

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MODELIZACIÓN DE LAS ZONAS DE ACUMULACIÓN DE NIEVE EN AMBIENTES DE ALTA MONTAÑA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Autor: Iván Gento Arranz

Director: Miguel Ángel Saz Sánchez

Máster Universitario en

**Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del
Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección**

Noviembre de 2018



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Los modelos de nieve son muy útiles en la gestión del recurso y en el análisis de los procesos y actividades en las que interviene, pero la mayoría se centra en su cuantificación obviando su localización. El objetivo de este trabajo es definir mediante Sistemas de Información Geográfica, los lugares de alta montaña donde hay más probabilidades de que se acumule nieve y ésta perdure durante un mayor periodo de tiempo, diferenciando los factores que intervienen en los procesos de acumulación y fusión, y el influjo de cada uno. Para ello se ha establecido una metodología de trabajo y se ha creado un modelo y una herramienta que automaticen el proceso.

Palabras Clave: *nieve, modelo, zonas de acumulación, Pirineo Aragonés, alta montaña.*

Abstract

The snow models are very useful to manage the resource and to analyze the processes and activities in which they take part, but most of them focus on its quantification ignoring its location. The objective of this dissertation is to define the high mountain areas where snow is more likely to accumulate and remain for longer, using Geographic Information Systems, distinguishing the factors that intervene in the accumulation process and those that intervene in the fusion process, and the influence of each one. To this end, a working methodology has been established and a model and tool have been created to automate the process.

Key Words: *snow, model, accumulation zones, Aragonese Pyrenees, high mountains.*

Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo en el contexto del programa de becas del Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA).

Además, quiero dar las gracias a Enrique Serrano Cañadas (Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Valladolid) y al Grupo de Investigación Reconocido Patrimonio Natural y Geografía Aplicada (PANGEA), por brindarme la oportunidad de realizar el trabajo de campo con ellos, aportándome material e información.

Índice

1.	Introducción	pág. 1
2.	Objetivos y aplicaciones	pág. 2
3.	Área de estudio	pág. 5
4.	Factores que intervienen en el proceso	pág. 8
	4.1. Factores intrínsecos	pág. 8
	4.2. Factores extrínsecos.....	pág. 9
5.	Datos y metodología de trabajo	pág. 12
	5.1. Fuentes de datos	pág. 13
	5.2. Pasos previos a la implementación del modelo.....	pág. 14
	5.3. Obtención de las bases de datos espaciales restantes.....	pág. 15
	5.4. Trabajo de campo.....	pág. 16
	5.5. Relación de dependencia entre las variables.....	pág. 17
	5.5.1.Proceso de acumulación	pág. 17
	5.5.2.Proceso de fusión	pág. 19
	5.5.3.Resultado final	pág. 20
6.	Implementación del modelo en ArcMap.....	pág. 21
7.	Validación del modelo y resultados	pág. 23
	7.1. Resultados del proceso de acumulación	pág. 26
	7.2. Resultados del proceso de fusión	pág. 29
	7.3. Áreas con mayor probabilidad de permanencia de nieve ...	pág. 32
8.	Discusión y conclusiones	pág. 35
9.	Bibliografía	pág. 40
	ANEXO I. Flujo de trabajo del modelo de geoprocésamiento	pág. 42
	ANEXO II. Tablas con los valores de ponderación de cada factor	pág. 45
	ANEXO III. Datos empleados en la validación.....	pág. 48
	ANEXO IV. Script de Python.....	pág. 50

Índice de figuras

Figura 1.	Acumulación de nieve en la cima del pico Argualas.....	pág. 1
Figura 2.	Acumulación de nieve en el entorno del Pico de Alba	pág. 2
Figura 3.	Localización de las áreas de estudio	pág. 5
Figura 4.	Superficie que abarcan las distintas bases de datos espaciales empleadas	pág. 14
Figura 5.	Ejemplo de aplicación del TPI de Jenness en el entorno de la Maladeta	pág. 15
Figura 6.	Trabajo de campo en la base del glaciar de la Maladeta con el GIR PANGAEA	pág. 16
Figura 7.	GPS RTK empleado en la toma de coordenadas	pág. 16
Figura 8.	Distribución de las probabilidades de acumulación de nieve respecto a la pendiente del terreno.....	pág. 18
Figura 9.	Distribución de las probabilidades de acumulación de nieve respecto a la concavidad del terreno.....	pág. 18
Figura 10.	Esquema básico del proceso de trabajo.....	pág. 21
Figura 11.	Localización de los lugares de toma de datos.....	pág. 24
Figura 12.	Distribución media mensual del coeficiente de escorrentía y de la precipitación, y duración de las fases del proceso nival	pág. 25
Figura 13.	Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color. 6 de marzo de 2017. Área de estudio del Posets	pág. 26
Figura 14.	Zonas de acumulación de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. Área de estudio del Posets	pág. 26
Figura 15.	Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve. 6 de marzo de 2017. Área de estudio del Posets	pág. 27
Figura 16.	Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color. 1 de marzo de 2018. Área de estudio de la Maladeta	pág. 27
Figura 17.	Zonas de acumulación de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. Área de estudio de la Maladeta	pág. 28
Figura 18.	Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve. 1 de marzo de 2018. Área de estudio de la Maladeta	pág. 28
Figura 19.	Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color. 5 de julio de 2017. Área de estudio del Posets	pág. 29
Figura 20.	Zonas de fusión de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. Área de estudio del Posets	pág. 29
Figura 21.	Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve. 5 de julio de 2017. Área de estudio del Posets	pág. 30
Figura 22.	Imagen Sentinel 2B. Composición en falso color. 25 de junio de 2018. Área de estudio de la Maladeta.....	pág. 30
Figura 23.	Zonas de fusión de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. Área de estudio de la Maladeta.....	pág. 31
Figura 24.	Imagen Sentinel 2B. Composición que discrimina la cubierta de nieve. 25 de junio de 2018. Área de estudio de la Maladeta	pág. 31
Figura 25.	Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color. 13 de septiembre de 2017. Área de estudio del Posets	pág. 32

Figura 26.	Zonas de permanencia de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. Área de estudio del Posets	pág. 32
Figura 27.	Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve. 13 de septiembre de 2017. Área de estudio del Posets	pág. 33
Figura 28.	Imagen Sentinel 2B. Composición en falso color. 23 de septiembre de 2018. Área de estudio de la Maladeta	pág. 33
Figura 29.	Zonas de permanencia de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. Área de estudio de la Maladeta	pág. 34
Figura 30.	Imagen Sentinel 2B. Composición que discrimina la cubierta de nieve. 23 de septiembre de 2018. Área de estudio de la Maladeta	pág. 34
Figura 31.	Neveros localizados en el área de estudio de la Maladeta durante el trabajo de campo	pág. 36
Figura 32.	Imagen nevero número 1, base del glaciar de la Maladeta. 23 de septiembre de 2018	pág. 37
Figura 33.	Imagen nevero número 2, lateral del glaciar de la Maladeta. 23 de septiembre de 2018	pág. 37
Figura 34.	Imagen nevero número 3. 23 de septiembre de 2018....	pág. 38
Figura 35.	Imagen nevero número 4. 23 de septiembre de 2018....	pág. 38
Figura 36.	Diagrama de flujo de trabajo del modelo.....	pág. 42
Figura 37.	Ampliación del cuadrante 1 del diagrama de flujo de trabajo del modelo	pág. 43
Figura 38.	Ampliación del cuadrante 2 del diagrama de flujo de trabajo del modelo	pág. 43
Figura 39.	Ampliación del cuadrante 3 del diagrama de flujo de trabajo del modelo	pág. 44
Figura 40.	Ampliación del cuadrante 4 del diagrama de flujo de trabajo del modelo	pág. 44

Índice de tablas

Tabla 1.	Valores de probabilidad de acumulación de nieve en función de la pendiente del terreno en grados.....	pág. 45
Tabla 2.	Valores de probabilidad de fusión de nieve en función de la litología del terreno.....	pág. 46
Tabla 3.	Valores de probabilidad de acumulación y fusión de nieve en función de las características de la cubierta vegetal ..	pág. 47
Tabla 4.	Valores de probabilidad de permanencia de masas de nieve en función de la altitud.....	pág. 47
Tabla 5.	Datos medios mensuales del periodo entre enero de 2009 y junio de 2018, del telenivómetro de la Renclusa.	pág. 48
Tabla 6.	Datos medios mensuales del periodo entre enero de 2009 y junio de 2018, del telenivómetro de Eriste.....	pág. 48
Tabla 7.	Datos medios mensuales del periodo entre julio de 2008 y junio de 2018, con los que se ha elaborado el balance hídrico	pág. 49

Índice de fórmulas

Fórmula 1.	Ponderación de las variables vinculadas al proceso de acumulación.....	pág. 19
Fórmula 2.	Ponderación de las variables vinculadas al proceso de fusión.....	pág. 20
Fórmula 3.	Ponderación de la altitud sobre el resultado final.....	pág. 20
Fórmula 4.	Comando los píxeles con valores negativos	pág. 22

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los ambientes de alta montaña, la nieve se presenta como uno de los elementos más característicos y representativos. Aparte de un importante recurso, es una pieza clave a tener en cuenta dentro de numerosos procesos y actividades.

Esta se muestra como resultado de un fenómeno meteorológico de precipitación que sigue una dinámica concreta, con una serie de fases definidas, entre las que se destacan la acumulación y la fusión. Conocer el comportamiento de la nieve dentro de cada una de estas fases, conlleva poder establecer una serie de patrones con los que predecir sus episodios.

Esto facilita la gestión del recurso y el estudio de los procesos en los que interviene, permitiendo pronosticar sus efectos y consecuencias, además de facilitar el correcto desarrollo de todas las actividades en las que se presenta como un componente determinante.

Pese a que su comportamiento depende de numerosos factores, algunos de ellos se pueden parametrizar y establecer así un modelo de conducta que muestre como actúa la nieve en función de unas determinadas características.



Figura 1. Acumulación de nieve en la cima del pico Argualas. 9 de diciembre de 2017. Elaboración propia.

Hasta ahora, la mayoría de los modelos vinculados al análisis del proceso nival, tienen como objetivo conocer la cantidad de nieve acumulada en un momento determinado, así como conjeturar acerca de su duración y del inicio de la fase de fusión.

Además, dichos modelos son principalmente matemáticos y su plasmación temporal hace referencia al momento presente o a un futuro cercano, ya que se basa en datos que aluden exclusivamente a factores meteorológicos, cuya precisión se reduce a medida que se intentan pronosticar a más largo plazo.

En la literatura científica, son pocos los modelos en los que se emplean factores relativos a las características del terreno y más escasos aun los que aglutinan más de uno de estos o los que exclusivamente se basan en ellos, como Maza *et al.* (1995) o Herrero (2007).

Esto se debe a que los principales intereses que motivan las investigaciones sobre nieve la plantean como un recurso y no como agente dentro de diversos procesos y actividades. Es por ello por lo que buscan su cuantificación y su estimación temporal, obviando en cierta medida su localización.

Al establecer un modelo que dé prioridad al emplazamiento de las masas de nieve, se tienen en cuenta factores directamente relacionados con las características del terreno susceptibles de cartografiado, con resultados más vistosos y fácilmente comprensibles.

Pese a que la utilidad que se le puede dar a este tipo de modelos, dista mucho de la finalidad que tienen los modelos centrados en la cuantificación de nieve, estos permiten abrir una puerta a otra clase de usos, pudiendo resolver otra serie de necesidades.

2. OBJETIVOS Y APLICACIONES

El propósito primordial del presente trabajo es modelizar mediante Sistemas de Información Geográfica las zonas de acumulación de nieve en ambientes de alta montaña. Esta modelización se plantea como una aproximación, ya que no va a emplear valores concretos de cantidad de nieve precipitada ni demás factores meteorológicos que intervienen, si no que se va a basar en representar la potencialidad que tiene un punto determinado para que se acumule nieve en él y perdure durante un periodo de tiempo mayor (figura 2).

Para ello se ha llevado a cabo un estudio de caso interpretativo, con el cual se pretende teorizar acerca de qué factores intervienen en el acopio y la fusión natural de la nieve describiendo cómo lo hace cada uno. A su vez, este estudio de caso se plantea como instrumental, ya que con él se busca ajustar una serie de teorías y profundizar en la temática tratada, basándose en la formulación de afirmaciones obtenidas a partir de los resultados alcanzados sobre los objetos de estudio en los que se apoya, los cuales juegan un papel secundario (Gutiérrez *et al.*, 2002).

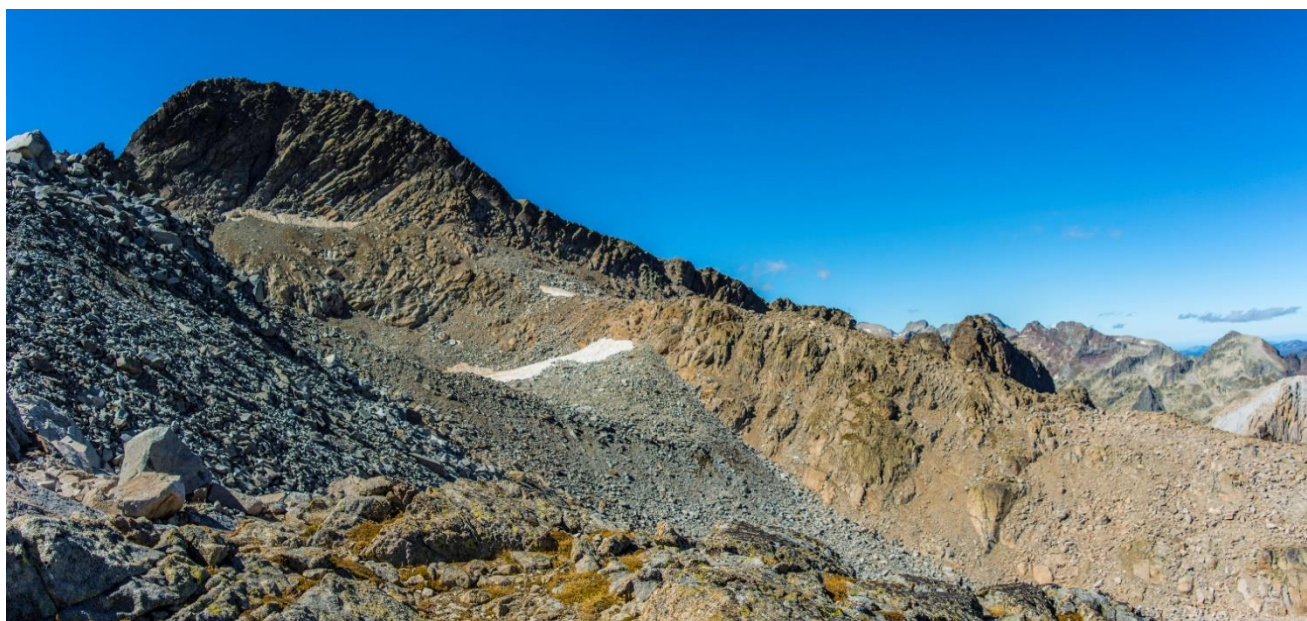


Figura 2. Acumulación de nieve en el entorno del Pico de Alba. 23 de septiembre de 2018. Elaboración propia.

Teniendo esto en cuenta, el objetivo principal de este trabajo sería el de:

- Determinar los lugares, adscritos a ámbitos de alta montaña, donde hay más probabilidades de que se acumule la nieve y ésta perdure durante un mayor periodo de tiempo, diferenciando los factores que participan en sus procesos de acumulación y fusión, y el influjo de cada uno.

Para ello podemos establecer una serie de objetivos secundarios que no son sino hitos en el proceso de la investigación:

- i. Crear una metodología de trabajo orientada a establecer las fases del proceso, partiendo de una base teórica fundamentada en una bibliografía sólida. Esta ha de conducir a la concreción de los métodos y técnicas a emplear en el diseño del modelo. En este caso se centra en cómo representar espacialmente, mediante Sistemas de Información Geográfica, cada uno de los factores que intervienen en el acopio y posterior fusión de las masas de nieve, y establecer un modo de ponderación argumentado para cada uno.
- ii. Elaborar un modelo con la finalidad de generar un esquema teórico de los sistemas de acumulación y fusión de nieve, que acerque a una realidad más compleja, facilitando su comprensión y estudio.

- iii. Implementar una herramienta que automatice el proceso mediante un script ejecutable en Python, lo cual permitirá desarrollar el modelo tantas veces como se quiera, pudiendo modificar los parámetros referentes a los factores y al área de estudio, ahorrando costes de tiempo y ampliando su funcionalidad al poder utilizarse en otros casos y no únicamente sobre las zonas de trabajo elegidas como objeto de estudio.

A partir del análisis de los factores que intervienen tanto en el proceso de acumulación, como en el de fusión de la nieve, se ha procedido a ponderar su influencia, para posteriormente establecer una metodología de trabajo y elaborar un modelo con el que se pueda implementar una herramienta que automatice todo el procedimiento y haga que se pueda aplicar a otros espacios.

Pero aparte de los objetivos teóricos que se muestran como resultado directo del desarrollo de este análisis, se pueden discernir gran cantidad de fines y aplicaciones para el resultado final de dicho proyecto.

En áreas de alta montaña la acumulación de nieve controla numerosos procesos ambientales y múltiples actividades socioeconómicas. Sin ir más allá, la disponibilidad de reservas hídricas y la estacionalidad de los regímenes fluviales, están estrechamente vinculados con el espesor del manto de nieve y su estacionalidad (López y García, 2004).

La acumulación de nieve y su posterior fusión, originan importantes alteraciones en el régimen fluvial de una cuenca hidrográfica, retrasándose parte de la escorrentía respecto al ritmo anual de las precipitaciones. La importancia de tales alteraciones depende del volumen de nieve retenido durante la estación fría, así como de la fecha de inicio y la duración del período de fusión (Chorley, 1969).

Por consiguiente, las masas de nieve se ven amparadas de forma indirecta por la actual Ley de Aguas (BOE, 1985), que considera este bien como un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas. El hecho de que se considere irremplazable y fácilmente vulnerable, que deba estar disponible en cantidades necesarias y con la calidad precisa, de acuerdo con las previsiones de la ordenación territorial y en la forma que la propia dinámica social demande, hace que se exija una planificación hidrológica.

Esta planificación hidrológica permite satisfacer las demandas de agua y equilibrar y armonizar el desarrollo regional y sectorial, incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales (BOE, 1985).

En el marco de la planificación hidrológica, conocer la localización, tamaño y comportamiento de las masas de nieve situadas en la cabecera de las cuencas de alta montaña, se muestra como un importante apoyo a la hora de implementar los modelos hidrológicos de fusión de nieve-escorrentía con los que se pronostica el llenado de embalses, se previenen inundaciones y se abastecen de agua grandes extensiones de regadío (Alonso y Moreno, 1996).

Además, los sistemas convencionales de observación y cuantificación de la cubierta de nieve, se basan en el establecimiento de redes de estaciones de medida y trabajo de campo, los cuales suponen elevados costes económicos, que se pueden reducir mediante el empleo de metodologías, modelos o herramientas como las que se presentan.

Desde el punto de vista geomorfológico, tanto la acumulación como la fusión de la nieve tienen repercusiones importantes en función de su velocidad y del estado hídrico del suelo. Numerosos procesos se hallan estrechamente relacionados con ellos, como por ejemplo algunos movimientos en masa derivados del deshielo o la instalación de redes de rigolas por mecanismos superficiales y subsuperficiales. De ahí que los hidrogeomorfólogos puedan ver en los resultados obtenidos en esta investigación, un apoyo para sus análisis (Revuelto *et al.*, 2012).

Otras geoformas relacionadas con los ambientes nivosos que cuyo estudio se puede beneficiar de las conclusiones obtenidas son los montículos de hielo, ya que la permanencia del manto nival hasta

finales de junio protege al sustrato de la radiación solar directa y favorece un proceso de retroalimentación que mantiene al suelo a una temperatura constante y asiste el mantenimiento de estos (González *et al.*, 2016).

La elaboración de cartografías temáticas acerca de riesgos naturales es otra de las aplicaciones de un modelo que represente las zonas de potencial acumulación y permanencia de nieve. Concretamente se centra en el riesgo de aludes, mostrándose las áreas que pueden estar expuestas en mayor o menor medida al desencadenamiento de estos, o verse afectadas por uno de ellos (Julián *et al.*, 2000).

Pese a que este tipo de cartografía solo alcanza un alto grado de exactitud cuándo se complementa con información referente a las condiciones meteorológicas y el estado de la nieve, en un determinado momento este tipo de herramientas se afianzan como la base de la ordenación y planificación del territorio, siendo el punto de partida para la elaboración de cartografías de riesgos.

Estas aplicaciones sobre procesos ambientales junto con otras muchas como la posible fragmentación natural de los hábitats a causa de las grandes acumulaciones de nieve y su prolongación temporal, van acompañada de otras vinculadas con actividades socioeconómicas.

De estas últimas la principal es el turismo, y concretamente las actividades de montaña. En estos territorios las actividades recreativas ligadas a la montaña alcanzan una gran relevancia, y aunque la nieve no supone un impedimento para su desarrollo, determina el tipo de actividades que se van a desarrollar en dicho espacio.

En lugares donde hay grandes acumulaciones de nieve se fomentarán los deportes de invierno, mientras que en lugares donde no se acumule mucha nieve y no permanezca durante largos periodos de tiempo, se podrán potenciar actividades con una menor exigencia técnica.

En todas ellas, tanto el modelo llevado a cabo como sus resultados, se pueden emplear en su planificación, con el fin de buscar su desarrollo óptimo y seguro, pudiendo establecerse niveles de dificultad en función de las características que se requieran.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El Pirineo es una cadena montañosa situada al norte de la Península Ibérica, en el istmo que la une con el resto del continente europeo. Latitudinalmente se extiende entre los paralelos 42° y 43° N, alcanzando una anchura máxima de 150 kilómetros en su parte central. Longitudinalmente se encuentra enmarcada entre los accidentes geográficos del Golfo de Vizcaya y el Cabo de Creus y recorre una longitud de 435 kilómetros entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo (González, 2013).

Presenta una gran variedad de sistemas geomorfológicos y paisajísticos, resultantes de su complejidad litológica y morfoestructural, las cuales explican los fuertes contrastes en el relieve y su entidad y diversidad natural.

Orográficamente, se muestra como un sistema montañoso disimétrico que difiere, de forma más o menos radical, de las zonas llanas que se sitúan tanto al norte como al sur, pudiéndose organizar, según González (2013), en tres niveles que atienden a criterios morfoestructurales:

- i. Pirineo Axial: conformado por las elevaciones labradas sobre los materiales del zócalo Precámbrico-Paleozoico aflorantes en el eje central de la cordillera.
- ii. Sierras Interiores: modeladas sobre la cobertera sedimentaria mesocenozoica en el interior del sistema montañoso.
- iii. Sierras Exteriores: labradas sobre la misma cobertera, en el área del borde de dicho sistema montañoso.

Las mayores alturas se concentran en su sector central, también conocido como Aragonés, con los picos Aneto (3.404 metros) y Posets (3.375 metros). En torno a ellos se centra el área de estudio del presente trabajo (figura 3), que se corresponde con el ámbito de la alta montaña, el cual, para esta unidad, se extiende entre los 2.400 metros a los que se sitúa el límite del arbolado disperso, y los 3.404 metros de la cima más alta, por lo que la mayoría de sus cumbres se encuentran adscritas a este ambiente al superar dicha cota inferior (García *et al.*, 1990).

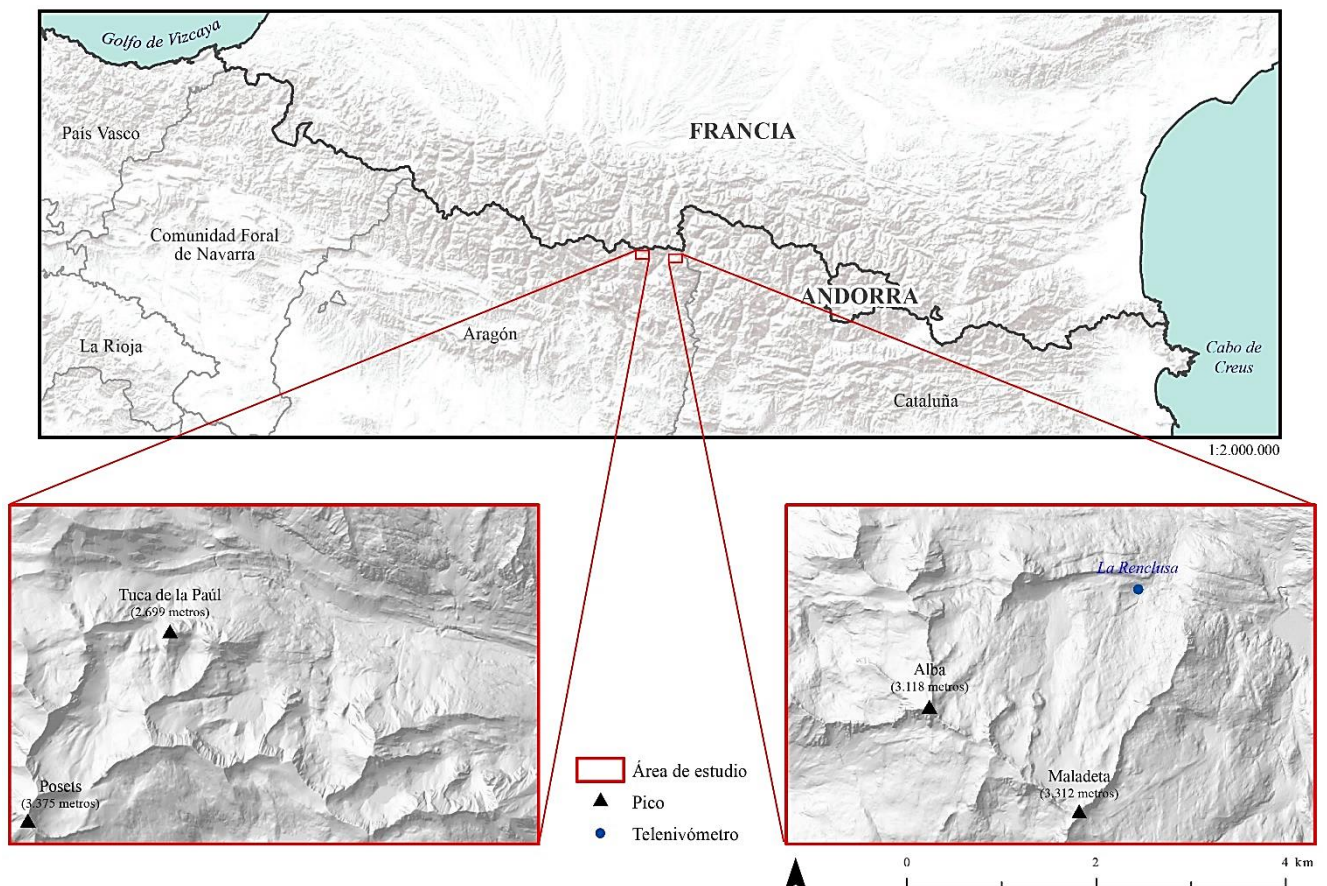


Figura 3. Localización de las áreas de estudio. Elaboración propia.

A grandes rasgos, el relieve se muestra como resultado morfológico de un proceso de construcción y destrucción. Durante la orogenia alpina se organiza su volumen y fisiografía general, los cuales se perfilan por la actividad postorogénica durante el mioceno, y se retocan durante el cuaternario por el modelado glaciar, labrándose las crestas de las cabeceras y ensanchándose los valles de la red fluvial, cuya disposición transversal sesga el relieve (García y Puigdefábregas, 1982).

Esta actividad glaciar se percibe desde las cumbres hasta los fondos de valle, ya que ha conformado la geometría, las formaciones superficiales y la hidrología de este espacio, mediante procesos de erosión (circos, artesas, cubetas de sobreexcavación, etc.) y de acumulación (morrenas, till, etc.), que han acabado afectando a la morfodinámica actual.

En la actualidad únicamente perviven pequeños glaciares, muchos de ellos en sus fases finales, asentados en las zonas más elevadas, con orientaciones favorables, amparados en circos y siempre bajo cumbres de 3.000 metros, mostrándose como las últimas huellas de la evolución climática pasada (González, 2013).

El resto de la alta montaña pirenaica está deglaciada y es fundamentalmente rocosa, siendo un paisaje dinámico y heterogéneo. Un medio donde predominan los procesos periglaciares, nivales, crionivales y de gravedad, sobre todo a partir de los 2.600 metros (González *et al.*, 2016).

El emplazamiento estratégico de esta cadena montañosa, en la divisoria entre las aguas del Océano Atlántico y las del Mar Mediterráneo, hace que se distingan, desde el punto de vista climático, tres sectores distintos, uno con características oceánicas al oeste, otro con rasgos mediterráneos al este, y un amplio espacio de transición con influencia continentalizada entre ambos; todos ellos afectados por el matiz montano (García *et al.*, 1986).

Esto se traduce en variaciones térmicas y pluviométricas longitudinales. De oeste a este aumentan las diferencias térmicas y decrecen las precipitaciones, a causa de una reducción del efecto de las masas de aire marítimas del Atlántico, al aumento de la continentalidad y el efecto del Mediterráneo. Estas características se ven potenciadas localmente por los efectos orográficos del sistema, tales como la altitud, el desnivel, la orientación o la disposición morfoestructural (González, 2013).

La disposición longitudinal de esta cordillera conlleva marcados contrastes entre las vertientes norte y sur. La primera, más húmeda, con mayores precipitaciones y temperaturas más bajas; la segunda, más seca, con menores precipitaciones y temperaturas más contrastadas.

Por encima de los 1.000 metros de altitud, las precipitaciones superan los 1.000 milímetros al año, y a más de 2.000 metros, sobrepasan los 2.000 milímetros, produciéndose el mayor volumen en otoño y primavera respectivamente, y el mínimo en invierno, el cual registra una cantidad de lluvias inferior incluso al verano (García *et al.*, 1985).

Por otro lado, la temperatura desciende a razón de un gradiente de entre 0,5 y 0,6 °C por cada 100 metros de altitud, situándose la isoterma de los 5 °C, en torno a los 2.000 metros, y la de 0 °C alrededor de los 3.000. Esta última, durante la estación fría, llega a descender hasta los 1.600 metros, cota a partir de la cual las precipitaciones son en forma de nieve y las bajas temperaturas permiten su conservación (Julián y Chueca, 1999).

La vegetación arbórea, aunque en general muy modificada por la secular acción humana, se mantiene en buenas condiciones, pudiéndose establecer un transecto geobotánico en función de la topografía y la orientación. Entre los 1.200 y 1.600 metros de altitud, en las umbrías, se asientan hayas (*Fagus sylvatica*), ocasionalmente formando bosques mixtos junto a los abetos (*Abies alba*), que también se pueden encontrar en las solanas, junto con la especie dominante de estas, el pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y el pino negro (*Pinus uncinata*).

A partir de los 2.000 metros se empieza a manifestar la escasez de vegetación arbórea, en muchos casos de forma artificial, ya que responde a la deforestación llevada a cabo para proporcionar pastos al ganado. Por encima de los 2.200 metros, se alternan manchas aisladas de comunidades herbáceas alpinas, con roquedo desnudo, el cual crece en extensión conforme aumenta la altitud (Julián y Chueca, 1999).

Este trabajo se ha apoyado concretamente en el estudio de caso de dos áreas que abarcan una superficie de 20 km² cada una. Una se encuentran en los macizos de la Maladeta y la otra en el del Posets, ambas en la vertiente meridional del Pirineo central o Aragonés, separadas por el valle del río Ésera.

El Macizo de la Maladeta (42° 38′ 51″ N - 0° 38′ 30″ E) forma parte de la alta cuenca del río Ésera, en el valle de Benasque. Está compuesto por una sucesión de picos alineados en dirección noroeste-sureste, desde el Pico del Alba (3.118 metros) al pico Russell (3.207 metros). Se sitúa en la zona noroccidental de un extenso batolito granodiorítico, de forma elíptica, que se extiende desde el valle del Noguera Pallaresa hasta el río Ésera. Esta litología le otorga un carácter masivo y una morfología particular, con una destacada disimetría.

El área de estudio se centra en el circo glaciar del pico Alba, que estuvo ocupado por un glaciar durante la Pequeña Edad del Hielo, del cual únicamente persiste un pequeño helero y muestras de permafrost a partir de los 2.760 metros de altitud. Las aguas procedentes de este espacio, junto con las del glaciar de la Maladeta, se pierden a través del Forau de la Renclusa que mediante distintos sumideros kársticos se unen al eje de drenaje subterráneo de Aiguallut (González *et al.*, 2016; Alonso y Moreno, 1996).

El Macizo del Posets (42° 39′ 29″ N - 0° 26′ 15″ E) se localiza entre el valle de Benasque y el de Gistaín, drenados por los ríos Ésera y Cinqueta respectivamente, los cuales articulan el relieve. Está formado por una elevada alineación de picos, con dirección suroeste-noreste, desde el collado de Sahún hasta el collado de Gistaín, superándose los 3.000 metros de altitud en más de veinte de ellos.

El sector estudiado se enmarca en el conjunto de Posets o Llardana, entre el Pico Posets y la Tuca de la Paúl (2.699 m), en los circos glaciares de Posets y la Paúl. Su litología condiciona la morfología de los circos, individualizados, encajados y circulares, con la presencia de un estrato calizo vertical y continuo que configura la sucesión de circos escarpados desde de los Gemelos hasta Montidiego. Al abrigo de las cumbres se mantienen el glaciar de la Paúl y el helero del Posets, manifestándose permafrost a partir de los 2.800 metros de altitud (González *et al.*, 2016).

4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

Los criterios empleados para modelizar las zonas de acumulación de nieve, y poder determinar los espacios donde potencialmente hay más probabilidades de que esta se acumule y perdure durante un mayor periodo de tiempo, se han definido en función de los factores que intervienen tanto de forma directa, como de forma indirecta, en los procesos de acopio y fusión.

Estos factores se pueden clasificar en dos grandes grupos. Por un lado, los factores intrínsecos o directos, vinculados a las vertientes; y por otro los factores extrínsecos o indirectos, relacionados con las condiciones nivo-meteorológicas (Julián *et al.*, 2000). Los primeros, a su vez, se han catalogado en función de si intervienen en el proceso de acumulación de la nieve, en el proceso de fusión, o en ambos.

4.1. Factores intrínsecos

Los factores intrínsecos o directos están relacionados con las vertientes, por lo que presentan un carácter más permanente, que hace que se puedan localizar de forma más fácil sobre el territorio, posibilitando su cartografiado. Estos factores son:

- i. **Límite altitudinal:** directamente relacionado con la isoterma de los 0 °C, hace referencia a la cota altitudinal a partir de la cual, durante una determinada época del año, vinculada en gran medida con la estación fría, las precipitaciones son en forma de nieve y las bajas temperaturas favorecen su conservación (Julián y Chueca, 1999).

En rasgos generales, este límite se ha establecido a una media de 1.600 metros de altitud para el Pirineo y durante los meses invernales. Aun así, con afán de aportar una mayor precisión y siguiendo la metodología empleada por Rijckborst (1967) para el valle de Arán en Lérida, se determinó que la isoterma de los 0 °C, en la cuenca del río Ésera, se sitúa a 1.700 metros de altitud (García *et al.*, 1985).

Esta se calculó a partir de los gradientes de variación de la temperatura media invernal vinculados a la altitud, obtenidos a partir de los datos de las estaciones termométricas de Benasque, Villanova, Seira y Argoné, tomando los meses de diciembre a marzo, ambos incluidos (García *et al.*, 1985).

Además de esta cota, también se ha incluido la de 2.800 metros ya que, a partir de ella, como se ha corroborado en el trabajo de campo, aumentan considerablemente las probabilidades de acumulación, y sobre todo de conservación de la nieve.

- ii. **Pendiente:** se refiere a la inclinación de la superficie. Al implementar un modelo optimizado para ambientes de alta montaña, la variabilidad de las pendientes es muy alta, pasando de inclinaciones muy suaves o nulas en los fondos de valle y rellanos, a pendientes muy escarpadas en cumbres, riscos y barrancos.

Las posibilidades de que se acumule nieve en un espacio determinado, son inversamente proporcionales a la pendiente ya que, cuanto mayor sea esta, menos probabilidades de acumulación habrá.

Los parámetros con los que se ha trabajado se encuentran entre los 0° que marcan la horizontalidad absoluta, y los 90° que indican la verticalidad. Entre los 0° y 10° se ha establecido un 100% de probabilidades de que se acumule la nieve, reduciéndose progresivamente hasta que a partir de los 70°, las probabilidades son nulas.

Estos valores se han fijado teniendo en cuenta que es necesaria una inclinación de al menos 28° para que la componente longitudinal del peso de la nieve supere las fuerzas de resistencia que producen aludes y que a partir de los 45° la cantidad de nieve que se puede llegar a acumular no es suficiente como para generar avalanchas de cierta significación (Julián y Chueca, 1999). Por lo tanto, el mayor decremento en las probabilidades de acumulación, se encuentra entre estos dos valores.

- iii. **Morfología:** vinculada a la forma externa del relieve terrestre, distingue dos tipos, cóncava y convexa. La morfología cóncava hace referencia a superficies cuyo punto central se encuentra por debajo de los que le rodean, manteniendo una forma similar a la del interior de un cuenco; mientras

que la morfología convexa se refiere a superficies cuyo punto central se encuentra por encima de los que le circundan, manteniendo una forma semejante a la que muestra el exterior de un cuenco.

Ligado a la acumulación de nieve, las morfologías cóncavas lo facilitan, mientras que las morfologías convexas lo dificultan en cierta medida (Julián *et al.*, 2000).

- iv. **Orientación:** asociada con la exposición de una superficie a la influencia del sol, se relaciona de forma directa con los factores extrínsecos de radiación solar e insolación. Aunque estos agentes no son susceptibles de modelizarse de forma exacta, la influencia que ejerce la orientación del terreno sobre el proceso de fusión se puede parametrizar de forma aproximada.

Teniendo en cuenta que el área de trabajo se encuentra en el hemisferio norte, todas aquellas superficies orientadas al sur van a tener más exposición a la influencia del sol que las superficies situadas hacia el norte. Por ello, en las partes orientadas hacia el norte, conocidas como umbrías, se favorece la conservación de la nieve y en las partes del terreno que se encuentren orientadas al sur, conocidas como solanas, se favorece el proceso de fusión.

- v. **Litología:** dependiendo de las características de la superficie sobre la que se acumule la nieve y más concretamente de la permeabilidad de ésta, se pueden valorar las probabilidades de que se mantenga o se funda, ya que, por norma general, una masa de nieve comienza su fusión por la base y únicamente funde por la superficie cuando se ve afectada por procesos de precipitación en forma de lluvia.

De esta manera, atendiendo a la litología, se puede estimar que hay más posibilidades de que se funda la nieve en espacios cuyo sustrato es más permeable, mientras que, en superficies menos permeables, es más fácil que la nieve se mantenga durante un mayor periodo de tiempo.

- vi. **Vegetación:** este agente es determinante tanto en el proceso de acumulación como en el proceso de fusión, pero no desde el punto de vista taxonómico, si no que se rige por las cualidades vinculadas al porte y a la densidad (Julián y Chueca, 1999).

El porte atiende al tamaño de la planta, clasificándose de mayor a menor en tres grandes grupos, arbóreo, arbustivo y herbáceo respectivamente. A mayor porte, menor probabilidad de que se acumule la nieve y de que se funda, ya que la poca nieve que se acumula en estos espacios se va a encontrar al abrigo de las umbrías que genera dicha vegetación.

Esta cualidad es complementada por el número de unidades vegetales por unidad de espacio, es decir, la densidad. A mayor densidad, menos probabilidades de que la nieve se acumule y de que se funda, ya que cuanto más densa es la vegetación, más umbrías genera.

4.2. Factores extrínsecos

Los factores extrínsecos o indirectos están vinculados a las condiciones nivo-meteorológicas, cuya variabilidad temporal los hace difícilmente representables en el espacio y complica su cartografiado. Dicha temporalidad aporta una doble utilidad al modelo.

Si se atiende a estos agentes desde una perspectiva pasada, se pueden conocer con exactitud las características y consecuencias de una nevada o de un periodo de nevadas anteriores y comparar con situaciones presentes para inferir consecuencias futuras. Este proceso estima los posibles efectos de estos fenómenos, pero no los determina, ya que difícilmente se repiten manteniendo unas mismas propiedades. Además, sería necesario generar numerosas alternativas para afrontar las posibles variaciones que se den en ellos.

Por otro lado, si se consideran estos factores desde una perspectiva de futuro, se podría modelizar la cantidad de nieve que se va a acumular en un punto concreto, además de pronosticar su proceso de fusión y con ello conocer su duración. Esto podría tener grandes utilidades, como por ejemplo predecir la influencia hidrológica que va a tener una cantidad determinada de nieve acumulada, que se va a fundir durante un periodo de tiempo específico, entre otras. Pese a ello, actualmente, esto se plantea poco realista, ya que la precisión de los datos a razón de cantidad y duración de una nevada, así como de los

factores meteorológicos que intervienen posteriormente en la conservación de la nieve, es ínfima, nula o se proyecta por un periodo de tiempo muy corto.

En este caso, únicamente se han empleado este tipo de factores para validar el modelo ya que, a partir de ellos, afrontándolos desde una perspectiva pasada, se pueden conocer casos determinados, además de calcular la duración de las distintas fases del proceso nival y establecer fechas concretas con las que comparar los resultados de dicho modelo con la realidad plasmada en imágenes de satélite.

Estos factores son:

- i. **Precipitación media:** aunque comprende cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, para el presente trabajo solo se atiende a la que se muestra en forma de nieve.

A pesar de que cuando una estación pluviométrica registra datos de este tipo no diferencia los distintos formatos, tanto sólidos como líquidos, en los que se puede presentar este fenómeno, se ha considerado que toda precipitación que se produzca en un momento y lugar determinado en el que la temperatura atmosférica sea de 0 °C o inferior, se mostrará en forma de nieve.

Aun así, en cierta medida se tiene constancia de la cantidad de nieve acumulada, a partir de los datos de altura de nieve en centímetros, registrados por los telenivómetros.

- ii. **Temperatura del aire:** referente al grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinados. Está directamente relacionada con la altitud y es determinante en el hecho de que la precipitación se presente en forma de nieve y esta perdure.

Por cada aumento de 100 metros en la altitud, la temperatura desciende entre 0,5 y 0,6 °C, estableciéndose el límite de los 0 °C a unos 3.000 metros, el cual, en el Pirineo, cae hasta alcanzar una cota de entre 1.600 y 1.700 metros, en los meses de invierno (Julián y Chueca, 1999).

A partir de esa cota, generalmente la precipitación se presenta en forma de nieve, y aunque afecte en un momento u otro a toda el área de estudio, su influencia aumenta cuando ésta se constituye en reserva, aplazándose significativamente el momento de fusión, lo cual ocurre también por encima de este límite.

La escasez de datos de este tipo deriva de la inexistencia de estaciones meteorológicas en altura, lo cual resta rigor a los datos que se tienen, ya que se obtienen mediante interpolación, además de que se dificulta su análisis.

- iii. **Evapotranspiración potencial (ETP):** índice que expresa la cantidad de agua del suelo, indicada en milímetros por unidad de tiempo (meses), que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas. Se ha calculado mediante el método de Thornthwaite, en función de la temperatura media, y se ha aplicado una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes (Faci y Martínez, 1991).

Mediante este índice, puesto en relación con las precipitaciones, se puede conocer el déficit o el superávit de agua y la porción de reserva original que permanece disponible en el suelo. A partir de estos datos, junto con el coeficiente de escorrentía, se pueden estimar las reservas hídricas en el suelo y en forma de nieve, valores fundamentales del proceso de retención/fusión nival y de la evapotranspiración, pues acusan los déficits mensuales de escorrentía.

Por último, a partir del análisis de la variación estacional de los coeficientes mensuales de escorrentía, como consecuencia de la evapotranspiración, la creación de reserva en el suelo, la retención de nieve en cabecera y la fusión, se puede dividir el año en cuatro periodos de duración variable que determinen las fases del periodo nival, en las cuales se incluyen las imágenes de satélite seleccionadas para validar el modelo (Alonso y Moreno, 1996).

- iv. **Radiación solar e insolación:** la radiación solar hace referencia a la cantidad de energía que recibe una superficie por parte del sol, en este caso la superficie terrestre y más concretamente las masas de nieve. Este factor se encuentra estrechamente relacionado con la insolación, que es el periodo de tiempo durante el que se encuentra expuesta una superficie a la influencia de la energía solar.

La radiación solar se mide en $w \cdot m^2$ y la insolación en unidades de tiempo. Ambas intervienen en el proceso de fusión de la nieve, ya que cuanto mayor radiación solar y mayor insolación reciba una masa de nieve, se verá más afectada por la fusión.

- v. **Temperatura del suelo:** hace alusión al grado de calor específico del suelo e influye de manera directa en el mantenimiento del manto nival. Cuanto más baja sea la temperatura de este hay más posibilidades de la nieve perdure, aumentándose drásticamente las probabilidades en las zonas con presencia de permafrost o de montículos de hielo.

5. DATOS Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

Como se ha citado anteriormente, la metodología empleada para llevar a cabo la modelización de las zonas de acumulación de nieve, ha sido el estudio de casos siguiendo la lógica de la investigación interpretativa. Esta se basa en describir, comprender, caracterizar, interpretar y explicar un fenómeno, bajo la perspectiva de su idiosincrasia y de las causas particulares de cada uno de los agentes que intervinen en él.

Esta metodología se plantea como una alternativa a la investigación empírica, ya que no se basa exclusivamente en la lógica experimental y el enfoque cuantitativo, ni precisa de una teoría ya construida; si no que también se apoya en la observación persistente y prolongada de un entorno, con el fin de profundizar en la comprensión del fenómeno estudiado y así generar una hipótesis. Esta lógica entiende una realidad dinámica y diversa, e intenta evitar un proceso de investigación obstrusivo, en favor de un acercamiento a los resultados de forma amplia y flexible (Gutiérrez *et al.*, 2002).

Según Chetty (1996), el método de estudio de caso:

- Es adecuado para investigar fenómenos en los que se busca dar respuesta a cómo y por qué ocurren.
- Permite estudiar un tema determinado.
- Es ideal para el estudio de temas de investigación en los que las teorías existentes son inadecuadas.
- Permite estudiar los fenómenos desde múltiples perspectivas y no desde una sola variable.
- Permite explorar de forma más profunda y obtener un conocimiento más amplio sobre cada fenómeno, lo cual tolera la aparición de nuevas señales sobre los temas que emergen.
- Juega un papel importante en la investigación, por lo que no debería ser utilizado meramente como la exploración inicial de un fenómeno determinado.

La complejidad de los problemas abordados desde este tipo de metodología hace que el número de variables no se concrete exactamente y que alguna de ellas no se pueda cuantificar en términos numéricos, lo cual implica su generalización y simplificación. Esas variables están vinculadas con las influencias del entorno, la diversidad intrínseca y consustancial de su contexto y las posibles alteraciones humanas.

Por tanto, mediante el análisis de casos llevado a cabo desde un enfoque fundamentalmente cualitativo y en profundidad, se intenta comprender los procesos de acumulación y fusión de las masas de nieve, para determinar los espacios donde estas van a perdurar más, verificando las teorías ya consolidadas e intentando generar una propia que fundamente el modelo desarrollado y se pueda transferir a otros casos (Martínez, 2006).

Los modelos que pretenden obtener cierto grado de aplicabilidad general deben estar basados en un número diverso de casos, ya que uno solo puede orientar una teoría, pero varios la consolidan. Con ellos, lo que se pretende es llevar a cabo una generalización analítica que evidencie dicha teoría a partir de dos o más casos (replicación literal) (Yin, 1989).

Por lo tanto, el primer paso ha sido concretar los casos que se van a analizar. Las características del presente estudio y el carácter espacial de sus objetivos, hace que estos casos sean áreas delimitadas de la superficie terrestre, acordadas con una forma rectangular y un tamaño determinado de 20 km².

En el desarrollo de la investigación se han empleado dos espacios con estas características, situados en los macizos de la Maladeta y Posets, descritos detalladamente en el apartado que trata sobre el área de estudio. Los criterios empleados para su selección han sido su representatividad, su cercanía y la disponibilidad de datos y bibliografía acerca de ellos.

Una vez planteados los objetivos principales y secundarios, y precisados los casos que se van a estudiar, el siguiente paso es determinar qué factores intervienen en el proceso de acumulación de la nieve, cuales en su proceso de fusión, y decretar su papel dentro de ellos.

Esto se ha realizado con el apoyo de abundante bibliografía, contrastando diversas fuentes de información y adoptando las teorías que más consolidadas están y más se adecúan a los objetivos. Para

ratificar la validez de la información y de sus parámetros, se han establecido relaciones causales entre los factores y entre estos y el objetivo principal, en condiciones concretas e introduciendo variaciones respecto a otras condiciones, de manera que se pudieran distinguir posibles incidencias.

Mediante el establecimiento de patrones de comportamiento y en un intento por construir una explicación del fenómeno, se han podido desechar los factores cuya repercusión es ínfima o que no se pueden modelar mediante los Sistemas de Información Geográfica (factores extrínsecos). Esto resta precisión al modelo y limita su utilidad, a la vez que lo simplifica.

Es así como se han establecido los factores intrínsecos como variables de trabajo, habiéndose clasificado entre los que participan en la fase de acumulación de la nieve, los que intervienen en su proceso de fusión, o los que actúan en ambos.

5.1. Fuentes de datos

Una vez concretados los factores que intervienen en el desarrollo del modelo, los cuales se reducen a seis (límite altitudinal, pendiente, morfología, orientación, litología y vegetación), se procedió a buscar y adquirir las bases de datos espaciales que contengan dicha información.

Respecto al límite altitudinal, la pendiente, la morfología y la orientación, se han generado en Arc-Map a partir de un Modelo Digital de Elevaciones. Este se ha obtenido del Centro Nacional de Información Geográfica de España (CNIG) (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>).

Para ello se ha seleccionado el Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 5 metros (MDT05), ya que es el que mayor resolución espacial presenta. Este se ha desarrollado por interpolación a partir de la clase terreno de los vuelos LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), para la Península Ibérica.

Las hojas empleadas se corresponden con los números 147, 148, 179 y 180 y los archivos tienen formato ASCII con matriz ESRI (.asc). Su sistema geodésico de referencia es ETRS89, la proyección UTM en el huso 31 y las altitudes están referidas al nivel medio del Mar Mediterráneo en Alicante.

Estos Modelos Digitales del Terreno presentan una escala de trabajo de 1:500. El paso de malla de dichos rásters es de 5 metros, por lo que cada píxel representará un área cuadrada de 5 metros de lado y que abarcará una superficie de 25 metros cuadrados.

Por otro lado, para trabajar con información espacial referente a la litología, se ha empleado un archivo en formato vectorial ESRI Shapefile (.shp) que representa el dominio correspondiente al Sinclinal del Tresp, uno de los ocho dominios hidrogeológicos en los que la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ha dividido la cuenca del Ebro.

Esta división responde a la heterogeneidad lito-estratigráfica de una zona tan amplia como es la cuenca del Ebro (85.500 km² aproximadamente), dentro de la cual se pueden establecer unas áreas geológicamente homogéneas y cuyo comportamiento hidrogeológico es más o menos independiente de los dominios adyacentes.

Esta base de datos espacial se ha obtenido del Geoportal SITEbro dependiente de la CHE (<http://iber.chebro.es/geoportal/>). Presenta una escala de síntesis es de 1:200.000 y está destinada a servir de apoyo a los trabajos realizados por la Oficina de Planificación Hidrológica de dicho organismo.

Se ha empleado esta base de datos y no el mapa geológico de España elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), porque tiene mayor resolución espacial, ya que el archivo shapefile del IGME emplea una escala de trabajo de 1:1.000.000 para toda España, lo que restaría precisión al modelo.

Por último, para disponer de la información espacial que aluda a la vegetación y sus características, se ha empleado el Mapa Forestal de España a escala 1:50.000, en concreto el archivo en formato vectorial ESRI Shapefile correspondiente a la provincia de Huesca (https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50_descargas_aragon.aspx).

Esta base de datos almacena la información referente a la situación de las masas forestales, siguiendo un modelo conceptual de usos del suelo jerarquizados, desarrollados en las clases forestales, especialmente en las arboladas. Esta labor ha sido realizada desde el Banco de Datos de la Naturaleza, y se compone de una serie de campos descriptores de la ecología y estructura de las masas, de los cuales se ha empleado el campo que define la estructura de cada formación vegetal, refiriéndose a porte y densidad.

La escala de síntesis que emplea este archivo es de 1:50.000, considerándose el más apropiado para los objetivos planteados. Se barajó la posibilidad de Emplear el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), que añadía resolución espacial en detrimento de la información acerca de las características de las masas forestales; o el empleo de la información resultante del proyecto CORINE Land Cover (*Coordination of Information on the Environment*), sobre la cobertura y uso del territorio en la Unión Europea, con la cual se perdía gran resolución espacial.

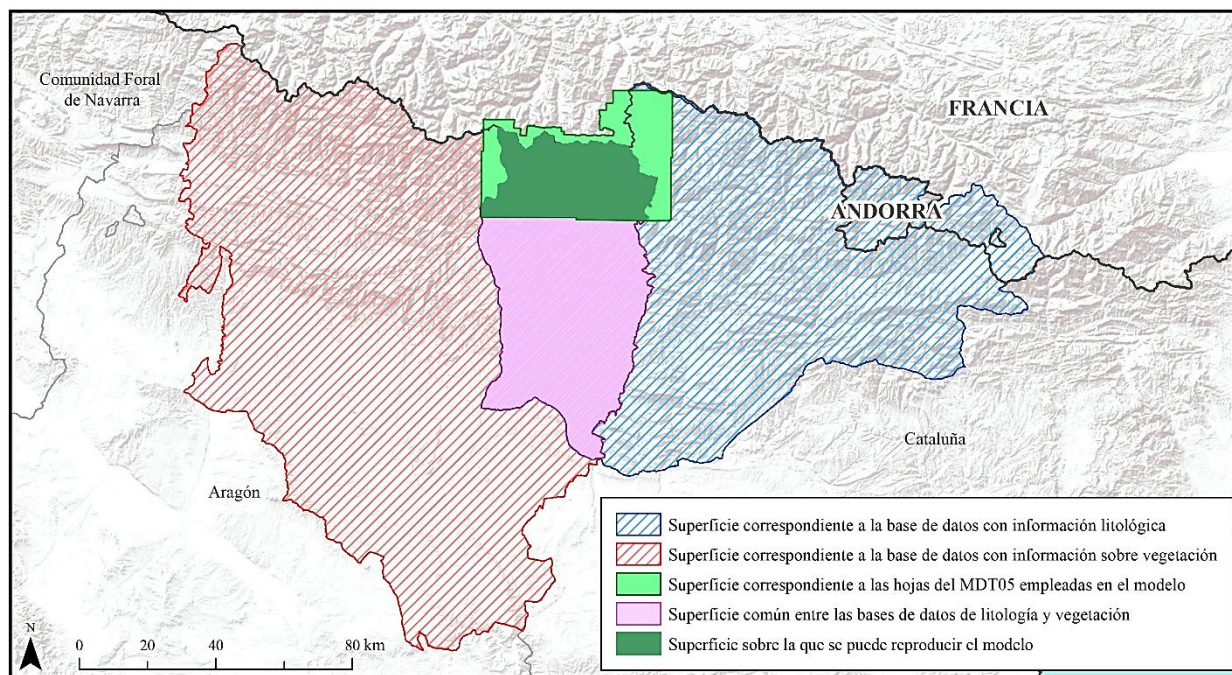


Figura 4. Superficie que abarcan las distintas bases de datos espaciales empleadas. Elaboración propia.

La superficie que abarca la base de datos con información litológica es de 11.460 km², mientras que la del Mapa Forestal de la provincia de Huesca es de 15.650 km², teniendo en común 3.465 km² (figura 4).

5.2. Pasos previos a la implementación del modelo

El primer paso llevado a cabo para implementar el modelo en el programa ArcMap 10.5, ha sido preparar las bases de datos espaciales. Para ello se ha unificado el sistema geodésico de referencia a ETRS89, la proyección a UTM y el huso al 31, refiriendo las altitudes al nivel medio del Mar Mediterráneo en Alicante.

En segundo lugar, se han revisado los campos de las dos bases de datos en formato vectorial shapefile (litología y vegetación). Se han analizado sus campos numéricos y de texto, suprimiendo o modificando elementos que pudieran causar problemas más adelante, como por ejemplo valores nulos, decimales, espacios o símbolos.

Para facilitar la gestión y almacenamiento de toda la información, y mejorar el rendimiento del modelo, se ha creado una geodatabase de archivo que reúna las bases de datos de partida y en la que se almacenen el resto de elementos resultantes de la ejecución del proceso.

En dicha geodatabase se localizan todas las hojas del MDT05 necesarias, así como un *dataset* de entidades que alberga las capas vectoriales de litología y vegetación, junto con una capa vectorial que

contiene un único polígono que delimita el área de estudio. Estas bases de datos vectoriales, más tarde, se convertirán a formato ráster, ya que es más apropiado para este tipo de trabajos.

5.3. Obtención de las bases de datos espaciales restantes

Por último, se procede a generar las bases de datos espaciales que contienen la información referente al límite altitudinal, la pendiente, la morfología y la orientación. Estas se crean empleando diferentes herramientas pertenecientes a la pestaña de *ArcToolbox*, en ArcMap 10.5, y teniendo como base el Modelo Digital del terreno.

El límite altitudinal se ha obtenido mediante la reclasificación de los datos de altitud del MDT05. La herramienta empleada para ello ha sido *Reclassify (Spatial Analyst/Reclass/Reclassify)*. Con ella se reemplazan los valores de un determinado campo de un ráster, obteniéndose otro ráster en el que cada punto tiene los nuevos valores introducidos.

La pendiente se ha elaborado mediante la herramienta *Slope (Spatial Analyst/Surface/Slope)*. Con ella, se crea un ráster de salida en el que cada píxel tiene un valor de pendiente en grados, calculado a partir de la diferencia de altitud respecto a los píxeles vecinos.

La morfología se ha obtenido a partir de la herramienta *Topographic Position Index*. Esta ha sido implementada por el analista de SIG Jeff Jenness, y con ella se calculan las cuadrículas del Índice de Posición Topográfica (TPI) a partir de las cuadrículas de elevación, y se clasifica el paisaje en función de la pendiente y la morfología del relieve, utilizando los valores de TPI. Esta extensión automatiza los métodos de Weiss y requiere *Spatial Analyst* (figura 5).

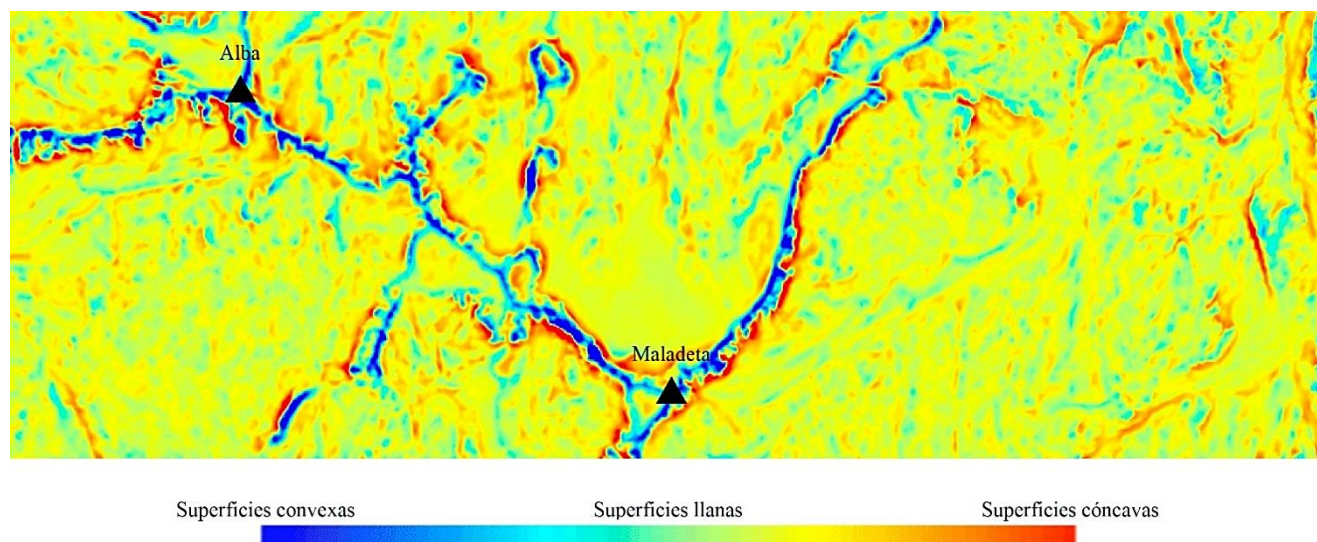


Figura 5. Ejemplo de aplicación del TPI de Jenness en el entorno de la Maladeta. Elaboración propia.

Por último, para crear una base de datos espacial que represente los valores de orientación se puede emplear la herramienta *Aspect (Spatial Analyst/Surface/Aspect)*. Pese a ello, y como este factor está estrechamente relacionado con la radiación solar y la insolación, se plantea una alternativa más precisa, el empleo de *Area Solar Radiation (Spatial Analyst/Solar Radiation/Area Solar Radiation)*.

La herramienta de análisis de radiación solar calcula la insolación de un espacio basándose en los métodos de algoritmo de cuenca visual hemisférica, obteniéndose como resultado un ráster en el que cada píxel tiene un valor en unidades de vatios hora por metro cuadrado (WH/m^2). Este ráster representa la radiación global, que es la cantidad de radiación total calculada para un área, resultante de la suma de la radiación directa y la radiación difusa, de todos los sectores del mapa solar y mapa del cielo, respectivamente.

Este método añade mayor precisión al modelo que usando simplemente la orientación, ya que estima la radiación solar y la insolación, en función de la latitud del punto y a lo largo de todo un año en intervalos mensuales, incluyendo una variable extrínseca al proceso.

5.4. Trabajo de campo

Uno de los pasos más importantes en la metodología de estudio de casos es el trabajo de campo. Este se llevó a cabo entre los días 21 y 24 de septiembre de 2018, con el Grupo de Investigación Reconocido Patrimonio Natural y Geografía Aplicada (PANGEA).



Figura 6. Trabajo de campo en la base del glaciar de la Maladeta con el GIR PANGEA. Elaboración propia.

Durante estos días, y bajo la dirección de Enrique Serrano Cañadas, Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Valladolid, y un equipo multidisciplinar; se llevaron a cabo labores de medida de los glaciares de la Maladeta y del Posets, mediante técnicas de láser escáner terrestre y GPS-RTK, con el fin de conocer la dinámica de estos y validar las distintas técnicas geomáticas.



Figura 7. GPS RTK empleado en la toma de coordenadas. Elaboración propia.

Además, en relación a este trabajo, se pudieron localizar las masas de nieve que persisten al final de la fase de agotamiento y justo antes del comienzo de la fase de reconstrucción de la reserva nival. Una vez localizadas, se tomaban sus coordenadas con un GPS-RTK, con el fin de contrastar su emplazamiento con los resultados del modelo, y así validar en cierta medida su fidelidad.

La observación directa sobre el terreno permite disponer de datos más detallados, concretar la información obtenida a través otras fuentes y tener una visión general del área de estudio. Pese a ello, solo se pudieron tomar datos de los neveros de mayor tamaño y más representativos.

5.5. Relación de dependencia entre las variables

Llegado el momento de establecer una relación entre los distintos factores que intervienen en ambos procesos, acumulación y fusión de la nieve, se ha de trabajar de forma separada con los que actúan en cada uno.

En el proceso de acumulación de nieve influyen la pendiente y la morfología del terreno, mientras que en el proceso de fusión lo hacen la permeabilidad de la litología del sustrato y su exposición a la radiación solar.

La vegetación interviene en ambos procesos, a razón de que cuanto mayor es el porte y la densidad de estas masas, mayores dificultades plantean a la acumulación de nieve; pero una vez acumulada, estas características dificultan su fusión al generar umbrías en las que se apoyen dichas masas para mantenerse.

La altitud también influye en ambos procesos de forma similar, ya que, a mayor altitud, mayor probabilidad de que la precipitación sea en forma de nieve, con lo que aumentan las posibilidades de que se acumule. Una vez acumulada, el descenso de la temperatura vinculado al aumento de la altitud, prolonga su fusión y favorece su conservación.

Por lo tanto, entre los distintos factores estudiados, se deben establecer dos tipos de relaciones. Por un lado, se deben vincular los factores que intervienen en cada proceso, para generar un modelo individual de cada uno. Posteriormente, se deben relacionar ambos modelos entre sí, para poder ponderarlos con el factor de altitud y así obtener como resultado final un modelo que explique donde hay más probabilidades de que se acumule y perdure una masa de nieve.

Algunos factores tienen comportamientos más constantes que otros, que pueden ser absolutamente diferentes cada vez que se observen. Esto introduce errores en el modelo, debido a fallos de medida o al hecho de que estén sometidos a algún tipo de influencia no controlada. A estos factores se les denomina estocásticos y tienen un comportamiento opuesto a las variables constantes o deterministas.

La correlación mide la similitud de la variabilidad de dos magnitudes estocásticas. Dicha similitud se intenta calcular a partir de una función matemática, conocida como regresión. Sin embargo, si se considera que más de una variable tiene influencia o está correlacionada con el valor de la variable dependiente, dicha función pasa a denominarse regresión lineal múltiple (Montero, 2016).

Para relacionar entre sí los factores que intervienen en cada proceso, se ha empleado el método de regresión lineal múltiple. Con él se pretende ajustar los modelos lineales o linealizables entre la variable dependiente (la acumulación o la fusión) y más de una variable independiente (los factores que intervienen en cada proceso), siendo necesario el cálculo de los promedios de cada variable.

Para relacionar ambos procesos entre sí, y poder ponderarlos con el factor altitud, se ha empleado el método de regresión lineal simple, con el que se busca ajustar el modelo lineal entre la variable dependiente resultante del modelo, y la variable independiente que representa la altitud (Montero, 2016).

5.5.1. Proceso de acumulación

Mediante la modelización de este proceso se pretende establecer el grado de probabilidad que presenta un determinado punto para que, en función de los factores estudiados, se acumule nieve en él.

La pendiente en grados, por un lado, se muestra como una variable cuantitativa continua, que se expresa mediante un número infinito de valores entre los 0° que representan la horizontalidad total, y los 90°, que manifiesta la verticalidad absoluta.

Esta variable se expresa mediante una distribución de probabilidad, para la cual, entre los valores de 0° y 10° hay un 100% de posibilidades de que se acumule la nieve, a partir de 70° las probabilidades son nulas, y entre los 10° y los 70°, los valores se reducen siguiendo una función sigmoide (figura 8).

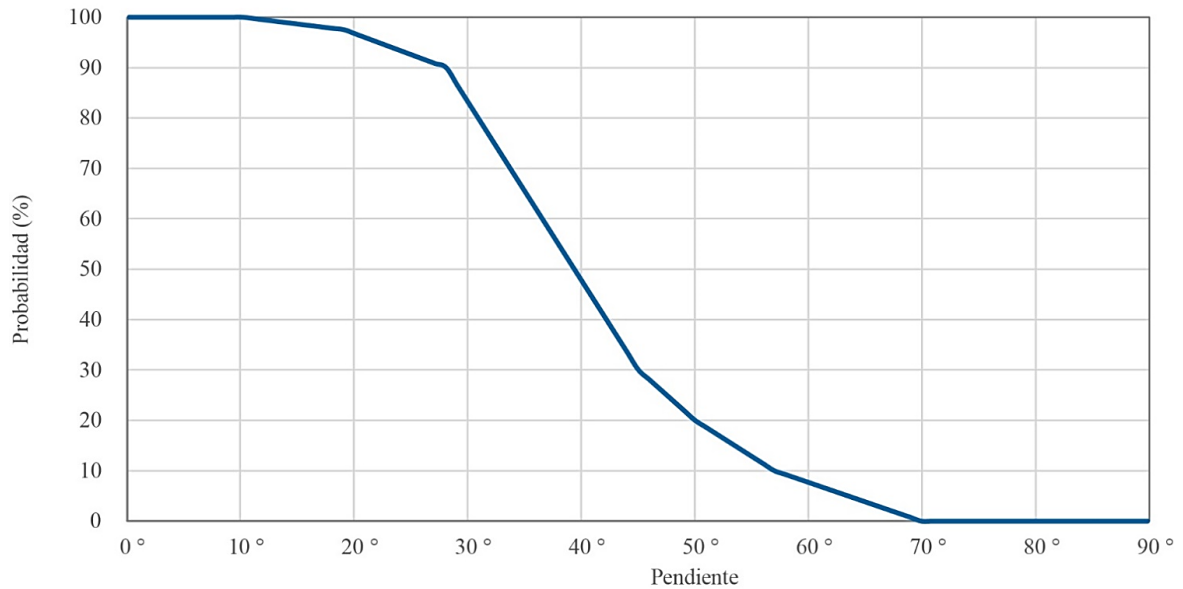


Figura 8. Distribución de las probabilidades de acumulación de nieve respecto a la pendiente del terreno. Elaboración propia.

La morfología del terreno, por otro lado, se muestra como una variable cualitativa. Para poder relacionarla con el resto de factores, se ha cuantificado a razón de -100 para el espacio que presente la máxima convexidad dentro del área de trabajo, 0 para las superficies llanas y 100 para la superficie más cóncava, de manera que pasa a ser una variable cuantitativa continua, con un número infinito de valores entre -100 y 100.

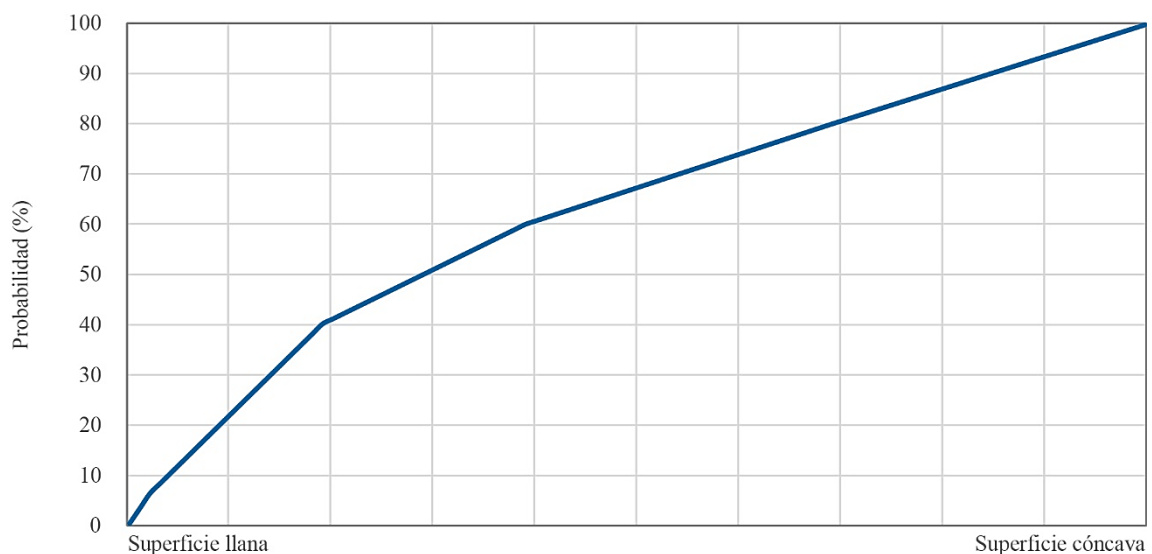


Figura 9. Distribución de las probabilidades de acumulación de nieve respecto a la concavidad del terreno. Elaboración propia.

Así, la probabilidad de que se acumule la nieve va directamente relacionada con los valores dados, ya que a medida que aumenta la concavidad de una superficie, también aumenta probabilidad de que se acumule la nieve en ese espacio. Por lo tanto, se han desechado los porcentajes negativos, empleándose

únicamente los valores positivos que representan las superficies cóncavas, y que siguen una función de distribución normal logarítmica (figura 9).

La vegetación y sus características es el tercer y último de los factores que se han empleado en la modelización del proceso de acumulación de nieve. Concretamente el porte de los individuos que componen estas masas y su densidad. Estas variables también son cualitativas, pero se pueden cuantificar siguiendo una progresión inversamente proporcional ya que a mayor porte menor acumulación, igual que a mayor densidad.

Por ello, se han extraído todas las categorías representadas en la leyenda del Mapa Forestal de España a escala 1:50.000, y se han clasificado en orden de porte y densidad, atribuyéndose un valor de 0 a las láminas de agua y coberturas de origen antrópico, seguidas por masas de vegetación de porte arbóreo y muy densas. Estos valores aumentan progresivamente, según se reduce el porte y la densidad de los individuos, hasta alcanzar un valor de 100 en los espacios catalogados como monte sin vegetación superior.

Una vez convertidos todos los factores en variables cuantitativas continuas, valoradas todas ellas de 0 a 100, se procede a ponderar el peso de cada una de ellas dentro del proceso. Esta ponderación se llevó a cabo mediante los datos obtenidos en el trabajo de campo y algo de apoyo bibliográfico. Pese a ello no deja de ser una simple aproximación, que está expuesta a posibles ajustes.

En este caso, tanto a la pendiente, como a la morfología se les ha dado un peso del 40% a cada una, mientras que a la vegetación se le ha atribuido un 20%, valores con los que se ha llevado a cabo una media ponderada, multiplicando los valores de cada variable en cada pixel por su ponderación, y luego sumado los valores de cada variable en cada pixel (fórmula 1).

$$(PENDIENTE * 0,4) + (MORFOLOGÍA * 0,4) + (VEGETACIÓN * 0,2)$$

Fórmula 1. Ponderación de las variables vinculadas al proceso de acumulación.

5.5.2. Proceso de fusión

Mediante la modelización de este proceso se pretende establecer el grado de probabilidad que presenta un determinado punto para que, en función de los factores analizados, la nieve que se haya podido acumular en él, se funda o perdure durante un periodo de tiempo mayor.

La radiación solar global se muestra como la variable cuantitativa que más importancia tiene dentro del proceso de fusión. Esta se expresa en vatios hora por metro cuadrado (WH/m²), por lo que cada pixel tendrá un valor positivo que represente estas unidades.

Para poder relacionar este factor con el resto, se ha llevado a cabo una reclasificación de los valores obtenidos para cada píxel del área de estudio, a razón de que el píxel con el valor más alto de radiación solar, pase a tener un valor de 100, mientras que al que tenga un valor más bajo se le dará un valor de 0, calculando el valor del resto de píxeles en función de estos dos. Por ello, se entiende que el píxel que mayor radiación global solar reciba, se verá más expuesto al proceso de fusión, que el píxel que tenga menor valor.

La litología del sustrato, y más concretamente su permeabilidad, se presenta como una variable cualitativa. Con ella se ha procedido de manera similar a como se ha hecho con el factor de la vegetación, extrayéndose todas las categorías representadas en la leyenda de la base de datos de la litología y se ha clasificado en orden de permeabilidad, atribuyéndose un valor de 0 a las superficies menos permeables y un valor de 100 a las más permeables.

De esta manera, en los lugares donde el sustrato presenta mayor permeabilidad se fomentan los procesos de fusión, mientras que en los lugares donde el sustrato es más impermeable, habrá una mayor permanencia de las masas de nieve.

Por último, la vegetación se comporta de igual manera en este proceso que en el de acumulación, por lo que únicamente se han modificado los valores de las láminas de agua y las cubiertas artificiales, ya que en ellos se fundirá antes la nieve.

La ponderación de cada una de estas variables, dentro del proceso de fusión, es distinta a la establecida en el proceso de acumulación. En este caso, a la radiación solar global se le ha dado un valor del 80%, mientras que a la litología y a la vegetación se les ha ponderado con un 10% a cada una (fórmula 2).

$$(RADIACIÓN SOLAR GLOBAL * 0,8) + (LITOLOGÍA * 0,1) + (VEGETACIÓN * 0,1)$$

Fórmula 2. Ponderación de las variables vinculadas al proceso de fusión.

5.5.3. Resultado final

Los resultados finales se muestran en forma de un ráster para cada proceso. Para el proceso de acumulación se ha obtenido una imagen en la que cada píxel tiene un valor de 0 a 100, en función de las probabilidades de que se acumule la nieve en él atendiendo a los factores estudiados. Para el proceso de fusión, se ha generado otra imagen en la que cada píxel tiene un valor de 0 a 100 a razón de las probabilidades de que la nieve que se haya podido acumular en ese píxel se funda.

Por lo tanto, para obtener un modelo que muestre las áreas donde la probabilidad de que la nieve acumulada permanezca durante un mayor periodo de tiempo, se ha procedido a restar los valores de los píxeles del modelo de fusión, de los valores de los píxeles del modelo de acumulación.

Una vez obtenida una imagen que represente las zonas donde hay más posibilidades de que la nieve perdure, se ha ponderado el factor de la altitud, el cual era el único que no se había incluido en el modelo. Se emplea en este momento porque esta variable afecta de igual manera al proceso de acumulación y al de fusión.

Para ello se ha establecido que, en los lugares por debajo de 2.000 metros de altitud, como se va a acumular menos nieve y ésta se va a fundir antes, sin que pueda permanecer de un año para otro, pasarán todos ellos a tener un valor de cero.

Los lugares que se encuentren entre 2.000 y 2.800 metros, mantendrán los valores resultantes del modelo. Y en los lugares situados a más de 2.800 metros, se duplican las probabilidades de que se acumule la nieve y esta se mantenga durante un periodo de tiempo mayor, multiplicándose estos valores por dos (fórmula 3).

$$(MODELO DE ACUMULACIÓN - MODELO DE FUSIÓN) * ALTITUD$$

Fórmula 3. Ponderación de la altitud sobre el resultado final.

6. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO

En los apartados anteriores se han expuesto tanto de las fuentes de datos, como las herramientas empleadas para generar las bases de datos que representan cada uno de los factores que intervienen en los procesos de fusión y acumulación. Tanto éstas como su relación, siguen un esquema de trabajo muy básico (figura 10). Pese a ello, el flujo de trabajo del modelo de geoprocésamiento, el cual se muestra en el Anexo I, tiene una serie de pasos intermedios, cuya argumentación es necesaria.

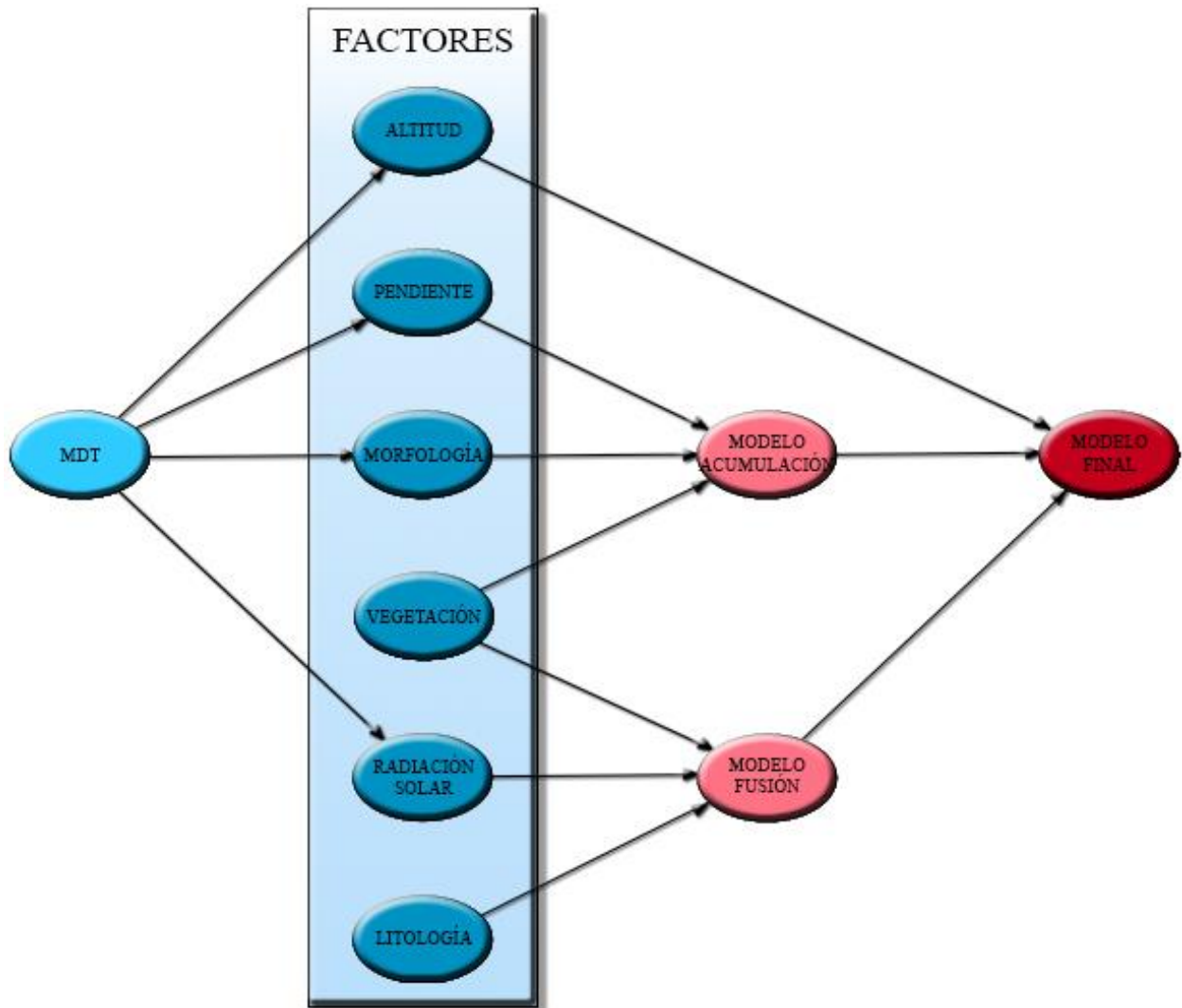


Figura 10. Esquema básico del proceso de trabajo. Elaboración propia.

- i. En primer lugar, se genera un Modelo Digital del Terreno, que abarque exclusivamente el espacio de trabajo delimitado. Para ello, una vez se hayan obtenido las hojas del MDT necesarias (en el caso de que se precise más de una), se elabora un mosaico con ellas, mediante la herramienta de *ArcToolbox Mosaic to New Ráster (Data Management Tool/Raster/Raster Dataset/Mosaic to New Raster)*.

Seguidamente se lleva a cabo un recorte del resultado, con el polígono del área de estudio, mediante la herramienta *Extract by Mask (Spatial Analyst Tools/Extraction/Extract by Mask)*.

- ii. A continuación, se generan las bases de datos espaciales que derivan directamente del MDT, mediante las herramientas descritas en el apartado 5. *Datos y metodología de trabajo*.

La única puntualización es que para la variable morfología, se ha empleado un radio de acción circular de 4 píxeles (20 metros) y que como los resultados se muestran en valores muy bajos, positivos para las superficies convexas y negativos para las cóncavas, se ha tenido que multiplicar por menos uno para invertir esa relación, y por 4,5, para que los valores máximos se aproximen a

la centena. Este valor es medio, ya que, si se quiere ajustar la precisión del modelo, este variará dependiendo de la zona de trabajo. Para Maladeta se ha empleado 5 y para Posets 4.

Además, para representar la radiación solar, se han empleado los datos del año 2017 con intervalos mensuales, de los cuales se han generado cuatro archivos ráster con datos de radiación global, radiación directa, radiación difusa y duración de la radiación de los que solo se ha utilizado el primero.

Una vez obtenido un archivo ráster que represente espacialmente cada variable, de manera que cada píxel tenga un valor que muestre las características de ese espacio; se procede a reclasificar esos valores para que representen de 0 a 100 las probabilidades con las que intervienen en cada proceso. Esto se lleva a cabo mediante la herramienta *Reclassify (Spatial Analyst/Reclass/Reclassify)*, estableciendo el valor más alto en 100 y el más bajo 0, y modificando los valores intermedios a su razón (morfología y radiación solar), o atendiendo a las tablas de ponderación adjuntas en el Anexo II (altitud y pendiente).

- iii. En tercer lugar, se rasterizan las bases de datos espaciales que almacenan la información de la vegetación y la litología, ya que se encuentran en formato ESRI Shapefile (.shp). Para ello se emplea la herramienta *Polygon to Raster (Conversion Tools/To Raster/ Polygon to Raster)*. Después se reclasifican según los valores de ponderación adjuntos en el Anexo II, y se recortan al área de trabajo. Las herramientas empleadas para ello son *Reclassify (Spatial Analyst/Reclass/Reclassify)* y *Extract by Mask (Spatial Analyst Tools/Extraction/Extract by Mask)* respectivamente.

Se ha de seguir este orden para que el modelo se pueda emplear sobre otras áreas, ya que si el recorte se llevase a cabo antes que los otros dos pasos, podría haber valores de la clasificación que no aparecerían representados en ese espacio, dando pie a posibles errores en el desarrollo del modelo y dificultando el empleo de las tablas de ponderación desarrolladas con todos los campos.

Se han generado dos ponderaciones distintas para la vegetación, según como interviene en el proceso de acumulación, y como en el de fusión, ya que, atendiendo a este factor, sobre las láminas de agua y sobre las cubiertas artificiales, las probabilidades de que se acumule son 0 y de que se funda son 100.

- iv. Por último, se han establecido relaciones de dependencia entre las variables que intervienen en cada proceso para generar un archivo ráster final en el que se muestren las áreas donde la probabilidad de que la nieve acumulada permanezca durante un mayor periodo de tiempo. Estas relaciones se han descrito con fórmulas en el apartado de datos y metodología de trabajo y se han aplicado mediante la herramienta *Raster Calculator (Spatial Analyst Tools/Map Algebra/ Raster Calculator)*.

Además, se han eliminado los píxeles con valores negativos, con la intención de mostrar de forma más clara la información que se presenta. Para ello, se ha empleado otra vez la herramienta *Raster Calculator*, con la fórmula mostrada en la fórmula 4, obteniéndose así el resultado final.

$$\text{Con}((\text{"\%MODELO GENERAL\%"} > 0), \text{"\%MODELO GENERAL\%"})$$

Fórmula 4. Comando para eliminar los píxeles con valores negativos.

7. VALIDACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS

Para validar el proceso de modelización y los resultados obtenidos, se ha procedido a comparar estos últimos con la información aportada por imágenes satélite. El momento al que se han de corresponder estas imágenes no se ha concretado de forma aleatoria, si no que se justifica con los datos resultantes del análisis del balance hídrico.

Los balances hídricos se elaboran a partir de datos de precipitación y de escorrentía. Con ellos se calculan el déficit y el coeficiente de escorrentía, tanto mensual como anual, con los cuales se pueden interpretar las relaciones entre precipitación y escorrentía, y de esta forma estimar las reservas hídricas, tanto del suelo como en forma de nieve (Alonso y Moreno, 1996).

Con dichos coeficientes se establece una relación entre el agua precipitada cada mes y el agua de escorrentía que engrosa el caudal de los ríos, reflejando los rasgos fundamentales del proceso de retención-fusión nival y la evapotranspiración, ya que acusan los déficits mensuales de escorrentía.

Los coeficientes mensuales de escorrentía experimentan variaciones estacionales a lo largo del año. Estas variaciones tienen que ver con la evaporación, con la creación de reserva del suelo, con la retención de nieve en cabecera y con la fusión según García *et al.* (1986) sirven para dividir el año en cuatro periodos de duración variable:

- i. Fase de reconstrucción de la reserva hídrica del suelo: coincide con parte del otoño y el coeficiente de escorrentía es también inferior al medio anual. Las precipitaciones aumentan considerablemente pero no sucede lo mismo con el caudal.
- ii. Fase de retención nival: corresponde a algunos meses invernales. La escorrentía es normalmente muy baja, aunque se aproxima a la media anual al avanzar hacia la primavera.
- iii. Fase de fusión nival: pertenece a la primavera y a la primera parte del verano. Los coeficientes de escorrentía se aproximan o superan la unidad o, por lo menos, siempre son superiores a la media anual.
- iv. Fase de agotamiento: corresponde habitualmente a la segunda mitad del verano, con coeficientes de escorrentía bajos. El caudal se alimenta en parte de reservas y en parte de las precipitaciones de la estación cálida.

Los datos necesarios para elaborar el balance hídrico se obtienen, en gran medida, del análisis de factores extrínsecos. Estos datos han adquirido del histórico de la estación de aforo de Eriste, situada sobre el río Ésera, en el municipio de Sahún.

Esta estación pertenece al Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro (SAIH Ebro). Se han empleado estos datos y no otros ya que dicha estación se encuentra en un punto intermedio entre los dos espacios de trabajo y en ella se toman datos de todos los indicadores que se precisan, de forma representativa para ambos sectores.

Así se han utilizado, como datos de partida, la precipitación en milímetros, la temperatura en grados celsius y el caudal medio en $\text{m}^3\text{seg}^{-1}$, escogiendo la serie de datos perteneciente al periodo que va entre julio de 2008 y junio de 2018 y calculándose los promedios mensuales.

A partir de los datos de temperatura, se ha calculado la evapotranspiración potencial, siguiendo el método de Thornthwaite. A continuación, se han restado estos datos, de los de precipitación, para obtener la diferencia entre la precipitación y la ETP que indique el déficit o el superávit de agua.

Con los datos de caudal medio, se ha calculado el caudal específico mediante la división del caudal medio en litros entre la superficie de la cuenca. Este representa el flujo de caudal por unidad de superficie, en litros por segundo por kilómetro cuadrado de la cuenca.

El índice de escorrentía es la lámina de agua escurrida, en milímetros de altura o litros por metro cuadrado. Se calcula multiplicando el caudal específico del río referido a un año, por un valor constante de 31'557, que proviene de los segundos que tiene un año dividido entre un kilómetro cuadrado.

El coeficiente de escorrentía, es la relación entre el índice de escorrentía y la precipitación anual. Con él se conoce la parte de agua que puede llegar a un punto determinado del curso fluvial partiendo de una cantidad de precipitación recibida y en consecuencia se deduce también la parte evaporada. Este coeficiente también se ha calculado de forma relativa con el fin de eliminar las influencias de los factores intrínsecos de la cuenca (Alonso y Moreno, 1996).

El déficit de escorrentía es la diferencia entre las precipitaciones medias y el índice de escorrentía, y muestra diferencia entre la altura media del agua de las precipitaciones sobre la cuenca y la lámina de agua equivalente.

Por último, el coeficiente de caudal resulta de la relación del caudal medio mensual con el caudal medio anual (módulo), y permite conocer cuál es el régimen estacional de un río, es decir, la variabilidad mensual de un curso de agua.

Todos estos datos se muestran en el Anexo III, y se han apoyado en los de altura de nieve en centímetros obtenidos de los telenivómetros de la Renclusa (2.180 m) y Eriste (2.350 m), pertenecientes también a la Red SAIH. Se han seleccionado estas dos fuentes, ya que se encuentran dentro o muy próximas a los espacios de trabajo.

Pese a ello, también se pueden emplear los datos del programa ERHIN (Estimación de los Recursos Hídricos Invernales), el cual realiza tres mediciones anuales (enero, marzo y finales de abril) del espesor de nieve, en 114 balizas localizadas a lo largo del Pirineo central español.

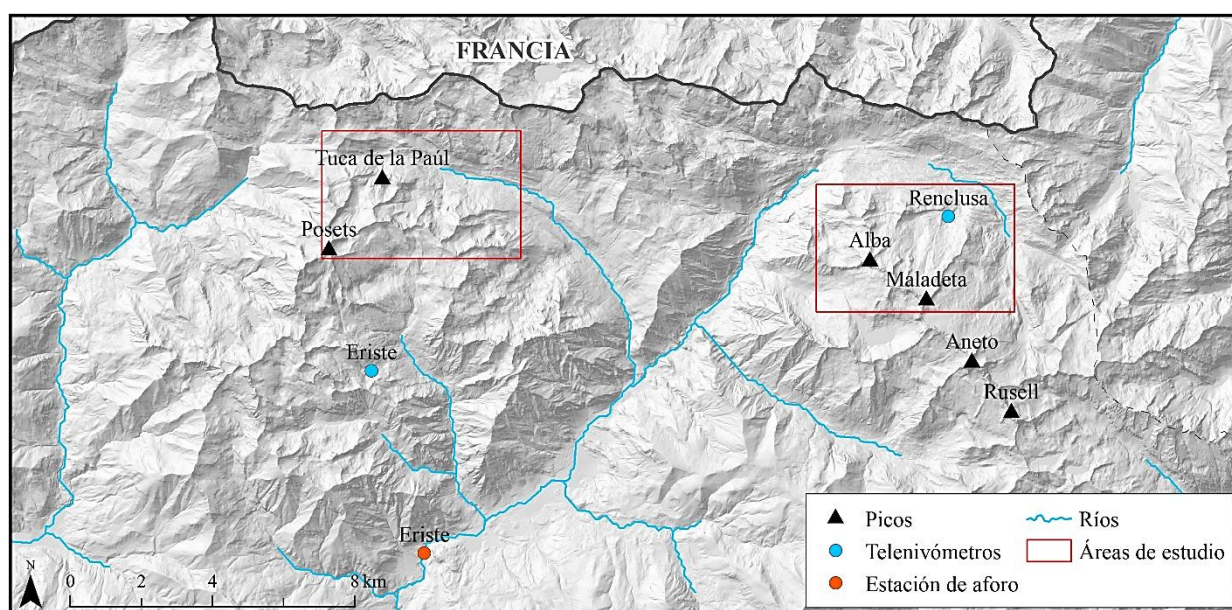


Figura 11. Localización de los lugares de toma de datos. Elaboración propia.

Los lugares donde se emplazan sendos telenivómetros, junto con la localización de la estación de aforo de Eriste, aparecen representados en la figura 11, donde se puede apreciar la cercanía de dichos puntos respecto a los espacios de trabajo, mostrándose la representatividad de los datos.

Mediante el análisis de todos estos valores y del comportamiento medio anual de cada uno de los indicadores empleados se han podido delimitar, de forma aproximada, la duración de las fases del proceso nival.

Esta delimitación se plantea como una simple aproximación con a que orientarse a la hora de descargar las imágenes de satélite que representen cada periodo, teniendo en cuenta que tanto el inicio como el final, y con ello la duración de cada fase, puede variar cada año.

Con todo ello y como se muestra en la figura 12, se ha podido determinar la duración media de cada fase del proceso nival, y concretar que fechas son más apropiadas para cotejar los resultados.

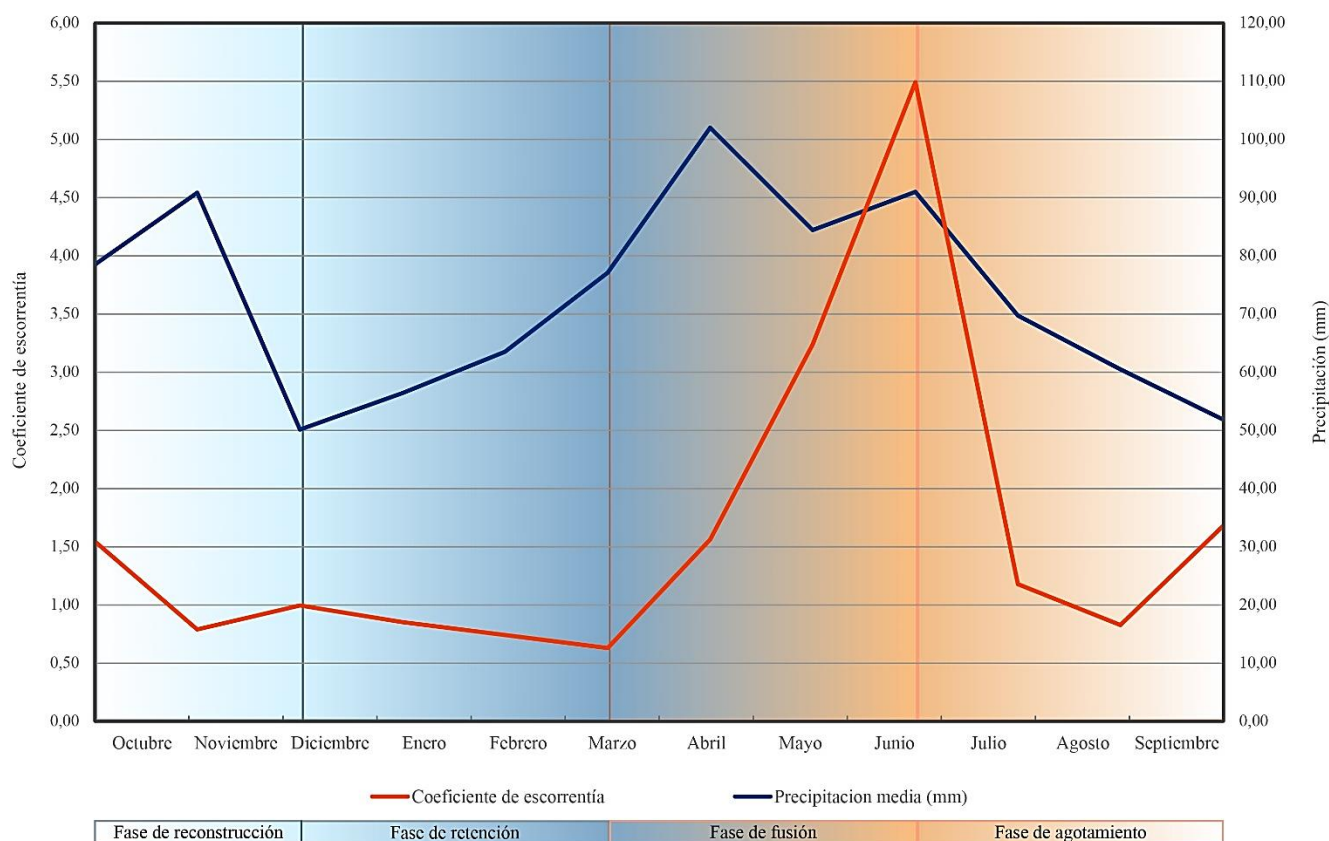


Figura 12. Distribución media mensual del coeficiente de escorrentía y de la precipitación, y duración de las fases del proceso nival. Elaboración propia.

- La fase de reconstrucción de la reserva hídrica del suelo comprende el periodo que va desde octubre hasta principios de diciembre.
- La fase de retención nival va desde principios de diciembre hasta mediados de marzo. Por lo tanto, para validar los resultados del proceso de acumulación de la nieve se han empleado imágenes de principios de marzo.
- La fase de fusión nival se establece entre mediados de marzo y finales de junio. Por lo que para validar el modelo de fusión se han utilizado imágenes de entre finales de junio y principios de julio.
- La fase de agotamiento se integra entre finales de junio y septiembre. Por lo que para corroborar la localización de las áreas donde hay donde hay más probabilidades de que la nieve perdure durante un mayor periodo de tiempo, se han usado imágenes de entre mediados y finales de septiembre.

Las imágenes seleccionadas para esta labor han sido tomadas por el satélite Sentinel 2, el primer satélite óptico de observación de la Tierra del programa Copernicus de la ESA. Se ha elegido esta plataforma, ya que su periodo de revisita es de cinco días, lo que aporta una frecuencia temporal que permite adaptarse a los periodos descritos, ofreciendo más alternativas frente al problema de las nubes.

La oferta de productos permite escoger entre imágenes sin corregir atmosféricamente o imágenes ya corregidas, habiéndose empleado estas últimas. El tamaño de la escena es de 290 kilómetros de ancho, pero para este trabajo, se ha reducido exclusivamente a las áreas de estudio a una escala de 1:25.000. Para mayor contraste de los resultados, se han empleado imágenes del proceso nival de 2017 sobre el área del Posets, y del 2018 sobre el área de la Maladeta.

Además, estos productos ofrecen varias resoluciones espaciales, utilizándose la de 10 metros con las bandas 2, 3 y 4, para las composiciones en falso color; y la de 20 metros con las bandas 3 y 11 para diferenciar las cubiertas de nieve de las nubes, ya que la propiedad óptica más importante del hielo y del agua, está en longitudes de onda del visible y del infrarrojo medio (Alonso y Moreno, 1996).

7.1. Resultados del proceso de acumulación

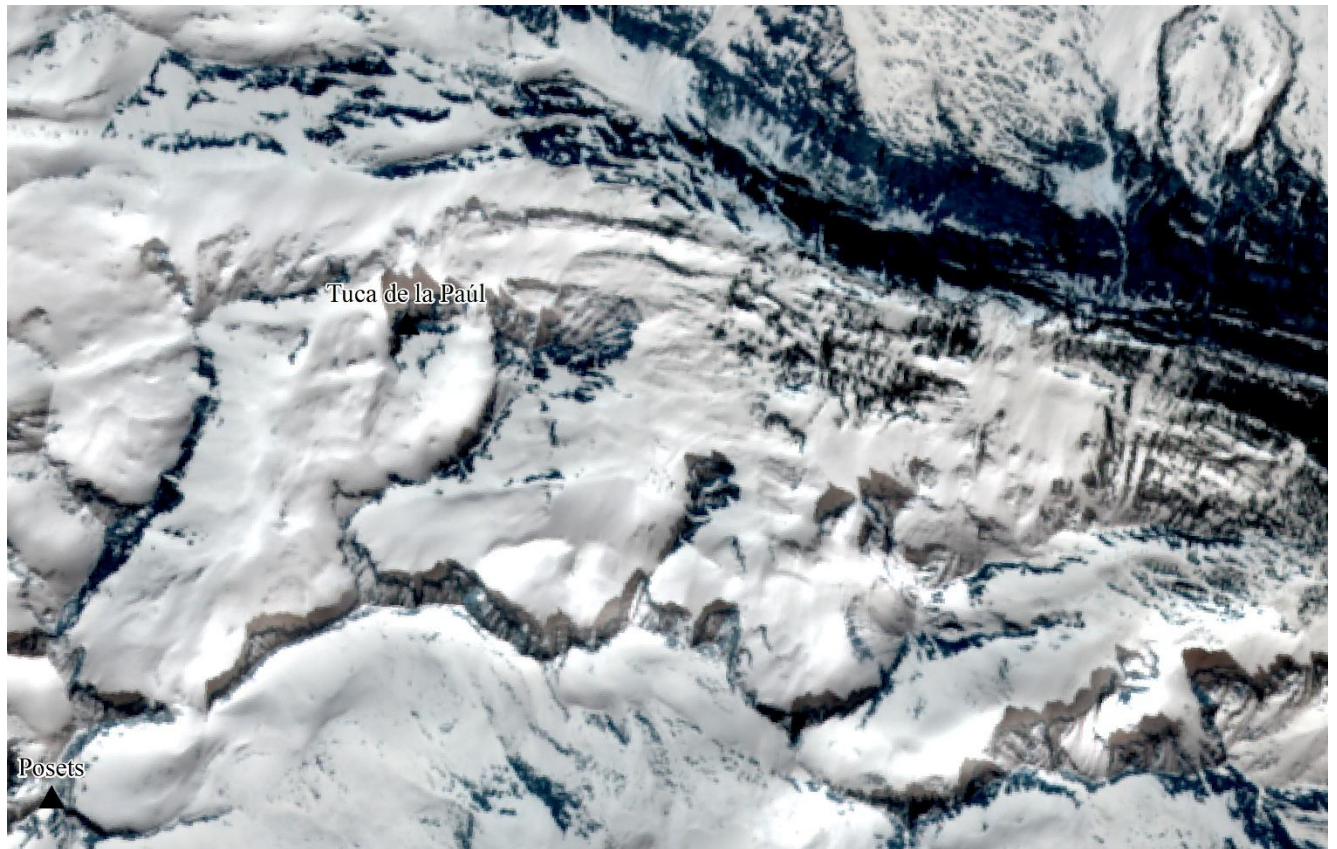


Figura 13. Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color (bandas 4, 3, y 2). 6 de marzo de 2017. Área de estudio del Posets.

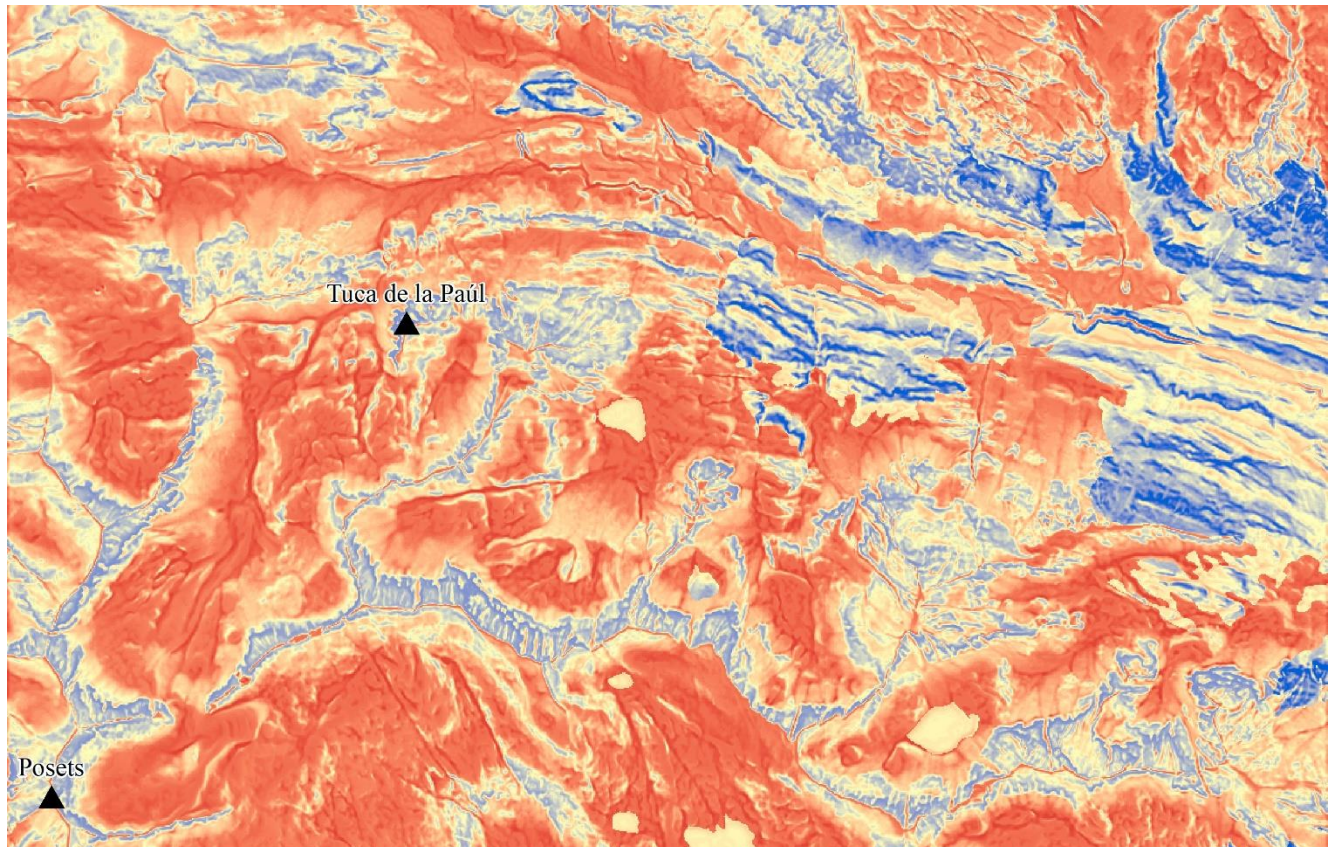


Figura 14. Zonas de acumulación de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. En azul los lugares con menos probabilidades de acumulación de nieve, y en rojo los lugares con más probabilidades. Área de estudio del Posets.

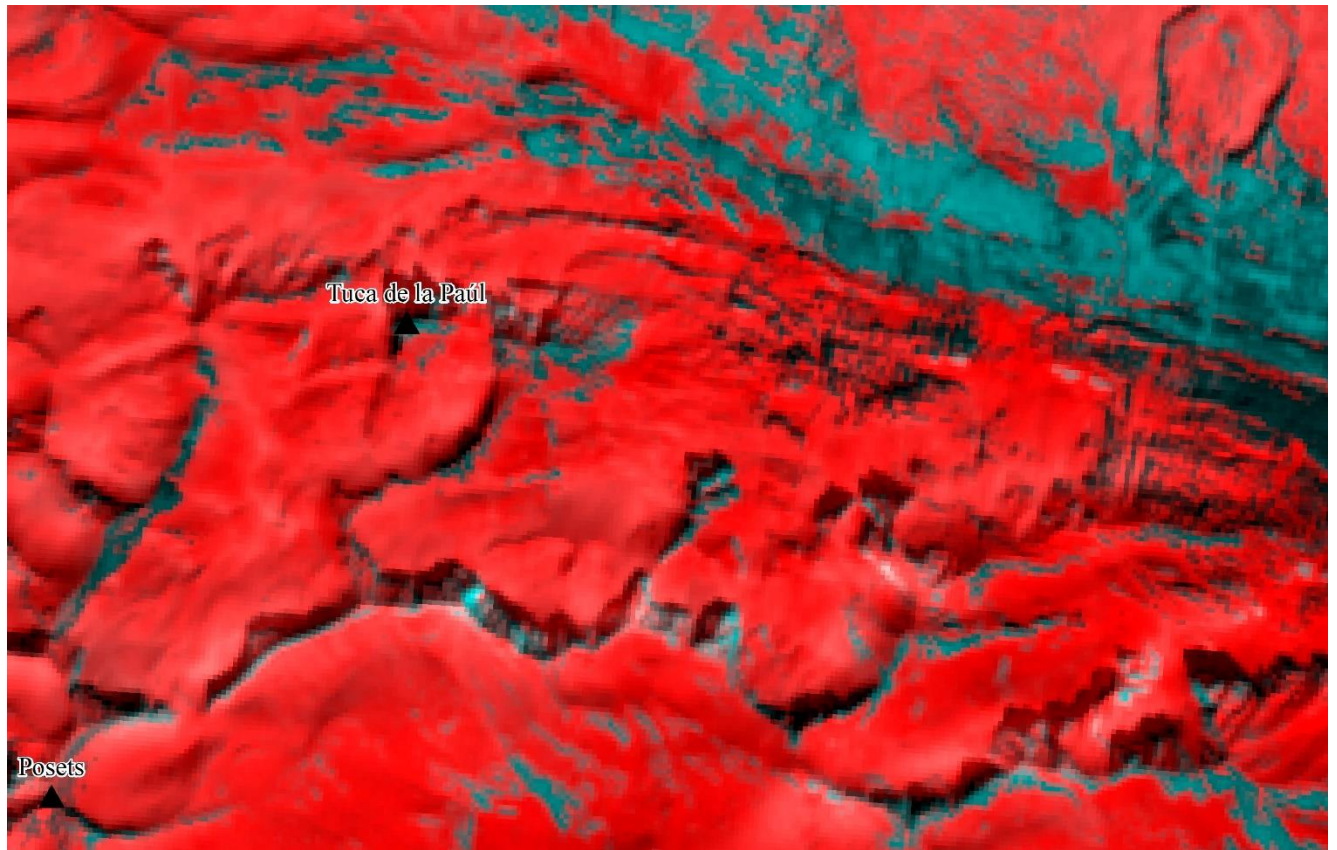


Figura 15. Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve (bandas 3, y 11). 6 de marzo de 2017. En rojo los lugares cubiertos de nieve y en verde los que no. Área de estudio del Posets.

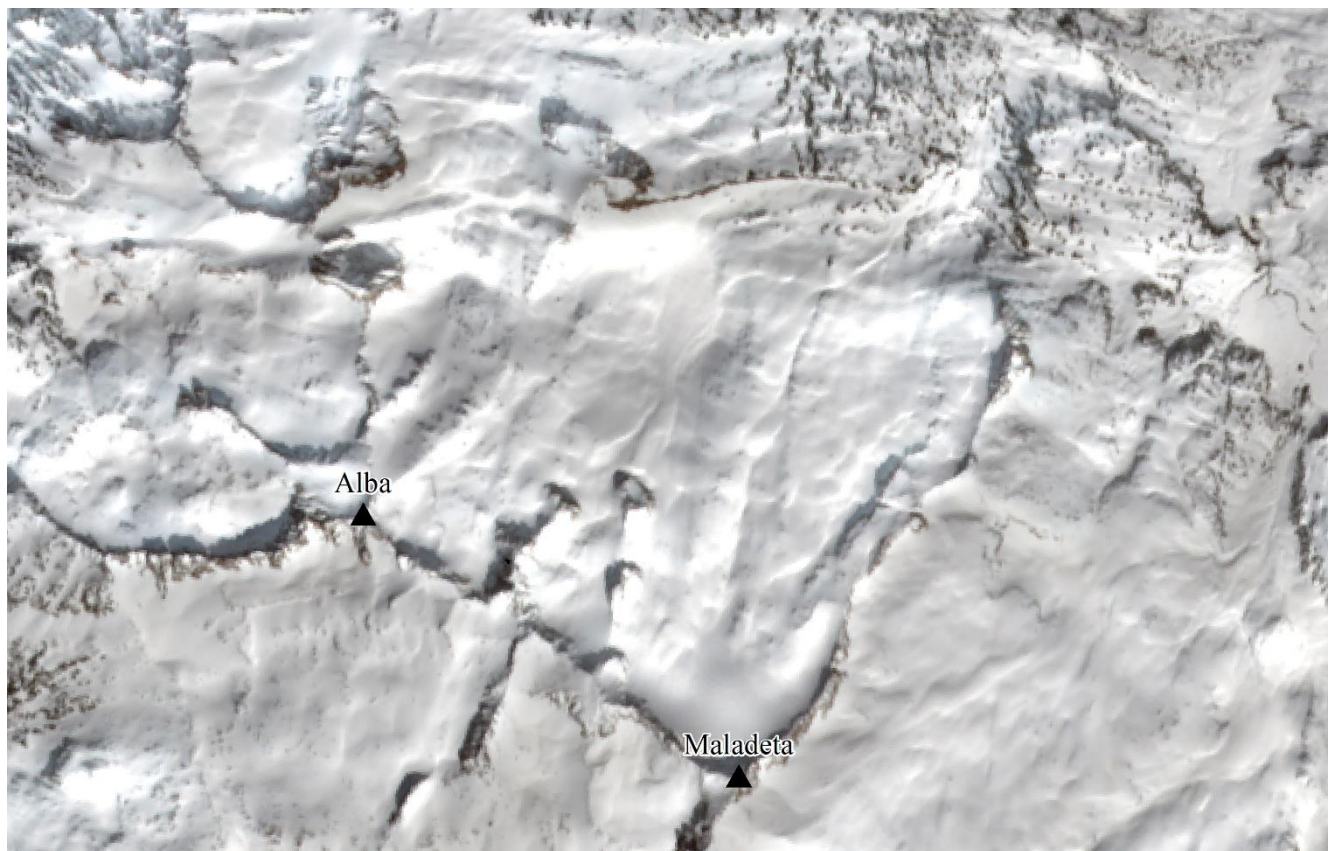


Figura 16. Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color (bandas 4, 3, y 2). 1 de marzo de 2018. Área de estudio de la Maladeta.

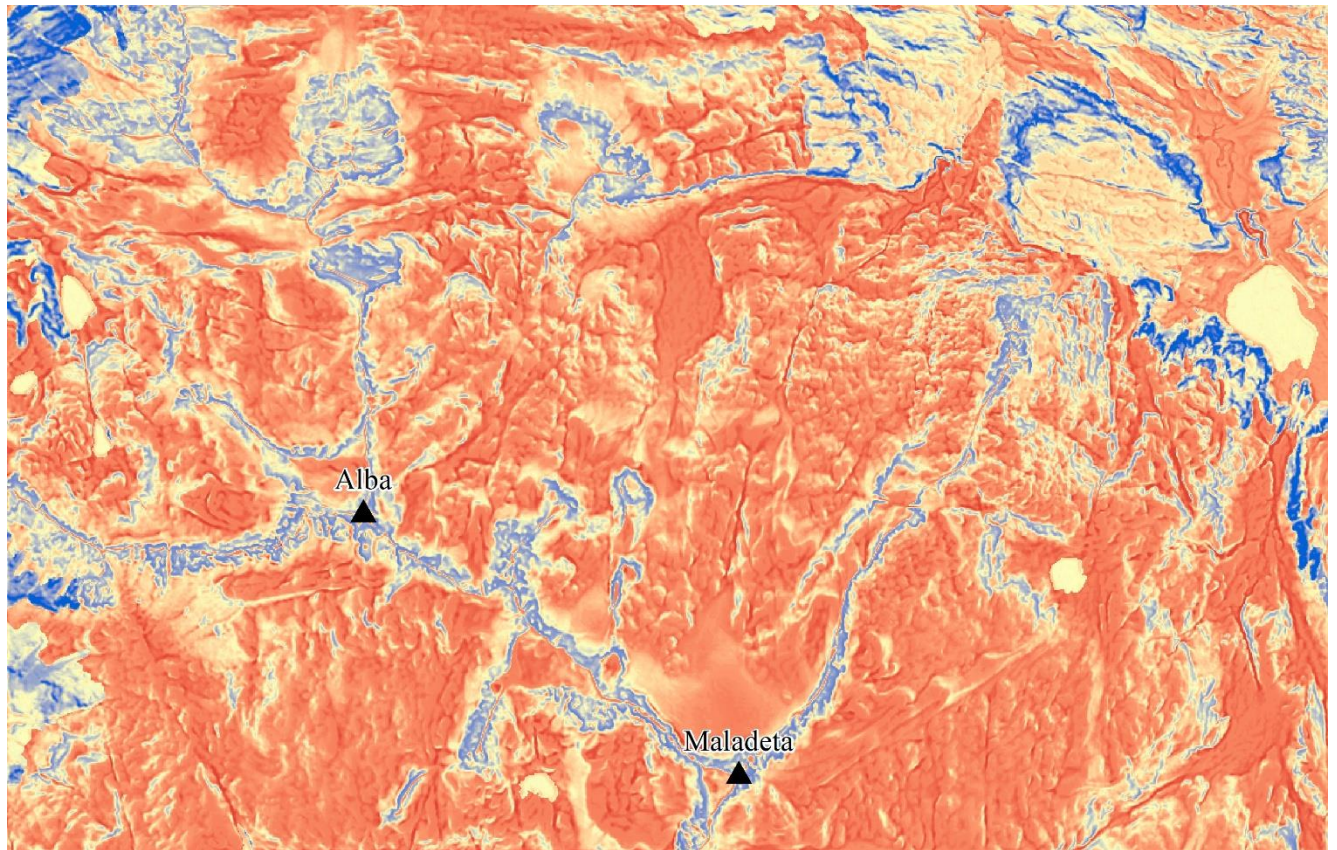


Figura 17. Zonas de acumulación de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. En azul los lugares con menos probabilidades de acumulación de nieve, y en rojo los lugares con más probabilidades. Área de estudio de la Maladeta.

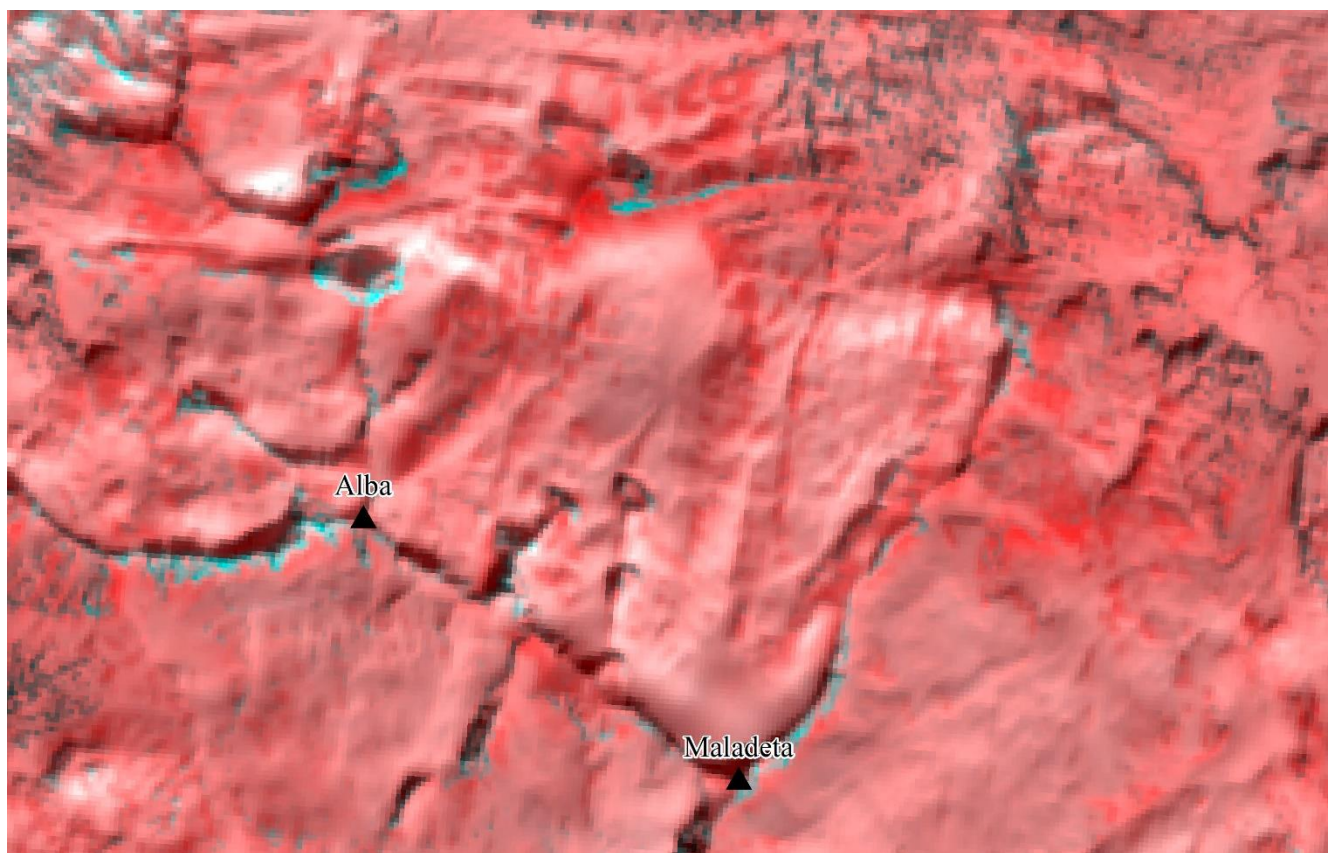


Figura 18. Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve (bandas 3, y 11). 1 de marzo de 2018. En rojo los lugares cubiertos de nieve y en gris los que no. Área de estudio del Maladeta.

7.2. Resultados del proceso de fusión

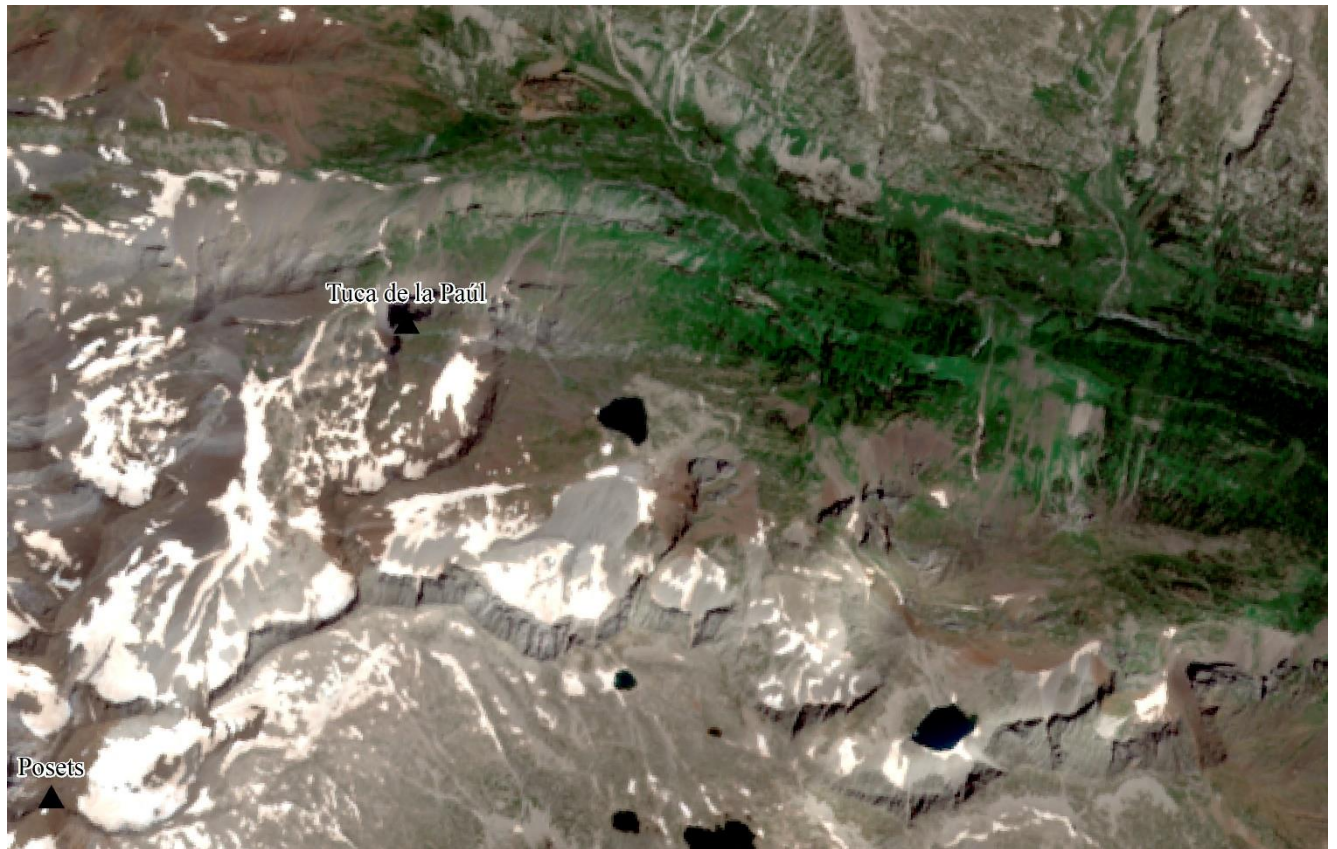


Figura 19. Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color (bandas 4, 3, y 2). 5 de julio de 2017. Área de estudio del Posets.

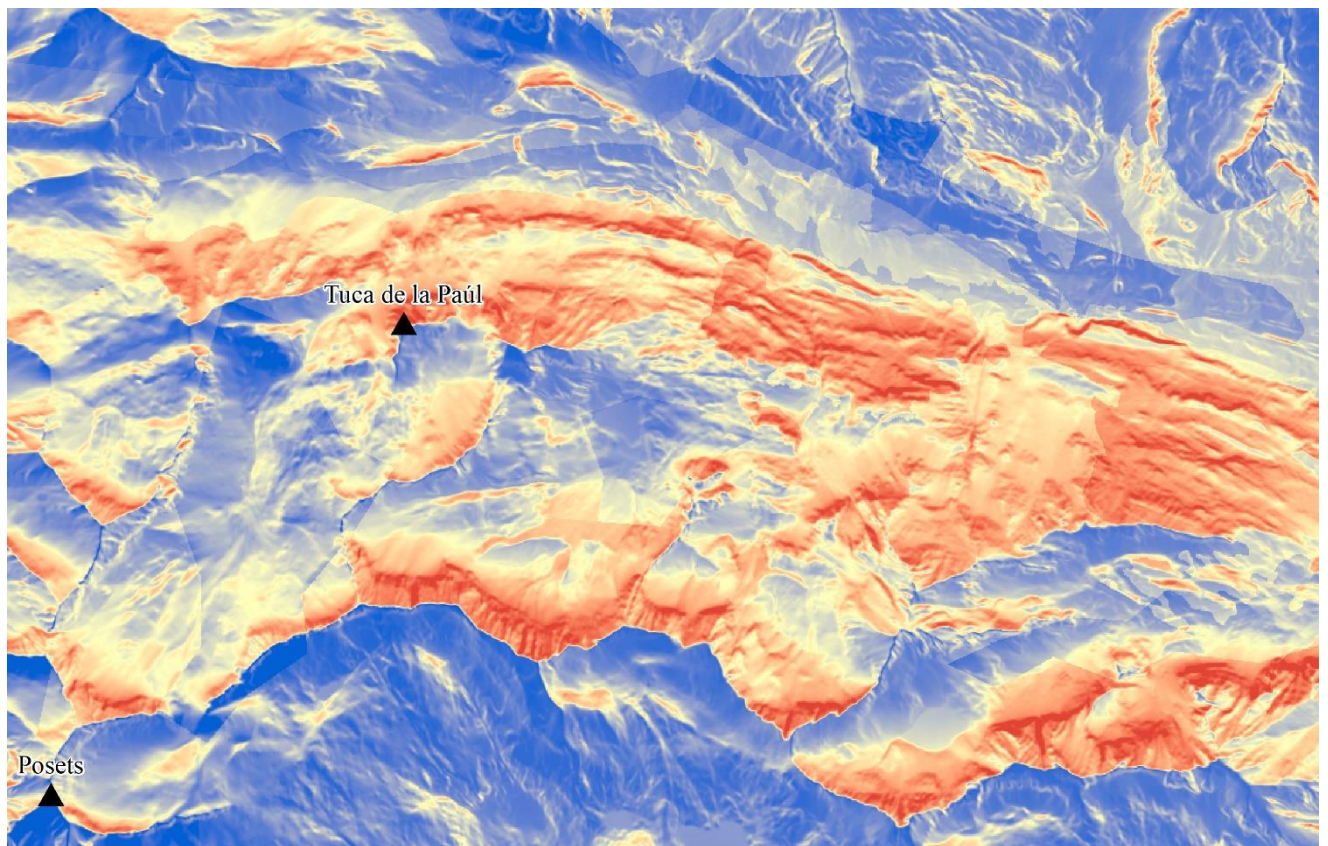


Figura 20. Zonas de fusión de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. En azul los lugares con más probabilidades de fusión de la nieve, y en rojo los lugares con más probabilidades mantenimiento. Área de estudio del Posets

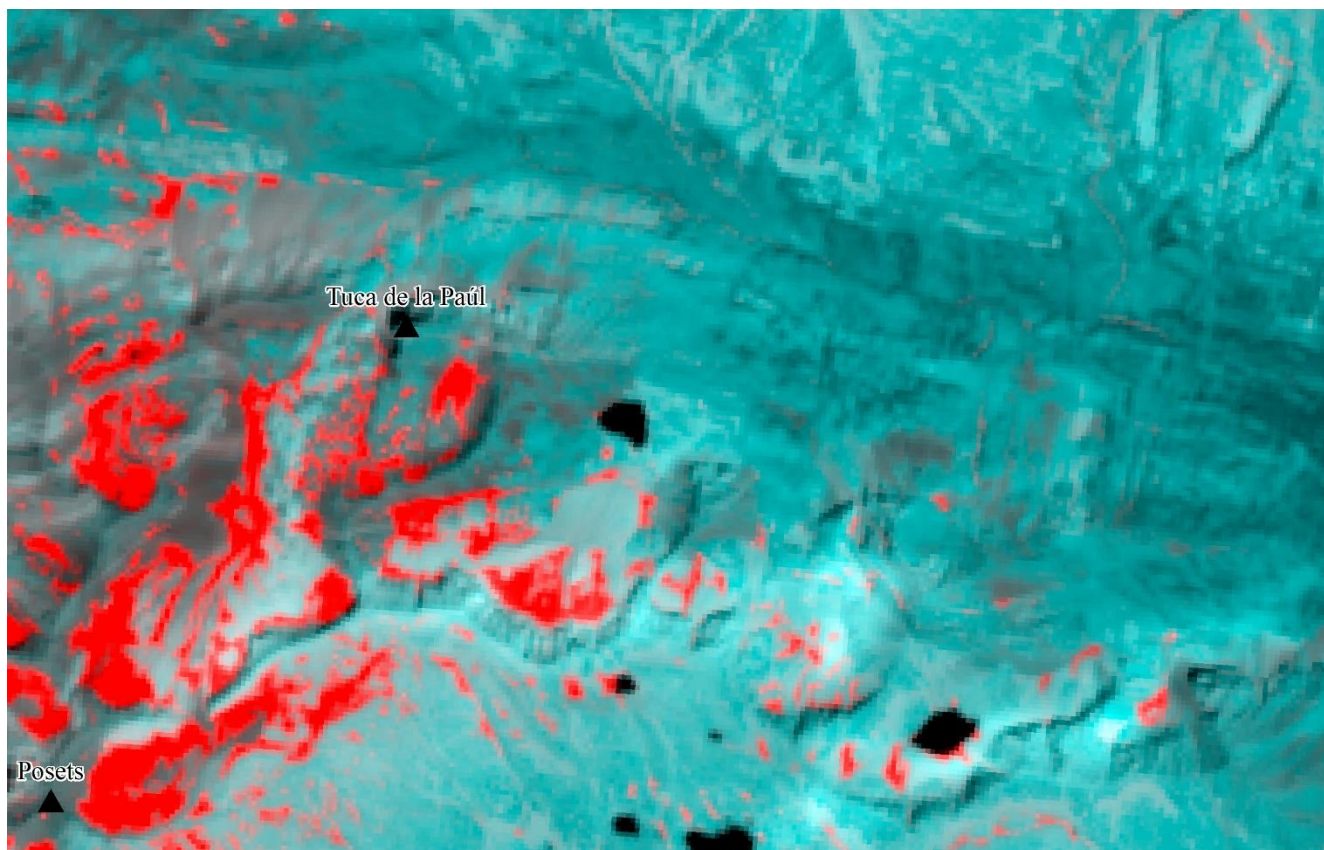


Figura 21. Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve (bandas 3, y 11). 5 de julio de 2017. En rojo los lugares cubiertos de nieve y en verde los que no. Área de estudio del Posets.

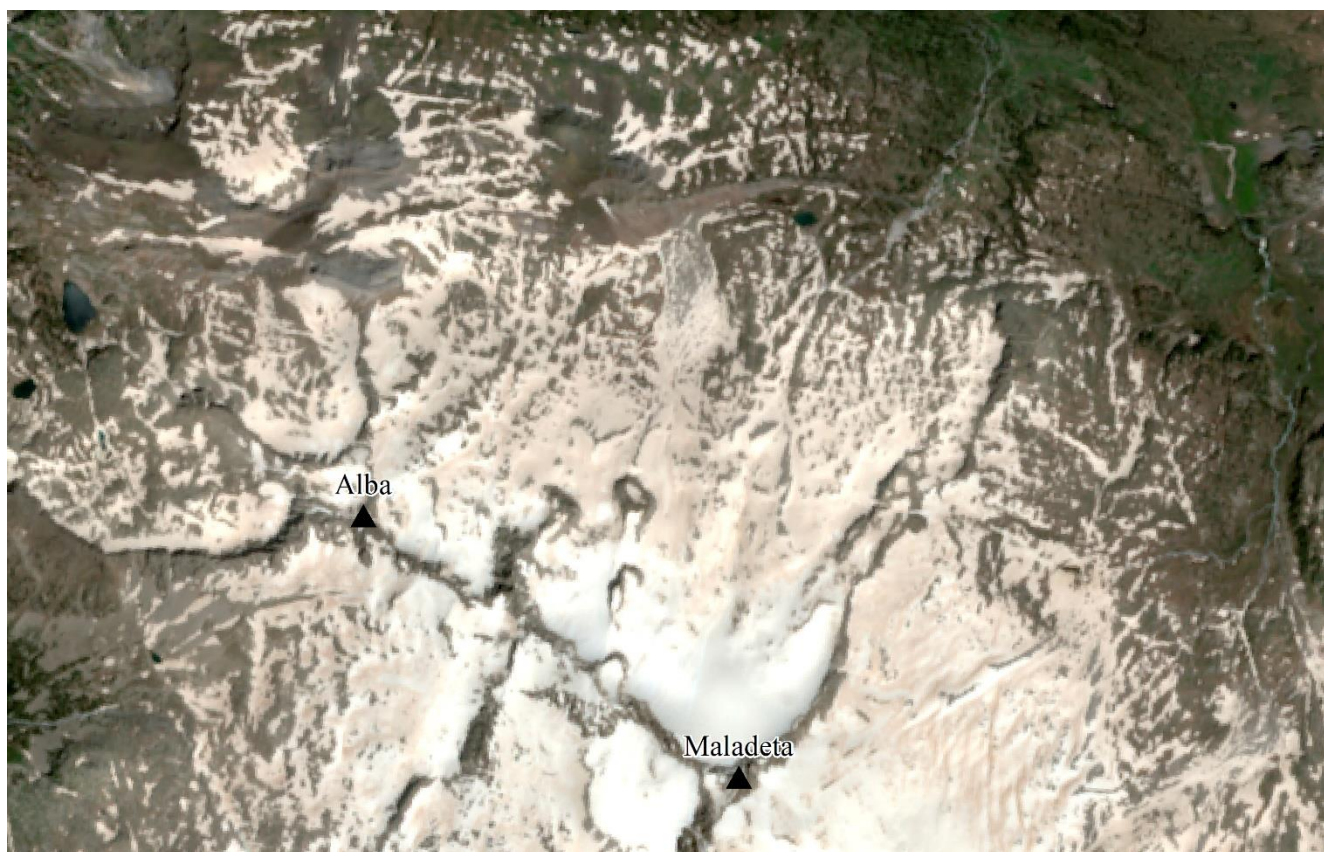


Figura 22. Imagen Sentinel 2B. Composición en falso color (bandas 4, 3, y 2). 25 de junio de 2018. Área de estudio de la Maladeta.

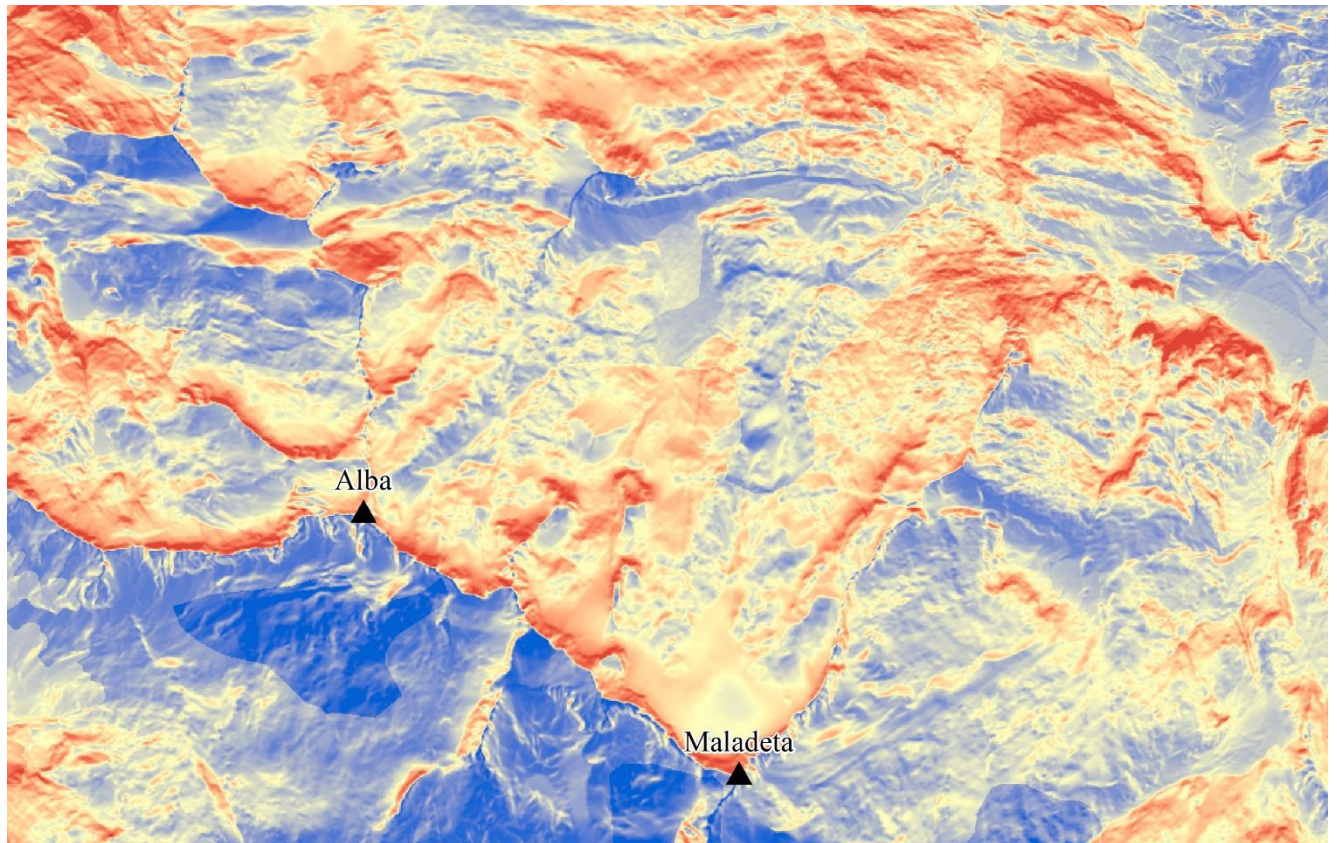


Figura 23. Zonas de fusión de nieve. Resultado de la ejecución del modelo. En azul los lugares con más probabilidades de fusión de la nieve, y en rojo los lugares con más probabilidades mantenimiento. Área de estudio de la Maladeta.

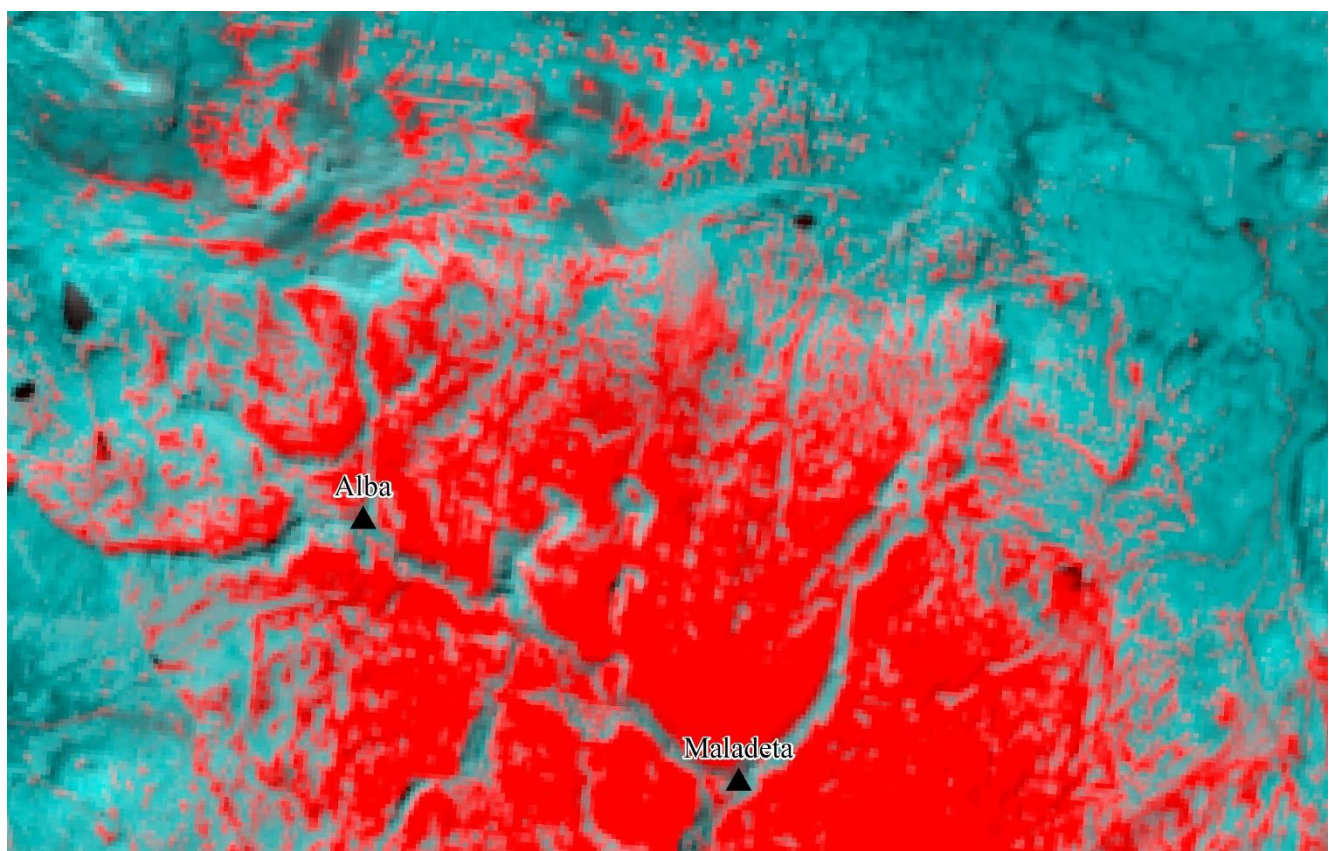


Figura 24. Imagen Sentinel 2B. Composición que discrimina la cubierta de nieve (bandas 3, y 11). 25 de junio de 2018. En rojo los lugares cubiertos de nieve y en verde los que no. Área de estudio del Maladeta.

7.3. Áreas con mayor probabilidad de permanencia de nieve

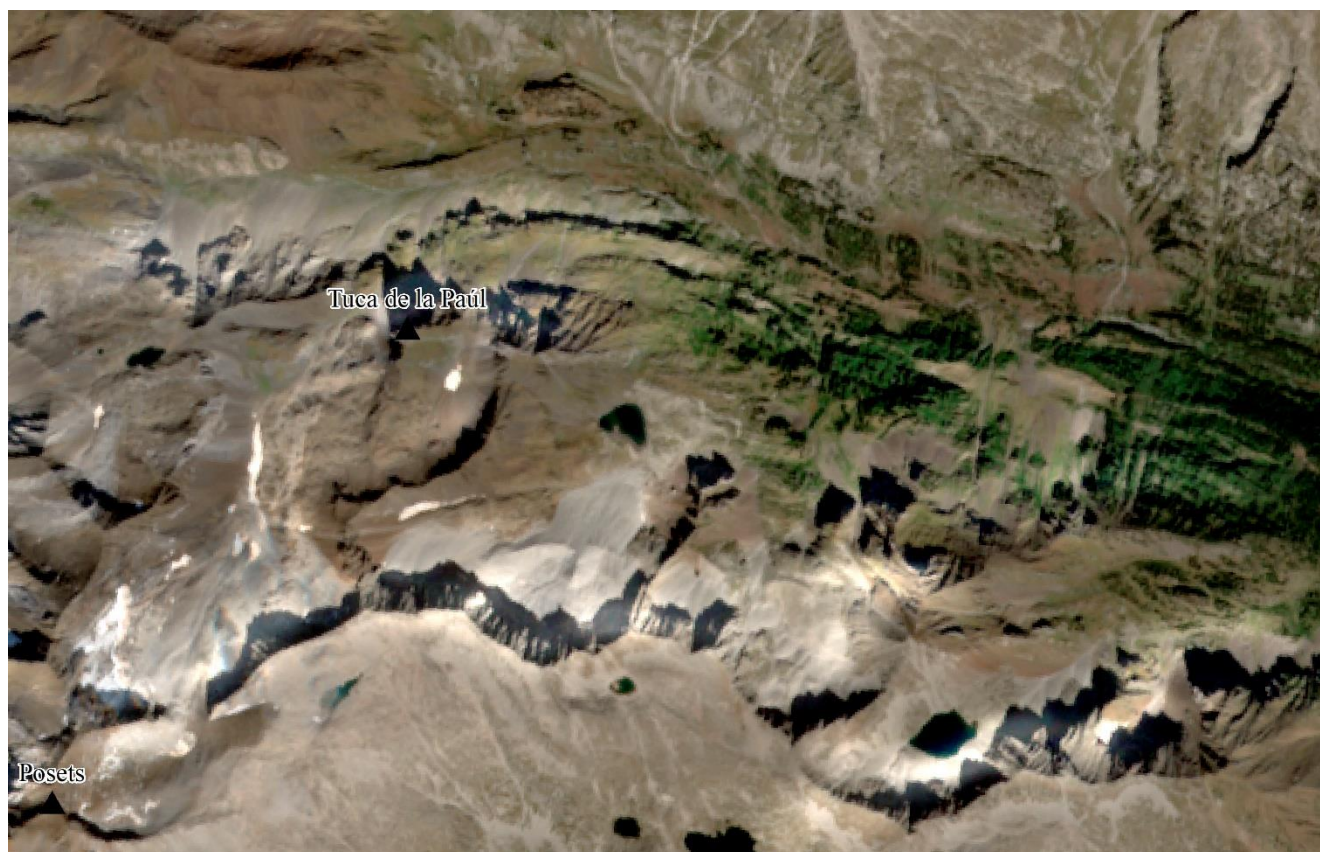


Figura 25. Imagen Sentinel 2A. Composición en falso color (bandas 4, 3, y 2). 13 de septiembre de 2017. Área de estudio del Posets.

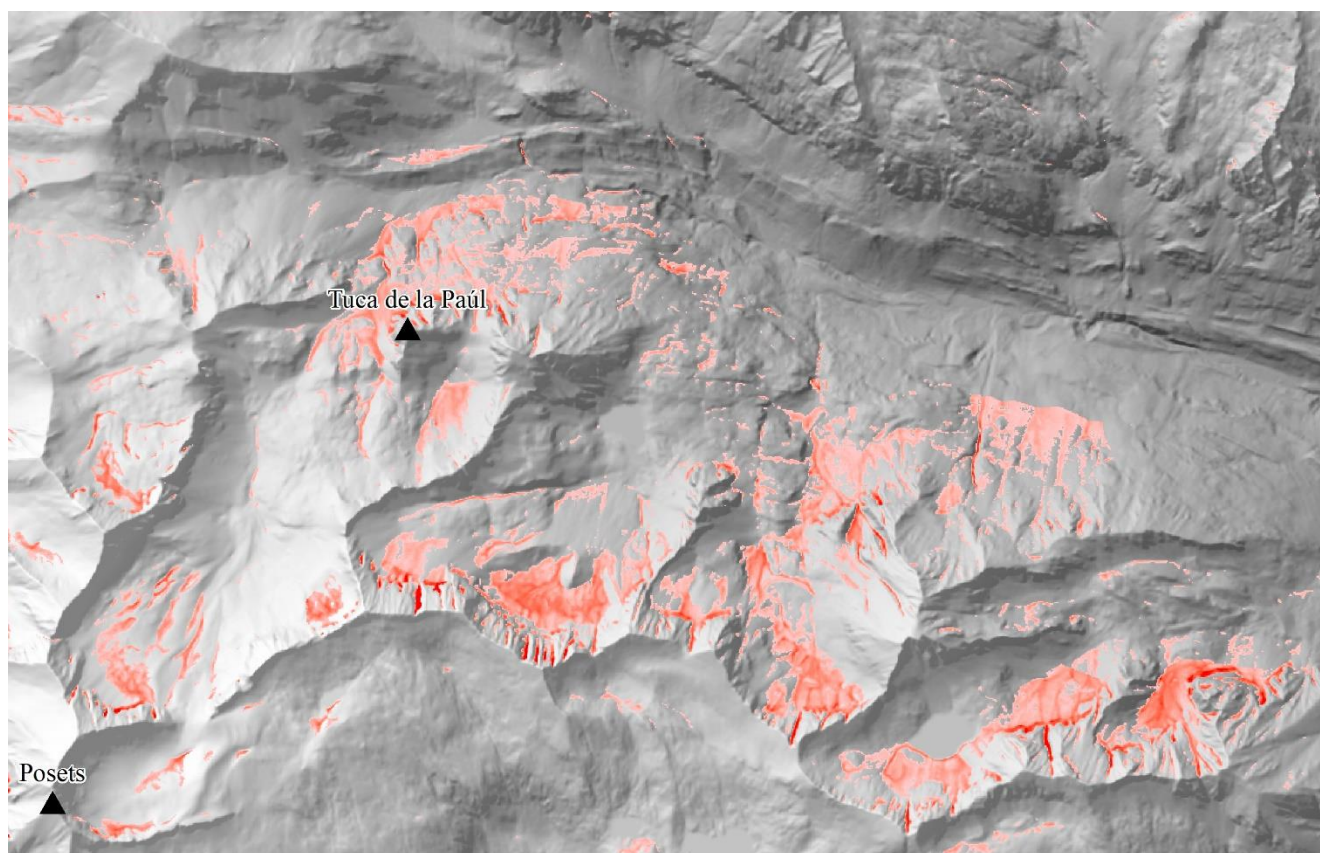


Figura 26. Zonas de permanencia de nieve. Resultado de la ejecución del modelo sobre un modelo de sombras del terreno. La intensidad del rojo aumenta con las probabilidades de permanencia de la nieve. Área de estudio del Posets.

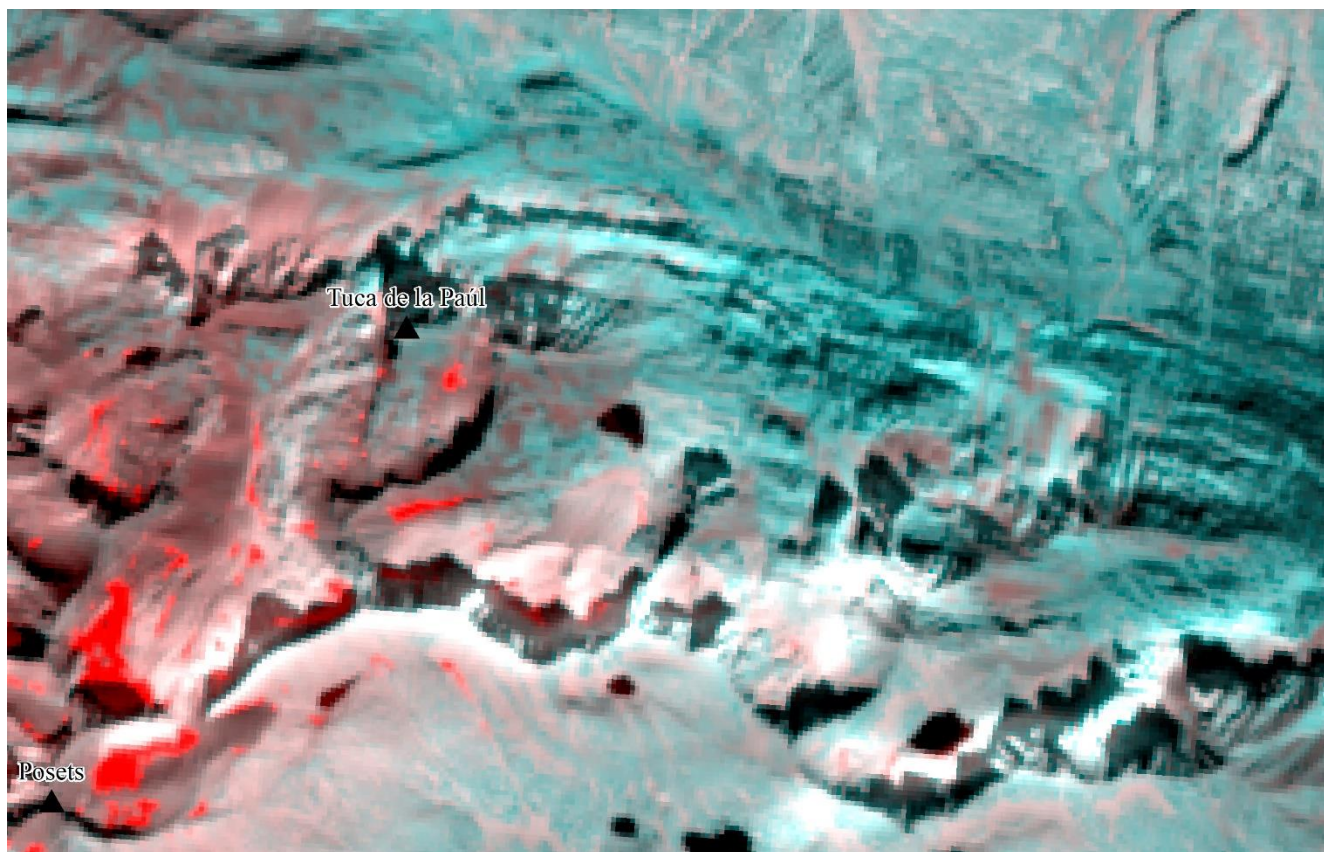


Figura 27. Imagen Sentinel 2A. Composición que discrimina la cubierta de nieve (bandas 3, y 11). 13 de septiembre de 2017. En rojo los lugares cubiertos de nieve y en verde los que no. Área de estudio del Posets.

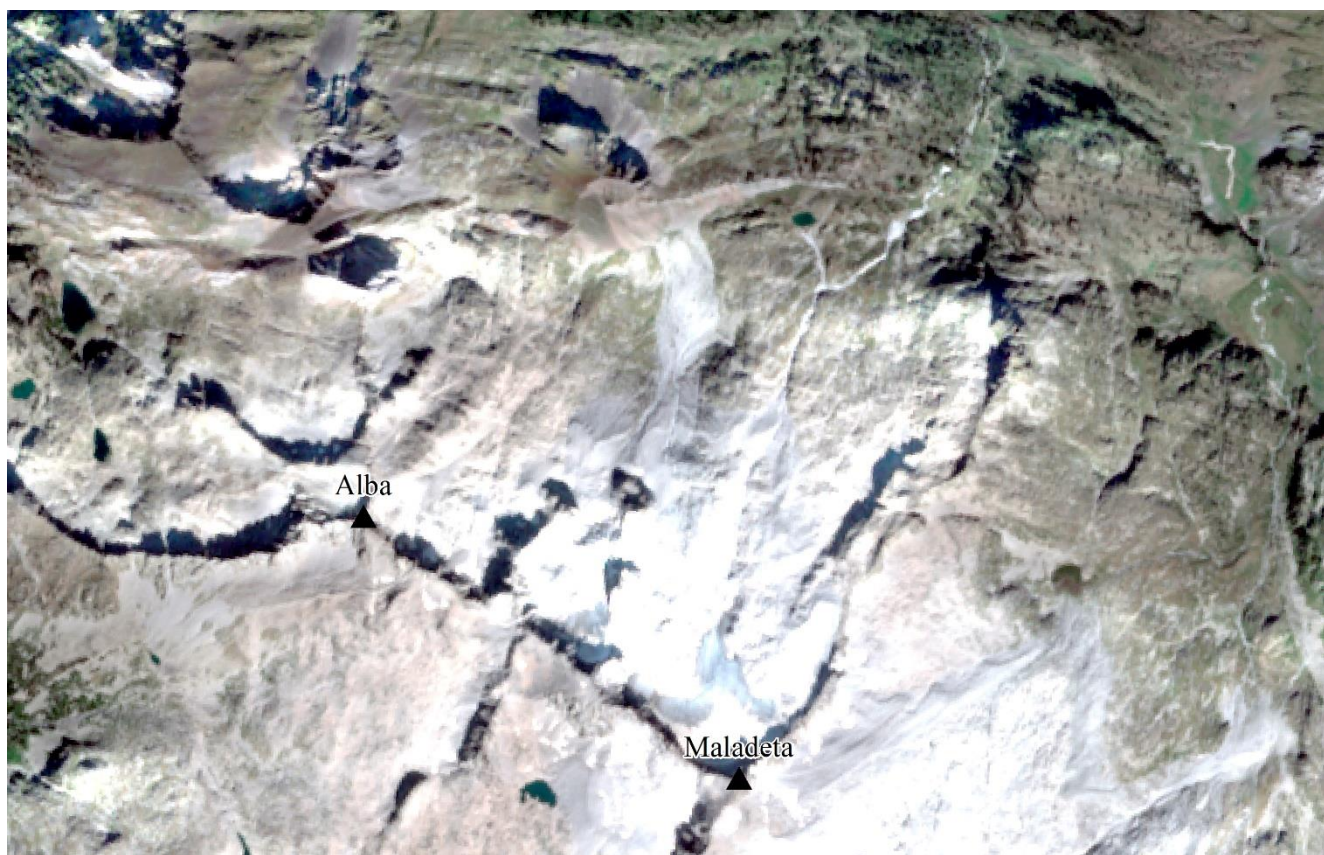


Figura 28. Imagen Sentinel 2B. Composición en falso color (bandas 4, 3, y 2). 23 de septiembre de 2018. Área de estudio de la Maladeta.

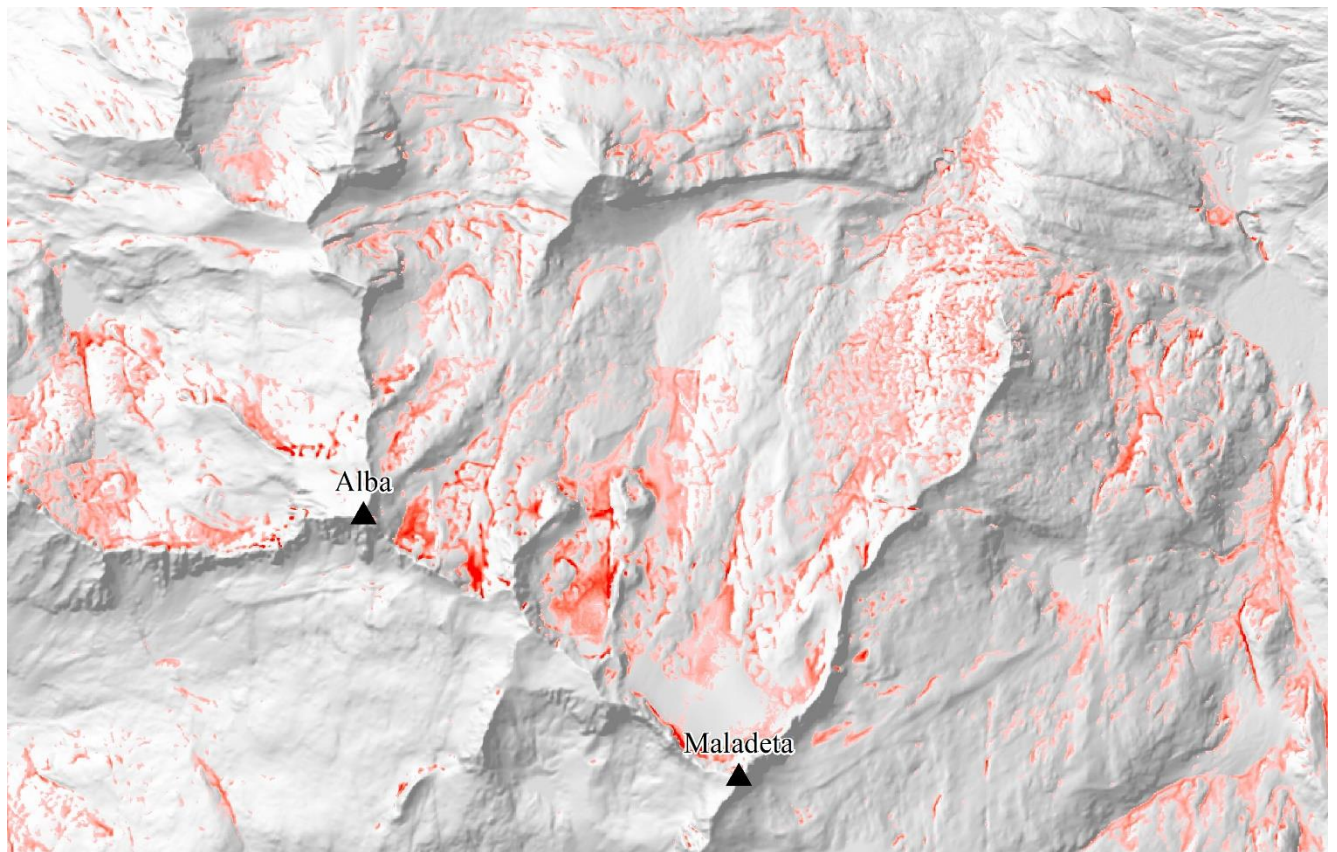


Figura 29. Zonas de permanencia de nieve. Resultado de la ejecución del modelo sobre un modelo de sombras del terreno. La intensidad del rojo aumenta con las probabilidades de permanencia de la nieve. Área de estudio del Maladeta.

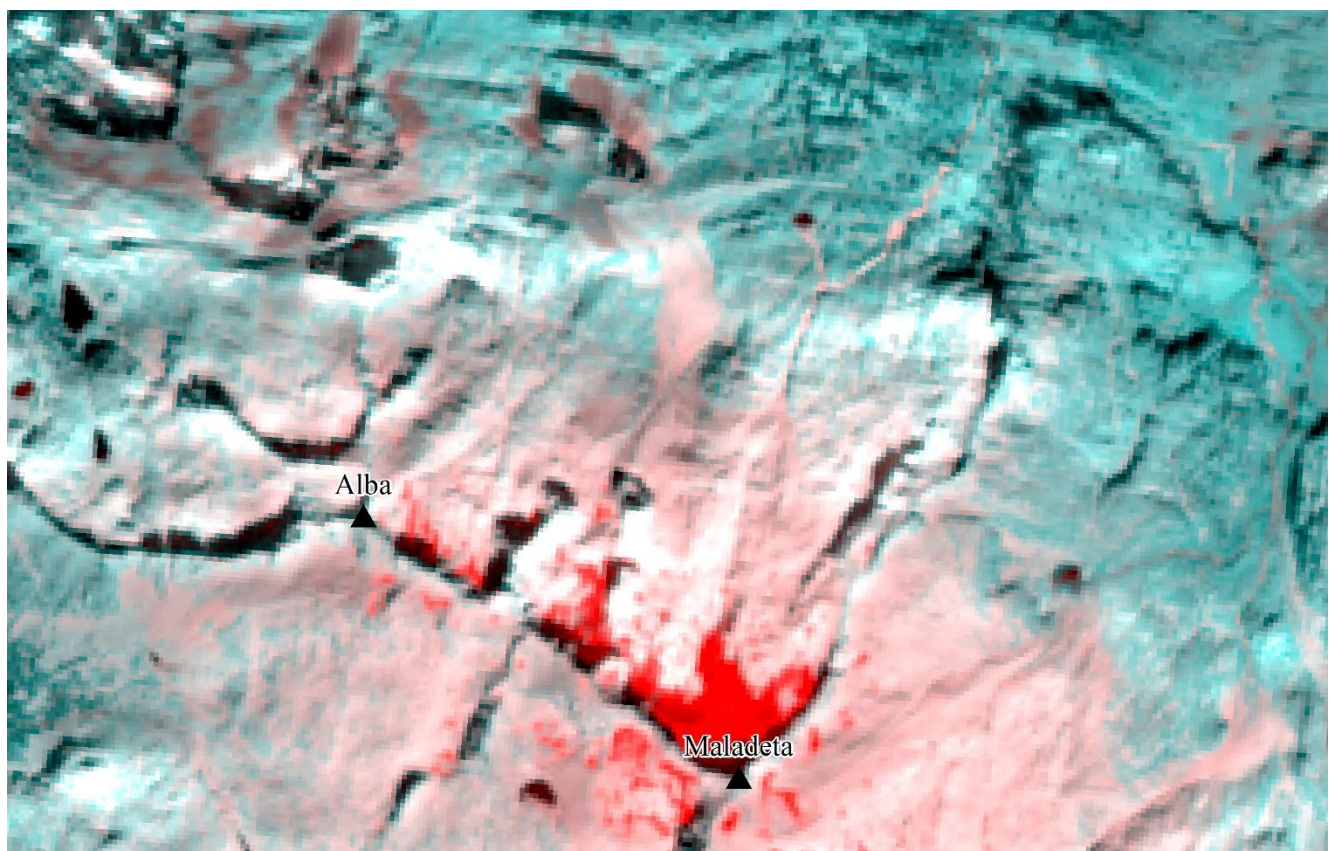


Figura 30. Imagen Sentinel 2B. Composición que discrimina la cubierta de nieve (bandas 3, y 11). 23 de septiembre de 2018. En rojo los lugares cubiertos de nieve y en verde los que no. Área de estudio del Maladeta.

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la ejecución del modelo se muestran como tres archivos en formato ráster que representan tres de las cuatro fases del proceso nival (acumulación, fusión y agotamiento). En ellos, cada píxel contiene un valor que hace referencia a la probabilidad con la que este participa en cada uno de los procesos.

Para demostrar la validez de los resultados obtenidos y con ello certificar la eficacia de la metodología y del modelo presentado, se ha llevado a cabo un análisis visual comparando estos resultados con la información que aportan las imágenes de satélite. Estas imágenes se corresponden con fechas concretas y representativas dentro de la fase del proceso nival para la que se quieren cotejar los datos.

Además, se han empleado dos periodos nivales distintos que, junto con las dos áreas de estudio sobre las que se ha trabajado, aportan más variedad de condiciones a las que se debe adaptar el modelo, lo que a su vez demuestra que la correlación entre los objetivos y el resultado no se debe al azar.

Por lo tanto, los resultados de la aplicación del modelo sobre el área de estudio del Posets se han validado con imágenes de satélite que representen cada una de las fases del periodo nival de 2017, mientras que los resultados obtenidos de la aplicación del modelo sobre el área de estudio de la Maladeta se han validado con imágenes de satélite del periodo nival de 2018. Todo ello contrastando la información que aporta una imagen en falso color con una resolución espacial de 10 metros y una imagen con una composición que emplea longitudes de onda del visible y del infrarrojo medio para discriminar las cubiertas de nieve, con una resolución de 20 metros.

Para el periodo nival de 2017, que se corresponde con el área de estudio del Posets, también se tienen datos de altura media de nieve en centímetros del día en que fue tomada la imagen, pero no para el de 2018 referente a la Maladeta ya que, en el verano del 2017 el telenivómetro de la Renclusa se vio afectado por una avenida de agua y piedras que inhabilitó el equipo. Pese a ello, el trabajo de campo se realizó el mismo día en el que se tomó la imagen con la que se han cotejado los resultados finales en este espacio.

Los resultados correspondientes a la modelización del proceso de acumulación, muestran la potencialidad de cada píxel para que se acumule nieve en él. Para el área del Posets se ha empleado una imagen tomada el día 6 de marzo de 2017, cuando la altura media de nieve en el telenivómetro de Eriste fue de 182 cm. Para el área de la Maladeta, se ha utilizado una imagen tomada el día 1 de marzo de 2018.

Los resultados están fuertemente correlacionados con lo que se plasma en las imágenes de satélite, diferenciándose claramente en qué lugares no se ha acumulado nieve. Pese a ello, se distingue un claro error ya que las láminas de agua muestran valores de acumulación de en torno al 40%. Esto se debe a que el MDT las presenta como superficies horizontales donde la acumulación es máxima, y aunque los factores de morfología y vegetación no se ponderen sobre estas cubiertas, la ponderación de la pendiente (40%) la adquieren en su totalidad.

Aparte de este error, también se plantea la dificultad de estimar cuanta cantidad de nieve se puede llegar a acumular en los píxeles cuyo valor de probabilidad es más alto, además del inconveniente de la representación, ya que se sabe en qué zonas hay menos posibilidades de que se acumule nieve, pero como todos los valores son mayores de cero, se desconoce a partir de qué valor la acumulación es de tal entidad como para que tenga que ser representada.

Los resultados correspondientes a la modelización del proceso de fusión, muestran las probabilidades de que la nieve que se haya acumulado en un píxel, se funda o perdure durante más o menos tiempo. Para el área del Posets se ha empleado una imagen tomada el día 5 de julio de 2017, cuando la altura media de nieve en el telenivómetro de Eriste fue de 15 cm. Para el área de la Maladeta, se ha utilizado una imagen tomada el día de 25 de junio de 2018.

Estos resultados, aunque bastante expresivos, guardan menos relación con la información que aportan las imágenes de satélite. Esto se debe a que, al no haberse vinculado aun con los datos de acumulación, se presentan como una estimación, que trabaja sobre zonas donde puede no haberse acumulado nieve.

Además, en las imágenes de satélite se puede apreciar como con el aumento de la altitud, reduce drásticamente la fusión, cosa que en los resultados obtenidos no se distingue ya que todavía no se ha ponderado el factor de la altitud. En este caso, los resultados obtenidos de modelizar el proceso de fusión se plantean únicamente como un medio para complementar al modelo de acumulación y así obtener las zonas de potencial permanencia de nieve.

Por último, los resultados de relacionar los procesos anteriores y el factor de la altitud muestran los píxeles donde hay mayor probabilidad de que una masa de nieve alargue su permanencia hasta la fase de agotamiento. Para el área del Posets se ha empleado una imagen tomada el día 13 de septiembre de 2017, cuando el telenivómetro de Eriste no registraba datos de nieve acumulada. Para el área de la Maladeta, se ha utilizado una imagen tomada el día de 23 de septiembre de 2018, coincidiendo con el día que se realizó el trabajo de campo.

Los resultados se muestran bastante precisos, aunque algo ambiguos ya que exponen la potencialidad que tiene un espacio para que la nieve que se haya acumulado en él perdure más tiempo de lo normal, pero esto no quiere decir que siempre vaya a haber nieve en ellos. Aquí entran en juego los factores extrínsecos, por lo que pueden darse importantes variaciones entre distintos periodos nivales.

Aun así, la fidelidad de los resultados es bastante alta y esto se puede apreciar en la figura 31, donde aparecen representados sobre el resultado final, los puntos tomados durante el trabajo de campo, correspondientes con las masas de nieve persistentes el 23 de septiembre de 2018, momento que se encontraba dentro de la fase de agotamiento.

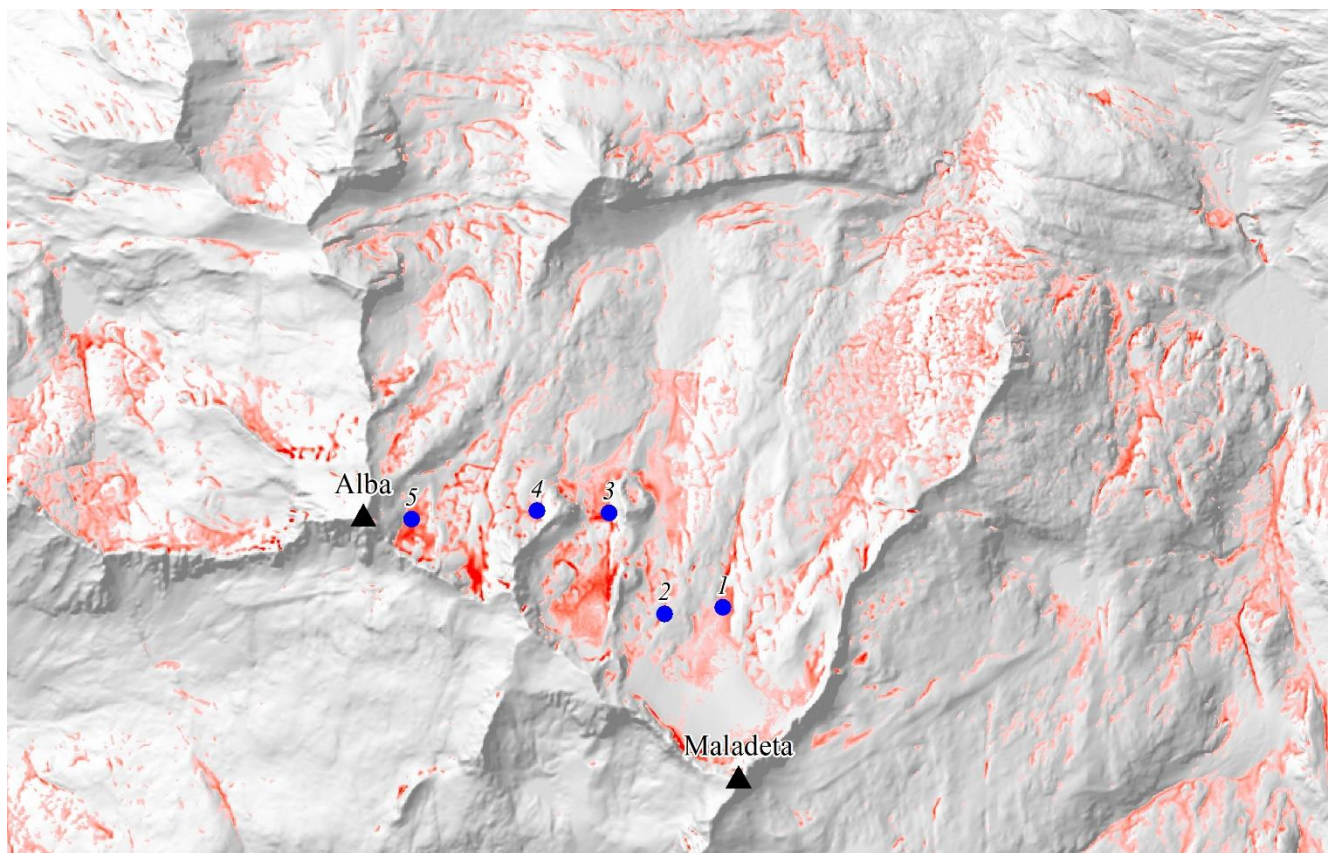


Figura 31. Neveros localizados en el área de estudio de la Maladeta durante el trabajo de campo.

Estos neveros han sido numerados del 1 al 5 y se ha incorporado una imagen de cada uno, a razón de que la figura 32 hace referencia al número 1, la figura 33 hace referencia al número 2, la figura 34 hace referencia al número 3, la figura número 35 hace referencia al número 4 y la figura 2 hace referencia al número 5



Figura 32. Imagen del nevero número 1, base del glaciar de la Maladeta. 23 de septiembre de 2018.
Elaboración propia.



Figura 33. Imagen del nevero número 2, lateral del glaciar de la Maladeta. 23 de septiembre de 2018.
Elaboración propia.



Figura 34. Imagen del nevero número 3. 23 de septiembre de 2018. Elaboración propia.



Figura 35. Imagen del nevero número 4. 23 de septiembre de 2018. Elaboración propia.

Por lo tanto, respecto al objetivo principal de determinar los lugares adscritos a ámbitos de alta montaña donde hay más probabilidades de que se acumule la nieve y ésta perdure durante un mayor periodo de tiempo se ha conseguido un resultado bastante satisfactorio, pese a que este se encuentra sujeto a posibles ajustes en fusión de la finalidad y la precisión que se le pretenda dar a los resultados.

Además, estos demuestran que se han identificado correctamente los factores que participan en los procesos de acumulación y fusión, que la metodología planteada es correcta y que el modelo e implementado en una herramienta es susceptible de ser aplicado sobre otros espacios de alta montaña.

Es por ello por lo que los resultados pueden ser útiles para todas aquellas aplicaciones que se enumeraron en el apartado 2. *Objetivos y aplicaciones*, aunque si la información que aporta este modelo se cruzase con la de los modelos matemáticos de cuantificación de nieve acumulada, el abanico de utilidades incrementa considerablemente.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, C. y Moreno, V. (1996): "Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica". *Revista de Teledetección* (7).
- BOE, n. (1985): *Ley 29/1985 de Aguas*. Madrid.
- Chetty, S. (1996): "The case study method for research in small- and médium - sized firms". *International Small Business Journal*, 5 (1), 73-85.
- Chorley, R. (1969): *Introduction to Physical Hydrology (Primera ed.)*. London: Methuen & co Ltd.
- Faci González, J. y Martínez Cob, A. (1991). *Cálculo de la evapotranspiración de referencia en Aragón*. Zaragoza, Diputación General de Aragón.
- García Ruiz, J. y Puigdefábregas Tomás, J. (1982): "Formas de erosión en el flysch eoceno surpirenaico". *Cuadernos de Investigación Geográfica*. VIII, 83-126.
- García Ruiz, J., Alvera, B., Del Barrio, G. y Puigdefábregas, J. (1990): "Geomorphic processes above timberline in the Spanish Pyrenees". *Mountain Research and Development*, Vol. 10, nº 3, 201-214.
- García Ruiz, J., Puigdefábregas Tomás, J. y Creus Novau, J. (1985): *Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón*. Huesca, Instituto de Estudios Altoaragoneses.
- García Ruiz, J., Puigdefábregas Tomás, J. y Creus Novau, J. (1986): "La acumulación de nieve en el pirineo central y su influencia hidrológica". *Pirineos*, nº 127, 27-72.
- González García, M. (2013): *La alta montaña periglaciaria en el Pirineo Central Español: procesos, formas y condiciones ambientales*. Málaga, Departamento de Geografía de la Universidad de Málaga.
- González García, M., Serrano Cañadas, E. y González Trueba, J. (2016): "Morfogénesis, morfodinámica y caracterización térmica de montículos de hielo en los Pirineos (macizos de Maladeta y Posets)". *Polígonos* (28), 73-93.
- González Trueba, J. y Serrano Cañadas, E. (2010): "La nieve en los Picos de Europa: implicaciones geomorfológicas y ambientales". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, nº 36 (2), 61-84.
- Gutiérrez Pérez, J., Pozo Llórente, T. y Fernández Cano, A. (2002): "Los estudios de caso en la lógica de la investigación interpretativa". *Arbor*, 533-557.
- Herrero Lantarón, J. (2007): *Modelo físico de acumulación y fusión de la nieve. Aplicación en Sierra Nevada (España)*. Granada: Universidad de Granada.
- Julián Andrés, A., Peña Monné, J., Chueca Cía, J., Zabala Martínez, J., Lapeña Laiglesia, A. y López Moreno, I. (2000): "Cartografía de zonas probables de aludes en el Pirineo Aragonés: metodología y resultados". *Boletín de la A.G.E.* nº 30, 119-134.
- Julián, A. y Chueca, J. (1999): "Cartografía de zonas probables de aludes en el valle de Ordesa (Pirineo Aragonés)". *Geographicalia*, 73-86.
- López Moreno, J. y García Ruiz, J. (2004): "Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees". *Hydrological Sciences Journal*, 49 (5), 787-802.
- López Moreno, J., Beguería Portugués, S. y García Ruiz, J. (2002): "El régimen del río Ésera, Pirineo Aragonés, y su tendencia reciente". *Boletín Glaciológico Aragonés*, 131-162.
- Martínez Carazo, P. (2006): "El método de estudio de caso: estrategia metodológica de la investigación científica". *Pensamiento & Gestión* (20), 165-193.
- Maza, J., Fornero, L. y Yañez, H. (1995). "Simulación matemática de la fusión nival y pronóstico de escurrimiento". *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines* (24), 651-659. Mendoza, Argentina.
- Montero Granados, R. (2016): *Modelos de regresión lineal múltiple. En Documentos de Trabajo en Economía Aplicada*. Granada, Universidad de Granada.
- Pereira, A. (2005): "Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather". *Agrometeorología*. Vol. 64, nº 2, 311-313.

- Revuelto Benedí, J., López Moreno, J., Morán Tejada, E., Fassnacht, S. y Vicente Serrano, S. (2012): “Variabilidad interanual del manto de nieve en el Pirineo: tendencias observadas y su relación con índices de teleconexión durante el periodo 1985-2011”. (págs. 613-621). Salamanca: Asociación Española de Climatología.
- Revuelto, J., López Moreno, J., Azorín Molina, C., Arguedas, G., Vicente Serrano, S. y Serreta, A. (2013): “Utilización de técnicas de láser escáner terrestre en la monitorización de procesos geomorfológicos dinámicos: el manto de nieve y heleros en áreas de montaña”. *Cuadernos de investigación geográfica*, nº 39(2), 335-357.
- Rico, I., Izaguirre, E., Serrano, E. y López Moreno, J. (2017): “Current glacier area in the Pyrenees: an updated assessment 2016”. *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, 172.
- Serrano Cañadas, E. y Martín Moreno, R. (2018): “Surge glaciers during the Little Ice Age in the Pyrenees”. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, nº 44 (1), 213-244.
- Yin, R. (1989): *Case study research: design and methods. Applied social research methods series (Segunda ed.)*. Newbury Park CA: Sage.

ANEXO I. FLUJO DE TRABAJO DEL MODELO DE GEOPROCESAMIENTO

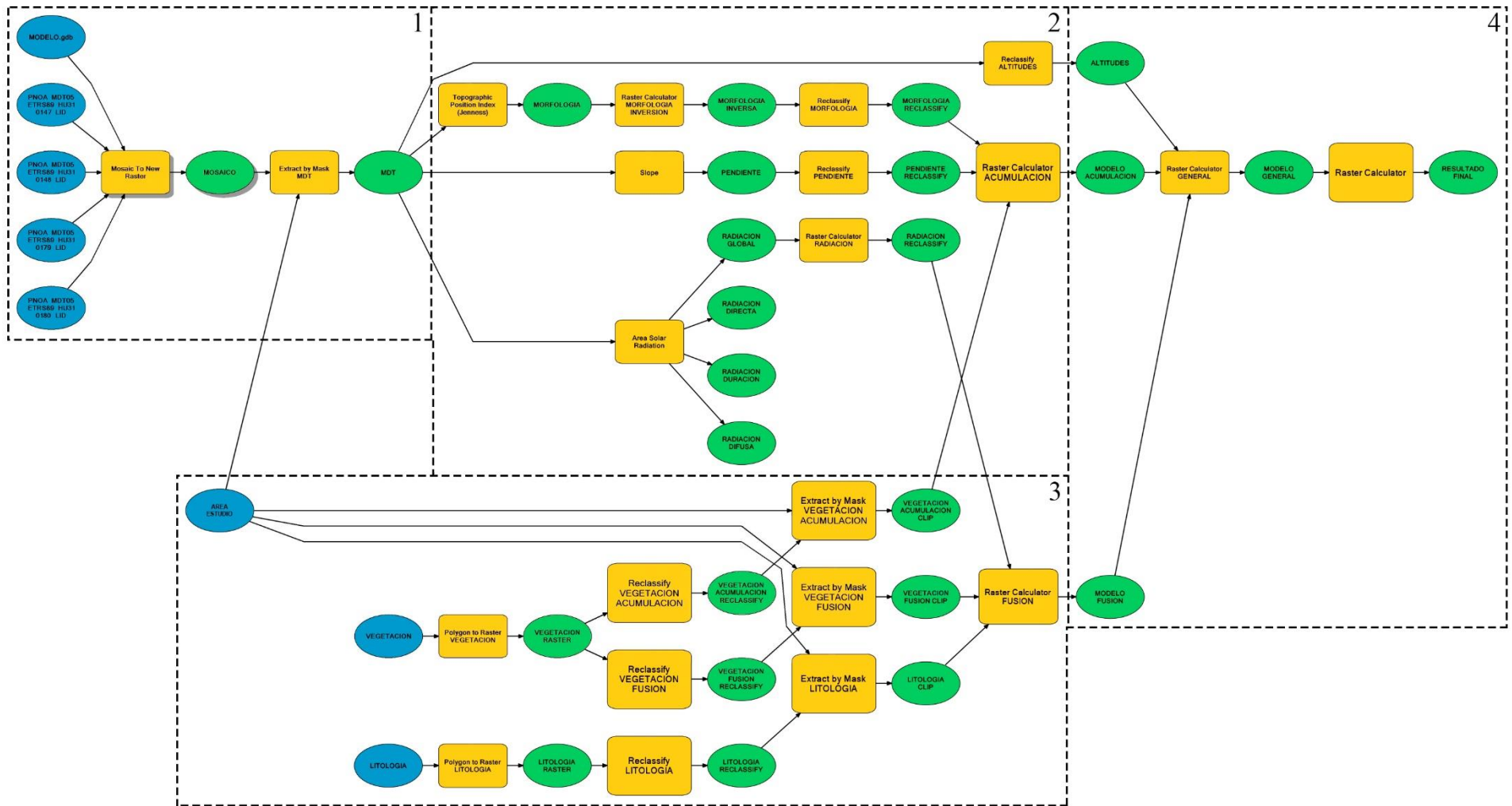


Figura 36. Diagrama de flujo de trabajo del modelo.

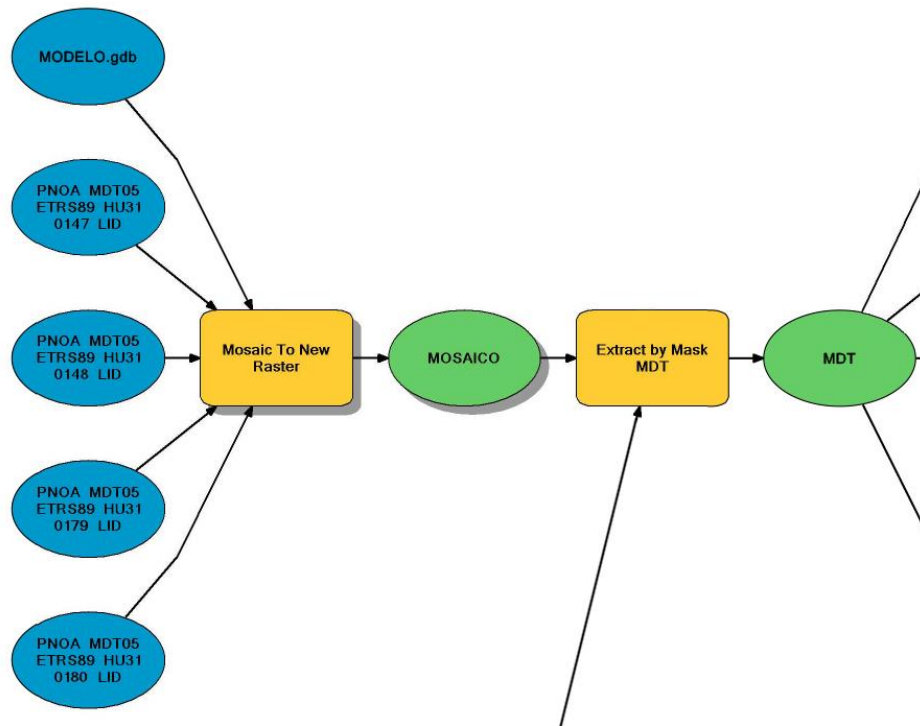


Figura 37. Ampliación del cuadrante 1 del diagrama de flujo de trabajo del modelo.

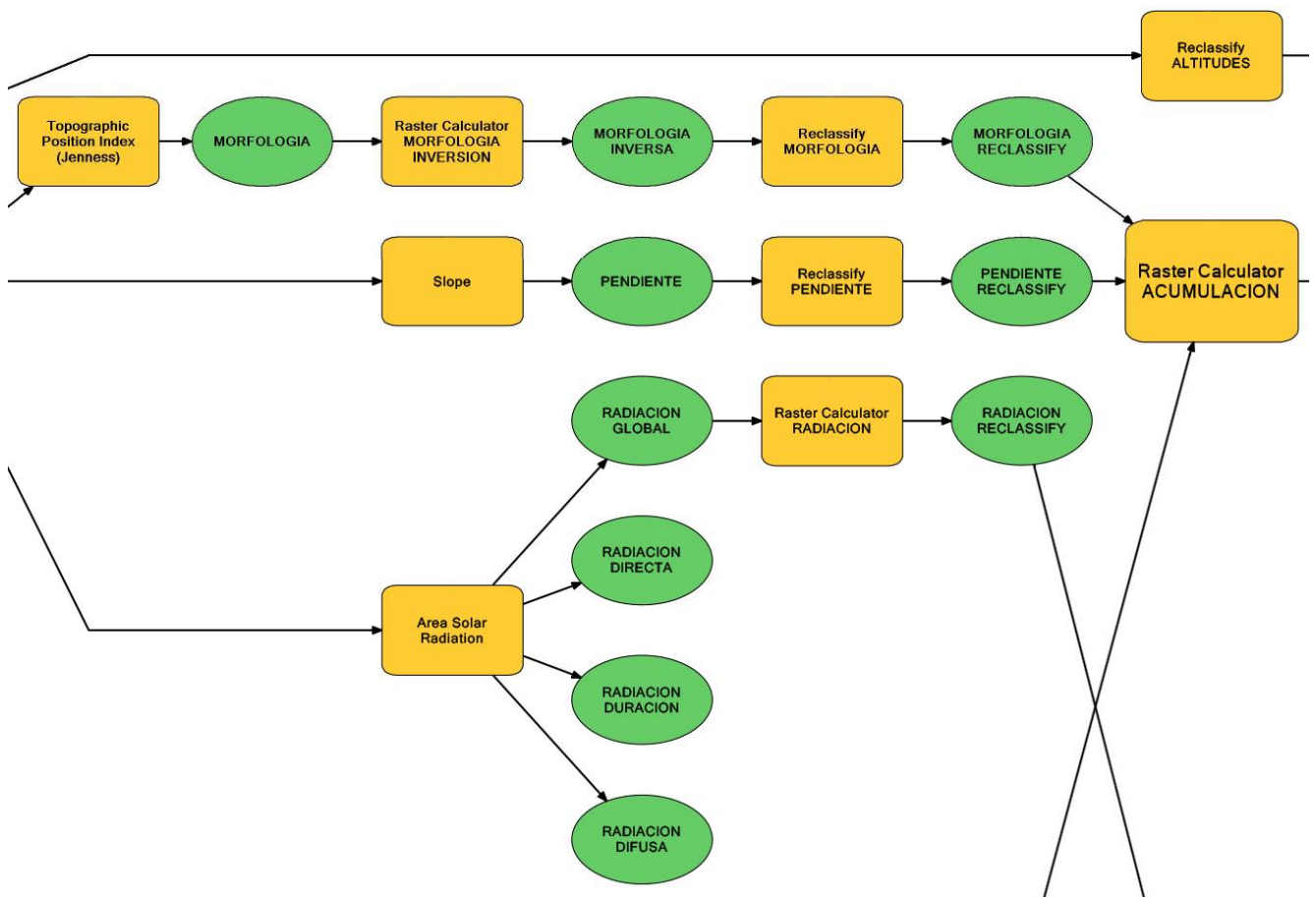


Figura 38. Ampliación del cuadrante 2 del diagrama de flujo de trabajo del modelo.

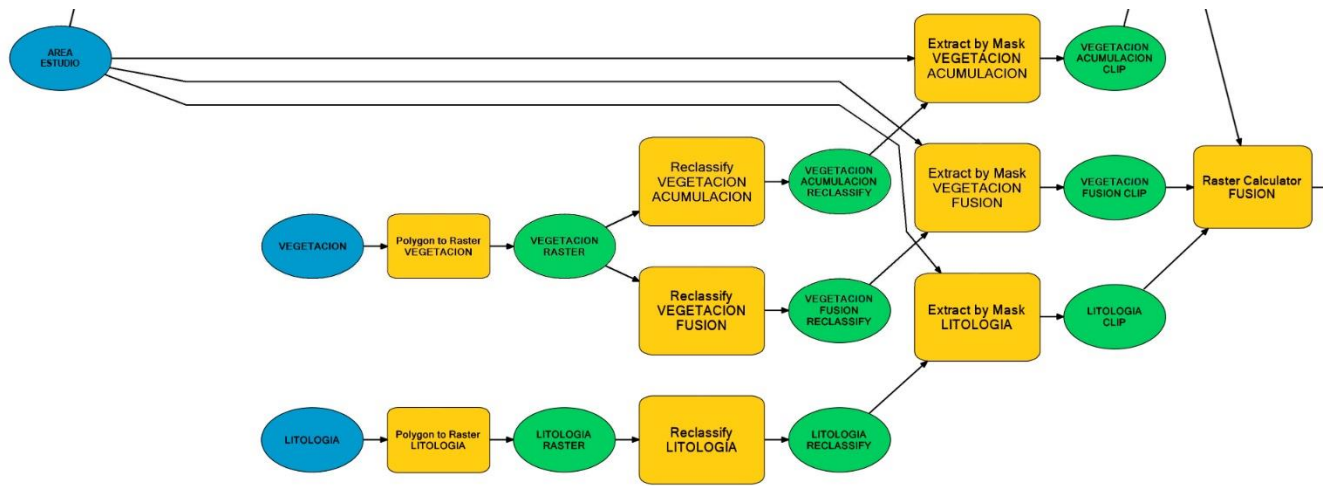


Figura 39. Ampliación del cuadrante 3 del diagrama de flujo de trabajo del modelo.

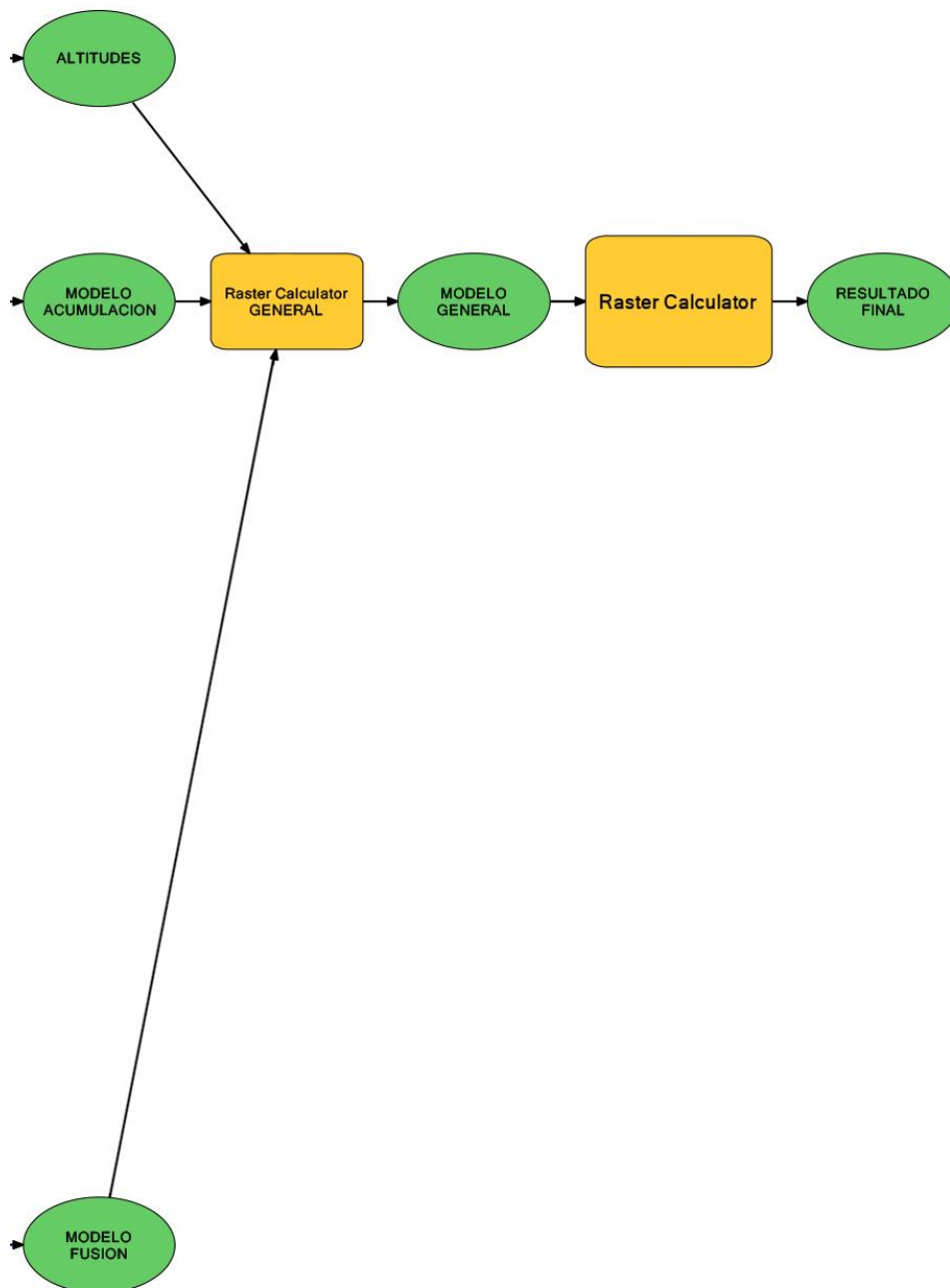


Figura 40. Ampliación del cuadrante 4 del diagrama de flujo de trabajo del modelo.

ANEXO II. TABLAS CON LOS VALORES DE PONDERACIÓN DE CADA FACTOR

GRADOS DE LA PENDIENTE	PROBABILIDAD DE ACUMULACIÓN	GRADOS DE LA PENDIENTE	PROBABILIDAD DE ACUMULACIÓN
0 °	100	46 °	28
1 °	100	47 °	26
2 °	100	48 °	24
3 °	100	49 °	22
4 °	100	50 °	20
5 °	100	51 °	19
6 °	100	52 °	17
7 °	100	53 °	16
8 °	100	54 °	14
9 °	100	55 °	13
10 °	100	56 °	11
11 °	100	57 °	10
12 °	99	58 °	9
13 °	99	59 °	8
14 °	99	60 °	8
15 °	99	61 °	7
16 °	98	62 °	6
17 °	98	63 °	5
18 °	98	64 °	5
19 °	98	65 °	4
20 °	97	66 °	3
21 °	96	67 °	2
22 °	95	68 °	2
23 °	94	69 °	1
24 °	93	70 °	0
25 °	93	71 °	0
26 °	92	72 °	0
27 °	91	73 °	0
28 °	90	74 °	0
29 °	86	75 °	0
30 °	83	76 °	0
31 °	79	77 °	0
32 °	76	78 °	0
33 °	72	79 °	0
34 °	69	80 °	0
35 °	65	81 °	0
36 °	62	82 °	0
37 °	58	83 °	0
38 °	55	84 °	0
39 °	51	85 °	0
40 °	48	86 °	0
41 °	44	87 °	0
42 °	41	88 °	0
43 °	37	89 °	0
44 °	34	90 °	0
45 °	30		

Tabla 1. Valores de probabilidad de acumulación de nieve en función de la pendiente del terreno en grados.
Elaboración propia.

LITOLOGÍA	VALUE	PROBABILIDAD DE FUSIÓN
Lutitas, areniscas, gravas, conglomerados y calizas margosas	1	64
Pizarras ampelíticas	2	68
Gravas, arenas, limos y arcillas	3	94
Cantos y bloques	4	100
Pizarras	5	66
Rocas intrusivas	6	7
Calizas, dolomias y pizarras	7	33
Liditas. Turbiditas, arenitas, pelitas y conglomerados poligénicos	9	60
Rocas metamórficas	10	58
Glaciar	11	3
Conglomerados, areniscas y lutitas	12	82
Arcillas versicolores y yesos	13	5
Calizas y dolomias	14	31
Margas, arcillas y yesos con intercalaciones de calizas	15	11
Calizas con lacazina	16	35
Conglomerados y areniscas	17	88
Margas con glauconita, arcillas y margocalizas. Puntualmente brechas	18	13
Gravas y arenas	19	98
Areniscas, lutitas y conglomerados	20	78
Turbiditas	21	74
Calizas, pelitas, arenitas y conglomerados en la base. Intercalaciones de tobas y lavas	22	49
Ofitas	23	90
Margas y margocalizas	24	17
Brechas	25	84
Dolomias, calizas, margas y calcarenitas	26	27
Lutitas y areniscas	27	62
Calizas con prealveolina y calizas con rudistas	28	43
Calizas bioclasticas con rudistas y orbitolinas. Calizas margosas	29	45
Margas y margocalizas con ammonites, a techo con lutitas y lignitos	30	15
Areniscas	31	80
Calizas con alveolinas	32	41
Margas y localmente brechas	33	25
Margas con intercalaciones de areniscas	34	19
Conglomerados, areniscas y arcillas	35	70
Dolomias	36	29
Calizas bioclasticas	37	47
Calizas bioclasticas y calizas micriticas con lignitos	38	51
Arenas	39	96
Calizas, calcarenitas, lignitos, calizas litogreficas y margas. Brecha carbonatada (limite a muro)	40	54
Calizas con nummulites, assilinas y alveolinas	41	37
Areniscas, conglomerados y margas	42	72
Calizas	43	39
Masas olistostromaticas	44	92
Intercalaciones de calizas lacustres y lignitos	45	53
Margas y areniscas	46	21
Areniscas con intercalaciones de conglomerados	47	86
Margas con niveles de areniscas. Brechas	48	23
Calizas travertínicas	49	56
Areniscas y lutitas	50	76
Yesos	51	9

Tabla 2. Valores de probabilidad de fusión de nieve en función de la litología del terreno.
Elaboración propia.

DEFINICION	VALUE	PROBABILIDAD DE ACUMULACIÓN	PROBABILIDAD DE FUSIÓN
Monte sin vegetación superior	1	100	100
Herbazal	2	75	75
Bosque arbolado	3	10	10
Bosque con arbolado ralo	4	30	30
Agua	5	0	100
Autopistas y autovías	6	0	100
Matorral	7	50	50
A.F.M. (Riberas)	8	40	40
Agrícola y prados artificiales	9	30	30
Monte de bosque con arbolado de plantación	10	10	10
Artificial	11	0	100
Bosque con arbolado disperso	12	20	20
Prado con sebes	13	60	60
Infraestructuras de conducción	14	0	100
Laguna de alta montaña	15	0	100
T. D. (Fenómenos naturales)	16	80	80
Humedal	17	0	100
A.F.M. (Bosquetes). Monte arbolado	18	10	10
Mínería, escombreras y vertederos	19	0	100
Pastizal-Matorral	20	55	55
Prado	21	70	70
A.F.M. (Bosquetes). Monte con arbolado ralo	22	30	30
Mosaico desarbolado sobre cultivo	23	25	25
T. D. (Talas)	24	65	65
Monte de bosque con arbolado ralo de plantación	25	30	30
Mosaico de monte arbolado sobre cultivo	26	15	15
Mosaico arbolado sobre cultivo	27	15	15
Cultivo con arbolado disperso	28	17	17
A.F.M. (Bosquetes). Monte con arbolado disperso	29	20	20
Complementos de bosque arbolado	30	10	10
Monte de bosque con arbolado disperso de plantación	31	20	20
Mosaico arbolado sobre forestal desarbolado	32	35	35
T. D. (Incendio)	33	85	85
Complementos de bosque con arbolado ralo	34	30	30

Tabla 3. Valores de probabilidad de acumulación y fusión de nieve en función de las características de la cubierta vegetal. Elaboración propia.

ALTITUD	PROBABILIDAD DE PERMANENCIA
0 - 2.000	0
2.000 - 2.800	100
2.800 - 3.404	200

Tabla 4. Valores de probabilidad de permanencia de masas de nieve en función de la altitud. Elaboración propia.

ANEXO III. DATOS EMPLEADOS EN LA VALIDACIÓN

ESPESOR DE NIEVE EN EL TELENIVÓMETRO DE LA RENCLUSA (cm)														
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media	Máxima
2009	144,4	214,6	221,9	227,7	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	23,8	70,3	90,3	259,8
2010	120,3	149,1	158,1	132,9	81,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,3	62,3	61,8	182,2
2011	79,5	99,8	157,0	65,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	22,7	36,0	185
2012	54,4	85,6	106,7	115,8	48,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	40,0	37,9	164
2013	106,1	213,6	214,7	191,4	130,3	48,6	0,0	0,0	0,0	0,0	26,9	65,1	83,1	238
2014	118,9	178,5	208,9	162,6	48,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6	60,0	65,8	238,8
2015	96,9	174,0	216,9	152,3	34,8	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	14,0	48,7	61,5	262,8
2016	70,0	99,3	136,0	138,2	55,6	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	14,5	46,3	46,7	177,3
2017	118,5	180,6	176,6	129,8	27,6	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-	-	63,3	208,5
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Media	101,0	155,0	177,4	146,2	53,3	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	51,9	60,7	
Minima	36,0	67,6	83,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0		
Máxima	192,8	262,8	250,7	256,9	182,3	139,2	2,1	1,1	3,4	7,9	85,4	119,2		

Tabla 5. Datos medios mensuales del periodo entre enero de 2009 y junio de 2018, del telenivómetro de la Renclusa. Elaboración propia.

ESPESOR DE NIEVE EN EL TELENIVÓMETRO DE ERISTE (cm)														
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media	Máxima
2009	155,5	203,5	179,7	195,6	107,4	11,6	17,5	6,6	4,6	24,4	25,4	101,7	84,7	265,0
2010	145,7	161,6	220,3	207,0	139,5	14,6	38,0	39,7	4,4	12,2	31,4	82,5	92,2	259,0
2011	137,2	164,3	204,7	121,4	62,8	7,8	15,9	-	2,3	17,9	25,1	36,3	57,0	190,0
2012	49,9	27,5	33,0	54,6	35,9	3,3	4,2	3,8	3,9	3,7	19,7	56,5	24,7	164,0
2013	119,2	123,5	139,6	148,7	109,0	41,0	9,8	8,8	7,5	8,9	24,3	88,7	66,8	185,0
2014	142,2	219,1	240,2	185,5	88,3	13,3	13,0	-	-	1,2	26,4	69,7	99,9	292,0
2015	78,4	99,8	119,3	79,9	6,1	8,7	11,7	1,6	1,7	1,3	33,0	58,6	39,9	172,0
2016	70,6	106,5	134,9	169,3	106,3	11,9	8,9	2,3	0,6	5,7	17,6	106,2	60,8	207,0
2017	104,2	199,7	198,7	143,8	64,0	9,8	4,1	3,3	9,9	-	1,7	49,1	65,7	236,0
2018	119,0	139,8	232,9	257,6	167,6	35,5	-	-	-	-	-	-	-	316,0
Media	112,2	144,5	170,3	156,3	88,7	15,7	13,7	9,4	4,4	9,4	22,7	72,1	65,7	
Minima	14,0	0,0	0,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Máxima	216,0	265,0	292,0	316,0	244,0	92,0	81,0	163,0	127,0	164,0	163,0	164,0		

Tabla 6. Datos medios mensuales del periodo entre enero de 2009 y junio de 2018, del telenivómetro de Eriste. Elaboración propia.

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Año
Precipitación media (mm)	78,5	90,8	50,1	56,4	63,5	77,1	102,0	84,4	91,0	69,7	60,5	51,9	876,0
Temperatura media	11,0	5,4	1,9	1,9	2,3	6,0	9,3	12,3	16,1	18,7	18,6	14,6	9,8
ETP (mm)	48,7	19,4	6,0	6,0	7,8	27,0	47,7	73,2	99,0	118,0	108,6	72,8	634,2
P-ETP	29,8	71,4	44,1	50,4	55,7	50,1	54,3	11,3	-8,0	-48,3	-48,1	-20,9	241,8
Caudal medio (m ³ /s)	1,2	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	1,6	2,8	5,1	0,8	0,5	0,9	1,3
Caudal específico (l/s/km ²)	3,8	2,3	1,6	1,5	1,5	1,5	5,0	8,7	15,8	2,6	1,6	2,8	4,1
Índice de escorrentía mm/(km ² · año)	121,3	71,6	49,9	48,1	47,1	48,6	159,3	273,5	499,6	82,3	50,0	87,1	128,2
Coefficiente de escorrentía	1,5	0,8	1,0	0,9	0,7	0,6	1,6	3,2	5,5	1,2	0,8	1,7	1,8
Coefficiente relativo de escorrentía	0,9	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3	0,9	1,8	3,1	0,7	0,5	0,9	1,0
Déficit de escorrentía (mm)	-42,9	19,2	0,2	8,3	16,4	28,5	-57,3	-189,0	-408,7	-12,5	10,5	-35,2	747,8
Coefficiente de caudal	0,9	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	1,2	2,1	3,9	0,6	0,4	0,7	1,0
Altura media de nieve en la Renclusa (cm)	101,0	155,0	177,4	146,2	53,3	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	51,9	59,1
Altura media de nieve en Eriste (cm)	9,4	22,7	72,1	112,2	144,5	170,3	156,3	88,7	15,7	13,7	9,4	4,4	68,3

Tabla 7. Datos medios mensuales del periodo entre julio de 2008 y junio de 2018, con los que se ha elaborado el balance hídrico. Elaboración propia.

ANEXO IV. SCRIPT DE PYTHON

```
# MODELO.py
# -----
# Creado en febrero de 2018
#
# Description:
# Herramienta que automatice el proceso que determinar los lugares,
# adscritos a ámbitos de alta montaña, donde hay más probabilidades
# de que se acumule la nieve y ésta perdure durante más tiempo.
# -----
# BASES DE DATOS
#
# IMPORT ARCPY MODULE
import arcpy

# HERRAMIENTAS EXTERNAS
arcpy.ImportToolbox("C:/Users/IVAN/Documents/ArcGIS/Topography Tools 10_3.tbx")

# BASES DE DATOS INICIALES
MODELO_gdb = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb"
PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0147_LID = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0147_LID"
PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0148_LID = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0148_LID"
PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0179_LID = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0179_LID"
PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0180_LID = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0180_LID"
AREA_ESTUDIO = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\BASES\\AREA_ESTUDIO"
VEGETACION = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\BASES\\VEGETACION"
LITOLOGIA = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\BASES\\LITOLOGÍA"

# BASES DE DATOS GENERADAS
MOSAICO = PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0180_LID
MDT = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\MDT"
ALTITUDES = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\ALTITUDES"
MORFOLOGIA = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\MORFOLOGIA"
MORFOLOGIA_INVERSA = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\MORFOLOGIA_INVERS"
MORFOLOGIA_RECLASSIFY = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\MORFOLOGIA_REC"
PENDIENTE = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PENDIENTE"
PENDIENTE_RECLASSIFY = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PENDIENTE_REC"
RADIACION_GLOBAL = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\RADIACION_GLOBAL"
RADIACION_RECLASSIFY = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\RADIACION_REC"
VEGETA_RASTER = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\VEGETACION_RAS"
VEGETA_ACUMULA_RECLASSIFY = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\VEGETACION_ACUMULACION_REC"
VEGETA_ACUMULA_CLIP = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\VEGETACION_ACUMULACION_CLIP"
VEGETA_FUSION_RECLASSIFY = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\VEGETACION_FUSION_REC"
VEGETA_FUSION_CLIP = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\VEGETACION_FUSION_CLIP"
LITOLOGIA_RASTER = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\LITOLOGIA_RAS"
LITOLOGIA_RECLASSIFY = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\LITOLOGIA_REC"
LITOLOGIA_CLIP = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\LITOLOGIA_CLIP"

# BASES DE DATOS GENERADAS Y NO USADAS
RADIACION_DIRECTA = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\RADIACION_DIRECTA"
RADIACION_DIFUSA = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\RADIACION_DIFUSA"
RADIACION_DURACION = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\RADIACION_DURACION"

# RESULTADOS
MODELO_ACUMULACION = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\MODELO_ACUMULACION"
MODELO_FUSION = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\MODELO_FUSION"
MODELO_GENERAL = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\MODELO_GENERAL"
RESULTADO_FINAL = "D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\RESULTADO_FINAL"
# -----
# PROCESO

# 1. Mosaic To New Raster
arcpy.MosaicToNewRaster_management
("D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0147_LID",
"D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0148_LID;
"D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0179_LID;
("D:\\MODELIZACIÓN_NIEVE\\MODELO.gdb\\PNOA_MDT05_ETRS89_HU31_0180_LID;
MODELO_gdb, "MOSAICO",
"PROJCS['ETRS_1989_UTM_Zone_31N',
"GEOGCS['GCS_ETRS_1989',
"DATUM['D_ETRS_1989',SPHEROID['GRS_1980',6378137.0,298.257222101]],
"PRIMEM['Greenwich',0.0],
"UNIT['Degree',0.0174532925199433]],
"PROJECTION['Transverse_Mercator'],
```



```

"PARAMETER['False_Easting',500000.0],
"PARAMETER['False_Northing',0.0],
"PARAMETER['Central_Meridian',3.0],
"PARAMETER['Scale_Factor',0.9996],
"PARAMETER['Latitude_Of_Origin',0.0],
"UNIT['Meter',1.0]]", "32_BIT_FLOAT", "5", "1", "LAST", "FIRST")

# 2. Extract by Mask MDT
arcpy.gp.ExtractByMask_sa
(MOSAICO, MALADETA, MDT)

# 3. Area Solar Radiation
arcpy.gp.AreaSolarRadiation_sa
(MDT, RADIACION_GLOBAL, "42,6594691126642", "200",
"WholeYear 2017", "14", "0,5", "NOINTERVAL", "1",
"FROM_DEM", "32", "8", "8", "UNIFORM_SKY", "0,3", "0,5",
RADIACION_DIRECTA, RADIACION_DIFUSA, RADIACION_DURACION)

# 4. Slope
arcpy.gp.Slope_sa
(MDT, PENDIENTE, "DEGREE", "1")

# 5. Reclassify PENDIENTE
arcpy.gp.Reclassify_sa
(PENDIENTE, "VALUE",
"0 11 100;
"11 15 99;
"15 19 98;
"19 20 97;
"20 21 96;
"21 22 95;
"22 23 94;
"23 25 93;
"25 26 92;
"26 27 91;
"27 28 90;
"28 29 86;
"29 30 83;
"30 31 79;
"31 32 76;
"32 33 72;
"33 34 69;
"34 35 65;
"35 36 62;
"36 37 58;
"37 38 55;
"38 39 51;
"39 40 48;
"40 41 44;
"41 42 41;
"42 43 37;
"43 44 34;
"44 45 30;
"45 46 28;
"46 47 26;
"47 48 24;
"48 49 22;
"49 50 20;
"50 51 19;
"51 52 17;
"52 53 16;
"53 54 14;
"54 55 13;
"55 56 11;
"56 57 10;
"57 58 9;
"58 60 8;
"60 61 7;
"61 62 6;
"62 64 5;

```

```

        "64 65 4;
        "65 66 3;
        "66 68 2;
        "68 70 1;
        "70 90 0;
        "NODATA 0",
    PENDIENTE_RECLASSIFY, "DATA")

# 6. Topographic Position Index (Jenness)
arcpy.gp.toolbox = "C:/Users/IVAN/Documents/ArcGIS/Topography Tools 10_3.tbx";
arcpy.gp.JennessTPI2
    (MDT, "Circle 4 CELL", MORFOLOGIA)

# 7. Raster Calculator MORFOLOGIA INVERSION
arcpy.gp.RasterCalculator_sa
    ("(\%MORFOLOGIA%\ " * ( - 1)) * 5", MORFOLOGIA_INVERSA)

# 8. Reclassify MORFOLOGIA
arcpy.gp.Reclassify_sa
    (MORFOLOGIA_INVERSA, "VALUE",
        "-999999 0 0;
        "0 1 3;
        "1 2 6;
        "2 3 8;
        "3 4 10;
        "4 5 12;
        "5 6 14;
        "6 7 16;
        "7 8 18;
        "8 9 20;
        "9 10 22;
        "10 11 24;
        "11 12 26;
        "12 13 28;
        "13 14 30;
        "14 15 32;
        "15 16 34;
        "16 17 36;
        "17 18 38;
        "18 19 40;
        "19 20 41;
        "20 21 42;
        "21 22 43;
        "22 23 44;
        "23 24 45;
        "24 25 46;
        "25 26 47;
        "26 27 48;
        "27 28 49;
        "28 29 50;
        "29 30 51;
        "30 31 52;
        "31 32 53;
        "32 33 54;
        "33 34 55;
        "34 35 56;
        "35 36 57;
        "36 37 58;
        "37 38 59;
        "38 39 60;
        "39 41 61;
        "41 42 62;
        "42 44 63;
        "44 45 64;
        "45 47 65;
        "47 48 66;
        "48 50 67;
        "50 51 68;
        "51 53 69;
        "53 54 70;

```

```

"54 56 71;
"56 57 72;
"57 59 73;
"59 60 74;
"60 62 75;
"62 63 76;
"63 65 77;
"65 66 78;
"66 68 79;
"68 69 80;
"69 71 81;
"71 72 82;
"72 74 83;
"74 75 84;
"75 77 85;
"77 79 86;
"79 80 87;
"80 82 88;
"82 83 89;
"83 85 90;
"85 86 91;
"86 88 92;
"88 89 93;
"89 91 94;
"91 93 95;
"93 94 96;
"94 96 97;
"96 97 98;
"97 99 99;
"99 100 100;
"NODATA 0",
MORFOLOGIA_RECLASSIFY, "DATA")

# 9. Polygon to Raster VEGETACION
arcpy.PolygonToRaster_conversion
(VEGETACION, "DEFINICION", VEGETA_RASTER, "MAXIMUM_COMBINED_AREA", "POLIGON", "5")

# 10. Reclassify VEGETACION ACUMULACION
arcpy.gp.Reclassify_sa
(VEGETA_RASTER, "VALUE",
"1 100;
"2 75;
"3 10;
"4 30;
"5 0;
"6 0;
"7 50;
"8 40;
"9 30;
"10 10;
"11 0;
"12 20;
"13 60;
"14 0;
"15 0;
"16 80;
"17 0;
"18 10;
"19 0;
"20 55;
"21 70;
"22 30;
"23 25;
"24 65;
"25 30;
"26 15;
"27 15;
"28 17;
"29 20;

```

```

"30 10;
"31 20;
"32 35;
"33 85;
"34 30;
"NODATA 0",
VEGETA_ACUMULA_RECLASSIFY, "DATA")

# 11. Extract by Mask VEGETACION ACUMULACION
arcpy.gp.ExtractByMask_sa
(VEGETA_ACUMULA_RECLASSIFY, MALADETA, VEGETA_ACUMULA_CLIP)

# 12. Raster Calculator ACUMULACION
arcpy.gp.RasterCalculator_sa
("(\%PENDIENTE RECLASSIFY%\ * 0.4) + (\%MORFOLOGIA RECLASSIFY%\ * 0.4) +
"(\%VEGETA ACUMULA_CLIP%\ * 0.2)", MODELO_ACUMULACION)

# 13. Polygon to Raster LITOLOGIA
arcpy.PolygonToRaster_conversion
(LITOLOGIA, "litologia", LITOLOGIA_RASTER, "MAXIMUM_COMBINED_AREA", "ID", "5")

# 14. Reclassify LITOLOGIA
arcpy.gp.Reclassify_sa
(LITOLOGIA_RASTER, "VALUE",
"1 64;
"2 68;
"3 94;
"4 100;
"5 66;
"6 7;
"7 33;
"8 100;
"9 60;
"10 58;
"11 3;
"12 82;
"13 5;
"14 31;
"15 11;
"16 35;
"17 88;
"18 13;
"19 98;
"20 78;
"21 74;
"22 49;
"23 90;
"24 17;
"25 84;
"26 27;
"27 62;
"28 43;
"29 45;
"30 15;
"31 80;
"32 41;
"33 25;
"34 19;
"35 70;
"36 29;
"37 47;
"38 51;
"39 96;
"40 54;
"41 37;
"42 72;
"43 39;
"44 92;
"45 53;

```

```

        "46 21;
        "47 89;
        "48 23;
        "49 59;
        "50 76;
        "NODATA 9",
LITOLOGIA_RECLASSIFY, "DATA")

# 15. Extract by Mask LITOLOGIA
arcpy.gp.ExtractByMask_sa
(LITOLOGIA_RECLASSIFY, MALADETA, LITOLOGIA_CLIP)

# 16. Reclassify VEGETACION FUSION
arcpy.gp.Reclassify_sa
(VEGETA_RASTER, "VALUE",
    "1 100;
    "2 75;
    "3 10;
    "4 30;
    "5 100;
    "6 100;
    "7 50;
    "8 40;
    "9 30;
    "10 10;
    "11 100;
    "12 20;
    "13 60;
    "14 100;
    "15 100;
    "16 80;
    "17 100;
    "18 10;
    "19 100;
    "20 55;
    "21 70;
    "22 30;
    "23 25;
    "24 65;
    "25 30;
    "26 15;
    "27 15;
    "28 17;
    "29 20;
    "30 10;
    "31 20;
    "32 35;
    "33 85;
    "34 30;
    "NODATA 100",
VEGETA_FUSION_RECLASSIFY, "DATA")

# 17. Extract by Mask VEGETACION FUSION
arcpy.gp.ExtractByMask_sa
(VEGETA_FUSION_RECLASSIFY, MALADETA, VEGETA_FUSION_CLIP)

# 18. Raster Calculator RADIACION
arcpy.gp.RasterCalculator_sa
("(\%RADIACION GLOBAL%\ * 0.0001)/1.88", RADIACION_RECLASSIFY)

# 19. Raster Calculator FUSION
arcpy.gp.RasterCalculator_sa
("(\%LITOLOGIA CLIP%\ * 0.1) + (\%VEGETA FUSION CLIP%\ * 0.1) +
    (\%RADIACION RECLASSIFY%\ * 0.8)", MODELO_FUSION)

# 20. Reclassify ALTITUDES
arcpy.gp.Reclassify_sa
(MDT, "VALUE", "-99999 2000 0;2000 2800 1;2800 3405 2", ALTITUDES, "DATA")

```

```
# 21. Raster Calculator GENERAL
arcpy.gp.RasterCalculator_sa
    ("(\%MODELO ACUMULACION%\" - \"%MODELO FUSION%\")*\"%ALTITUDES%\"", MODELO_GENERAL)

# 22. Raster Calculator
arcpy.gp.RasterCalculator_sa
    ("Con((\"%MODELO GENERAL%\" > 0),\"%MODELO GENERAL%\"", RESULTADO_FINAL)
```

Nota: aunque los comandos no se han modificado, se han introducido saltos de línea y comillas para ajustarlo al formato del documento y que se pudiese visualizar.