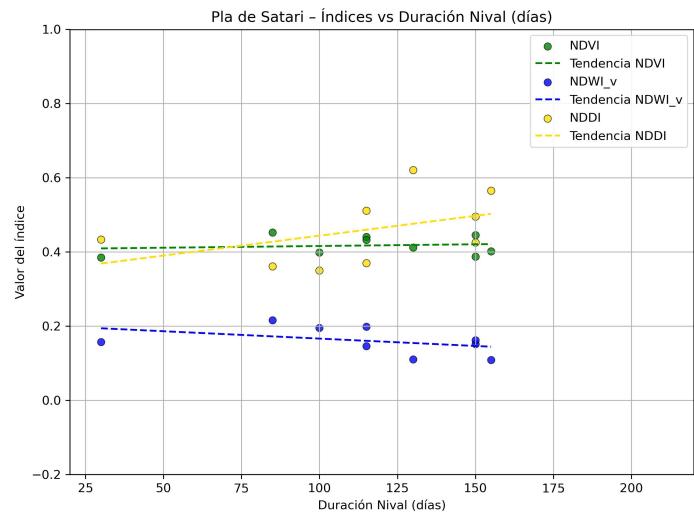
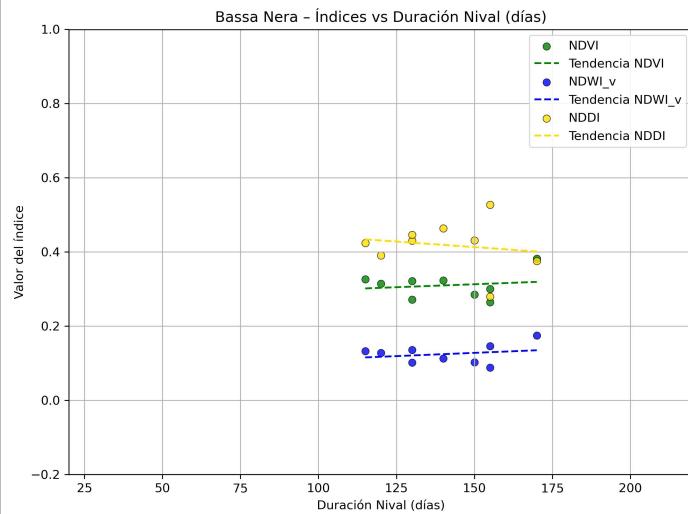
**NDDI medio vs Duración Nival (días)**



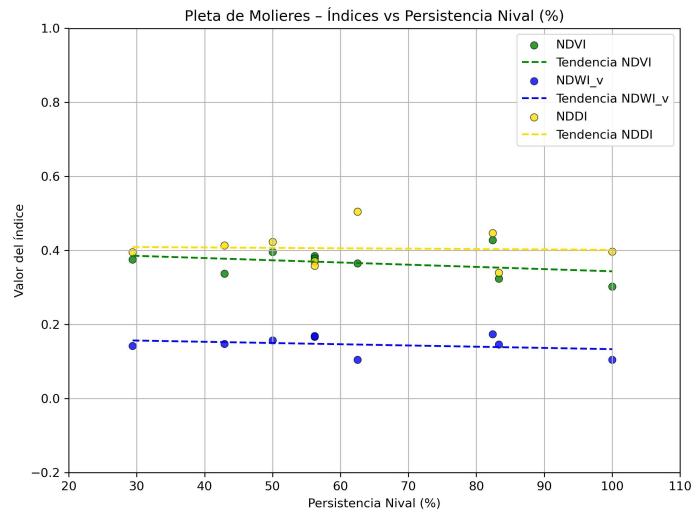
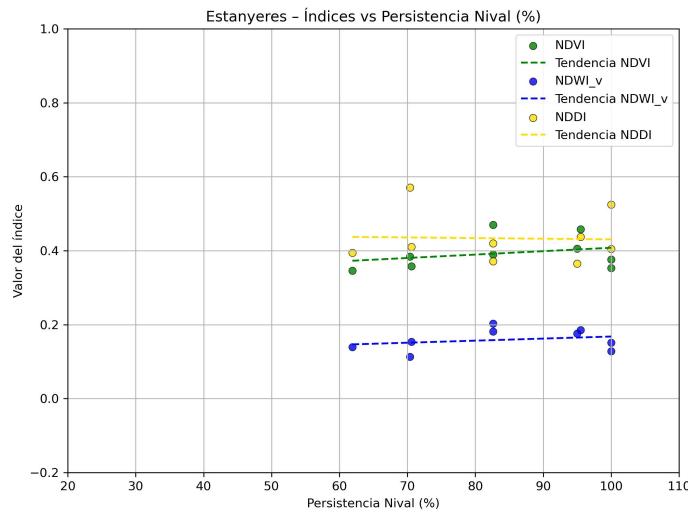
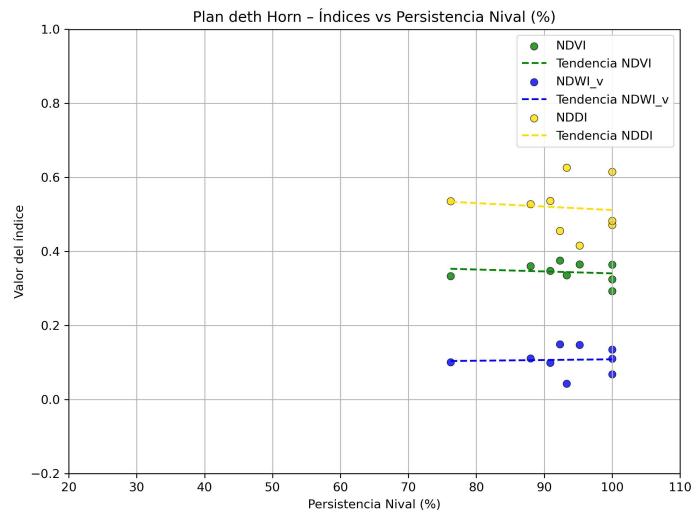
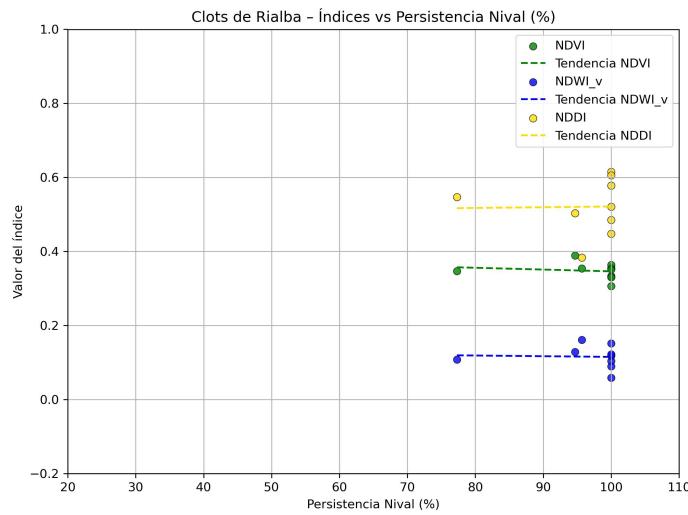
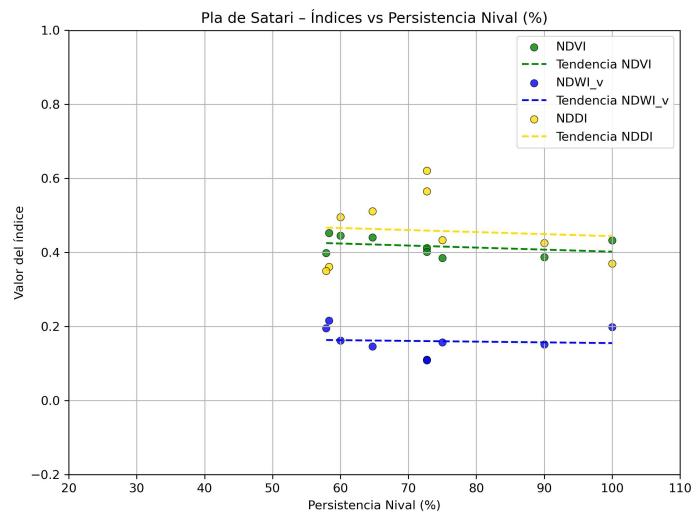
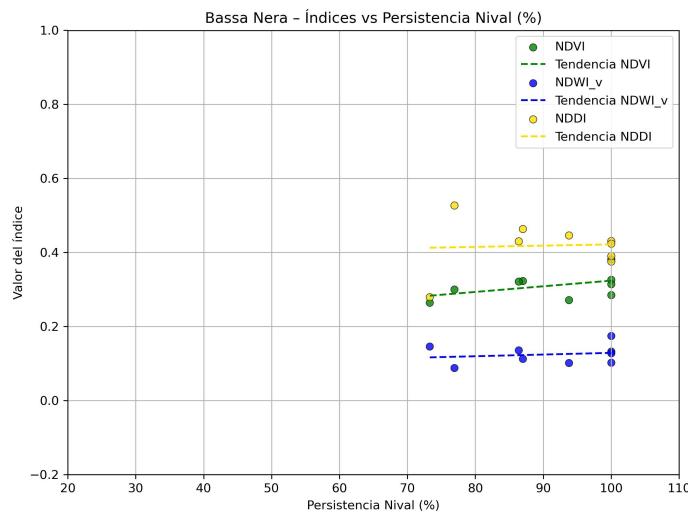
**NDDI medio vs Persistencia Nival (%)**



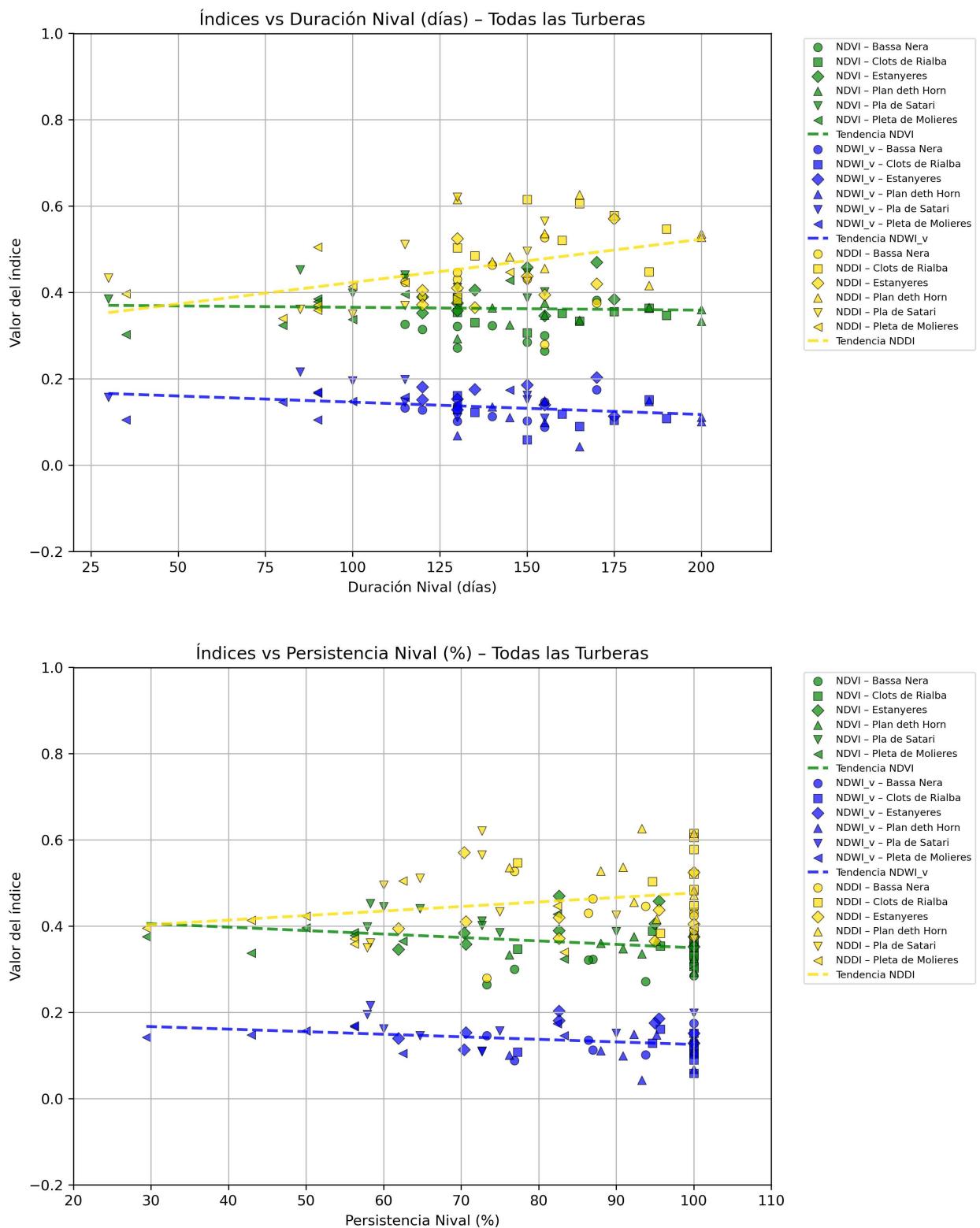
**Correlaciones**  
**Índices de vegetación vs NDSI (duración del periodo de nieve)**  
**Por turbera**



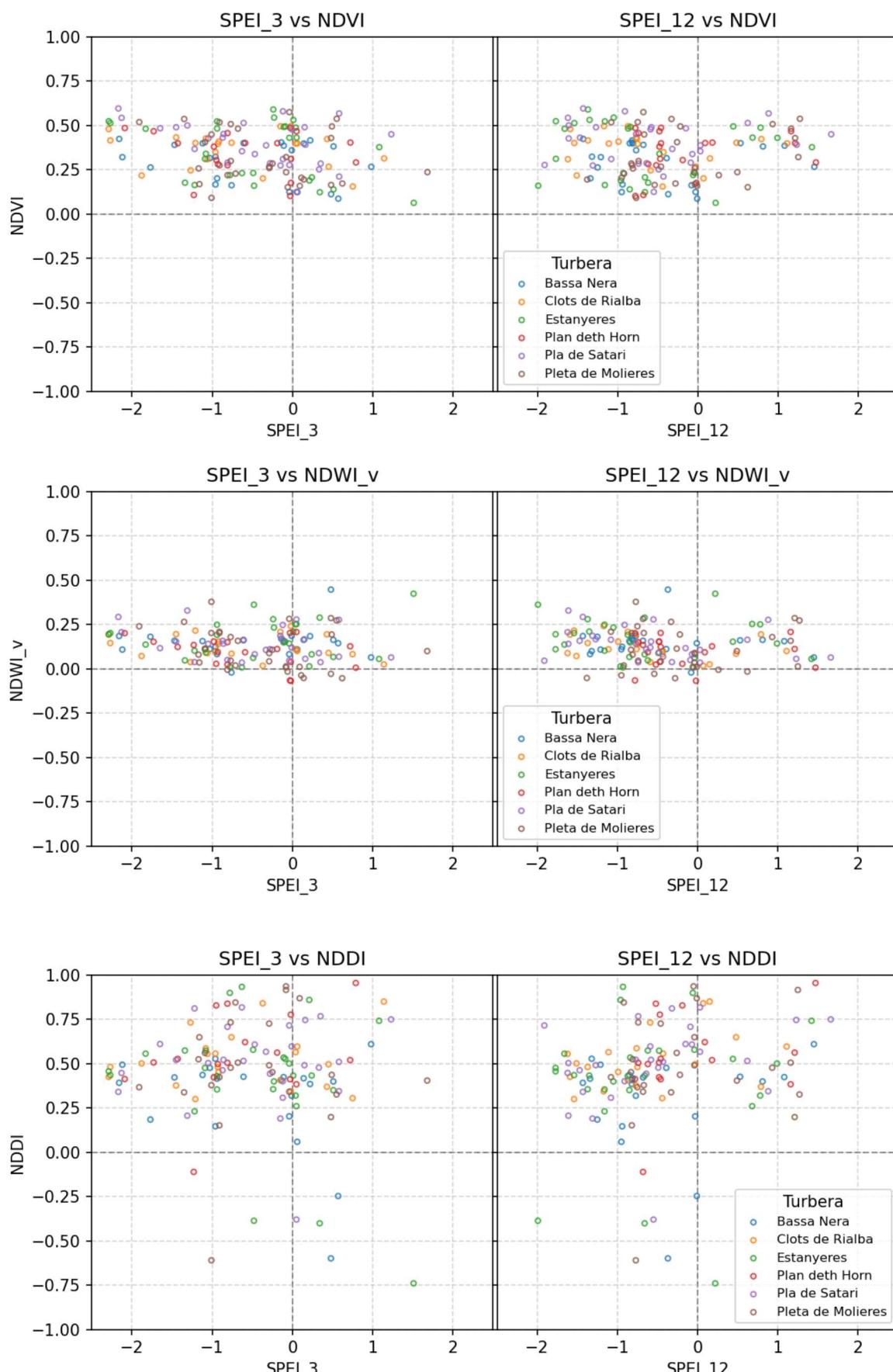
**Correlaciones**  
**Índices de vegetación vs NDSI (Persistencia nival)**  
**Por turbera**



**Correlaciones**  
**Índices de vegetación vs NDSI**  
**Todas las turberas**

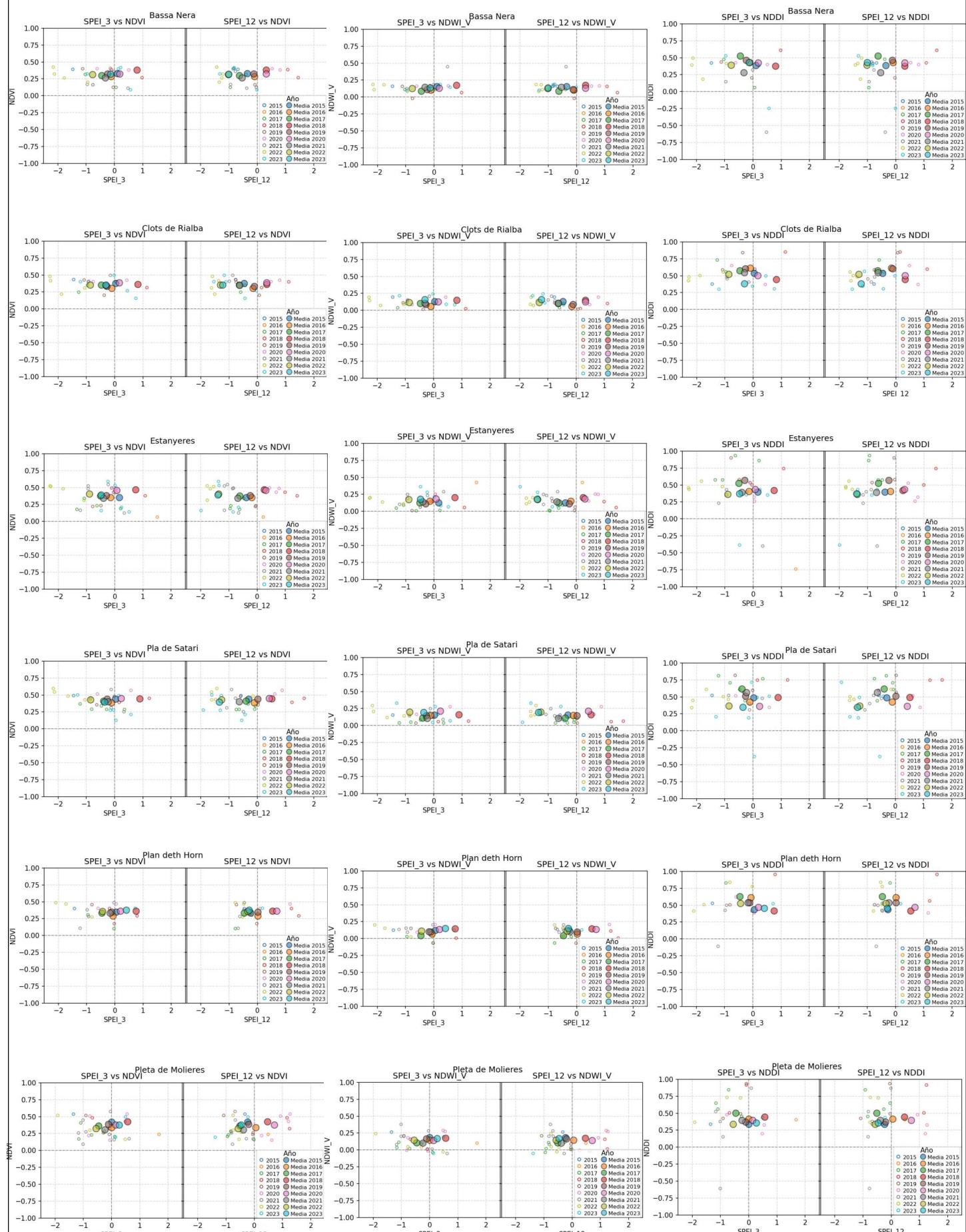


**Correlaciones**  
índices de vegetación vs SPEI 3 y 12 (todos los datos)



## Correlaciones

### Índices de vegetación vs SPEI 3 y 12 (todos los datos y media anual)



**Apéndice V:**  
**Correlación datos de meteorología vs**  
**edáficos e índices espectrales**  
**en Pleta de Molières.**

