

**ESTUDIO DEL CONTENIDO DE
HUMEDAD DEL SUELO EN ZONAS DE
ALTA MONTAÑA MEDIANTE TÉCNICAS
DE TELEDETECCIÓN**

**SOIL MOISTURE ASSESSMENT IN HIGH
MOUNTAIN AREAS BY REMOTE
SENSING TECHNIQUES**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D. DIEGO CRUZ GALVÁN

Dirigido por:

Dr. D. FRANCISCO CARREÑO CONDE Y D. JAVIER LILLO RAMOS

Alcalá de Henares, a 8 de JUNIO de 2020

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todos los que, directa o indirectamente, han hecho que sea posible la realización de este Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, a mis tutores, Francisco Carreño Conde y Javier Lillo Ramos, por su apoyo, y posibilitar la presentación de este trabajo.

A mi familia, por su cariño y comprensión, y por apoyarme siempre.

A mis amigos, especialmente a Laura por sus consejos y ayuda,

A mis compañeros del máster, por hacer este curso mucho más ameno, y en especial a Alejandro, por ayudarme a resolver las dudas que me hayan surgido.

A los profesores que nos han dado clase durante el curso, por habernos aportado tantos conocimientos en tan poco tiempo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ABREVIATURAS.....	7
RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. OBJETIVOS	17
4. METODOLOGÍA	18
4.1. Zona de estudio	18
4.2. Datos de precipitación.....	19
4.3. Datos de satélites.....	20
4.3.1. Sentinel-1	20
4.3.2. Sentinel-2	26
4.4. Tratamiento de datos.	28
4.4.1. NDVI	28
4.4.2. Capa de puntos	30
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
5.1. Variación de la retrodispersión a lo largo de un año en períodos secos y húmedos.....	32
5.2. Determinar cómo afecta la cobertura nival a los resultados.....	34
5.3. Variación de la retrodispersión durante los meses cálidos.....	36
5.4. Áreas de influencia de la cobertura nival sobre la retrodispersión.	38
6. CONCLUSIONES	40
7. BIBLIOGRAFÍA	41
8. ANEXOS	45
8.1. Anexo I. Tablas.	45
8.2. Anexo II. Gráficas.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Subzonas y flujos en la Zona No Saturada (Figura tomada de los apuntes del profesor Javier Lillo, URJC. Adaptada de Alley et al., 1999)	10
Figura 2. Fuentes de dispersión: 1) dispersión por volumen de la copa de los árboles, 2) dispersión directa con el tronco de los árboles, 3) dispersión directa con el suelo, 4) el tronco y el suelo, 5a) la copa y el suelo, 5b) el suelo y la copa (Fuente: NASA).	16
Figura 3. Zona de estudio.....	19
Figura 4. Esquema procesado SNAP.....	21
Figura 5. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de corregir la órbita del satélite (15/03/2019).....	22
Figura 7. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de aplicar la corrección radiométrica (15/03/2019).	23
Figura 8. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de corregir el moteado o speckle (15/03/2019).....	24
Figura 9. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de corregir la distorsión geométrica (15/03/2019).	25
Figura 10. Imagen Sentinel-1 del 15/03/2019.....	26
Figura 11. Imagen Sentinel-2 del 01/01/2019.....	28
Figura 12. Imagen NDVI del 01/01/2019.	30
Figura 13. Localización de los puntos de muestreo para las diferentes coberturas.	31
Figura 13. Comportamiento de cultivos frente a las otras zonas del estudio.	32
Figura 14. Períodos secos y húmedos del intervalo temporal estudiado.	33
Figura 15. Valores de retrodispersión en función de la precipitación en períodos secos y húmedos.	33
Figura 16. Coberturas retrodispersión.....	35
Figura 17. Coberturas NDVI.....	35
Figura 18. Relación de la retrodispersión respecto a temperatura y precipitaciones.	36
Figura 19. Valores de retrodispersión (SAR) vs NDVI (óptica) para la vegetación.	37
Figura 20. Áreas de influencia de la cobertura nival.....	38

Figura 21. Datos de humedad, precipitación y temperatura.....	63
Figura 22. Retrodispersión frente a NDVI en Nieve.	63
Figura 23. Retrodispersión frente a NDVI en Vegetación.....	64
Figura 24. Área de influencia de 100 m para retrodispersión y NDVI.....	64
Figura 25. Área de influencia de 500 m para retrodispersión y NDVI.....	65
Figura 26. Área de influencia de 1000 m para retrodispersión y NDVI.....	65
Figura 27. Área de influencia de 2000 m para retrodispersión y NDVI.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales técnicas utilizadas para la estimación de la HS mediante teledetección (Fuente: Engman, 1991).	13
Tabla 2. Fechas imágenes Sentinel-1.	21
Tabla 3. Bandas Sentinel 2 (modificado de Lizarazo y Mancera).....	27
Tabla 4. Fechas imágenes Sentinel-2.	27
Tabla 5. Estado de la vegetación según el valor de NDVI.	29
Tabla 6. Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.....	45
Tabla 7. Valores de retrodispersión.....	56
Tabla 8. Valores NDVI.....	60

ABREVIATURAS

ESA: *European Space Agency*

HS: Humedad del suelo.

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*

SAR: Radar de apertura sintética.

SIG: Sistema de información geográfica.

SNAP: *Sentinel Application Platform* de la ESA.

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos

ZNS: Zona No Saturada.

RESUMEN

El estudio de la humedad del suelo constituye uno de los mayores retos dentro del ámbito de la hidrología, debido a su alta variabilidad; por este motivo, se han buscado métodos alternativos a los métodos tradicionales *in-situ* para determinar la humedad del suelo. Uno de los más importantes es utilizar técnicas de teledetección con imágenes tanto ópticas como de radar.

El siguiente estudio tiene como objetivo conocer la variación de la humedad del suelo en zonas de alta montaña utilizando imágenes de satélites radar y ópticas procedentes de los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2, que serán representadas mediante SIG.

Se ha utilizado un método de detección de cambios, donde se asume que los parámetros del terreno como la rugosidad y la vegetación cambian de forma más lenta que la humedad del suelo, por lo que no influyen de manera importante en los resultados obtenidos. Por tanto, los cambios de humedad en el suelo van a ser relacionados directamente con la señal retrodispersada captada por los satélites RADAR.

Con este estudio se determina la influencia que tiene la cobertura nival con respecto a la retrodispersión medida y, con ello, se establece cómo afecta la cobertura nival a la humedad del suelo. Las precipitaciones en zonas de alta montaña resultan un factor más relevante que la temperatura, pero los procesos de fusión de la cobertura nival tienen mayor relevancia en la variación de la HS, ya que permiten un aporte de agua al suelo en épocas más secas.

Por último, se establece que la teledetección supone una buena alternativa para medir variaciones de HS cuando se tienen que estimar superficies extensas, ya que permite obtener una estimación de cómo varía la HS de una forma rápida y sencilla.

1. INTRODUCCIÓN

El agua retenida en el suelo puede presentar tres estados; estos son agua estructural, que forma parte de los minerales, agua libre, que fluye a través de los huecos y poros, y agua adsorbida, que se encuentra adherida a las partículas por fuerzas de adhesión (Hillel,1998). Estos tres estados del agua conforman la humedad del suelo (HS).

La HS constituye un factor fundamental dentro del ciclo hidrológico, y es el factor responsable de relacionar la precipitación con la escorrentía superficial y la infiltración; por otra parte, la HS determina el contenido de agua disponible para la mayoría de las plantas.

Como se ha mencionado, el proceso más importante en el que participa la HS dentro del ciclo hidrológico es su incidencia en la infiltración producida por las precipitaciones y en la escorrentía superficial; la escorrentía depende de diferentes características, tanto del suelo (textura, rugosidad, porosidad) como del terreno (pendiente). El contenido de HS modifica la capacidad de infiltración que posee el suelo, y por tanto determina la escorrentía producida en el terreno, por lo que conocer el contenido de humedad de una zona previamente a que se produzcan precipitaciones puede cobrar gran importancia.

En la Figura 1 se encuentran representados los flujos del agua en la zona no saturada (ZNS).

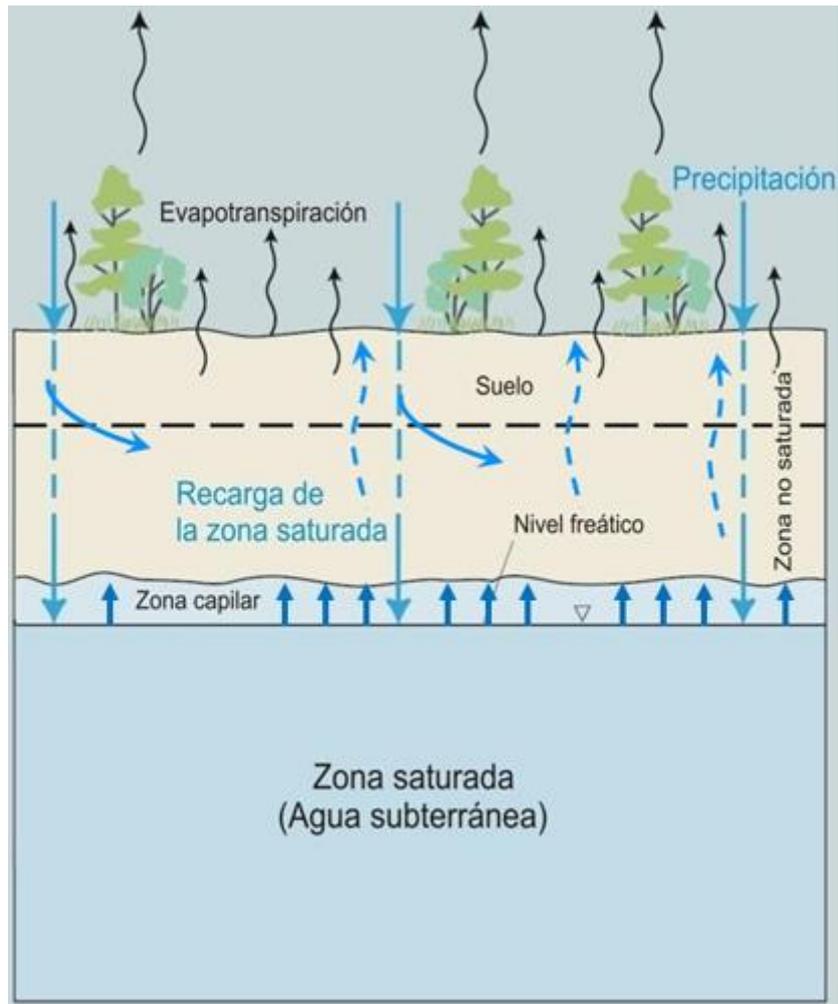


Figura 1. Subzonas y flujos en la Zona No Saturada (Figura tomada de los apuntes del profesor Javier Lillo, URJC. Adaptada de Alley et al., 1999)

Por otra parte, la infiltración se encuentra relacionada con la capacidad de almacenamiento del terreno, sobre la cual se basan los diferentes procesos de evaporación y evapotranspiración, y la escorrentía favorece los procesos de erosión del suelo; junto a ello, la presencia de humedad reduce la cohesión de las partículas del suelo, haciendo que resulte fácilmente erosionable (Huang et al., 2002).

Asimismo, la HS constituye un factor determinante en el crecimiento de las plantas, ya que constituye la fracción de agua que se encuentra disponible en la parte del suelo donde se desarrollan las raíces de éstas.

Junto a estos procesos, la humedad puede tener un papel similar al que juegan los océanos, suavizando las temperaturas, aunque en menor medida (Shukla y Mintz, 1982).

Cuando se habla de HS, se habla generalmente del agua contenida en la capa superficial de éste (5-10 cm). La HS es una parte clave dentro del ámbito de la hidrología, debido a su importancia dentro del ciclo hidrológico, así como a su variabilidad temporal y espacial, lo que constituye uno de los principales retos a la hora de su estudio (Álvarez-Mozos *et al.*, 2005a). En el primer caso, influye el clima fundamentalmente, mientras que la variabilidad espacial se ve afectada por numerosos factores, tales como la topografía del terreno (pendiente, elevación, orientación), las propiedades del suelo (textura, estructura, contenido en materia orgánica) y la cobertura vegetal presente (Ceballos-Barbancho *et al.*, 2005).

La HS puede expresarse como la relación entre la masa de agua en una muestra de suelo (M_A) y la masa de suelo (M_T), o como la relación entre el volumen de agua de una muestra de suelo (V_A) y el volumen de la muestra (V_T). Así, se habla de humedad gravimétrica (1) o humedad volumétrica (2), siendo esta última la más utilizada:

$$\theta_g = \frac{M_A}{M_T} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\theta_v = \frac{V_A}{V_T} \cdot 100 \quad (2)$$

La humedad presente en el suelo se puede medir a través de diferentes métodos *in-situ*. Éstos pueden ser directos (miden la cantidad de agua del suelo) o indirectos (calibración entre la humedad y una propiedad física). El método gravimétrico es el método directo, y es el más exacto porque se obtiene una muestra de suelo y se determina su contenido en agua. Frente a este método se realizan los métodos indirectos en base a otras propiedades físicas: reflectometría (constante dieléctrica); dispersor de neutrones (neutrones lentos); placa de presión (potencial de succión); tensiómetros (potencial matricial) y resistímetro (conductividad eléctrica) (Enciso *et al.*, 2007).

Este tipo de mediciones *in situ* no son sencillas de llevar a cabo ya que, por una parte, es necesario conocer las propiedades del suelo (porosidad, textura, estructura), y a la vez el contenido de humedad del suelo es muy variable tanto espacial, como temporalmente; esto es, varía mucho de un punto a otro del terreno, y a su vez varía de un momento a otro del día (Solorza, 2013).

En los últimos años, gracias al desarrollo y los avances obtenidos en la tecnología de satélites, se ha comenzado a estudiar el uso de la teledetección como una alternativa para determinar la humedad del suelo (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2015).

La teledetección es una forma de medición y observación a distancia que se realiza mediante objetos que permiten el escaneo o grabación a tiempo real, como pueden ser satélites o radares. Para que esta observación sea posible es necesario que, aunque no exista un contacto material, haya interacción entre los objetos de los que se quiere obtener información y el sensor que recoge dicha información. En este caso esa interacción es un flujo de radiación. En la teledetección también se engloba el posterior tratamiento e interpretación de las imágenes (Chuvienco, 2008).

La teledetección supone una buena alternativa para determinar la HS, especialmente cuando se necesita estimar superficies extensas, frente a los métodos *in-situ* (Martínez-Fernández y Ceballos, 2005).

Aunque las medidas *in-situ* son simples, llevar a cabo un estudio a largo plazo mediante estos métodos resulta inviable a largo plazo, especialmente si hablamos de estudios a pequeña escala. Por este motivo ha aumentado el uso de técnicas de teledetección para estimar la HS en las últimas décadas (Brocca *et al.*, 2012).

A continuación, se detallan las principales técnicas de teledetección utilizadas para el estudio de la HS, en la Tabla 1:

Tabla 1. Principales técnicas utilizadas para la estimación de la HS mediante teledetección (Fuente: Engman, 1991).

Región del espectro	Propiedad observada	Ventajas	Inconvenientes
Visible	Albedo	Multitud de sensores disponibles	Influencia de otros factores, nubosidad
Infrarrojo térmico	Temperatura superficial	Buena resolución temporal	Nubosidad, influyen topografía y cubierta vegetal
Microondas pasivo	Temperatura de brillo	No se ve afectado por la nubosidad, buena sensibilidad	Resolución espacial pobre. Interferencia con redes de comunicación. Influencia de la vegetación y la rugosidad.
Microondas activo	Coefficiente de retrodispersión	No se ve afectado por la nubosidad, buena resolución espacial	Influencia de la topografía, rugosidad y cubierta vegetal

En la región del espectro visible la iluminación solar y la cubierta vegetal afectan enormemente en la señal que retorna al satélite, por lo que el estudio de la HS mediante teledetección visible no es aconsejable, ya que los valores medidos no se ajustan a lo que ocurre en realidad (Engman, 1991).

En cuanto a las imágenes obtenidas en el infrarrojo, no hay modelos que lo relacionen con la humedad, puesto que la resolución espacial con la que se trabaja es insuficiente, la capa de suelo de la que aportan información es demasiado fina, y la presencia de nubosidad hacen que resulte muy complicado adquirir las imágenes, por lo que su uso tampoco resulta aconsejable.

Respecto a la teledetección por microondas, se puede diferenciar entre teledetección pasiva o activa, en función de la fuente de luz empleada. Los sensores pasivos de microondas (denominados también radiómetros) van a recoger la radiación emitida por la superficie terrestre de forma natural. Las imágenes obtenidas por este método tienen algunas características que pueden resultar interesantes para llevar a cabo estudios de la HS. Una de las principales ventajas es que la radiación recogida puede atravesar las nubes sin verse alterada, y tampoco se ve influida por la iluminación (pueden trabajar tanto de día como de noche), ya que se trabaja con radiación emitida por la superficie de manera natural.

El uso de esta técnica ofrece unos resultados prometedores, ya que además presenta una baja sensibilidad a la vegetación (Jackson, 1993).

Los sensores de microondas activos, también conocidos como radares, comparten la capacidad de atravesar las nubes sin sufrir alteración, y tampoco se ven influidos por la radiación solar. En lugar de recibir la radiación emitida por la superficie, emiten un pulso de radiación, recogiendo la señal que vuelve después de rebotar en la superficie; este fenómeno se conoce como retrodispersión. Permiten alcanzar una resolución mucho menor que en el caso de los sensores pasivos (Barrett *et al.*, 2009).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la teledetección por microondas es probablemente el método más adecuado para este tipo de mediciones, ya que son los únicos sensores capaces de medir cuantitativamente la humedad del suelo bajo la vegetación y otras condiciones topográficas (Behari, 2005). Se han llevado a cabo estudios para estimar la humedad con sensores pasivos y activos durante los últimos años, y los mejores resultados obtenidos han sido utilizando los sensores radar (Álvarez-Mozos *et al.*, 2005b).

Dentro de los sensores radar, es especialmente interesante el uso de los SAR, puesto que permiten analizar los diferentes parámetros del suelo en condiciones climáticas muy variables (Kousik y Prabir-Kumar, 2015).

La estimación de la HS a partir de sensores radar tiene una dificultad añadida, ya que influyen factores propios de los sensores activos, como son la constante dieléctrica (ϵ) y el coeficiente de dispersión (σ), y además influyen las características del terreno como la rugosidad superficial (es el factor que más afecta a la retrodispersión junto a la humedad), la textura del suelo, el relieve y la presencia o ausencia de vegetación (Álvarez-Mozos, *et al.*, 2005a). A pesar de estas limitaciones en cuanto a eficacia, permiten estimar la evolución de la HS en períodos largos de tiempo de los que se dispone de datos meteorológicos de la zona a estudiar.

La información sobre la superficie obtenida por el radar se caracteriza por la retrodispersión de la onda electromagnética incidente (de la señal de radar). La magnitud y la intensidad de la retrodispersión depende de cómo la energía transmitida interactúa con la superficie (*European Space Agency [ESA], 2020*). Depende de variables del radar y de la superficie:

- Ángulo de la onda incidente (radar). Si el ángulo de incidencia es pequeño, la penetración de la onda es menor, y la retrodispersión será baja.
- Longitud de onda (radar). Define la interacción de la señal con la superficie. Si la aspereza de los objetos es del tamaño de la onda, habrá retrodispersión de la energía. Si la longitud de onda es alta, la energía retrodispersada es mínima y la superficie sería lisa. Cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor es la penetración.
- Polarización de la onda (radar). Provee información relacionada con los componentes verticales y horizontales de la superficie.
- Constante dieléctrica (superficie). Es un indicador de la efectividad y la conductividad de la superficie. La cantidad de humedad en el suelo tiene una gran importancia en la reflectividad. En materiales secos (rocas, suelo, vegetación o nieve) se encuentra entre 0 y 10, mientras que para el agua tiene un valor de 80. Por este motivo, durante la transición de la superficie congelada a descongelada hay un cambio en las propiedades dieléctricas, lo que causa un incremento notable en la retrodispersión.
- Estructura y orientación de los objetos (superficie). Influyen en la interacción de las ondas. Cuanto más áspera es la superficie observada, mayor es la retrodispersión. En la nieve y en la vegetación se produce dispersión por volumen. La influencia de la estructura y orientación de los objetos en la dispersión de la onda puede observarse en la Figura 2.

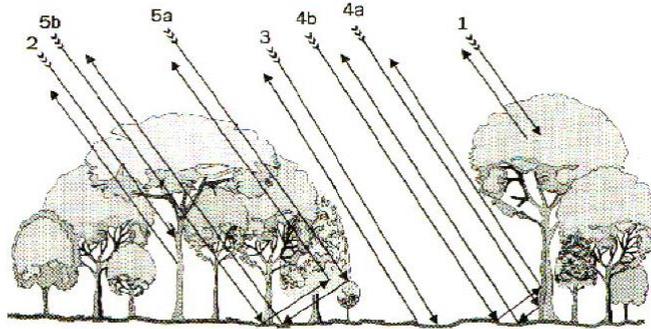


Figura 2. Fuentes de dispersión: 1) dispersión por volumen de la copa de los árboles, 2) dispersión directa con el tronco de los árboles, 3) dispersión directa con el suelo, 4) el tronco y el suelo, 5a) la copa y el suelo, 5b) el suelo y la copa (Fuente: NASA).

- Distorsiones geométricas, radiométricas y moteado o speckle (superficie). Se trata de distorsiones que se deben corregir para analizar las imágenes radar. Se profundizará en estos conceptos en el apartado de Metodología.

2. JUSTIFICACIÓN.

El estudio de la HS es ampliamente reconocido en multitud de trabajos de teledetección. Sin embargo, el estudio de la humedad del suelo en zonas glaciares o periglaciares mediante teledetección es un apartado bastante novedoso.

Los glaciares son áreas de hielo formadas a partir de nieve (con diversos orígenes, ya sea por precipitación o avalanchas) que se acumula en áreas montañosas, cristaliza, y se compacta (Benn y Evans, 1998).

Las zonas periglaciares originariamente han sido aquellas zonas próximas a los glaciares, donde hay una fuerte dominancia de procesos de geomorfológicos producidos por la transformación de agua en hielo (French, 1996). Los límites de las áreas periglaciares son muy difíciles de determinar, puesto que se ven influenciados por la cubierta nival, la temperatura del suelo y la HS (French, 2007; Thorn, 1992). Asimismo, la HS puede provocar que, en dos zonas de similares condiciones climáticas, en un lugar esté representado un comportamiento periglacial mientras que en el otro no (Lehmkuhl *et al.*, 2003).

De este modo, y siguiendo criterios restrictivos, la variabilidad de las áreas glaciares y periglaciares en zonas de alta montaña hacen que en la Península Ibérica solo exista este ambiente en los Pirineos. El estudio de la HS en zonas de alta montaña tiene importancia puesto que las masas de nieve constituyen una reserva de agua para la vegetación en los meses más cálidos, de modo que cuando aumentan las temperaturas, la nieve se funde y aumenta la HS, al contrario de lo que ocurriría en zonas donde no hubiese nieve. Esto permite que la vegetación de esas zonas se mantenga en mejor estado durante más tiempo a lo largo del año.

Durante el estudio se busca establecer una relación entre los cambios de NDVI (Índice de Vegetación Normalizado) obtenido por medio de las imágenes ópticas de Sentinel-2, y la retrodispersión de las imágenes radar obtenidas del Sentinel-1. El NDVI está estrechamente relacionado con la HS, por tanto, si se establece una relación entre el NDVI y la retrodispersión, se puede comprobar cómo varía la retrodispersión con respecto a la HS en zonas de alta montaña, que es el objetivo principal del presente estudio.

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es determinar la variación de la humedad en el suelo de zonas de alta montaña a partir de la retrodispersión medida con imágenes RADAR SAR (Sentinel-1).

Para la consecución del objetivo principal, es necesario alcanzar estos objetivos secundarios:

- Estudio de la influencia de las temperaturas y las precipitaciones sobre la HS, y su efecto en zonas nivales.
- Obtener la relación que hay entre el NDVI, la retrodispersión y la humedad del suelo.
- Analizar si la utilización de este método constituye una alternativa viable para medir la HS en zonas de alta montaña.

4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para analizar las variaciones de la HS utilizando técnicas de teledetección es asumir que ésta va a mostrar cambios de forma mucho más rápida que otras características del suelo, como son la cobertura vegetal o la rugosidad del terreno (Álvarez-Mozos et al., 2005b).

Con este supuesto, un cambio en la HS va a mostrar una diferencia en la retrodispersión que no se podría encontrar analizando otras propiedades. Se asume que la variación de la HS varía directamente con los cambios en la retrodispersión, ya que las otras propiedades no tienen una influencia significativa en un período de tiempo tan pequeño.

4.1. Zona de estudio

Para estudiar la evolución de la HS en zonas de alta montaña con influencia de coberturas nivales se ha seleccionado una zona ubicada en el Valle del Gállego, situado en el norte de España, en la zona del Pirineo aragonés.

La razón principal de la elección de esta zona de estudio radica en que en el Valle del Gállego la morfología posee un fuerte componente periglacial, donde las zonas altas permanecen cubiertas de nieve varios meses al año. Posee un clima considerado de alta montaña, donde la temperatura media durante el año se encuentra por debajo de 10° C y las precipitaciones se encuentran en torno a los 800-1000 mm, potencialmente en forma de nieve (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío [SIAR], 2020). La altitud de la zona favorece que haya zonas cubiertas de nieve durante 6 meses al año.

Esta zona de estudio se encuentra representada en la Figura 3:

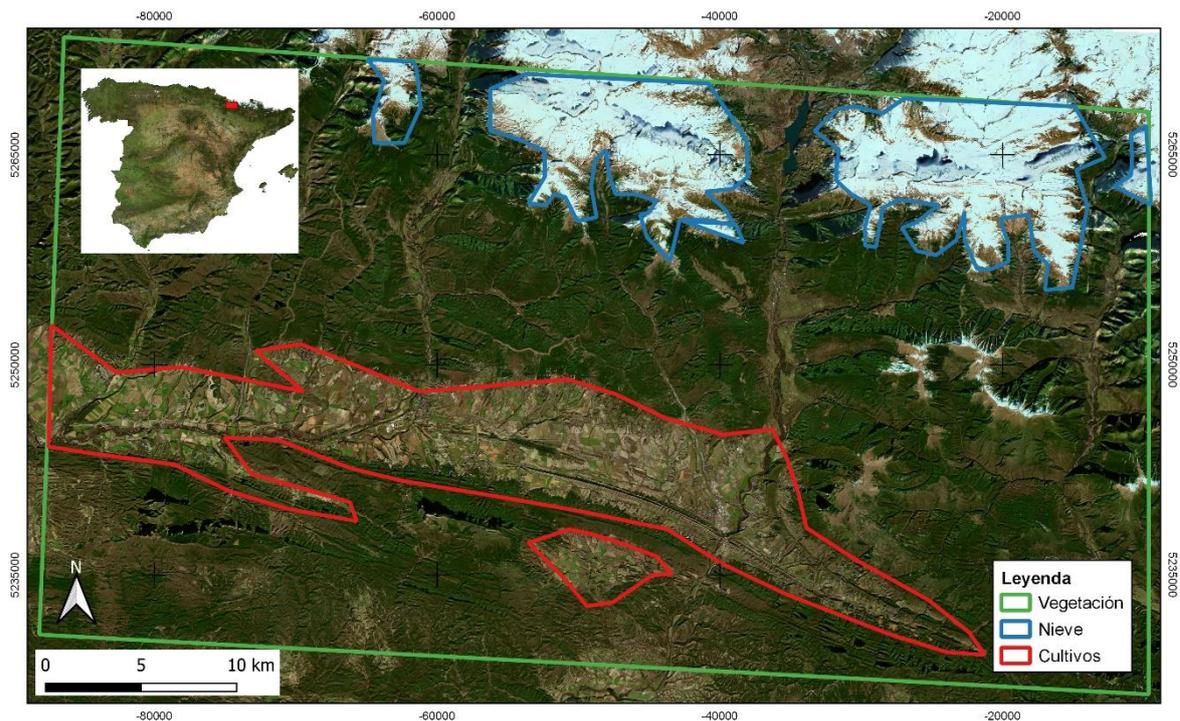


Figura 3. Zona de estudio.

En la zona de estudio se pueden diferenciar fundamentalmente 3 zonas: 1) zona de nieve situada fundamentalmente en el norte, de mayor o menor extensión en función de la época del año en la que nos encontremos; 2) zona de vegetación, siendo ésta la más extensa; 3) zona de cultivos, situada cerca de las poblaciones, en la zona baja del valle.

4.2. Datos de precipitación

Se han utilizado datos de precipitación diarios desde el 1 de enero de 2019 al 29 de febrero de 2020, obtenidos de la estación meteorológica de Santa Cilia de Jaca (SIAR, 2020), situado a menos de 20 km de la zona de estudio. De esta estación se han obtenido datos de precipitación, temperatura y humedad que servirán para correlacionar dichos eventos de precipitación con la humedad del suelo. Los datos utilizados de la estación meteorológica de Santa Cilia de Jaca están recogidos en la Tabla 6 de los Anexos.

4.3. Datos de satélites

En el presente estudio se van a utilizar dos tipos de imágenes; por una parte, se van a utilizar imágenes radar, obtenidas del satélite Sentinel-1, y por otra parte imágenes ópticas del satélite Sentinel-2. Ambos tipos de imágenes han sido descargadas desde el servidor de imágenes de la ESA (ESA, 2020). Las imágenes radar van a necesitar que se lleve a cabo una corrección y un procesamiento, que se llevará a cabo con el programa SNAP (ESA, 2020). Por otra parte, las imágenes ópticas descargadas ya incluyen correcciones radiométricas, geométricas y atmosféricas de los datos.

4.3.1. Sentinel-1

Sentinel-1 es una misión de satélite radar, compuesta por dos satélites, 1A y 1B, con un sensor activo de radar de apertura sintética (SAR), que proporciona imágenes de banda C con una resolución de hasta 5 m y un ancho de banda de 400 km, tanto en polarización singular VV como en polarización dual VH, y no se ve afectado por la cobertura de nubes o la falta de iluminación; esto implica que puede tomar datos durante el día o la noche, bajo todo tipo de condiciones climáticas (ESA, 2020).

Las imágenes adquiridas se han obtenido en modo interferométrico de amplia franja (IW), y los productos son productos del tipo GRD (*Ground Range Detected*) obtenidos utilizando un modelo elipsoidal de la Tierra. Esto hace que se reduzca el moteado de la imagen, a costa de una peor resolución espacial. Se han descargado imágenes desde el 1 de enero de 2019 hasta el 29 de febrero de 2020; a continuación, en la Tabla 2 se muestran las fechas de las imágenes de esta misión con las que se ha trabajado:

Tabla 2. Fechas imágenes Sentinel-1.

Fecha imágenes Sentinel-1					
02/01/2019	08/01/2019	14/01/2019	07/02/2019	19/02/2019	15/03/2019
28/03/2019	02/04/2019	08/04/2019	14/04/2019	20/04/2019	26/04/2019
02/05/2019	08/05/2019	14/05/2019	26/05/2019	01/06/2019	07/06/2019
13/06/2019	19/06/2019	26/06/2019	01/07/2019	07/07/2019	13/07/2019
26/07/2019	31/07/2019	06/08/2019	12/08/2019	18/08/2019	25/08/2019
30/08/2019	05/09/2019	09/09/2019	11/09/2019	29/09/2019	05/10/2019
11/10/2019	17/10/2019	23/10/2019	29/10/2019	04/11/2019	10/11/2019
16/11/2019	22/11/2019	28/11/2019	04/12/2019	10/12/2019	16/12/2019
22/12/2019	28/12/2019	03/01/2020	09/01/2020	15/01/2020	21/01/2020
27/01/2020	14/02/2020	20/02/2020	26/02/2020		

Las imágenes utilizadas tienen un ángulo de incidencia de entre 34 y 36°, por lo que entran dentro del rango óptimo para estimar la HS (Holah *et al.*, 2005). La polarización utilizada ha sido la VV, puesto que según Kumar y Bhagat (2017) la polarización simple (VV y HH) es más precisa para la estimación de la HS que la polarización dual (VH o HV).

Además de estas condiciones, las imágenes radar se han procesado mediante el software SNAP para eliminar las distorsiones radiométricas, las distorsiones geométricas y el moteado o *speckle* presentes en dichas imágenes, siguiendo el esquema representado en la Figura 4.



Figura 4. Esquema procesado SNAP.

Corrección de la órbita. Antes de llevar a cabo cualquier tipo de preprocesamiento, es conveniente realizar un primer paso en SNAP denominado “*apply orbit file*”. Normalmente la órbita del satélite es detectada por multitud de sensores y GPS, la cual conlleva un alto tiempo de cálculo para que esa órbita sea precisa, por lo que la precisión de los datos de algunos satélites SAR no es muy elevada. Este paso ayudará a conseguir datos de la órbita del satélite más precisos, lo que mejorará la geocodificación y otros resultados de futuros procesados de los SAR. A continuación, en la Figura 5 se muestra la corrección de la órbita:

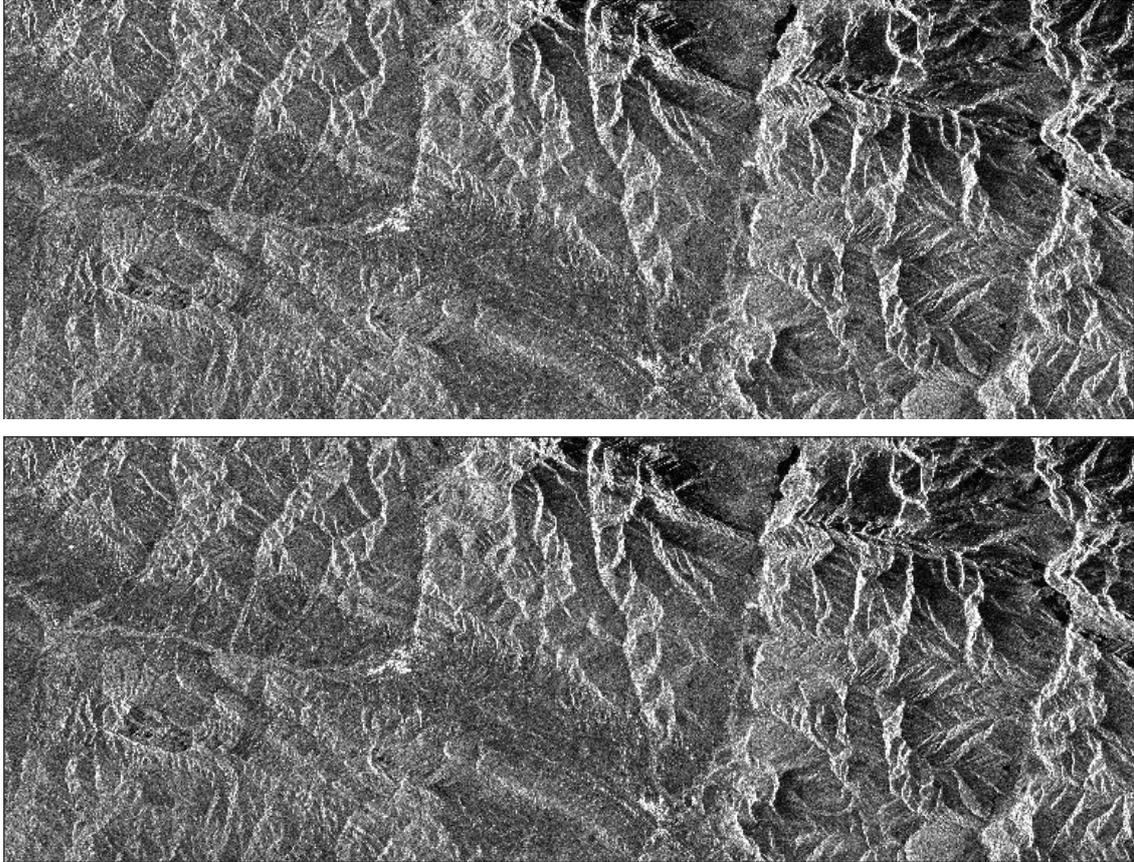


Figura 5. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de corregir la órbita del satélite (15/03/2019).

Una vez realizado este paso, se van a llevar a cabo las 3 correcciones ya mencionadas:

Distorsión radiométrica. Ocurre cuando la energía transmitida se concentra en un área, lo que provoca que alrededor haya menor cantidad de energía. El efecto que provoca es la aparición de zonas más brillantes en el centro y zonas más oscuras en las esquinas (*National Aeronautics and Space Administration, NASA, 2018*). La corrección radiométrica se muestra en la Figura 6:

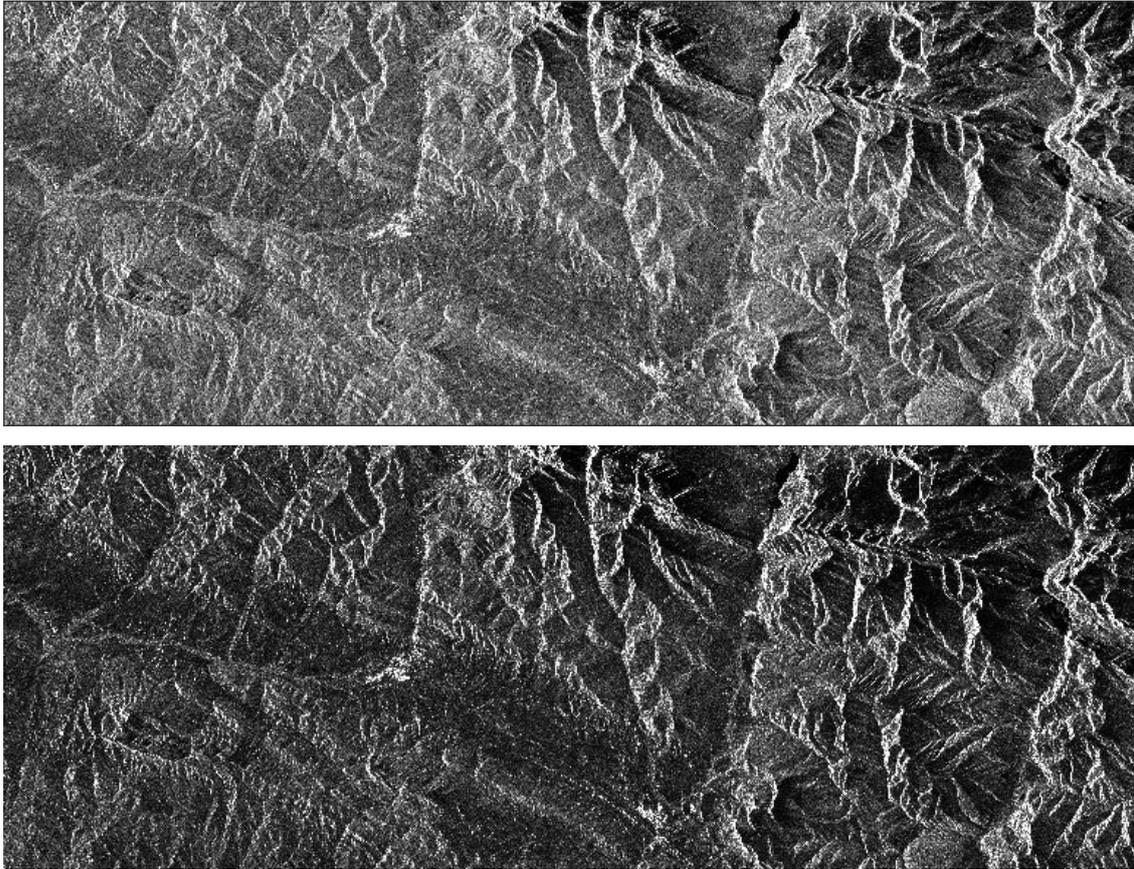


Figura 6. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de aplicar la corrección radiométrica (15/03/2019).

Moteado (*speckle*). Se trata de un efecto granular, un “ruido” que disminuye la calidad de la imagen, así como la información ofrecida; también se denomina efecto sal y pimienta. Este efecto es debido a que dentro del área de iluminación hay diferentes objetos que dispersan la señal de radar (NASA, 2018.). Este moteado tiene un efecto multiplicativo, lo que hace que sea complicado de extraer, y supone un problema a la hora de analizar e interpretar las imágenes (Solorza, 2013). Para eliminar el moteado se utilizan fundamentalmente dos técnicas:

- *Multilooking*. Consiste en dividir el ancho de banda de la imagen que se quiere corregir, de modo que se formen muchas imágenes independientes. Estas imágenes se suman y se obtiene una imagen promedio de ellas.

- Filtración espacial. Se coloca una ventana en cada píxel, y se le aplican cálculos matemáticos; finalmente se sustituye el valor original del píxel por el nuevo valor calculado. Se consigue un efecto alisador en la imagen (NASA, 2018). Algunos de los filtros que ofrecen un mejor resultado para eliminar el moteado son Frost, Gamma-Map o Lee, de acuerdo con Kupidura (2016).

En el caso de las imágenes estudiadas en el presente trabajo, para eliminar el moteado se realizó un *multilooking*, seguido de un filtrado mediante un filtro Lee de 3x3. La reducción del moteado puede apreciarse en la Figura 7:

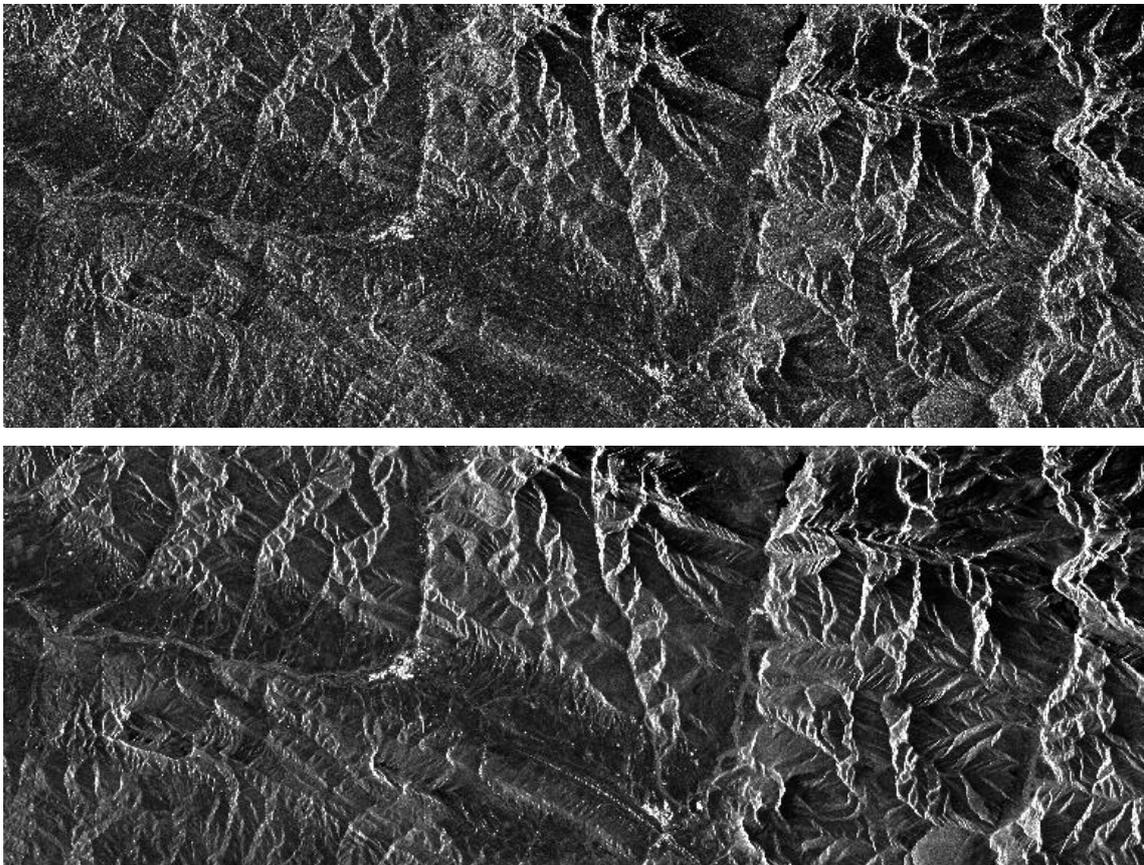


Figura 7. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de corregir el moteado o speckle (15/03/2019).

Distorsión geométrica. Ocurre en zonas geográficamente complejas, esto es, en zonas con mucho relieve; pueden estar provocadas por la inclinación del sensor en el momento de la toma de la imagen o la influencia del relieve, aunque también pueden ser debidos a errores sistemáticos de la imagen (Cabrera *et al.*, 2011). En

las imágenes que ofrece el radar pueden producirse distintos tipos de distorsiones, como cambios de tamaño, la aparición de sombras, donde la energía no llega a la zona que está detrás de la estructura y las zonas aparecen más oscuras (NASA,2018). La corrección geométrica aplicada se observa en la Figura 8:

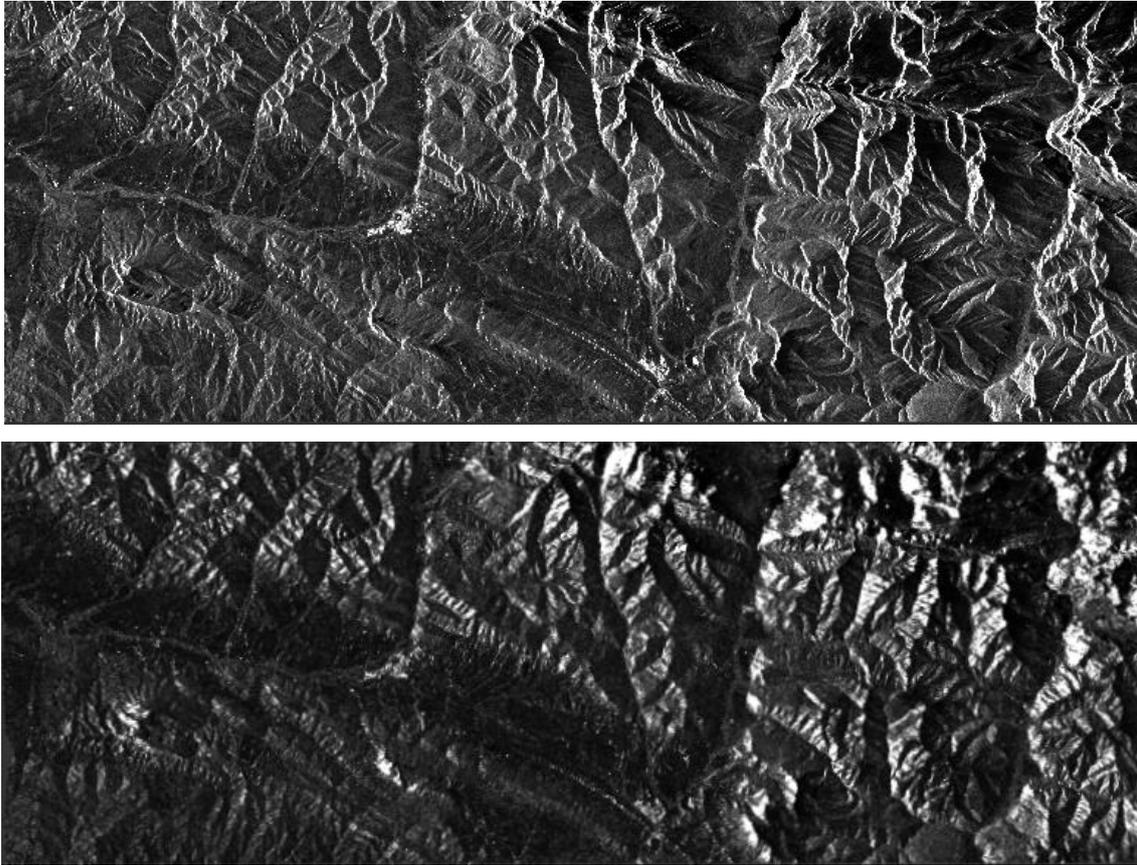


Figura 8. Imagen antes (arriba) y después (debajo) de corregir la distorsión geométrica (15/03/2019).

Cuando ya se han llevado a cabo las correcciones mencionadas, se debe convertir la imagen, ya que la imagen obtenida muestra datos digitales, mientras que, para medir y determinar la retrodispersión, se necesita que las unidades sean decibelios (dB). Para ello, el software SNAP utiliza la siguiente fórmula:

$$\sigma^0 \text{ (dB)} = 10 * \log_{10} (\text{abs} (\sigma^0))$$

Donde σ^0 (dB) es la imagen de retrodispersión, medida en dB, y σ^0 es la imagen obtenida de datos digitales.

El procesado final de las imágenes incluye la corrección de todas estas distorsiones, como se muestra en la Figura 9.

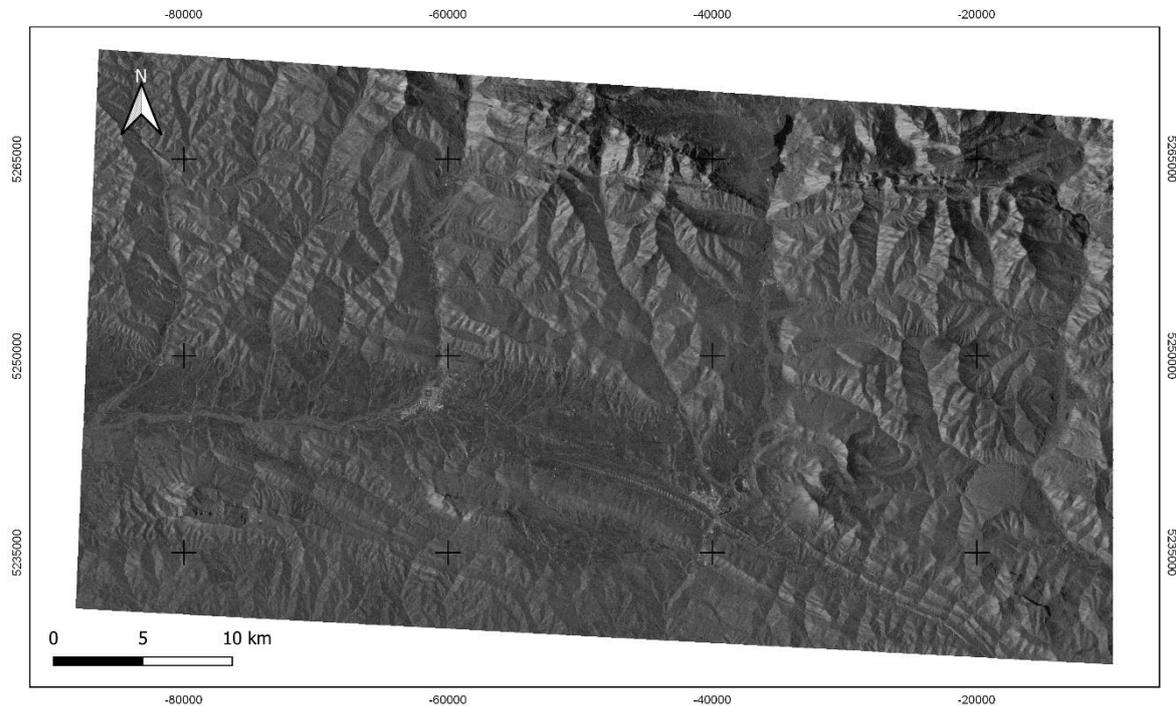


Figura 9. Imagen Sentinel-1 del 15/03/2019.

4.3.2. Sentinel-2

La misión Sentinel-2 está compuesta por 2 satélites en la misma órbita solar, con el objetivo de monitorear la variación en la superficie terrestre. Provee imágenes multiespectrales gracias a su sensor MSI (Multi Spectral Imager) con resolución espacial media-alta. Posee un ancho de banda de 290 km (ESA, 2020).

Este sensor es capaz de ofrecer hasta 13 bandas espectrales que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), pasando por el infrarrojo cercano (NIR). A continuación, se muestran las bandas con las que cuenta el sensor, así como su resolución, en la Tabla 3:

Tabla 3. Bandas Sentinel 2 (modificado de Lizarazo y Mancera).

Sentinel 2A			
Resolución (m)	Banda	Resolución (m)	Banda
60	B1 – Costa y aerosol	10	B8 – NIR
10	B2 – Azul	20	B8a - NIR
10	B3 – Verde	60	B9 - Vapor de agua
10	B4 – Rojo	60	B10 - Cirrus
20	B5 – NIR	20	B11 - SWIR
20	B6 – NIR	20	B12 - SWIR
20	B7 – NIR		

Respecto a las imágenes utilizadas en el estudio, se han utilizado aquellas cuya nubosidad no excediese de un 40%, y se han descargado aquellas imágenes con un Nivel-2 de procesado. Estas imágenes satelitales se encuentran procesadas con correcciones radiométricas y geométricas, y pueden ser utilizadas para la obtención de índices normalizados como es el caso del NDVI (ESA, 2020). Las imágenes utilizadas durante el período de tiempo estudiado se muestran a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4. Fechas imágenes Sentinel-2.

Fechas imágenes Sentinel-2					
01/01/2019	06/01/2019	11/01/2019	16/01/2019	15/02/2019	20/02/2019
25/02/2019	02/03/2019	22/03/2019	27/03/2019	01/05/2019	31/05/2019
25/06/2019	30/06/2019	05/07/2019	10/07/2019	15/07/2019	20/07/2019
25/07/2019	04/08/2019	09/08/2019	14/08/2019	24/08/2019	28/08/2019
03/09/2019	08/09/2019	28/09/2019	03/10/2019	08/10/2019	02/12/2019
07/12/2019	27/12/2019	01/01/2020	06/01/2020	16/01/2020	05/02/2020
10/02/2020	15/02/2020	20/02/2020			

La imagen tomada del satélite Sentinel-2 se muestra a continuación en la Figura 10:

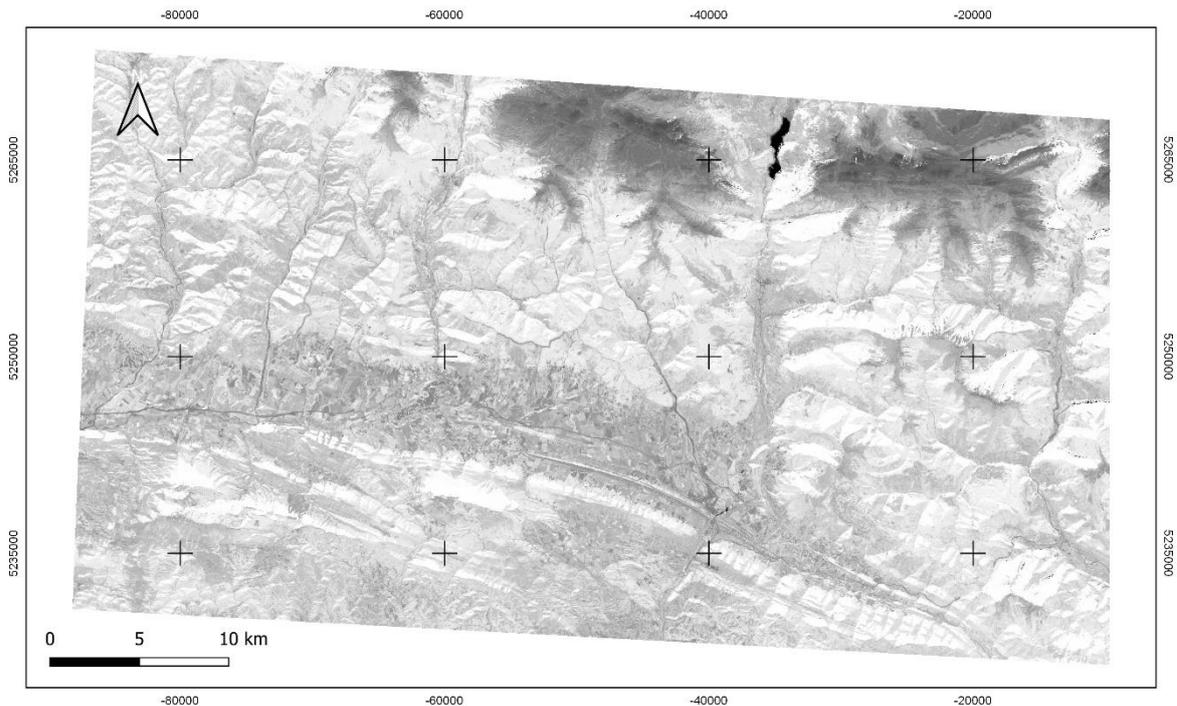


Figura 10. Imagen Sentinel-2 del 01/01/2019.

4.4. Tratamiento de datos.

4.4.1. NDVI

Un índice de vegetación se define como “un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia obtenido a distintas longitudes de onda” Esto hace que sea particularmente sensible a la cubierta vegetal, por lo que es muy utilizado para estudiar la frondosidad y/o vigorosidad de la vegetación (Gilabert *et al.*, 1997).

Uno de los índices de vegetación más empleados es el Índice de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI, el cuál proporciona una medida sobre la cobertura vegetal. Por otro lado, permite conocer in situ, mediante correlaciones directas o indirectas, características de interés como la cobertura vegetal, la biomasa, el crecimiento o evaluar la vigorosidad de la vegetación. También ofrece una respuesta muy sensible a la vegetación verde, incluso en áreas cuya cobertura vegetal es baja (Xue y Su, 2017).

De este modo, es el índice más conocido y el más utilizado debido a su sencillez. La fórmula que se utiliza para obtener el NDVI es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

En el caso de Sentinel-2, la banda NIR corresponde a la banda 8 (B8 y la banda RED a la banda 4 (B4). Los valores de este índice oscilan entre -1 y 1. Cuando los valores se encuentran por encima de 0,1, se puede determinar la existencia de vegetación, y cuanto mayor sea el valor, mejor será el estado de esa vegetación, tal y como se refleja en la Tabla 5:

Tabla 5. Estado de la vegetación según el valor de NDVI.

Valor NDVI	Descripción del estado de la vegetación
<0	Material inanimado: como el agua o la nieve en el caso estudiado.
De 0 a 0,1	Afloramientos rocosos, áreas yermas de roca o arena
De 0,1 a 0,3	Vegetación no saludable o escasa.
De 0,3 a 0,6	Vegetación sana
> 0,6	Vegetación muy saludable

Una vez aplicada la fórmula de NDVI a la imagen obtenida del Sentinel-2 se obtiene la imagen representada en la Figura 11:

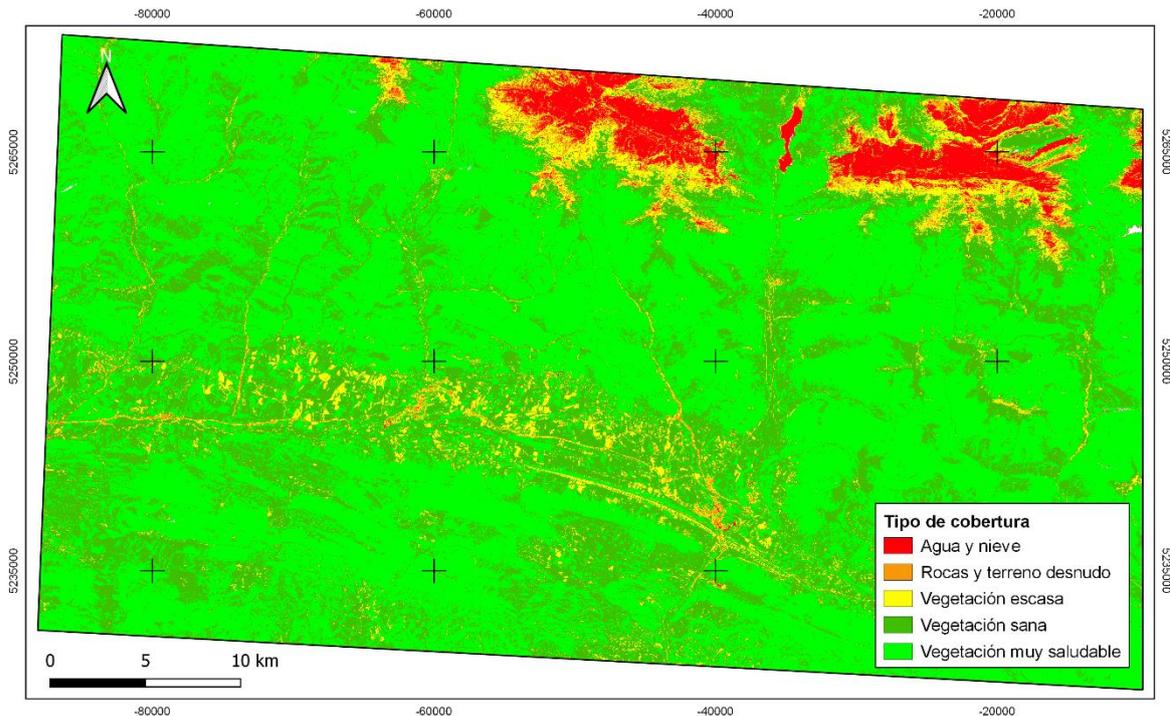


Figura 11. Imagen NDVI del 01/01/2019.

4.4.2. Capa de puntos

Para obtener los datos tanto de retrodispersión como de NDVI se generará una capa de puntos, en cuya tabla se irán marcando puntos que contendrán los valores asociados a estas variables; retrodispersión en el caso de las imágenes de Sentinel-1, y NDVI para las imágenes de Sentinel-2. Se cogen diferentes puntos para obtener una muestra de datos que sea representativa de las 3 zonas mencionadas anteriormente. Es importante separar la vegetación natural de la zona de cultivos, puesto que el comportamiento que tienen será diferente y puede dar lugar a que se obtengan datos erróneos.

Una vez completada la capa de puntos de la zona de estudio para la imagen correspondiente a una fecha concreta, se aplica al resto de las fechas que se van a estudiar. La capa de puntos utilizada en el estudio se puede observar en la Figura 12.

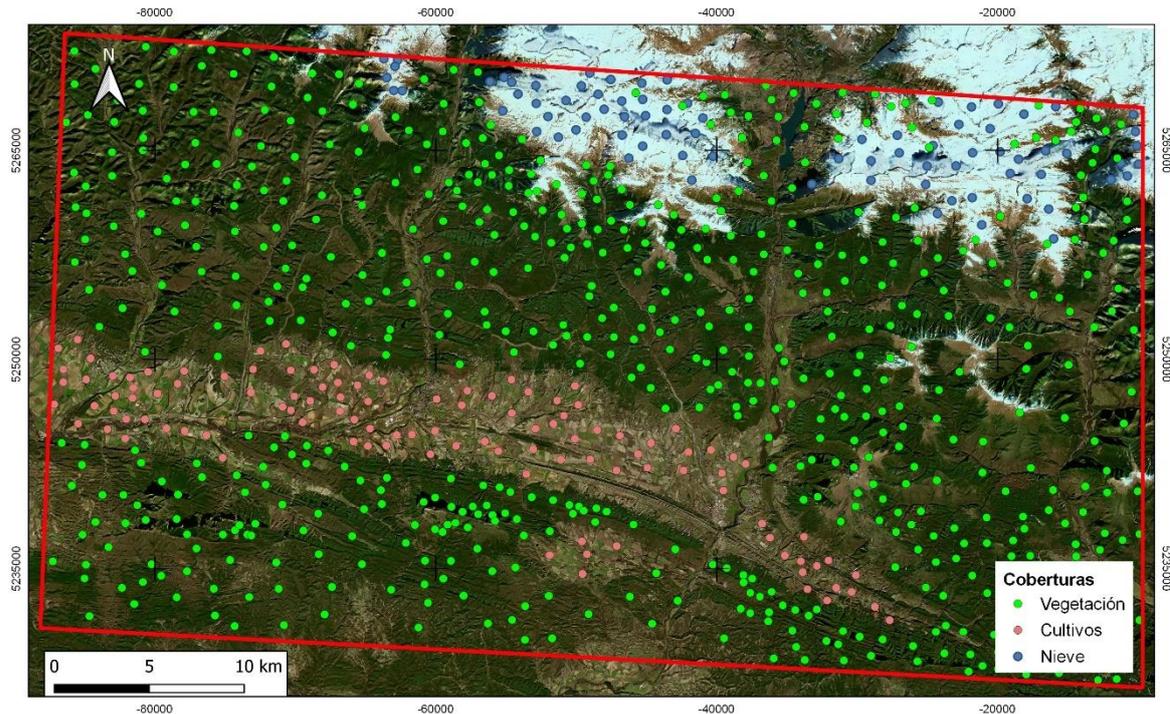


Figura 12. Localización de los puntos de muestreo para las diferentes coberturas.

Una vez realizada esta capa de puntos, se agrupan todos los datos obtenidos de las diferentes zonas estudiadas (tanto por coberturas, como por áreas de influencia de la cobertura nival) y se agrupan en una tabla, que se exportará al software Excel, desde donde se podrá trabajar con estos datos. Los datos obtenidos de la capa de puntos se encuentran recogidos en la Tabla 7 y la Tabla 8 de los Anexos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con todos los datos de precipitaciones y temperaturas de la zona, así como los datos recopilados de NDVI, retrodispersión, y las áreas de influencia de la nieve, se va a llevar a cabo un análisis de cómo afecta la cobertura nival a la retrodispersión.

Puesto que el estudio consiste en comparar la variación de la humedad superficial en función de la distancia a la que se encuentra la cobertura nival, los resultados obtenidos en la zona de los cultivos tienen poca importancia ya que no dependen de las precipitaciones de la zona. En la Figura 13 se observa que el NDVI de los cultivos tiene su mínimo cuando se alcanzan los máximos de NDVI en la nieve y en la vegetación, en los meses de mayo y junio.

A pesar de haber calculado los valores de NDVI y retrodispersión de los cultivos, no aportan información relevante para el presente estudio, más allá de observar el comportamiento de esta zona respecto a las zonas estudiadas (nieve y vegetación).

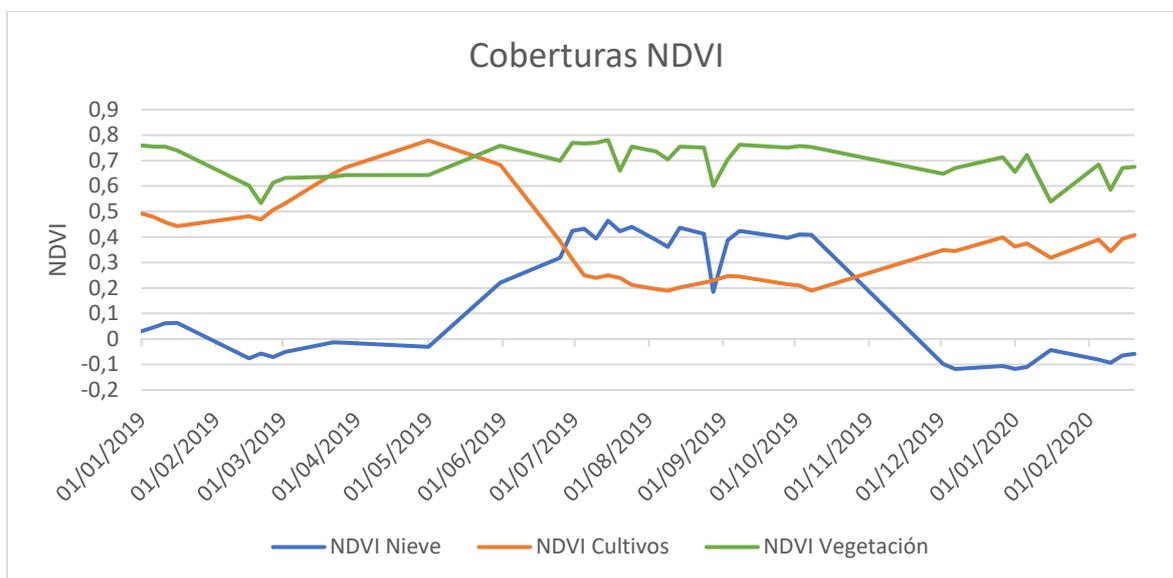


Figura 13. Comportamiento de cultivos frente a las otras zonas del estudio.

5.1. Variación de la retrodispersión a lo largo de un año en períodos secos y húmedos.

Se ha considerado que, en un período seco, transcurren como mínimo diez días sin precipitaciones. Durante los períodos de lluvia intermitentes, los valores de retrodispersión oscilan entre valores secos y húmedos a medida que la HS va cambiando. Los períodos secos y húmedos se encuentran representados en la Figura 14.

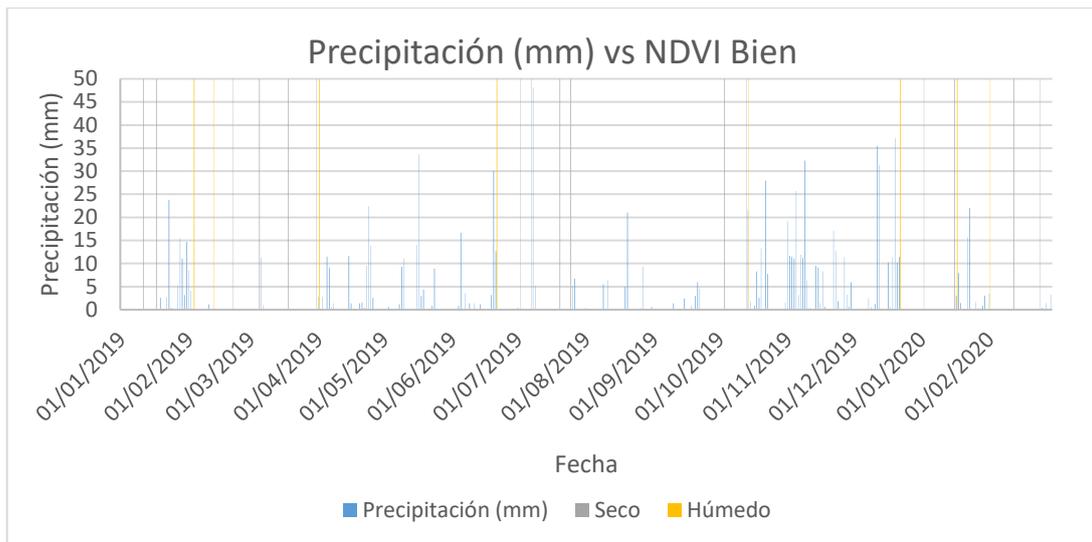


Figura 14. Períodos secos y húmedos del intervalo temporal estudiado.

En la Figura 15 se puede observar un valor base de -10 dB para períodos secos, que aumenta con los eventos de precipitación, puesto que aumenta el contenido en agua del suelo, esto es, la HS. Después de las lluvias, la retrodispersión disminuye a medida que se va secando el suelo hasta alcanzar de nuevo el nivel base de -10 dB cuando el suelo se encuentra seco.

Una vez se produzcan nuevas precipitaciones, el valor de la retrodispersión vuelve a aumentar, observándose un comportamiento cíclico y directamente proporcional entre precipitación y retrodispersión.

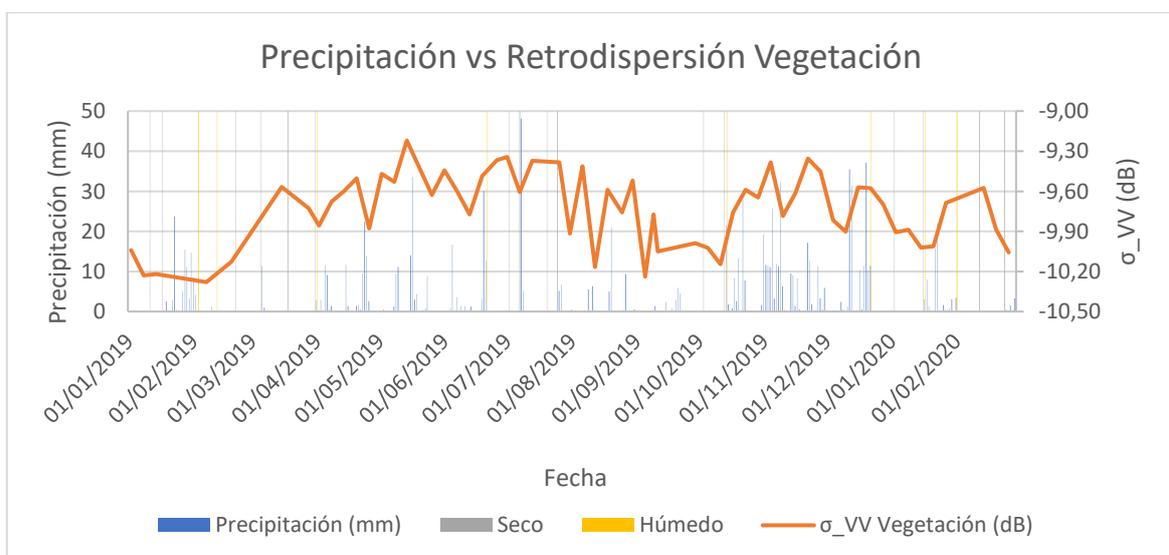


Figura 15. Valores de retrodispersión en función de la precipitación en períodos secos y húmedos.

Los valores más altos se encuentran a partir de mayo, y el máximo absoluto en junio, fecha donde las temperaturas empiezan a ser elevadas, por lo que la nieve comienza a fundir, aumentando su coeficiente dieléctrico y la humedad presente en el suelo. Además, se encuentra en un período en el que ocurren precipitaciones de forma esporádica, sin que pase el tiempo suficiente para que se seque el suelo.

Por otra parte, los valores mínimos se registran cuando están terminando los meses más cálidos de verano, cuando el agua procedente de las nieves fundidas se ha evaporado debido a una época de altas temperaturas. La otra fecha donde se observan valores similares de retrodispersión es a principios de año, cuando el suelo está cubierto por nieve, que posee un coeficiente dieléctrico muy bajo. Esto hace que los valores de retrodispersión medidos también sean bajos.

5.2. Determinar cómo afecta la cobertura nival a los resultados.

En cuanto a las coberturas nivales, se pueden destacar tres factores que afectan a la hora de medir la retrodispersión en zonas con cobertura nival:

- Espesor. El espesor de la nieve influye puesto que incrementa la resistencia a que la onda llegue al suelo y se mida la retrodispersión. En este tipo de estudios se utilizan SAR ya que su poder de penetración es elevado, pero si el espesor de la nieve es mayor, la onda no será capaz de penetrar lo suficiente como para llegar a la HS; esto hará que los valores obtenidos sean menores.
- Tipo de nieve. Cuando se mezclan el agua y la nieve, la superficie adquiere un mayor porcentaje de agua, con lo que aumenta el coeficiente de dispersión y, por consiguiente, la retrodispersión. Este aumento de agua puede ser debido a la lluvia o al deshielo producido en verano a causa de un aumento en las temperaturas.
- Constante dieléctrica. A la hora de determinar las propiedades dieléctricas de los materiales, la nieve se considera un material seco, y

su constante dieléctrica no llega a 10, mientras que la del agua llega hasta los 80 (Topp *et al.*, 1980). Esto explica el aumento en la retrodispersión en zonas húmedas respecto a zonas con cobertura nival.

En las zonas de nieve el NDVI es constante durante los meses fríos, donde el suelo está cubierto de nieve, mientras que el deshielo producido en verano hace que los valores sean mucho mayores, ya que suponen una fuente de agua adicional que aumenta la HS, y permite que la vegetación se encuentre en buen estado ya que tiene a su disposición mayor cantidad de agua. Este comportamiento se puede observar en la Figura 16 y en la Figura 17:

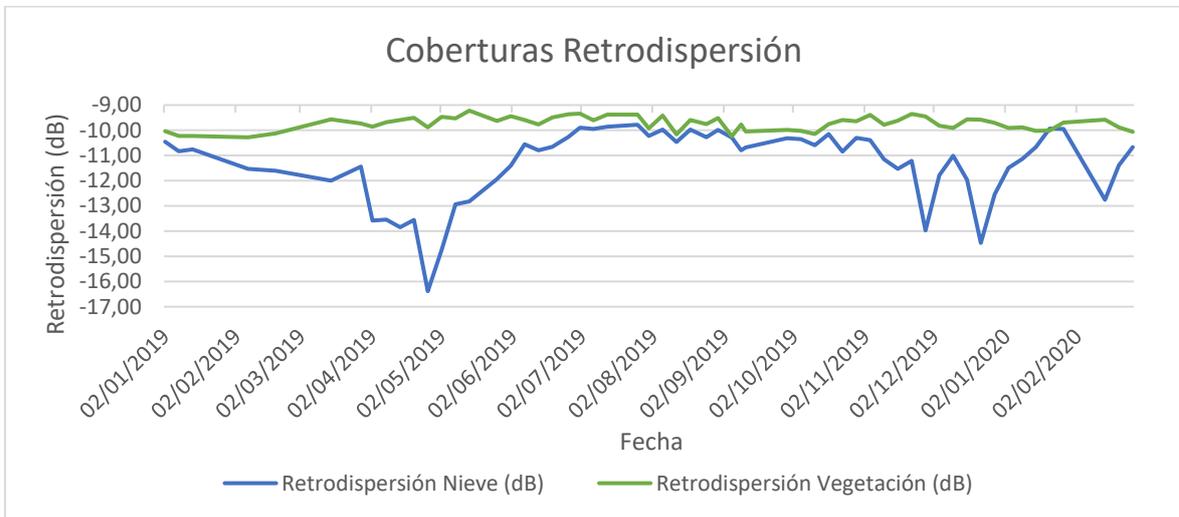


Figura 16. Coberturas retrodispersión.

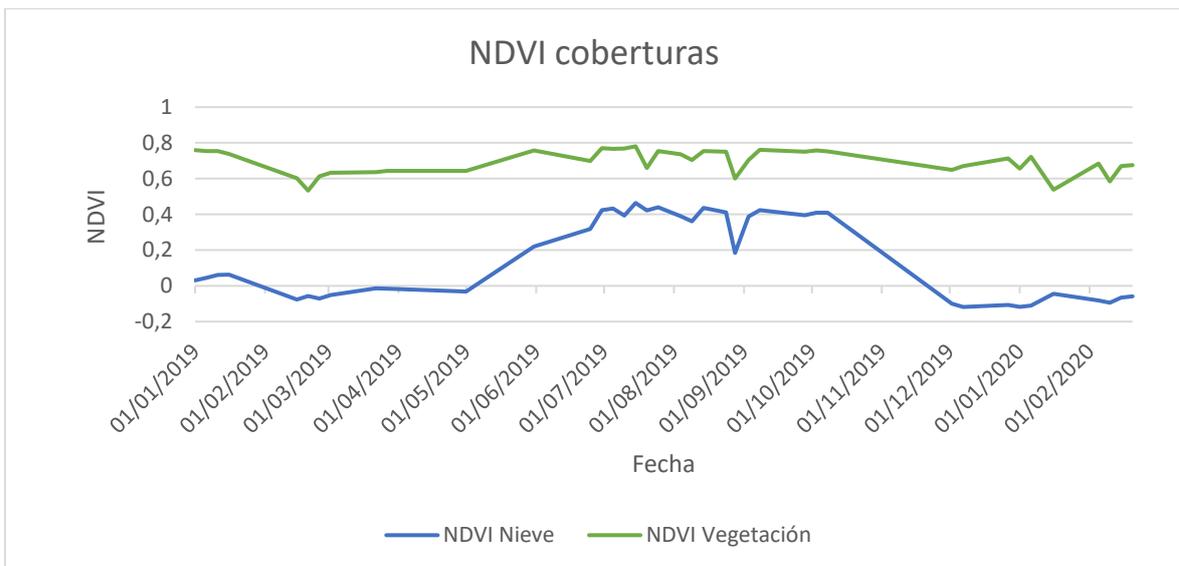


Figura 17. Coberturas NDVI.

En la Figura 16 se observa un mínimo muy destacado en mayo. De acuerdo con la Figura 14, justo antes de esa medida hay una serie de precipitaciones superior a lo habitual. El aumento de las precipitaciones, unido a una bajada de las temperaturas, provoca que aumente el espesor de la capa nival, lo que hace que la señal no sea capaz de penetrar lo suficiente para medir la HS y la medida obtenida tenga un valor tan bajo.

5.3. Variación de la retrodispersión durante los meses cálidos.

La retrodispersión aumenta con la humedad del suelo. Si llueve, la retrodispersión aumentará. Durante el verano aumentan las temperaturas, y se producen pocos y aislados eventos de precipitación, como se puede apreciar en la Figura 18, lo que debería hacer que la retrodispersión disminuyese, ya que el aumento de las temperaturas favorece la evaporación, y la HS disminuye.

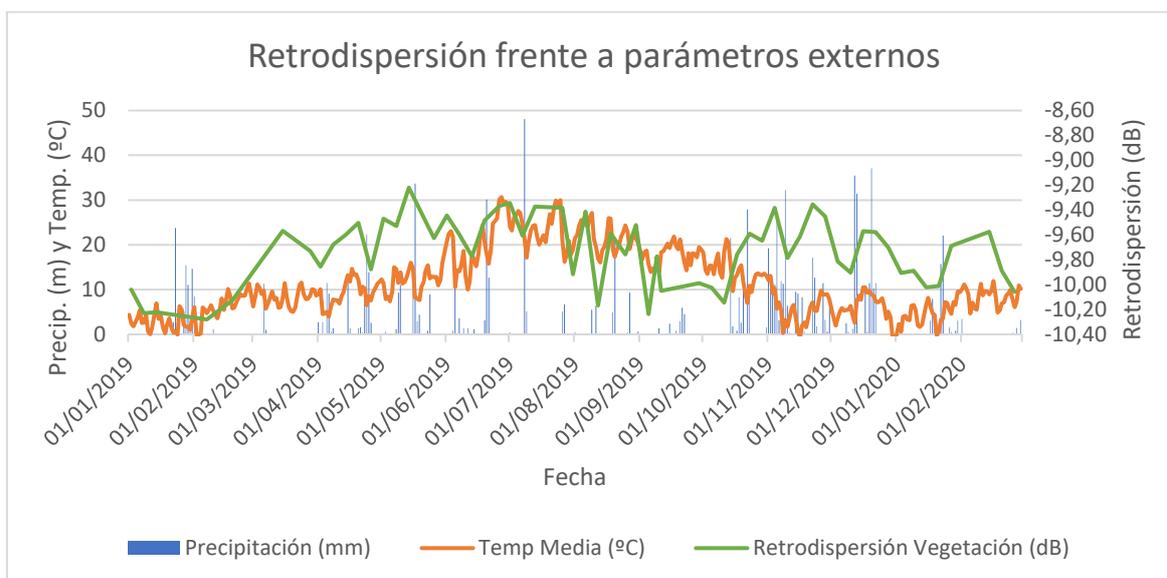


Figura 18. Relación de la retrodispersión respecto a temperatura y precipitaciones.

Sin embargo, se puede observar que los valores de retrodispersión se asemejan a los valores observados en fechas anteriores, cuando había más precipitaciones y las temperaturas eran más suaves.

La similitud de los valores veraniegos con los valores invernales se debe a la fusión de las nieves por el calor del verano. Cuando la nieve se transforma en agua líquida, parte de esta agua se infiltra aumentando la HS, lo que hace que aumente la retrodispersión. De este modo, los valores de retrodispersión observados son superiores a los valores esperables para un material seco. La fusión de la nieve también influye en los valores de NDVI, ya que la cantidad de agua disponible en el suelo es mayor, lo que se refleja en la Figura 19.

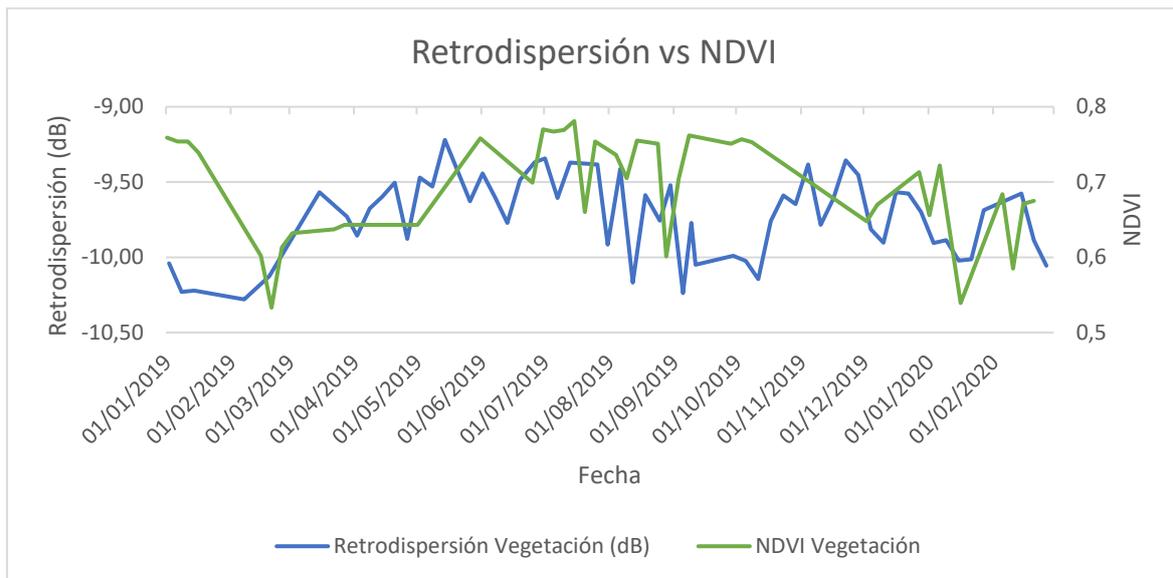


Figura 19. Valores de retrodispersión (SAR) vs NDVI (óptica) para la vegetación.

En la Figura 19 también se puede observar que en los meses de octubre y principios de noviembre se obtuvieron valores muy elevados, mientras que la retrodispersión sufrió una disminución en esa misma fecha. Si se observa la Figura 18, se puede ver que durante los meses previos ha habido escasos eventos de precipitación, por lo que el aporte de agua a la HS era el deshielo de la cobertura nival. A esas alturas del año, ese aporte es casi inexistente o incluso nulo, por ello el contenido en humedad disminuye, provocando que los valores de retrodispersión medidos sean menores.

En el caso del NDVI, este comportamiento se puede explicar utilizando la suposición de que la HS varía más rápidamente que la cobertura vegetal; así, se mantiene valores elevados debido a que los cambios observables en la vegetación se muestran de forma más paulatina que la variación de la HS medida con la retrodispersión.

5.4. Áreas de influencia de la cobertura nival sobre la retrodispersión.

Una vez obtenida la retrodispersión y el NDVI, se va a buscar conocer la influencia que tiene la nieve con respecto a zonas donde no hay nieve. Para ello se establecen áreas de influencia de la zona cubierta de nieve.

Se cogen los valores de aquellos puntos que se encuentran a 100, 500, 1000 y 2000 metros de la zona nevada; estos valores se encuentran representados en la Figura 20. Los valores que se encuentran dentro de esas zonas de influencia van a permitir estimar la variación de la retrodispersión.

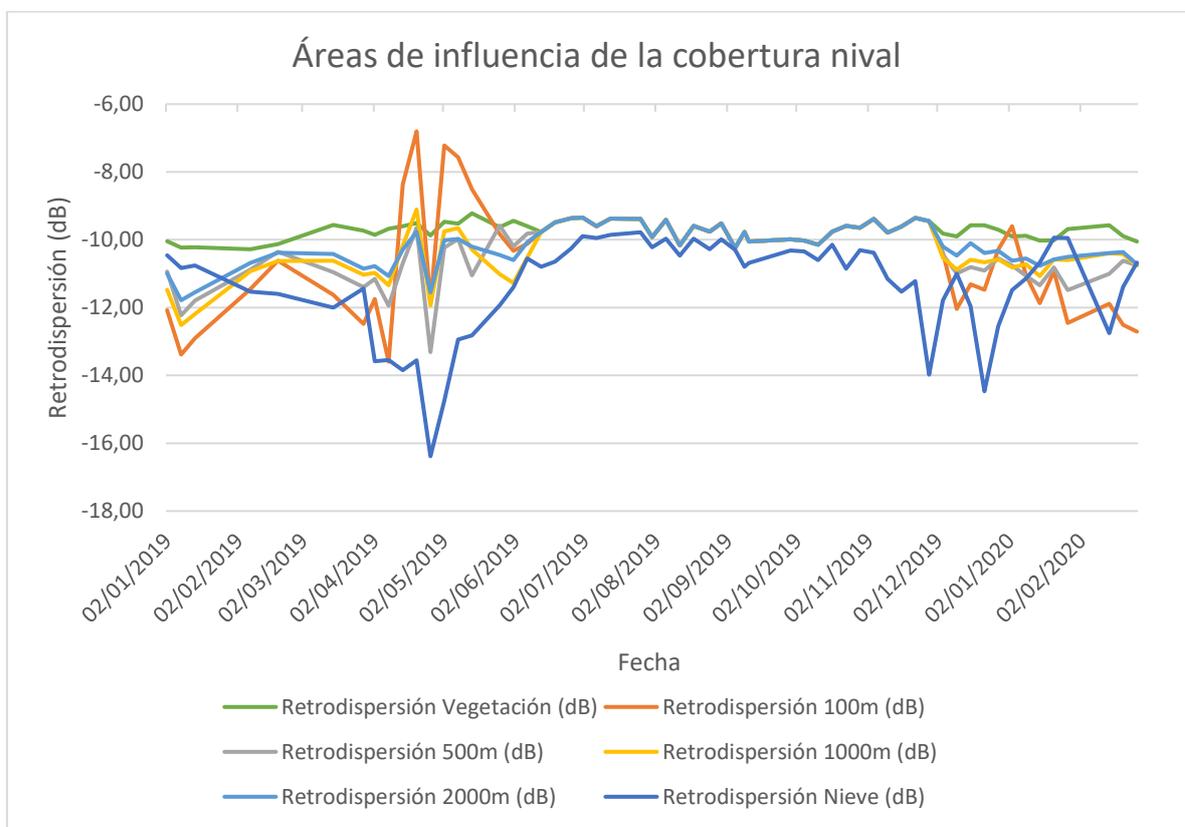


Figura 20. Áreas de influencia de la cobertura nival.

Para estimar la variación de la retrodispersión respecto a la distancia del punto de muestreo respecto a la cobertura nival, se han representado las dos coberturas y cuatro áreas de influencia a diferentes distancias de la zona nival.

Tal y como se esperaba, en zonas de nieve la retrodispersión es menor, ya que disminuye la constante dieléctrica respecto a la encontrada en zonas con mayor HS; con la excepción de las oscilaciones en el área de influencia de 100 m puesto

que es el área más pequeña y hay menos datos, lo que posibilita que pueda haber anomalías.

A medida que la distancia respecto a la zona cubierta de nieve es mayor, esa cobertura nival comienza a fundirse, transformándose en agua, que se infiltra en el suelo aumentando la HS. Por este motivo en zonas de influencia muy alejadas, los valores obtenidos se asemejan a los valores de HS registrados en zonas sin cobertura nival, puesto que la influencia de la nieve allí será mínima, sólo se encontrará en forma de agua en el suelo.

La retrodispersión se encuentra condicionada por la constante dieléctrica, es proporcional a ella; este factor es un indicador de la conductividad de la superficie, y está controlada por la cantidad de agua en la vegetación o en el suelo. Las propiedades dieléctricas influyen en la capacidad de absorber energía de microondas, y por ello afecta a la dispersión de dicha energía. Cuanta mayor humedad haya, menor es la penetrabilidad y mayor será la retrodispersión.

Durante el deshielo de una superficie congelada hay un cambio en las propiedades dieléctricas, lo que causa un incremento notable en la retrodispersión. (NASA, www.arset.gsfc.nasa.gov). Por este motivo, cuanto más alejada de la zona nevada se mida, mayor es la cantidad de nieve fundida que se ha infiltrado en el suelo, aumentando la HS, hasta llegar a un punto que la cobertura nival no tiene influencia alguna sobre la retrodispersión medida.

De acuerdo con esta afirmación, la línea azul de los 2000 metros en la gráfica debería estar siempre por encima del resto, pero en mayo los máximos se encuentran en el área de influencia de 100 metros. Esto se debe a que, al tratarse de una zona tan pequeña, se tienen muy pocas medidas de esa zona, y si se ha tomado alguna medida anómala, esta influye enormemente en el resultado.

6. CONCLUSIONES

Mediante el estudio de los datos de precipitación, se ha observado un aumento en la retrodispersión cuando los eventos de precipitación aumentan, lo que se interpreta como un aumento en la HS, y una disminución de la retrodispersión en épocas de menos precipitaciones, al igual que ocurre en los datos de NDVI obtenido mediante imágenes ópticas. Así mismo, estos valores se ven afectados negativamente por el aumento de las temperaturas que provocan que el suelo pierda humedad.

En zonas de alta montaña las precipitaciones resultan un factor más relevante en la variación de la HS que la temperatura. Estas precipitaciones permiten que se forme la cobertura nival en zonas de alta montaña, y posteriormente los procesos de fusión de la cobertura nival debido al aumento de las temperaturas, permiten que haya un aporte de agua al suelo en épocas más secas, cuando el contenido en agua del suelo sería muy bajo. Por el contrario, cuando la superficie se encuentra cubierta de nieve la retrodispersión es baja, puesto que el coeficiente dieléctrico de la nieve es mucho menor que el del agua.

Esta metodología supone una buena alternativa para analizar la variación de la HS de forma cualitativa, especialmente en superficies extensas, permitiendo obtener datos con una gran rapidez. A pesar de su simplicidad, puede ser de gran utilidad para estudiar la HS, ya que la relaciona con la variación de la retrodispersión medida por el SAR mediante la suposición de que la HS varía más rápidamente que la cobertura vegetal, lo que permite obtener una estimación de forma sencilla y rápida.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Mozos, J., Casalí, J., y González-Audícana, M. (2005a). Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. *Revista de Teledetección*, 23, 27-42. Recuperado de <http://www.aet.org.es/revistas/revista23/AET23-03.pdf>
- Álvarez-Mozos, J., Casalí, J., González-Audícana, M., y López, J. J. (2005b). Estimación de la humedad superficial del suelo mediante teledetección radar en presencia de una cubierta de cereal. *Estudios de la Zona No Saturada del suelo*, 7, 313-318. Recuperado de http://www.zonanosaturada.com/zns05/publications_files/area_4/12.pdf
- Barrett, B., Dwyer, E., y Whelan, P. (2009). Soil Moisture Retrieval from Active Spaceborne Microwave Observations: An Evaluation of Current Techniques. *Remote Sensing*, 1(3), 210- 242. doi:10.3390/rs1030210
- Benn, D. I. y Evans D.J.A (1998). *Glaciers and Glaciation*. London: Arnold.
- Behari. J. (2005) *Microwave Dielectric Behavior of Wet Soils*. Anamaya. Nueva Delhi, India: Anamaya.
- Brocca, L., Tullo, F., Melone, F., Moramarco, T., y Morbidelli, R. (2012). Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. *Journal of Hydrology*, 422, 63-75. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.12.039
- Cabrera, E., Galindo, G., y Vargas, D. M. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia, nivel nacional escala gruesa y fina*. Bogotá DC (Colombia): Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM.
- Ceballos-Barbancho, A., Hernández Santana, V., Casado Ledesma, S., y Morán Tejada, C. (2005). *Variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo en el sector semiárido de la cuenca del Duero (España)*. Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS). <http://hdl.handle.net/10261/65164>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio* (pp. 17-21, 43-46). Barcelona: Ariel, S.A.
- Enciso, J. M., Porter, D., y Peries, X. (2007). *Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego*. Universidad de Texas, Austin, EEUU.
- Engman, E. T. (1991). Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3), 213-226.

- European Space Agency (ESA). *Caja de Herramientas SNAP*. Recuperado el 12 de febrero de 2020. <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
- European Space Agency (ESA). *Descarga de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2*. Recuperado el 10 de febrero de 2020. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- European Space Agency (ESA). *Descarga de Software SNAP*. Recuperado el 21 de febrero de 2020. <http://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- European Space Agency (ESA). *Descripción de SENTINEL-1*. Recuperado el 18 de abril de 2020. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>.
- European Space Agency (ESA). *Descripción de SENTINEL-2*. Recuperado el 18 de abril de 2020. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- French, H.M., (1996). *The periglacial environment* (p.341). Singapore: Longman.
- French, H.M., (2007). *The periglacial environment* (3ª edición). Chichester, UK: Wiley and Sons.
- García-Ruiz, J. M., Puigdefábregas, J., y Creus Novau, J. (1986). La acumulación de nieve en el Pirineo central y su influencia hidrológica. *Pirineos*, 127, 27-72. Recuperado de https://digital.csic.es/bitstream/10261/95396/1/Pirineos%20127%20%20GarciaRuiz_nieve_Pirineocentral_hidraulica.pdf
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8(1), 1-10. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/MA_Gilabert/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion/links/00b7d5187635eb5a1a000000/Acerca-de-los-indices-de-vegetacion.pdf
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2015). *Estimación de Humedad de Suelo con Base en Imágenes de Satélite*, <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1785>
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. San Diego, EEUU: Academic Press.
- Holah, N., Baghdadi, N., Zribi, M., Bruand, A. y King, C. (2005). Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 96, (1), 78-86. doi: 10.1016/j.rse.2005.01.008

- Huang, C., Gascuel-Oudou, C. y Cros-Cayot, S. (2002). Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *CATENA*, 46 (2-3), 177-188. doi: 10.1016/S0341-8162(01)00165-5
- Jackson, T. J. (1993). III. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. *Hydrological Processes*, 7(2), 139-152. doi: 10.1002/hyp.3360070205
- Kousik, D., y Prabir-Kumar, P. (2015). Soil moisture retrieval model by using RISAT-1, C-band data in tropical dry and sub-humid zone of Bankura district of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space*, 18, 297–310. doi: 10.1016/j.ejrs.2015.09.004
- Kumar, S., y Bhagat, V. S. (2017). Remote Sensing Satellites for Land Applications: A Review. *Remote Sensing of Land*, 1(1), 53-86. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/10a2/95557fc0520ff7ce586b1baed2a1e0823993.pdf>
- Kupidura, P. (2016). Comparison of filters dedicated to speckle suppression in SAR images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 269-276. Recuperado de <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/>
- Lehmkuhl, F., Stauch, G. y Batkhishing, O. (2003). Rock glacier and periglacial processes in the Mongolian Altai. En M. Phillips, S.M. Springman y L. Arenson (Eds.), *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost* (pp. 639-644). Zurich.
- Lizarazo, I., y Mancera, R (2017). Uso de técnicas de regresión ML para obtener una propiedad de interés en la zona de estudio. https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/324020_6826d946a9e04a59905e5db23aa0b6ca.html
- Martínez-Fernández, J., y Ceballos, A. (2005). Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. *Journal of Hydrology*, 312(1-4), 28-38. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.007
- Ministerio de Agricultura, Gobierno de España, 2020, SIAR. <http://portal.mapa.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1>. Consultado el 02/03/2020.

- National Aeronautics and Space Administration (NASA). *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR)*. Recuperado el 15 de enero de 2020. <https://arset.gsfc.nasa.gov/disasters/webinars/intro-SAR>.
- Shukla, J., y Mintz, Y. (1982). Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science*, 215(4539), 1498-1501. doi: 10.1126/science.215.4539.1498
- Solorza, R. (2013). *Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano. Estudio exploratorio en imágenes SARAT*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba]. https://ig.conae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2010_Solorza-Romina.pdf
- Thorn, C.E. (1992). Periglacial Geomorphology: What, Where, When? En J.C. Dixon y A.D. Abrahams (Eds.), *Periglacial Geomorphology* (pp. 1-30). Chichester: Wiley and Sons.
- Topp, G. C., Davis, J. L., y Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582. doi: 0.1029/WR016i003p00574
- Xue, J., y Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017. doi: 10.1155/2017/1353691

8. ANEXOS

8.1. Anexo I. Tablas.

Tabla 6. Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
01/01/2019	4,4	67,12	0
02/01/2019	2,46	74,9	0
03/01/2019	1,8	59,9	0
04/01/2019	2,72	51,67	0
05/01/2019	3,79	50	0
06/01/2019	5,39	39,84	0
07/01/2019	2,51	50,45	0
08/01/2019	2,64	72,5	0
09/01/2019	4,47	64,82	0
10/01/2019	0,66	47,58	0
11/01/2019	0	61,77	0
12/01/2019	1,62	71,7	0
13/01/2019	4,46	77,8	0
14/01/2019	6,97	71,6	0
15/01/2019	3,46	68,82	0
16/01/2019	4,14	66,9	0
17/01/2019	1,68	83,9	0
18/01/2019	0,22	87,4	0,2
19/01/2019	2,07	85,9	2,57
20/01/2019	3,58	87,5	0,2
21/01/2019	1,77	72,1	0
22/01/2019	0,41	89,2	2,77
23/01/2019	0,6	98	23,76
24/01/2019	-0,01	70,6	0,4
25/01/2019	6,27	76,2	0
26/01/2019	5,52	80,6	0
27/01/2019	2,12	89,9	5,15
28/01/2019	1,71	94,1	15,44
29/01/2019	1,68	94,3	11,09
30/01/2019	1	94,8	3,17
31/01/2019	3,86	93,9	14,65
01/02/2019	6,07	77,9	8,51
02/02/2019	-0,1	94,2	4,16
03/02/2019	-0,03	55,24	0
04/02/2019	0,19	61,41	0,2
05/02/2019	6,04	89,4	0
06/02/2019	5,51	86,2	0,2
07/02/2019	4,75	83,3	0

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
08/02/2019	5,57	71,2	0
09/02/2019	6,51	72,7	0
10/02/2019	5,28	81,7	1,19
11/02/2019	4,4	74,6	0
12/02/2019	3,59	67,95	0
13/02/2019	5,48	62,16	0
14/02/2019	7,99	42,39	0
15/02/2019	5,43	49,69	0
16/02/2019	7,42	42,93	0
17/02/2019	10,18	27,89	0
18/02/2019	8,81	39,97	0
19/02/2019	5,8	58,28	0
20/02/2019	5,95	71,3	0
21/02/2019	7,25	68,56	0
22/02/2019	8,06	58,31	0
23/02/2019	8,92	55,37	0
24/02/2019	8,56	63,49	0
25/02/2019	8,62	68,85	0
26/02/2019	10,21	56,04	0
27/02/2019	11,36	36,83	0
28/02/2019	8,74	58,75	0
01/03/2019	6,24	65,82	0
02/03/2019	8,55	62,75	0
03/03/2019	11,17	47,33	0
04/03/2019	10,4	53,56	0
05/03/2019	8,99	61,21	0
06/03/2019	9,81	67,41	11,29
07/03/2019	5,74	71,2	0,99
08/03/2019	6,86	72,1	0
09/03/2019	8,08	79,7	0
10/03/2019	9,56	76,7	0
11/03/2019	7,72	61,16	0
12/03/2019	8,12	59,17	0
13/03/2019	5,98	65,02	0
14/03/2019	6,11	72,9	0
15/03/2019	8,23	64,36	0
16/03/2019	11,42	43,51	0
17/03/2019	8,08	59,01	0
18/03/2019	6,06	53,51	0
19/03/2019	5,14	65,44	0
20/03/2019	5,04	57,17	0
21/03/2019	6,02	54,12	0

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
22/03/2019	8,5	57,02	0
23/03/2019	10,98	54,27	0
24/03/2019	11,61	52,63	0
25/03/2019	8,98	58,12	0
26/03/2019	7,85	49,6	0
27/03/2019	7,91	42,98	0
28/03/2019	8,65	55,09	0
29/03/2019	10,06	52,81	0
30/03/2019	9,95	54	0
31/03/2019	8,66	66,3	0
01/04/2019	9,07	85	2,77
02/04/2019	10,08	73,6	0,2
03/04/2019	4,5	82,2	2,77
04/04/2019	4,64	64,49	0
05/04/2019	5,01	80	11,48
06/04/2019	3,98	87,8	9,11
07/04/2019	6,32	78,5	0,59
08/04/2019	7,83	78,3	1,39
09/04/2019	7,64	77,5	0
10/04/2019	7,59	69,48	0
11/04/2019	6,87	68,84	0
12/04/2019	8,55	60,41	0
13/04/2019	9,45	40,44	0
14/04/2019	11,75	60,46	0
15/04/2019	13,22	72,3	11,68
16/04/2019	11,78	72,2	1,39
17/04/2019	14,63	58,56	0
18/04/2019	13,28	62,74	0
19/04/2019	13,42	54,19	0
20/04/2019	12,14	67,58	1,39
21/04/2019	8,91	88	1,58
22/04/2019	10,66	77,8	0,4
23/04/2019	10,22	81,1	9,5
24/04/2019	6,5	85,8	22,37
25/04/2019	8,51	79,8	13,86
26/04/2019	7,62	81	2,57
27/04/2019	9,41	70,8	0
28/04/2019	10,2	64,45	0
29/04/2019	11,26	67	0
30/04/2019	11,7	62,75	0
01/05/2019	12,32	63,19	0
02/05/2019	11,43	70,3	0

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
03/05/2019	7,85	76,1	0,59
04/05/2019	8,47	68,59	0
05/05/2019	7,38	50,52	0
06/05/2019	9,43	47,02	0
07/05/2019	14,97	46,11	0
08/05/2019	14,6	65,34	1,19
09/05/2019	11,49	62,24	9,31
10/05/2019	13,87	84,9	11,09
11/05/2019	11,36	70,8	0
12/05/2019	11,7	55,25	0
13/05/2019	12,71	52,24	0
14/05/2019	14,46	55,52	0
15/05/2019	16	51,06	0
16/05/2019	14,67	65,07	14,06
17/05/2019	8,2	86,9	33,66
18/05/2019	7,92	77,8	2,97
19/05/2019	7,67	84,5	4,36
20/05/2019	10,59	70,3	0
21/05/2019	11,7	67,73	0
22/05/2019	14,2	66,28	0
23/05/2019	15,42	69,01	0,79
24/05/2019	12,47	80,4	8,91
25/05/2019	12,92	70,7	0
26/05/2019	12,8	70,6	0
27/05/2019	12,84	73,2	0
28/05/2019	10,96	64,17	0
29/05/2019	12,15	60,54	0
30/05/2019	15,96	59,58	0
31/05/2019	18,38	53,74	0
01/06/2019	20,78	51,67	0
02/06/2019	22,47	45,24	0
03/06/2019	23,04	43,91	0
04/06/2019	21,81	48,35	0,79
05/06/2019	10,58	85,5	16,63
06/06/2019	14,36	62,13	0
07/06/2019	14,11	58,41	3,56
08/06/2019	15,6	55,48	0
09/06/2019	18,66	55,18	1,39
10/06/2019	13,1	69,33	0
11/06/2019	10,03	72,9	1,39
12/06/2019	11,82	56,51	0
13/06/2019	17,81	46,15	0
14/06/2019	16,7	66,5	1,19

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
15/06/2019	15,22	66,55	0
16/06/2019	17,86	51,04	0
17/06/2019	22,05	38,92	0
18/06/2019	24,39	33,47	0
19/06/2019	20,72	46,86	3,17
20/06/2019	17,82	75,6	30,1
21/06/2019	15,77	81,2	12,67
22/06/2019	18,98	58,69	0
23/06/2019	24,79	42,01	0
24/06/2019	25,33	34,86	0
25/06/2019	25,88	42,56	0
26/06/2019	30,14	24,61	0
27/06/2019	30,66	22,37	0
28/06/2019	29,32	28,18	0
29/06/2019	29,63	22,61	0
30/06/2019	28,97	24,26	0
01/07/2019	24,05	52,32	0,4
02/07/2019	23,21	59,84	0
03/07/2019	26,13	42,38	0
04/07/2019	26,57	36,77	0
05/07/2019	27,53	35,04	0
06/07/2019	27,13	35,92	0
07/07/2019	24,57	45,39	0
08/07/2019	21,54	63,57	48,11
09/07/2019	17,14	78	5,15
10/07/2019	20,54	65,11	0
11/07/2019	23,21	54,16	0
12/07/2019	24,24	43,43	0
13/07/2019	24,4	50,8	0,2
14/07/2019	21,74	62,77	0
15/07/2019	20,09	53,96	0
16/07/2019	21,14	55,43	0
17/07/2019	22,13	62,86	0
18/07/2019	20,54	61,12	0
19/07/2019	23,56	48,73	0,2
20/07/2019	26,84	48,89	0
21/07/2019	24,73	58,23	0
22/07/2019	28,34	37,07	0
23/07/2019	29,91	25,12	0
24/07/2019	28,79	28,34	0
25/07/2019	30	27,71	0
26/07/2019	21,01	73,6	5,15
27/07/2019	16,22	82,8	6,73

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
28/07/2019	17,65	60,57	0
29/07/2019	20,89	54,31	0
30/07/2019	17,75	61,22	0
31/07/2019	18,91	57,57	0
01/08/2019	21,41	64,29	0,4
02/08/2019	22,17	56,2	0
03/08/2019	24,28	42,27	0
04/08/2019	25,56	47,74	0
05/08/2019	25,01	54,1	0
06/08/2019	24,57	53,69	0
07/08/2019	24,08	56,08	0
08/08/2019	26,18	48,23	0
09/08/2019	27,11	49,03	5,54
10/08/2019	21,33	66,13	0
11/08/2019	19,41	71,7	6,34
12/08/2019	16,9	63,39	0
13/08/2019	16,07	61,39	0
14/08/2019	18,76	56,54	0
15/08/2019	19,63	59,1	0
16/08/2019	21,27	48,58	0
17/08/2019	26	40,1	0
18/08/2019	25,82	49,56	0
19/08/2019	18,91	68,06	4,95
20/08/2019	17,33	79	20,99
21/08/2019	18,97	69,6	0
22/08/2019	20,14	60,23	0
23/08/2019	21,88	49,94	0
24/08/2019	23,02	47,66	0
25/08/2019	24,36	44,99	0
26/08/2019	22,82	45,74	0,4
27/08/2019	19,08	75,9	9,31
28/08/2019	21,03	66,67	0,2
29/08/2019	22,1	61,1	0
30/08/2019	21,45	62,02	0
31/08/2019	20,49	67,3	0,59
01/09/2019	18,69	73,4	0,2
02/09/2019	16,73	62,59	0
03/09/2019	18,35	55,07	0
04/09/2019	18,68	58,36	0
05/09/2019	15,61	50,98	0
06/09/2019	13,93	56,16	0
07/09/2019	14,7	54,4	0
08/09/2019	14,46	59,21	0

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
09/09/2019	15,41	57,21	0
10/09/2019	13,9	57,02	1,39
11/09/2019	18,32	46,53	0
12/09/2019	18,57	55,7	0
13/09/2019	19,38	53,63	0
14/09/2019	20,31	54,02	0
15/09/2019	19,28	71,4	2,38
16/09/2019	20,6	61,2	0
17/09/2019	21,86	54,91	0
18/09/2019	19,86	66,45	0,79
19/09/2019	18,99	64,14	0
20/09/2019	21,23	56,15	2,97
21/09/2019	18,33	73,8	5,94
22/09/2019	16,24	78,7	4,55
23/09/2019	14,3	65,02	0
24/09/2019	18,11	59,32	0
25/09/2019	15,41	69,27	0
26/09/2019	18,12	60,28	0
27/09/2019	17,95	54,01	0
28/09/2019	17,23	55,76	0
29/09/2019	19,46	45,89	0
30/09/2019	18,92	50,61	0
01/10/2019	18,29	55,62	0
02/10/2019	14,39	68,65	0
03/10/2019	13,52	59,92	0
04/10/2019	15,35	60,67	0
05/10/2019	15,38	64,37	0
06/10/2019	13,4	68,79	0
07/10/2019	16,2	50,97	0
08/10/2019	18,08	59,24	0
09/10/2019	13,79	69,82	0
10/10/2019	12,64	60,14	0
11/10/2019	18,42	50,13	0
12/10/2019	21,26	57,58	0
13/10/2019	20,56	56,73	0
14/10/2019	15,41	75,6	21,58
15/10/2019	9,62	79,4	1,78
16/10/2019	12,56	63,88	0
17/10/2019	13,31	68,79	0,79
18/10/2019	14,62	80,8	8,32
19/10/2019	15,4	67,96	2,57
20/10/2019	11,91	79,7	13,27
21/10/2019	9,01	85,6	0

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
22/10/2019	7,02	95,5	27,92
23/10/2019	10,9	81,1	7,72
24/10/2019	9,44	86,5	0,2
25/10/2019	11,83	77,4	0
26/10/2019	13,38	68,46	0
27/10/2019	13,64	69,93	0
28/10/2019	13,29	75,6	0
29/10/2019	13,25	78,9	0
30/10/2019	13,6	80,7	0
31/10/2019	13,16	79,6	1,58
01/11/2019	12,05	92	19,21
02/11/2019	13,08	93,3	11,68
03/11/2019	9,18	84,6	11,48
04/11/2019	10,23	91,1	11,09
05/11/2019	5,71	92,2	25,74
06/11/2019	7,17	88,7	3,17
07/11/2019	5,49	90,2	11,88
08/11/2019	0,32	99,7	11,29
09/11/2019	3,25	96,3	32,27
10/11/2019	1,73	95	6,34
11/11/2019	3,57	88	0,4
12/11/2019	5,95	82,9	0
13/11/2019	6,57	77,7	0
14/11/2019	3,52	85,8	9,5
15/11/2019	0,7	95,4	9,11
16/11/2019	-0,62	97,1	1,39
17/11/2019	1,96	99	8,32
18/11/2019	2,68	81,4	0,59
19/11/2019	1,58	76,8	0
20/11/2019	4,04	71,36	0,2
21/11/2019	6,17	76,1	0,2
22/11/2019	7,19	81,5	17,14
23/11/2019	5,38	90,6	12,65
24/11/2019	5,25	89,7	1,84
25/11/2019	7,78	88,6	0,2
26/11/2019	9,78	80,2	0,2
27/11/2019	8,84	85,8	11,42
28/11/2019	8,91	92,4	3,26
29/11/2019	8,93	83,4	0,61
30/11/2019	7,78	78,2	5,92
01/12/2019	5,58	90,8	0
02/12/2019	3,73	85,1	0,2
03/12/2019	1,92	88,7	0

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
04/12/2019	3,57	83,7	0,2
05/12/2019	5,1	86,1	0
06/12/2019	5,89	86,7	0
07/12/2019	5,3	86,8	0
08/12/2019	5,47	91,8	2,45
09/12/2019	5,51	84,2	0,61
10/12/2019	6,34	72,5	0
11/12/2019	4,32	85,8	1,22
12/12/2019	2,57	98,2	35,5
13/12/2019	7,27	95,6	31,42
14/12/2019	8,65	86,5	0
15/12/2019	7,73	81,2	0
16/12/2019	10,54	63,3	0
17/12/2019	10,5	77,7	10,2
18/12/2019	9,3	84,8	0,61
19/12/2019	9,75	78	11,42
20/12/2019	8,9	89,3	37,13
21/12/2019	8,63	87,8	10,2
22/12/2019	7,35	85,8	11,42
23/12/2019	7,19	80,4	0,2
24/12/2019	7,47	89	0
25/12/2019	8,07	85,5	0
26/12/2019	6,52	83,8	0
27/12/2019	3,45	84,6	0,2
28/12/2019	5,06	73,5	0
29/12/2019	3,86	84	0
30/12/2019	-0,39	99,8	0,2
31/12/2019	-0,99	100	0,2
01/01/2020	-0,04		0,2
02/01/2020	2,34	90,7	0,2
03/01/2020	0,6	97,6	0,2
04/01/2020	3,94	86	0,2
05/01/2020	4,19	82,6	0
06/01/2020	3,33	76,4	0
07/01/2020	3,19	80,9	0,2
08/01/2020	6,36	78,7	0
09/01/2020	6,57	74,1	0
10/01/2020	5,48	77,1	0,2
11/01/2020	1,97	76,3	0
12/01/2020	1,66	73,5	0
13/01/2020	2,16	71	0
14/01/2020	4,25	59,18	0
15/01/2020	6,65	61,43	0

Tabla 6. (cont). Datos de temperatura, humedad y precipitación obtenidos de la estación meteorológica.

Fecha	Tem. Media (°C)	Humedad Media (%)	Precipitación (mm)
16/01/2020	8,19	71	0
17/01/2020	6,2	82,2	3,06
18/01/2020	4,65	77	7,96
19/01/2020	4,39	60,2	1,43
20/01/2020	-0,27	67,17	0
21/01/2020	0,61	83,8	0
22/01/2020	3,34	93,7	15,71
23/01/2020	3,49	96,6	22,03
24/01/2020	7,25	77,9	0
25/01/2020	7,03	78,5	0,2
26/01/2020	5,43	86,8	1,63
27/01/2020	4,62	85,5	0,41
28/01/2020	7,23	82	0
29/01/2020	6,57	86,8	0,82
30/01/2020	9,57	91,9	3,06
31/01/2020	9,44	87,1	0
01/02/2020	10,07	89,8	3,47
02/02/2020	11,16	84,1	0
03/02/2020	10,37	79,5	0
04/02/2020	8,98	68,27	0
05/02/2020	4,69	61,84	0
06/02/2020	7,11	45,14	0
07/02/2020	5,82	65,93	0
08/02/2020	5,5	84,9	0
09/02/2020	8,66	77,2	0
10/02/2020	11,3	77	0
11/02/2020	8,73	83,5	0
12/02/2020	9,64	74,1	0
13/02/2020	9,56	82,5	0
14/02/2020	8,94	75,2	0
15/02/2020	9,73	70,7	0
16/02/2020	11,93	58,09	0
17/02/2020	8,51	72,7	0
18/02/2020	4,87	70,4	0
19/02/2020	5,38	73,1	0
20/02/2020	6,94	64,04	0
21/02/2020	7,15	69,39	0
22/02/2020	8,57	64,08	0
23/02/2020	9,12	61,51	0
24/02/2020	9,86	50,68	0
25/02/2020	7,95	63,76	0,41
26/02/2020	6,07	76,3	0,2
27/02/2020	7,2	82,4	1,43

28/02/2020	10,94	66,73	0
29/02/2020	10,13	74,2	3,26

Tabla 7. Valores de retrodispersión.

Fecha	Retrodispersión Nieve (dB)	Retrodispersión Vegetación (dB)	Retrodispersión 100m (dB)	Retrodispersión 500m (dB)	Retrodispersión 1000m (dB)	Retrodispersión 2000m (dB)
02/01/2019	-10,45	-10,04	-12,07	-10,93	-11,48	-11,00
08/01/2019	-10,83	-10,23	-13,39	-12,23	-12,52	-11,78
14/01/2019	-10,76	-10,22	-12,90	-11,80	-12,19	-11,55
07/02/2019	-11,53	-10,28	-11,46	-10,88	-10,93	-10,68
19/02/2019	-11,60	-10,13	-10,62	-10,35	-10,63	-10,39
15/03/2019	-12,00	-9,57	-11,63	-10,96	-10,62	-10,42
28/03/2019	-11,44	-9,73	-12,49	-11,40	-11,03	-10,86
02/04/2019	-13,58	-9,86	-11,75	-11,15	-10,97	-10,78
08/04/2019	-13,54	-9,68	-13,60	-11,95	-11,35	-11,07
14/04/2019	-13,85	-9,60	-8,37	-10,69	-10,17	-10,29
20/04/2019	-13,56	-9,50	-6,80	-9,65	-9,11	-9,77
26/04/2019	-16,39	-9,88	-11,86	-13,31	-11,94	-11,55
02/05/2019	-14,75	-9,47	-7,22	-10,23	-9,76	-10,02
08/05/2019	-12,94	-9,53	-7,57	-9,98	-9,66	-9,98
14/05/2019	-12,82	-9,22	-8,51	-11,05	-10,28	-10,20
26/05/2019	-11,94	-9,63	-9,83	-9,59	-11,01	-10,45
01/06/2019	-11,40	-9,44	-10,33	-10,19	-11,28	-10,59
07/06/2019	-10,55	-9,60	-10,12	-9,82	-10,52	-10,07

Tabla 7 (cont.). Valores de retrodispersión.

Fecha	Retrodispersión Nieve (dB)	Retrodispersión Vegetación (dB)	Retrodispersión 100m (dB)	Retrodispersión 500m (dB)	Retrodispersión 1000m (dB)	Retrodispersión 2000m (dB)
13/06/2019	-10,80	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77
19/06/2019	-10,65	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49
26/06/2019	-10,26	-9,37	-9,37	-9,37	-9,37	-9,37
01/07/2019	-9,89	-9,34	-9,34	-9,34	-9,34	-9,34
07/07/2019	-9,94	-9,61	-9,61	-9,61	-9,61	-9,61
13/07/2019	-9,86	-9,37	-9,37	-9,37	-9,37	-9,37
26/07/2019	-9,78	-9,38	-9,38	-9,38	-9,38	-9,38
31/07/2019	-10,22	-9,92	-9,92	-9,92	-9,92	-9,92
06/08/2019	-9,97	-9,41	-9,41	-9,41	-9,41	-9,41
12/08/2019	-10,47	-10,17	-10,17	-10,17	-10,17	-10,17
18/08/2019	-9,97	-9,59	-9,59	-9,59	-9,59	-9,59
25/08/2019	-10,28	-9,76	-9,76	-9,76	-9,76	-9,76
30/08/2019	-9,99	-9,52	-9,52	-9,52	-9,52	-9,52
05/09/2019	-10,29	-10,24	-10,24	-10,24	-10,24	-10,24
09/09/2019	-10,80	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77
11/09/2019	-10,69	-10,05	-10,05	-10,05	-10,05	-10,05
29/09/2019	-10,31	-9,99	-9,99	-9,99	-9,99	-9,99
05/10/2019	-10,35	-10,02	-10,02	-10,02	-10,02	-10,02

Tabla 7 (cont.). Valores de retrodispersión.

Fecha	Retrodispersión Nieve (dB)	Retrodispersión Vegetación (dB)	Retrodispersión 100m (dB)	Retrodispersión 500m (dB)	Retrodispersión 1000m (dB)	Retrodispersión 2000m (dB)
11/10/2019	-10,60	-10,14	-10,14	-10,14	-10,14	-10,14
17/10/2019	-10,15	-9,76	-9,76	-9,76	-9,76	-9,76
23/10/2019	-10,85	-9,59	-9,59	-9,59	-9,59	-9,59
29/10/2019	-10,30	-9,65	-9,65	-9,65	-9,65	-9,65
04/11/2019	-10,39	-9,38	-9,38	-9,38	-9,38	-9,38
10/11/2019	-11,15	-9,78	-9,78	-9,78	-9,78	-9,78
16/11/2019	-11,53	-9,61	-9,61	-9,61	-9,61	-9,61
22/11/2019	-11,22	-9,36	-9,36	-9,36	-9,36	-9,36
28/11/2019	-13,98	-9,45	-9,45	-9,45	-9,45	-9,45
04/12/2019	-11,78	-9,81	-10,38	-10,44	-10,53	-10,20
10/12/2019	-11,01	-9,90	-12,04	-10,99	-10,88	-10,47
16/12/2019	-11,96	-9,57	-11,32	-10,81	-10,59	-10,10
22/12/2019	-14,47	-9,58	-11,48	-10,91	-10,66	-10,39
28/12/2019	-12,54	-9,70	-10,28	-10,55	-10,58	-10,32
03/01/2020	-11,49	-9,91	-9,60	-10,76	-10,81	-10,62
09/01/2020	-11,14	-9,89	-11,04	-11,06	-10,72	-10,55
15/01/2020	-10,67	-10,02	-11,87	-11,34	-11,07	-10,77
21/01/2020	-9,94	-10,01	-10,92	-10,82	-10,58	-10,58

Tabla 7 (cont.). Valores de retrodispersión.

Fecha	Retrodispersión Nieve (dB)	Retrodispersión Vegetación (dB)	Retrodispersión 100m (dB)	Retrodispersión 500m (dB)	Retrodispersión 1000m (dB)	Retrodispersión 2000m (dB)
27/01/2020	-9,95	-9,69	-12,46	-11,48	-10,60	-10,51
14/02/2020	-12,76	-9,58	-11,89	-11,00	-10,40	-10,39
20/02/2020	-11,39	-9,89	-12,51	-10,62	-10,42	-10,36
26/02/2020	-10,67	-10,06	-12,70	-10,76	-10,76	-10,72

Tabla 8. Valores NDVI.

Fecha	NDVI Nieve	NDVI Vegetación	NDVI 100m	NDVI 500m	NDVI 1000m	NDVI 2000m
01/01/2019	0,030	0,759	0,140	0,292	0,361	0,472
06/01/2019	0,045	0,754	0,197	0,319	0,368	0,474
11/01/2019	0,062	0,754	0,179	0,307	0,348	0,457
16/01/2019	0,063	0,739	0,383	0,364	0,390	0,483
15/02/2019	-0,076	0,602	0,372	0,485	0,577	0,611
20/02/2019	-0,057	0,533	0,392	0,449	0,538	0,567
25/02/2019	-0,071	0,613	0,352	0,579	0,517	0,608
02/03/2019	-0,051	0,632	0,380	0,615	0,544	0,627
22/03/2019	-0,014	0,637	0,276	0,401	0,498	0,566
27/03/2019	-0,015	0,643	0,331	0,441	0,521	0,582
01/05/2019	-0,031	0,643	0,261	0,475	0,509	0,579
31/05/2019	0,221	0,758	0,283	0,309	0,494	0,516
25/06/2019	0,319	0,699	0,699	0,699	0,699	0,699
30/06/2019	0,424	0,770	0,770	0,770	0,770	0,770
05/07/2019	0,433	0,767	0,767	0,767	0,767	0,767
10/07/2019	0,394	0,769	0,769	0,769	0,769	0,769
15/07/2019	0,464	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781
20/07/2019	0,422	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660

Tabla 8 (cont.). Valores NDVI.

Fecha	NDVI Nieve	NDVI Vegetación	NDVI 100m	NDVI 500m	NDVI 1000m	NDVI 2000m
25/07/2019	0,44	0,754	0,754	0,754	0,754	0,754
04/08/2019	0,389	0,736	0,736	0,736	0,736	0,736
09/08/2019	0,361	0,705	0,705	0,705	0,705	0,705
14/08/2019	0,436	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755
24/08/2019	0,412	0,751	0,751	0,751	0,751	0,751
28/08/2019	0,184	0,601	0,601	0,601	0,601	0,601
03/09/2019	0,388	0,705	0,705	0,705	0,705	0,705
08/09/2019	0,424	0,762	0,762	0,762	0,762	0,762
28/09/2019	0,396	0,751	0,751	0,751	0,751	0,751
03/10/2019	0,41	0,757	0,757	0,757	0,757	0,757
08/10/2019	0,409	0,753	0,753	0,753	0,753	0,753
02/12/2019	-0,099	0,648	0,359	0,505	0,582	0,635
07/12/2019	-0,118	0,67	0,44	0,58	0,63	0,667
27/12/2019	-0,106	0,713	0,332	0,528	0,629	0,666
01/01/2020	-0,117	0,656	0,344	0,551	0,623	0,652
06/01/2020	-0,11	0,722	0,413	0,526	0,583	0,649
16/01/2020	-0,044	0,539	0,332	0,432	0,47	0,51
05/02/2020	-0,081	0,684	0,201	0,431	0,571	0,63

Tabla 8 (cont.). Valores NDVI.

Fecha	NDVI Nieve	NDVI Vegetación	NDVI 100m	NDVI 500m	NDVI 1000m	NDVI 2000m
10/02/2020	-0,094	0,585	0,243	0,425	0,549	0,594
15/02/2020	-0,065	0,671	0,219	0,327	0,458	0,56
20/02/2020	-0,059	0,675	0,272	0,359	0,486	0,579

8.2. Anexo II. Gráficas.

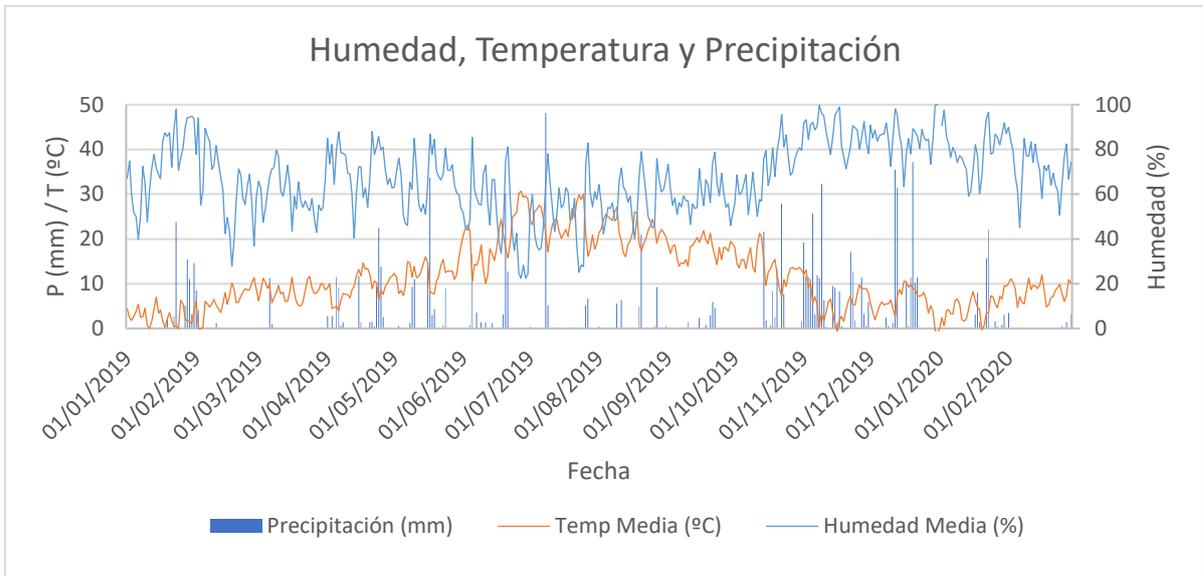


Figura 21. Datos de humedad, precipitación y temperatura.

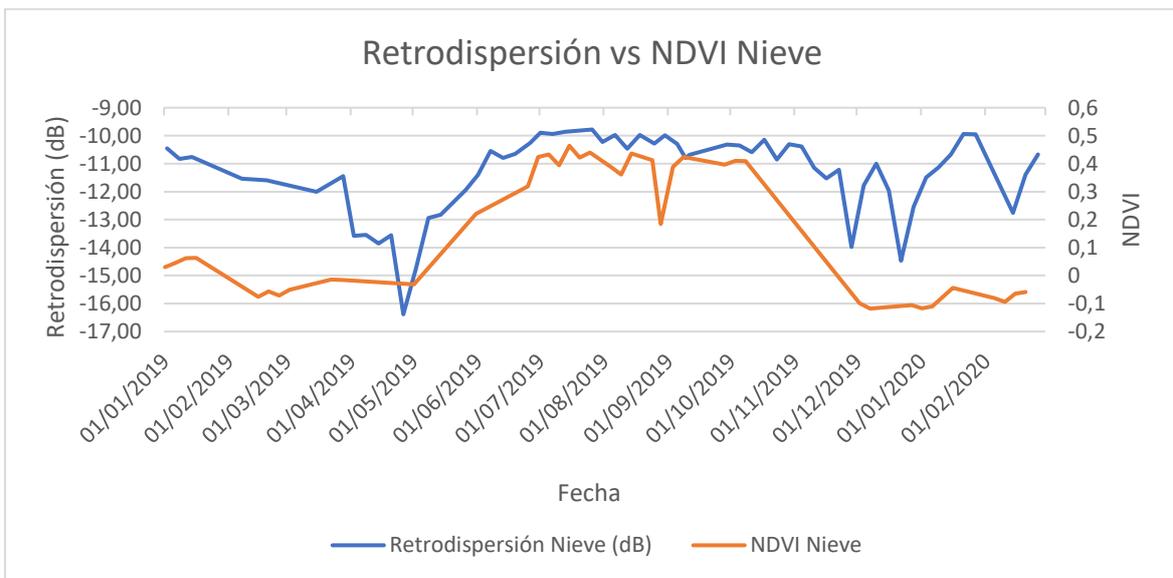


Figura 22. Retrodispersión frente a NDVI en Nieve.

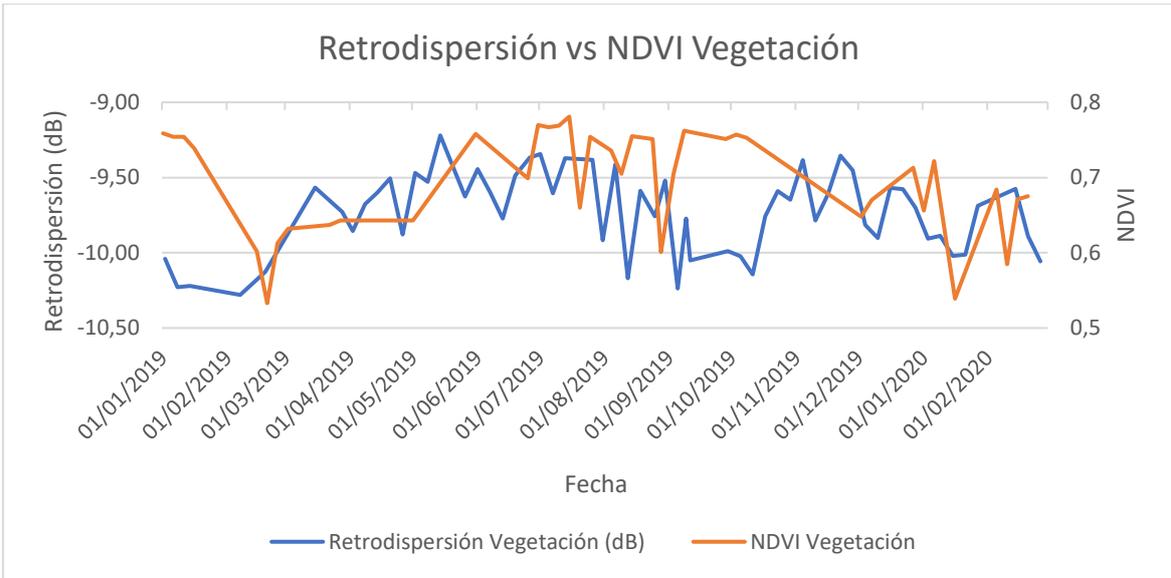


Figura 23. Retrodispersión frente a NDVI en Vegetación.

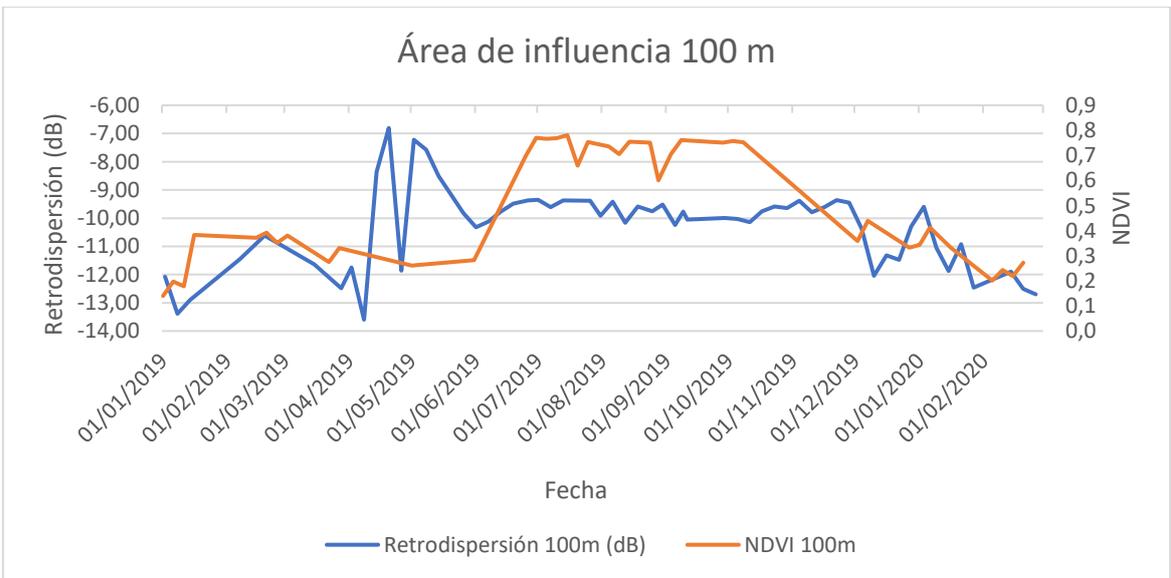


Figura 24. Área de influencia de 100 m para retrodispersión y NDVI.

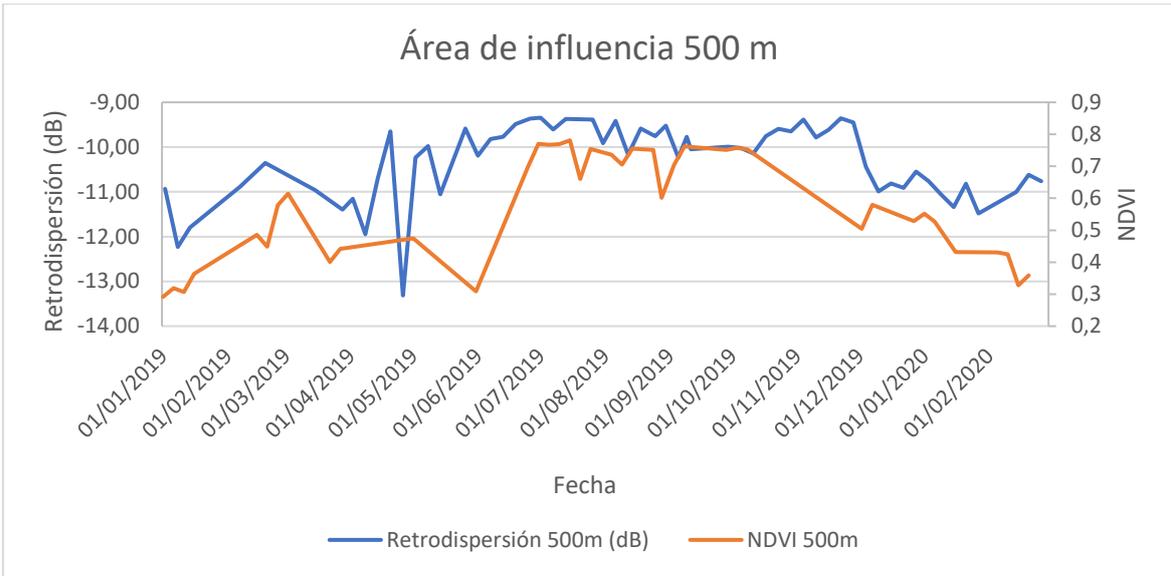


Figura 25. Área de influencia de 500 m para retrodispersión y NDVI.

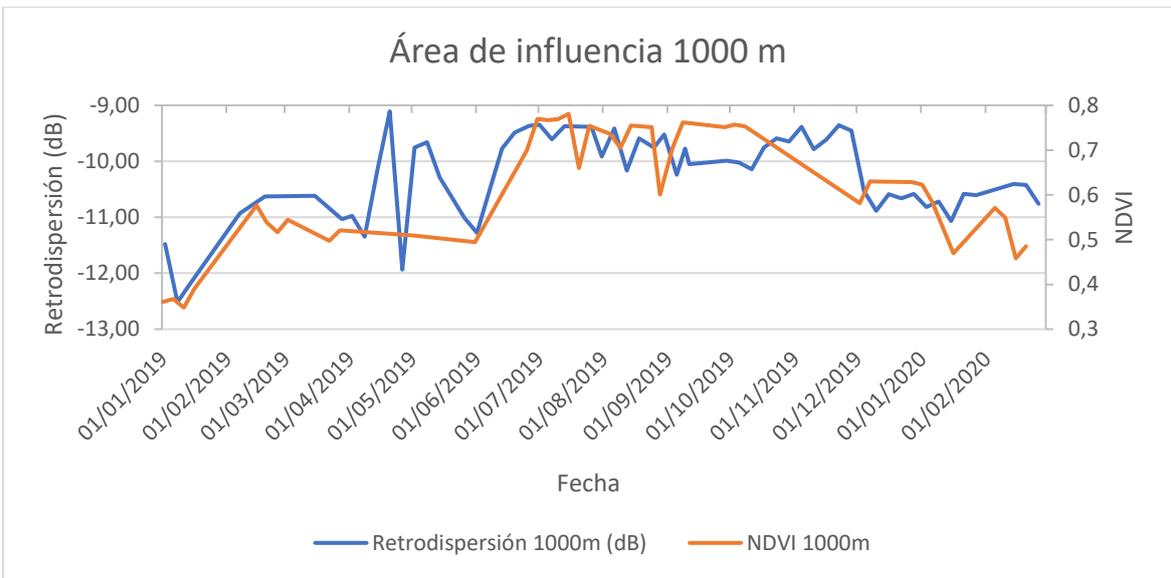


Figura 26. Área de influencia de 1000 m para retrodispersión y NDVI.

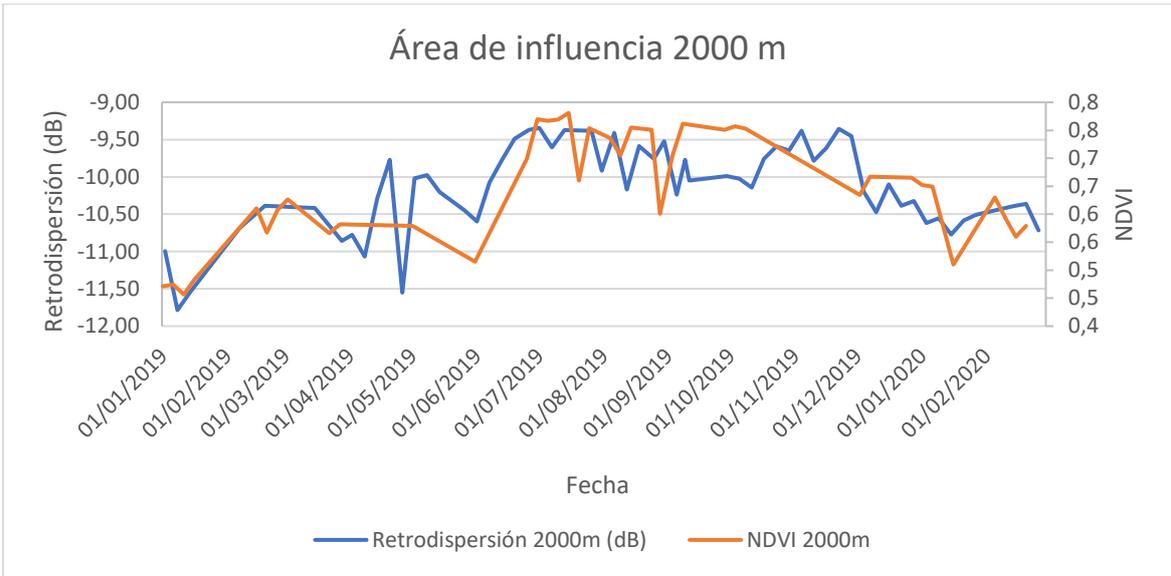


Figura 27. Área de influencia de 2000 m para retrodispersión y NDVI.