



FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE LA PRESENCIA DE MICROPLÁSTICOS EN
LAS CUMBRES DEL PARQUE NACIONAL DE LA
SIERRA DE GUADARRAMA**

Autor: Pedro Gutiérrez Gely

Tutor/es: María Sandín Vázquez, Roberto Rosal García y Carlos Edo Cuesta.

2020



FACULTAD DE CIENCIAS

-

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE LA PRESENCIA DE MICROPLÁSTICOS EN LAS CUMBRES
DEL PARQUE NACIONAL DE LA SIERRA DE GUADARRAMA**

Tribunal de calificación:

Presidente: _____

Vocal 1º: _____

Vocal 2º: _____

Calificación: _____

Fecha: _____

2020

INFORME PARA LA DEFENSA PÚBLICA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

D/D^a _____, profesor/es
del Departamento/s de _____ de la
UAH, como tutor/res del Trabajo de Fin de Grado en

_____ de D/D^a _____
titulado _____

(*) Realizado en _____

(*) Dirigido por D/D^a _____

INFORMA:

- FAVORABLE
- NO FAVORABLE

Alcalá de Henares de de 20....

Firma del tutor

Firma del cotutor

Fdo.: _____

Fdo.: _____

INDICE

GLOSARIO DE ABREVIATURAS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.1. ÁREA DE ESTUDIO	10
2.2. MUESTREO	13
PREPARACIÓN DE MATERIALES PARA EL MUESTREO	13
TOMA DE MUESTRAS.....	14
2.3. PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS	14
SEPARACIÓN POR DENSIDADES.....	15
DIGESTIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.....	15
FILTRADO	16
VISUALIZACIÓN.....	17
2.4. ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (MICRO-FTIR) .	18
3. RESULTADOS	19
3.1. ABUNDANCIA Y MORFOLOGÍA DE LAS MICROPARTÍCULAS.....	20
3.2. IDENTIFICACIÓN DE MP POR FTIR	22
4. DISCUSIÓN	24
5. CONCLUSIONES	28
6. AGRADECIMIENTOS	29
7. BIBLIOGRAFÍA	29
ANEXOS	33
ANEXO 1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS ESPECTROS DE INFRARROJO OBTENIDOS	33
ANEXO 2. ASPECTO VISUAL DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS	35
ANEXO 3. PORCENTAJE DE LAS PARTÍCULAS ENCONTRADAS EN CADA PUNTOS DE MUESTREO ATENDIENDO A SU NATURALEZA	36
ANEXO 4. TIPOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS POR CADA PUNTO DE MUESTREO	37
ANEXO 5. DISTRIBUCIÓN Y NATURALEZA DE LOS MATERIALES ENCONTRADOS EN CADA PUNTO DE MUESTREO	38
ANEXO 6. BIBLIOGRAFÍA ACTUAL CON DATOS SOBRE LA PRESENCIA DE MP EN AMBIENTES ALPINOS.	40

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

- MP: Microplástico/s.
- PNSG: Parque nacional de la sierra de Guadarrama.
- m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar.
- NO-SE: siglas que marcan la dirección y sentido del viento, proveniente del Noroeste y hacia el Sureste.
- Polímeros:
 - PVC: Cloruro de polivinilo.
 - PES: Poliéster
 - PU: Poliuretano
 - ACR: Acrílico
 - PMMA: Metacrilato
 - PA: Poliamida
 - PP: Polipropileno
 - PE: Polietileno
 - PS: Poliestireno
 - PLA: Poli (ácido láctico)

RESUMEN

Ya ha sido demostrada la presencia de microplásticos a ambientes naturales, incluyendo ecosistemas remotos como el Ártico, los Pirineos, lagos de montaña y grandes profundidades oceánicas (González-Pleiter, Velázquez et al. 2020) (Free, Jensen et al. 2014, Woodall, Sanchez-Vidal et al. 2014, Allen, Allen et al. 2019) Con este trabajo, realizado durante el año hidrológico 2019-2020, se pretende determinar la presencia de MP sobre el acuífero más importante del sistema central ibérico que recoge nieve del macizo de Peñalara y abastece de agua potable a millones de personas.

Tras su digestión, separación por densidades, y filtrado a través de mallas de acero (25 μm) y/o filtros de fibra de vidrio (1 μm), se realizó una caracterización e identificación, de los materiales encontrados a través de la técnica de microscopía asociada a espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (micro-FTIR).

Los resultados obtenidos revelan la presencia de MP y partículas naturales tintadas industrialmente en todas las muestras de nieve recogidas, presentando una mayor diversidad, y tamaño, de los polímeros al muestrear sobre la zona de mayor tránsito. Los polímeros más abundantes son el polietileno, poliuretano, acrílico y la poliamida.

Como conclusión, se demuestra la importancia de incluir estas partículas antrópicas como nuevos contaminantes, ya que han sido capaces de alcanzar las cumbres poco accesibles en zonas de alta montaña.

ABSTRACT

The presence of microplastics in natural environments, including remote ecosystems such as the Arctic, the Pyrenees, mountain lakes and great ocean depths has already been demonstrated (González-Pleiter, Velázquez et al. 2020) (Free, Jensen et al. 2014, Woodall , Sanchez-Vidal et al. 2014, Allen, Allen et al. 2019). With this work, carried out during the hydrological year 2019-2020, it is intended to determine the presence of MP on the most important aquifer of the central Iberian system that collects snow from the Peñalara massif and supplies drinking water to millions of people.

After digestion, separation by density, and filtering through steel meshes (25 μm) and/or fiberglass filters (1 μm), a characterization and identification of the materials found was carried out through the technique of microscopy associated with Fourier transform infrared spectroscopy (micro-FTIR).

The results obtained reveal the presence of PM and industrially tinted natural particles in all the snow samples collected, presenting a greater diversity, and size, of the polymers when sampling on the area of greatest influx. The most abundant polymers are polyethylene, polyurethane, acrylic and polyamide.

As a conclusion, the importance of including these anthropic particles as new pollutants is demonstrated, since they have been able to reach the inaccessible peaks in high mountain areas.

1. INTRODUCCIÓN

Con la creciente concienciación global en valores medioambientales y la consecuente preocupación por el mantenimiento y conservación del medio, también ha ganado importancia la investigación de los nuevos contaminantes emergentes, entre ellos la presencia de plástico en el medio ambiente (Campanale, Massarelli et al. 2020). El plástico lleva siendo fabricado desde el siglo XIX, alcanzando su mayor desarrollo a mediados del siglo XX. Desde entonces su producción se ha ido incrementando, llegando a alcanzar más de 359 millones de toneladas solo en la Unión Europea, durante el 2018 (PlasticsEurope 2019).

Las ventajas que los plásticos aportan a nuestra vida cotidiana son innegables. Al tratarse de materiales resistentes y maleables son empleados en la producción de gran cantidad de objetos que hacen la vida más fácil. Si no fuera por estos, se emplearían otros materiales, con un probable mayor gasto energético en su producción y mayor coste económico. Este hecho no evita sin embargo que se trate de un elemento altamente contaminante cuando sus residuos son mal gestionados. Los últimos seguimientos realizados en Europa en 2018 indican que, de las 359 toneladas usadas, se recuperaron tan solo 29.1 millones de toneladas, un 47 % de la producción previa (PlasticsEurope 2019). De esa fracción recuperada, un 25 % acabó siendo enviado a plantas de tratamiento, como vertederos, y desde allí, una cantidad desconocida acaba en el medio ambiente, ya sea arrastrada por el viento, o por escorrentía, donde termina sufriendo el efecto de los diferentes agentes abióticos y bióticos.

Desde 2004, cuando se publicó el primer estudio que mencionaba los MP como contaminantes (Thompson, Olsen et al. 2004), la preocupación científica no ha dejado de incrementar al aumentar las evidencias de este nuevo tipo de contaminación global, cuyas repercusiones son aun esencialmente desconocidas. Se entiende por "MP" una partícula cuya dimensión mayor es menor a 5 mm (NOAA), y cuyo límite inferior da paso a la fracción nanopartícula, 1 μm , que corresponde con los nanoplásticos (Gigault, Ter Halle et al. 2018). Existen principalmente dos tipos de MP, los primarios, diseñados en ese tamaño para formar parte de exfoliantes en cosméticos o elementos abrasivos en

algunas industrias, y los MP secundarios, que proceden de materiales de mayor tamaño fragmentados mediante procesos de erosión y degradación.

La mayor parte de estudios realizados hasta la fecha se han llevado a cabo en mares y océanos, al ser los principales sumideros ambientales de materiales antropogénicos. En ellos se han descrito grandes cantidades de plástico, tanto en la superficie y playas (Katsnelson 2015, Edo, Tamayo-Belda et al. 2019), como en grandes profundidades oceánicas (Jamieson, Brooks et al. 2019). En menor medida y más recientemente se ha empezado a evaluar la presencia de MP en aguas dulces, incluyendo ríos y lagos, por ser una gran fuente de aporte MP al medio marino y sirven de abastecimiento a la población humana (Free, Jensen et al. 2014, Silva-Cavalcanti, Silva et al. 2017). Los estudios más recientes han demostrado la presencia de MP incluso en lugares remotos, como lagos de aguas heladas en el Ártico (González-Pleiter, Velázquez et al. 2020). En los últimos años también se ha comprobado la presencia de estas partículas en el aire, habiendo sido encontrados en suspensión, desde donde se depositan en la superficie por medio de lluvias, o por precipitación seca, tanto en espacios cerrados como en lugares abiertos, como se comprobó en París (Dris, Gasperi et al. 2016) en un trabajo que abría una nueva vía de investigación de lo que implica este fenómeno.

El hecho de que estén presentes en prácticamente todo tipo de ambientes y a disposición, por su pequeño tamaño, de los eslabones más bajos de las cadenas tróficas, les permite bioacumularse pudiéndose encontrar en el zooplancton, las lombrices de tierra y las sardinas; y contaminar alimentos como la sal de mesa, el agua mineral y la cerveza entre otros (Liebezeit and Liebezeit 2014, Yang, Shi et al. 2015, Rillig, Ziersch et al. 2017, Steer, Cole et al. 2017, Karami, Golieskardi et al. 2018, Oßmann, Sarau et al. 2018). Importantes productos de consumo humano se han visto contaminados en sus respectivos ecosistemas, por lo que no sorprendería encontrarlos dentro del cuerpo humano (Kaya, Yurtsever et al. 2018), atravesando nuestro organismo y hallándose en excrementos y orina (Schwabl, Köppel et al. 2019), considerándose por tanto un problema para la salud pública. Además, este tipo de convivencia con los MP hace que se ponga el foco en su papel como vectores para microorganismos, patógenos y contaminantes, siendo un fenómeno extrapolable a la pandemia del Covid-19,

en la que los MP son unos de los actores que juegan un papel transportador, incrementando la facilidad de contagio de este virus (VishnuRadhan, Eldho et al. 2020).

Se sabe que una vez en la naturaleza, el plástico no solo no desaparece, sino que se degrada y erosiona hasta convertirse en partículas de dimensiones nanométricas. Estos materiales plásticos, cuyo rango de tamaños está todavía bajo debate (partículas con tamaño menor a 1000 nm con comportamiento coloidal), cuanto menor en tamaño, más dañinas parecen ser para el organismo al presentar el riesgo adicional de su posible internalización (Tamayo-Belda, González-Pleiter et al. 2019). Según los primeros estudios realizados, los más pequeños pueden poseer una alta capacidad de penetración en tejidos musculares y viscerales, produciendo así un efecto de bioacumulación que afecta a toda la cadena trófica (Mendoza, Karapanagioti et al. 2018). Un ejemplo de este fenómeno lo ha descrito uno de los proyectos más recientes de toxicología llevado a cabo en nuestra región de estudio. En él se demuestra la afección por MP en algunas especies de anfibios típicas del parque del macizo de Peñalara (Boyeró, López-Rojo et al. 2020).

La Sierra de Guadarrama (Figura 1) forma parte del sistema acuífero más importante de la Comunidad de Madrid, Castilla y León y de parte de la provincia de Guadalajara. El presente trabajo centra su atención en las cumbres nevadas del macizo de Peñalara, siendo su objetivo el de componer la primera línea de investigación acerca de la llegada de MP al ecosistema alpino del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (PNSG). En él se busca esclarecer la aparición del material plástico bajo condiciones de precipitación atmosférica, ya sea húmeda o seca, y de presión turística.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Teniendo en cuenta factores geográficos y meteorológicos, se estableció la zona del macizo de Peñalara como punto de muestreo. En concreto, la vaguada que une la cumbre de Hermana Menor, con la de Hermana Mayor, un collado que se encuentra al suroeste del pico Peñalara. Esta zona presenta unas condiciones alpinas de alta montaña que, aun estando situada a 2255 m.s.n.m., se encuentra

más allá de la línea de arbolado, y por su situación, permite encontrar los microclimas deseados al estar en una zona ventosa y transitada por el turismo (Figura 1).

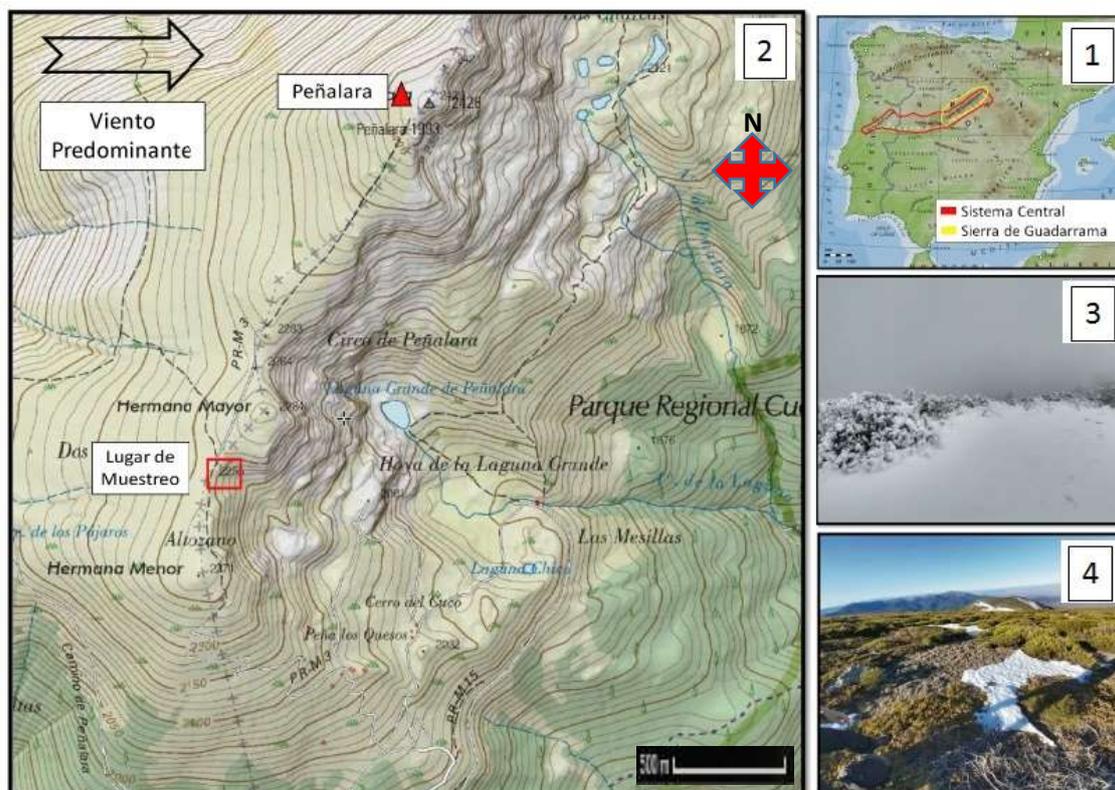


Figura 1: Situación geográfica: Situación de la serranía estudiada en la península ibérica (1); ampliación de la Sierra de Guadarrama (2); condiciones meteorológicas durante el 11/11/2019 (3); condiciones meteorológicas durante el 30/12/2019 (4). Fuente: IBERPIX y propias.

Denominamos “zona alpina” a aquella que está más allá de la línea de arbolado, ya sea por su gran altitud o por sus condiciones meteorológicas. Se trata de un espacio donde solo sobreviven las especies mejor adaptadas, las denominadas especialistas, como ciertos líquenes, arbustos basales o animales de montaña. En el centro peninsular este ecosistema lo podemos encontrar en el Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, empezando a partir de los 1600 m.s.n.m. (Richards 1992), y llegando hasta los 2428 m.s.n.m., altitud a la que se encuentra el punto más alto de la comunidad madrileña, el pico Peñalara.

Para seleccionar los puntos de muestreo, entre todos los posibles a lo largo de la cresta del macizo de Peñalara, se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- Lugar fácilmente accesible, lo más cercano posible a la carretera.
- Estar próximo a algún sendero con habitual tránsito humano.
- Estar dispuesto transversalmente a la dirección del viento predominante de la zona (NO-SE).
- Ser representativo de los diferentes microclimas a estudiar (barlovento, sotavento y antrópico).

Como se ha nombrado anteriormente, finalmente se seleccionó la vaguada existente en Dos Hermanas, entre Hermana Menor (2269 m.s.n.m.) y Hermana Mayor (2284 m.s.n.m.), por reunir las características apropiadas (Figura 1). La localización se ve atravesada por el sendero RV-2, uno de los más transitados del parque, y está situado a tan solo una hora, aproximadamente, de marcha desde el aparcamiento de los Cotos.

Una vez escogido este lugar como el idóneo para el muestreo, se subdividió la zona para distinguir tres microambientes. El primero en la cara norte, que recibiera el viento predominante de la zona (Viento - V). El segundo en la cara sur, sin viento, en el que las partículas se depositasen, por su propio peso (Sotavento - S). Y el tercer punto, como referencia del impacto de la presencia humana, en el sendero RV-2 (Turismo - A). Los tres puntos están situados lo más cerca posible entre ellos y forman una transversal con la divisoria de aguas (Tabla 1). Precisamente, para potenciar el conocimiento sobre este último factor, los muestreos se realizaron en lunes, habiendo pasado suficientes visitantes al parque durante el fin de semana como para dejar evidencia en el terreno. La información de los aforos de público para los días previos al muestreo ha sido proporcionada por el personal del PNSG.

El primer día, 11 de noviembre de 2019, las condiciones eran invernales tratándose de la primera gran precipitación nival de la temporada.

El segundo día de muestreo tuvo lugar el 30 de diciembre de 2019, en condiciones primaverales, el campo presentaba neveros, dispuestos

parcheadamente, con nieve dura y sucia. En este caso se escogieron los puntos más cercanos y con las mismas condiciones ambientales a los del anterior muestreo. Las coordenadas se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Coordenadas UTM de los puntos muestreados

Lugar	Datum	Noviembre	Diciembre
V	ETRS89	30T 418546-4520951	30T 418529-4520935 30T 418493-4520946
S	ETRS89	30T 418593-4520952	30T 418580-4520962 30T 418574-4520971
A	ETRS89	30T 418617-4520949	30T 418602-4520955 30T 418616-4520937

2.2. Muestreo

Preparación de materiales para el muestreo

Para el muestreo de MP en medioambiente se evitó, en la medida de lo posible, el uso de materiales plásticos. Los materiales utilizados para la recogida de nieve fueron los siguientes:

- Tarro de cristal (2 L)
- Cuchara de metal
- Metro metálico
- Papel aluminio
- GPS (Garmin eTrex 30x)
- Guantes de nitrilo

Los materiales destinados a la recolección de microplásticos siguieron un proceso de limpieza y preparación que garantizase la total desaparición de cualquier traza de plástico previa al ensayo. Para ello se lavaron con ácido clorhídrico (HCl) al 10 % y se aclararon al menos tres veces con agua ultrapura. Una vez limpios, se dispuso papel de aluminio entre la boca y la tapa de los tarros para evitar el aporte de materiales por fricción y se secaron en la estufa a 60 °C durante 24h. Todo proceso se realizó bajo la campana de ventilación para evitar

contaminaciones durante el mismo y con guantes antiácido para una mayor seguridad.

Toma de muestras

Antes de comenzar la aproximación hacia los puntos indicados, se realizó un reparto del material necesario para realizar el muestreo.

Durante el muestreo se tomó nota de los materiales y colores usados en la ropa por las personas presentes como parte de un control de la contaminación cruzada que pudiera ocurrir. Además, se informó a las personas responsables del PNSG acerca de la actividad a realizar. La organización en estos casos presta chalecos que acreditan la tarea de investigación, así se evita que el resto de las personas accedan a los lugares en que estos se encuentren, en muchas ocasiones fuera de las sendas permitidas.

Para tomar las muestras se identificó la dirección del viento y se realizó la aproximación a los puntos en contradirección a este (Allen, Allen et al. 2019). En los puntos de muestreo, mediante la cinta métrica se acotaron las áreas de 1 m² a muestrear. Después, tras abrir el tarro control para recoger los materiales que se depositen en el momento del muestreo, se recogió la nieve de los primeros dos centímetros de superficie, desde el punto más cercano al más lejano, para garantizar la ausencia de contaminación en todo momento, empleando durante todo el proceso guantes de nitrilo. En el segundo muestreo (diciembre) debido a la menor cantidad de nieve se llenó un segundo tarro siguiendo las mismas instrucciones, en una parcela cercana para descartar posible contaminación cruzada. Una vez finalizada la recogida de muestras, se registraron las coordenadas GPS de los puntos correspondientes.

Tras haber muestreado en todos los puntos y recogido el material sin dejar ningún resto en el medio ambiente, se llevaron las muestras al laboratorio. Allí se guardaron los tarros de cristal en el frigorífico a 4 °C, para evitar la proliferación de microorganismos, hasta su posterior filtrado (Allen, Allen et al. 2019).

2.3. Procesamiento de las muestras

Debido a las condiciones primaverales encontradas durante el día del segundo muestreo, 30 de diciembre de 2019, y la semana previa, la nieve se encontraba

compacta a capas y sucia con partículas y materia orgánica, por lo que se realizaron pasos previos al filtrado de las muestras.

Separación por densidades

Mediante la técnica de separación por densidades, ampliamente usada en los experimentos con MP (Zhang, Gao et al. 2019, Edo, González-Pleiter et al. 2020, Hitchcock 2020), se aumenta la salinidad de la muestra de tal modo que los materiales menos densos quedan flotando en la superficie, y los más densos como las partículas de arena, quedan en el fondo.

Para realizarla, se añadieron 20 g de cloruro sódico (NaCl) por cada 100 ml de muestra, en un vaso de precipitados previamente limpiado conforme al protocolo. Tras taparlo se puso a agitar durante diez minutos a temperatura ambiente. Posteriormente se guardó en el frigorífico para reposar la solución (Edo, González-Pleiter et al. 2020). La elección de emplear cloruro sódico atiende a su viabilidad ambiental y a su falta de peligrosidad durante el manejo.

A modo de control de la contaminación cruzada producida por los materiales usados, el proceso se repitió con un vaso control, con 100 ml de agua ultrapura y 20 g de NaCl.

Digestión de Materia Orgánica

Se debe tener en cuenta que no todas las partículas plásticas son menos densas que la solución creada, como por ejemplo el PVC cuya densidad es más alta que otros polímeros como el polietileno, o pueden haberse visto atrapadas por las partículas de arena que hay en el fondo.

Para facilitar la identificación de materiales procedentes del sedimento generado se utilizó la técnica de digestión de materia orgánica del material decantado. Así se elimina gran parte de los materiales no plásticos que pueden interferir en los procesos de identificación y contaje de partículas de plástico.

Para llevar a cabo el procedimiento, una vez filtrado el sobrenadante, en los mismos vasos de precipitados se disgregó la muestra para convertirla en un material particulado lo más fino posible al que se añadió peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 33%, hasta llegar a los 70 ml. Para que la reacción tuviera lugar se

dejaron las muestras cubiertas con papel de aluminio en la estufa a 60° C durante 24 horas (Edo, González-Pleiter et al. 2020).

Filtrado

Una vez seco y digerido el material depositado, para facilitar el contaje, se procedió a su filtrado con ayuda de agua ultrapura, a través de diferentes tamaños, 25 µm (malla de acero inoxidable) y 1 µm (filtros de fibra de vidrio).

Para este procedimiento, se mantuvo el vaso control que se preparó en el proceso anterior con el objetivo de cuantificar la posible contaminación que se haya podido producir a lo largo de estos pasos.

Los materiales utilizados en el proceso de filtrado fueron los siguientes:

- Sistema Millipore de Filtrado de Acero Inoxidable (Ø 47 mm). Conexión con la línea de aire comprimido
- Pinzas de Metal
- Placas de Petri de Vidrio
- Filtros de Acero Inoxidable, 25 µm de tamaño de poro (Ø 47 mm)
- Filtros de Fibra de Vidrio, 1 µm de tamaño de poro (Ø 47 mm)

Para garantizar la ausencia de plástico en los materiales del laboratorio se llevó a cabo la limpieza de estos con agua ultrapura, con un mínimo de tres lavados, se cubrieron con papel de aluminio y se secaron en la estufa a 60 °C durante una noche. Las placas Petri de vidrio, por su parte, se calentaron en un horno de mufla a 500 °C al igual que los filtros utilizados.

En todo momento se evaluó la posible contaminación cruzada al preparar sistemas de control durante los procesos. Bajo la campana se utilizaron filtros de fibra de vidrio que fueron, colocados al lado del sistema de filtrado y abiertos cada vez que la muestra o controles de campo quedaron expuestos al ambiente del laboratorio.

Los recipientes de “control de campo” se lavaron tres veces con agua ultrapura para después ser filtrado a través de 1 µm.

Para el filtrado de los tarros con muestra, se pasó toda la nieve en estado líquido por el sistema. Finalmente se realizaron tres lavados con agua ultrapura, asegurando no dejar nada de muestra en el recipiente. Los recogidos en el

segundo día, al presentar materia en suspensión, se dejaron reposar para filtrar el sobrenadante posteriormente y secar el material en suspensión.

Todos los filtros resultantes se secaron en la estufa de laboratorio a 60 °C durante 24 horas. Si se efectúa el secado a mayor temperatura se podrían dañar algunos componentes plásticos e incluso llegar a fundirse. Transcurridas las 24 horas de secado las placas se sellaron con Parafilm y se almacenaron en un lugar fresco y apartado de la luz solar.

Visualización

Los filtros con las muestras se observaron con un microscopio estereoscópico Edublué (Euromex) y se procedió al conteo y fotografiado de las partículas que se sospechaban plásticas o antrópicas. Las medidas se realizaron mediante el programa ImageJ.

Para facilitar el proceso de recuento en los filtros de fibra de vidrio se dibujó sobre las placas de Petri un enrejado a modo de cuadrícula que no fue necesario en las mallas de acero. En las muestras de sedimento se procedió a recuperar fibras y partículas con una aguja enmangada, tras lo cual se depositaron en una placa de Petri esterilizada antes de proceder a su análisis. Una vez localizada cada partícula a analizar, se tomó una fotografía de la misma y fue depositada en la placa con el filtro limpio.

Además del fotografiado de las partículas, se efectuó una clasificación en función de su morfología. Las tipologías seleccionadas fueron **Fibras**, partículas con una dimensión mucho más grande que la otra y forma de pelo; **Fragmento**, pequeños trozos erosionados de piezas más grandes; **Filamentos**, en forma de pequeños tubos; y **Films**, en forma de pequeños velos de material semitransparente. Se escogió una muestra representativa para su posterior identificación mediante el Infrarrojo.

Para evitar la contaminación cruzada, al igual que en pasos anteriores, durante la visualización de las muestras de sedimento, se dispuso de una placa control que permaneció abierta siempre que la muestra lo estaba.

2.4. Análisis e Identificación mediante espectroscopia de Infrarrojo (micro-FTIR)

Los análisis de infrarrojo para la caracterización química de las partículas encontradas en la nieve se realizaron en la unidad de espectroscopía molecular del Servicio Interdepartamental de Investigación (SIDI) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM).

La técnica seleccionada fue la espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier. Para ello se siguieron las instrucciones del técnico/a de laboratorio encargado del equipo utilizado para los análisis, el microFTIR Spotlight 200 Spectrum Two (Perkin-Elmer). Su detector MCT (mercurio-cadmio-teluro) usa nitrógeno líquido a -200° C para regular la temperatura y obtener un resultado óptimo.

Para el análisis, mediante el uso de una aguja de zirconio, se depositaron las partículas de las muestras en pastillas de bromuro de potasio (KBr). Este material es transparente al infrarrojo permitiendo el uso de la transmisión como método de identificación. Una vez montadas las pastillas en el equipo, y antes de cada partícula, el equipo hace un barrido de fondo para restar las señales aportadas por el ambiente, como el CO_2 , para posteriormente colocar el haz sobre la partícula seleccionada (Figura 2). Los análisis se replicaron al menos dos veces, para garantizar el resultado obtenido.

Sobre la muestra, el equipo, lanza un haz de infrarrojo, cuando esto ocurre una parte del haz es reflejado y otra parte atraviesa la muestra. Esta energía produce una serie de vibraciones en los enlaces químicos que son captadas por el detector del equipo. La clave de esta técnica es que las distintas estructuras químicas poseen huellas vibracionales características. La configuración de picos resultante se compara con otros espectros que forman parte de bases de datos creadas para la identificación, donde mediante correlación de Pearson se atribuye a un determinado material ([Anexo 1](#)).

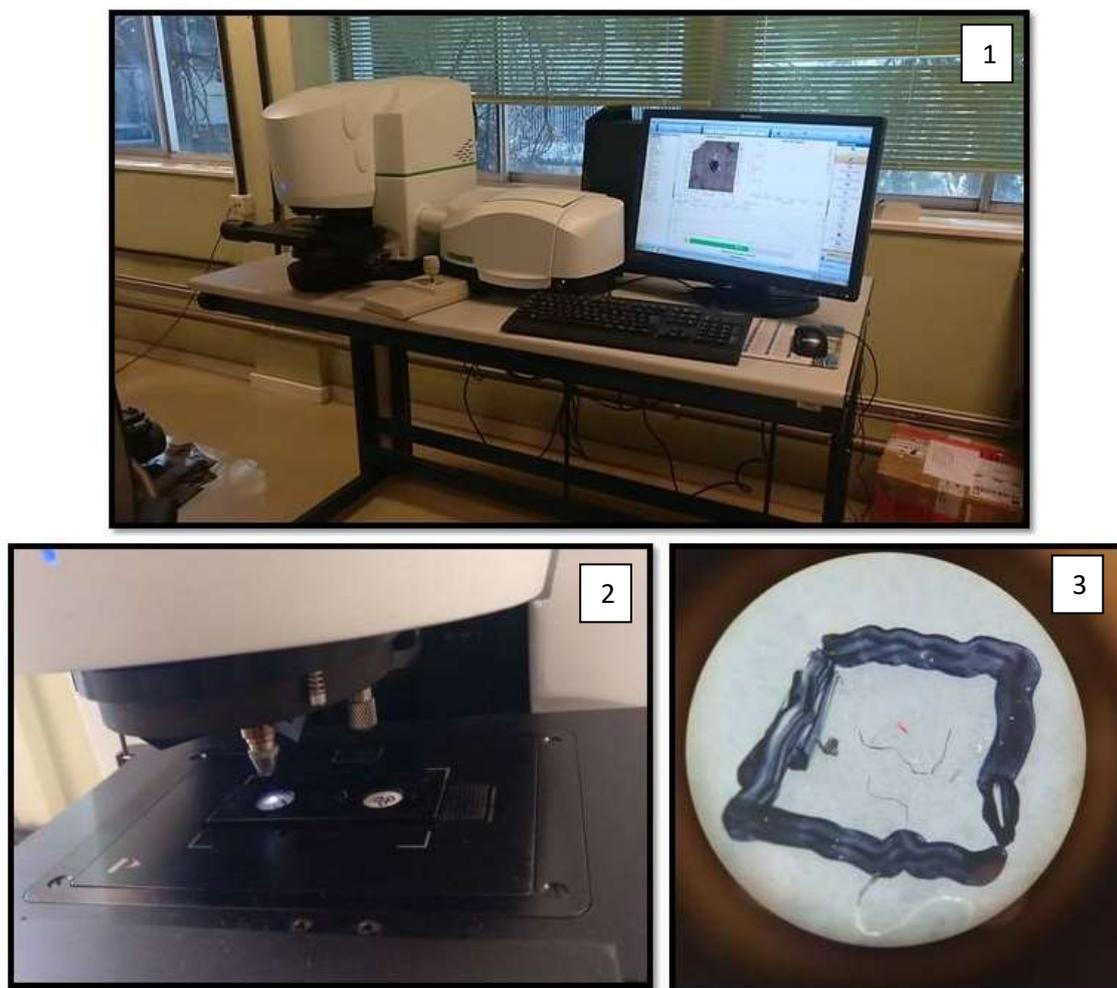


Figura 2: microFTIR Spotlight 200 Spectrum Two (Perkin-Elmer) (1), detalle de la placa de análisis (2), preparado de la muestra a analizar sobre la pastilla de KBr (3).

Para evitar la contaminación de la muestra se trabajó con ventanas y puertas cerradas, así como el equipo de ventilación apagado. La ropa utilizada por las personas presentes era de algodón. A su vez, se empleó otra placa Petri a modo de control, que permaneció abierta siempre que se manipularon las placas con la muestra.

3. RESULTADOS

En este trabajo se han recolectado y filtrado un total de 9 Litros de nieve. El primer día una muestra de 4,33 L de los que 1,35 L fueron recogidos en el punto V; 1,65 L en el punto S, y 1,33 L en el punto A. En el segundo día se recogieron 4,77 L en dos muestras, 1,46 L en el punto V; 1,66 L en el punto S y finalmente 1,65 L en el punto A.

Durante la primera jornada de campo se pudo comprobar la idoneidad de los puntos de muestreo seleccionados en relación con las características por las que se escogieron. Debido a los distintos microclimas de los tres puntos, el V (viento) resultó en una nieve formada por grandes cristales de hielo típicos de la centellada, mientras que el punto S (sotavento) presenta un polvo suave y sin compactar. Por último, el punto A (antrópico) mostró una nieve algo endurecida y sucia por las pisadas en el camino. En el [Anexo 2](#) se muestra una figura en la que se observan las distintas texturas de la nieve.

3.1. Abundancia y morfología de las micropartículas

Mediante el uso de los filtros indicados anteriormente se han retenido una serie de partículas de las que se han contabilizado 526, incluyendo materiales plásticos y no plásticos. Se han fotografiado y medido 199 partículas, el 37,8% del total.

Se ha encontrado una mayor cantidad de partículas en el punto “A” durante el muestreo de noviembre, mientras que el “S” y “V” resultan en mayor cantidad durante el segundo muestreo (Figura 3).

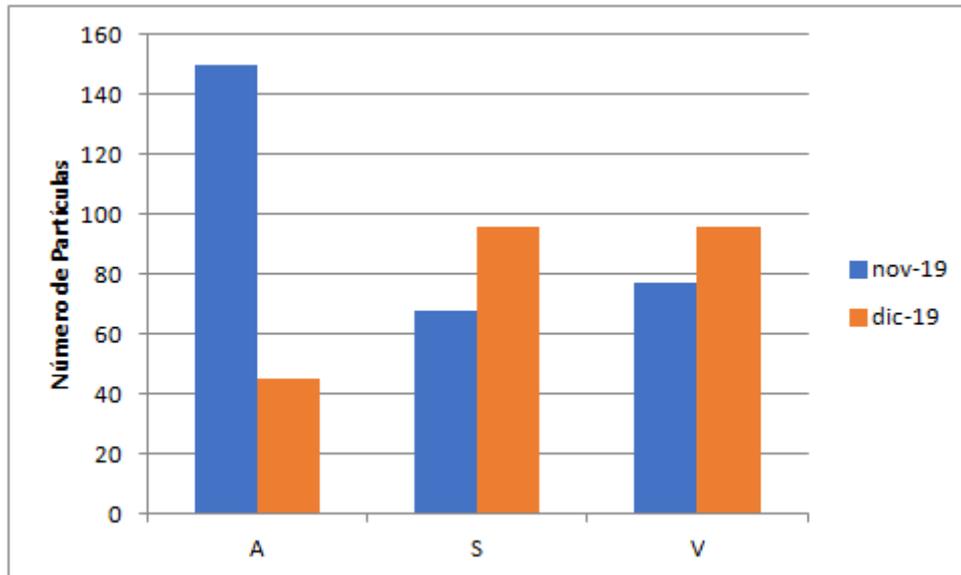


Figura 3: Cantidad de materiales encontrados, por fecha y día muestreado.

Las partículas encontradas fueron clasificadas atendiendo a su morfología, color, y tamaño, diferenciando entre fibras, fragmentos, partículas, y films. Además, fueron separadas por grupos de tamaños yendo desde menos de 0.3 milímetros, hasta más de 5 milímetros (Figura 4), aunque estas últimas no corresponderían

a MP en la clasificación de la NOAA. Las dos columnas de la izquierda corresponden a los tamaños obtenidos al muestrear sobre el sendero RV-2 (A), en los que se llegan a los valores de material particulado de mayor tamaño de todo el estudio, un 4 % de partículas mayores a 5 mm y un 30 % de partículas entre 2 y 5 mm. Las dos columnas centrales pertenecen a la zona muestreada a la sombra del viento (S), y las dos columnas de la derecha a la cara ventosa de la montaña (V) presentan materiales, en todos los casos, menores de 5 mm, existiendo una mayor cantidad de partículas entre los 0.5 y los 2 mm.

Las micropartículas observadas muestran una diversidad importante de tonalidades y colores siendo representativa de los materiales que se usan en la montaña. Fibras y fragmentos han resultado ser las más variadas en los mismos llegando a alcanzar un máximo de 11 colores en las fibras de la muestra V de Noviembre y 8 colores en los fragmentos de la muestra B de noviembre. Estos colores han sido descritos como: negro, azul, marrón, dorado, verde, gris, naranja, rosa, rojo, plateado, transparente, violeta, amarillo y blanco.

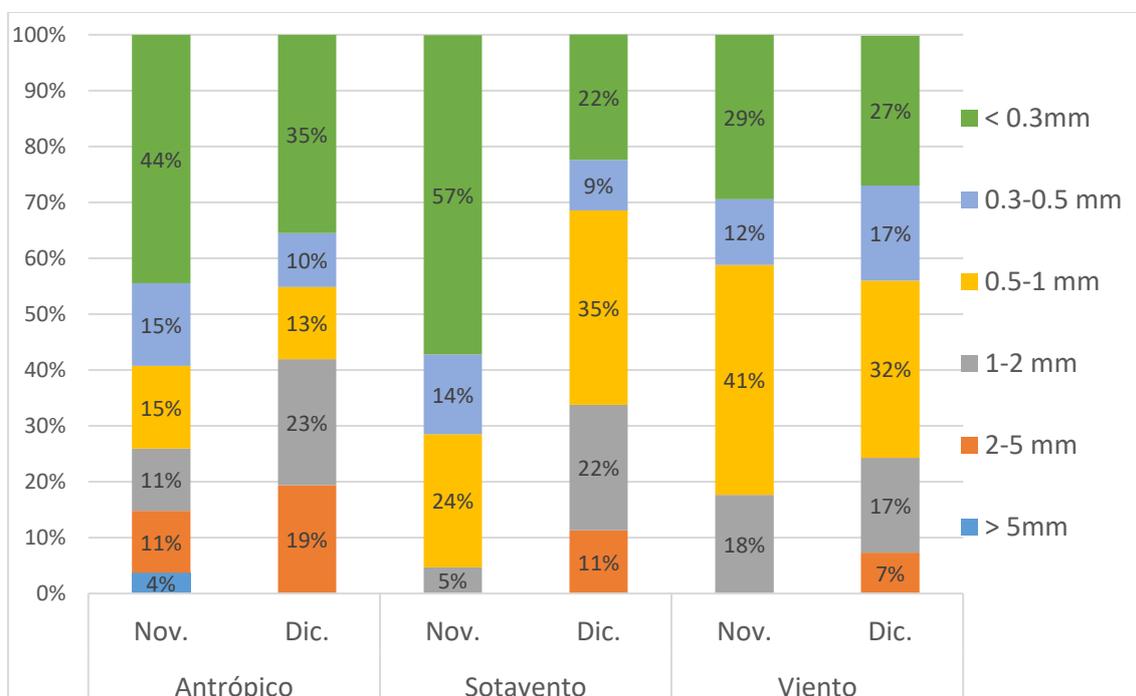


Figura 4: Distribución de rangos de tamaño en función del lugar de muestreo y la fecha.

Atendiendo a la morfología, se han observado ciertas diferencias entre el material recogido el primer día y el segundo. En el del primer muestreo, tanto

fibras como fragmentos aparecen en porcentaje similar con una presencia mínima del resto de tipologías. En el caso del segundo muestreo los fragmentos perdieron presencia a favor de la fracción filamentosa dejando un papel aún más importante a las fibras. La presencia de films también aumentó en este segundo muestreo ([Anexo 3](#)).

3.2. Identificación de MP por FTIR

De las 526 partículas halladas se han analizado mediante el micro-FTIR 132, un 25 % del total correspondiendo a una precisión del 7.5 %. Se ha usado una submuestra debido a la imposibilidad de evaluar la totalidad de la muestra, así, se han determinado un total de 56 microplásticos desglosados en 21 durante el primer muestreo y 35 en el segundo que suponen un 41 % y un 36 % del total de micropartículas analizadas respectivamente.

El número de microplásticos encontrado en los lugares A y S se distribuye de manera parecida en ambos muestreos, aumentando en ambos casos durante diciembre ($n=6 \rightarrow N=14$ para A y $n=7 \rightarrow N=15$ para S). En el punto V se ha reducido la cantidad entre ambos muestreos ($n=8 \rightarrow N=6$)

Atendiendo a los análisis realizados, el polímero más frecuentemente presente entre las partículas recogidas es el poliéster (PES) habiendo aparecido en un 25% de las partículas analizadas ($n: 33$). En la siguiente representación gráfica, dividida por días y puntos muestreados, se puede apreciar la relación que existe entre el poliéster y el resto de los polímeros encontrados (Figura 5). Otros polímeros reseñables del presente trabajo son las fibras acrílicas (ACR), la poliamida (PA), y el poliuretano (PU) que suponen un porcentaje importante de las mismas.

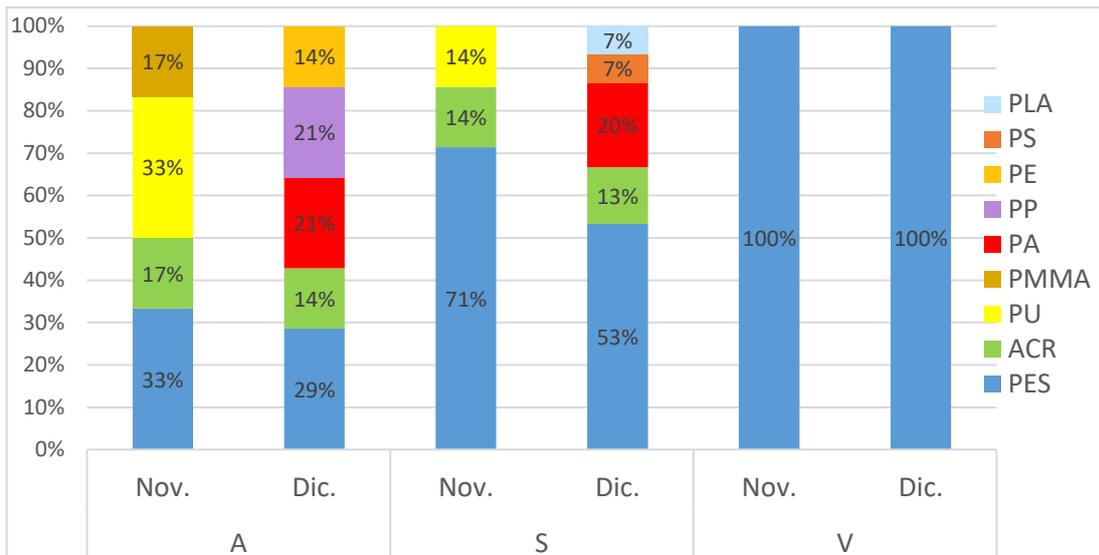


Figura 5: Distribución de polímeros: Mientras que, en las dos columnas de la izquierda, correspondientes al punto muestreado sobre el sendero, se encuentra la mayor diversidad de polímeros existente en el estudio, en las dos columnas de la derecha, correspondientes al punto ventoso de la montaña, solo se encuentran MP de poliéster.

Además de las partículas plásticas, se ha comprobado la presencia de fibras naturales antropogenizadas. Se trata de materiales con base en algodón o lana que han sido modificadas mediante tinciones y compuestos químicos que les dotan de otras propiedades físicas. En la Figura 5, se da énfasis a la cantidad de partículas de origen antropogénicas encontradas en cada lugar así como los porcentajes analizados correspondientes a las partículas naturales, las plásticas y las naturales teñidas, ([Anexo 4](#)). Se comprueba así, que el número de partículas antrópicas encontradas por litro de nieve es mayor al muestrear en el camino RV-2 que en cualquiera de los otros puntos (Figura 6), realizando la importancia de esta fracción natural modificada.

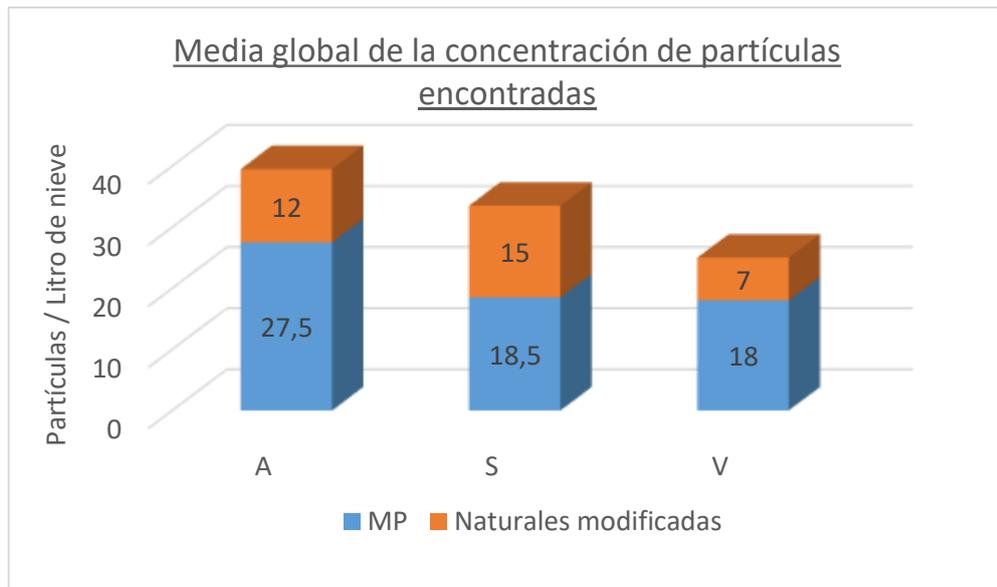


Figura 6: Concentración de partículas antrópicas en el medio: cantidad de partículas naturales modificadas, y MP por litro de nieve filtrado en cada punto de muestreo.

4. DISCUSIÓN

Mediante este trabajo se ha demostrado la presencia de material plástico bajo condiciones de precipitación atmosférica, ya sea húmeda o seca, y de presión turística. Además, se ha establecido el protocolo a seguir para la evaluación de la presencia de microplástico en ambientes alpinos.

Al tratarse de un ecosistema de alta montaña, el muestreo estuvo muy condicionado por los factores climáticos, que son claves para la aparición de MP y la interpretación de los datos tras el análisis de la muestra. El primer muestreo, de noviembre de 2019, se tomó mientras una ventisca, de rumbo NO-SE, azotaba las cumbres del macizo, esto supuso el aporte de una nieve virgen que garantizase una corta longevidad de los materiales encontrados en el medio. En este primer muestreo, se observó una mayor cantidad de materiales plásticos encontrados en comparación con el segundo muestreo. Los motivos pueden ser varios, pero probablemente los más importantes sean el lavado de la atmósfera por la precipitación húmeda y la congregación del turismo a transitar el camino marcado por las pisadas. El segundo muestreo, por el contrario, presentó unas características meteorológicas más propias de la primavera ya que el territorio mostraba pequeños parches de nieve endurecida, debido a unas semanas con pocas precipitaciones y días despejados y calurosos. Sin duda la acción del sol por el día y las bajas temperaturas durante la noche compactó la nieve en una

capa gruesa de hielo distribuida en neveros, condiciones que favorecen la deposición aérea a la sombra de los vientos y hacen que el tránsito de turistas sea mayor, creando un mayor impacto por MP en el lugar.

Debido al comportamiento del turismo, no se encontraron todas las partículas esperadas en el camino, ya que el público en general prefiere sortear las placas de hielo del camino, por los resbalones que puedan causar. En cambio, durante las ventiscas y con el terreno completamente cubierto de nieve, lo más seguro es seguir el sendero pisado, sin tener que abrir una nueva huella, lo que concentra a todas las personas a un mismo pasillo en el que pisar (Figura 7).

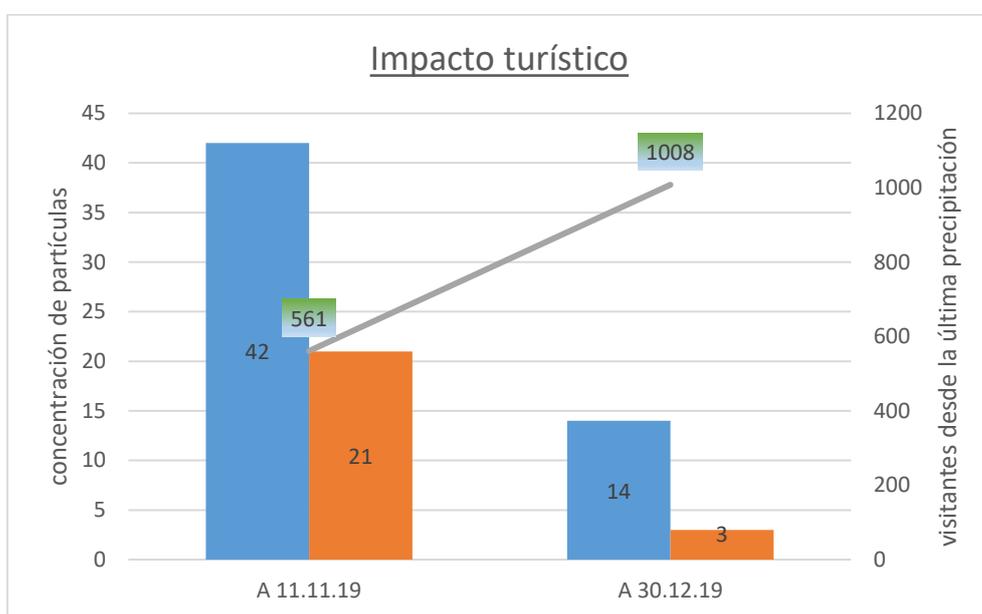


Figura 7: Relación entre los MP (azul) y partículas naturales tintadas (naranja), al muestrear sobre el camino.

Uno de los datos más importantes de este trabajo es que se han encontrado materiales plásticos en todos los lugares muestreados ([Anexo 5](#)). Esto responde a la hipótesis de inicio al dar evidencia de la llegada de partículas de origen humano en espacios naturales no afectados por el turismo de alta y media montaña. En cuanto a la hipótesis secundaria, que sugiere una diferenciación acerca de la naturaleza de las partículas a causa del impacto turístico, comprobamos una mayor diversidad entre los polímeros presentes en las partículas correspondientes a las zonas en contacto con el turismo que en las alejadas del mismo. Se entiende así un claro efecto de la presión turística que soporta diariamente este espacio natural.

Los polímeros más frecuentes son el poliéster, un material comúnmente empleado en la industria textil y en envases; el poliuretano (PU), habitual en espumas aislantes, fuertes adhesivos y suelas de zapatos; los polímeros acrílicos, comúnmente usados por la industria textil por su semejanza a la lana; y la poliamida (PA), sintetizada para la elaboración de plásticos resistentes como el nylon o el kevlar.

Entre los polímeros encontrados exclusivamente en el punto antrópico (A), muestreado sobre el sendero, encontramos el polipropileno (PP), el polietileno (PE) y el poli (metil metacrilato, PMMA), que suelen emplearse en la industria alimenticia y textil, en la fabricación de bolsas de plástico y envases de productos de limpieza e higiene, y en la creación de cosméticos y automóviles, respectivamente.

Mientras que los encontrados exclusivamente en el punto a la sombra del viento (B) son el poliestireno (PS) y el poli (ácido láctico, PLA), el primero característico en la industria textil deportiva y el envasado de productos lácteos, y el segundo en la impresión en 3D, y como plástico comúnmente conocido como “biodegradable” (Benítez, Ortiz et al. 2007).

La presencia de materiales en zonas donde no hay tránsito de personas se puede explicar por depósito aéreo. Estudios previos (Dris, Gasperi et al. 2016, Allen, Allen et al. 2019, Ambrosini, Azzoni et al. 2019) han demostrado la presencia de microplásticos en la atmósfera que viajan hacia otros lugares donde acaban depositándose (González-Pleiter, Velázquez et al. 2020). Para que esto ocurra se deben cumplir unas características físicas de tamaño y ligereza que solo se cumplen con un determinado tamaño. Si tenemos en cuenta los tamaños del material particulado encontrado en este trabajo, se observa que las mayores de 5 mm, y por tanto por encima del rango micro, solo se encuentran en el camino (A), mientras que las comprendidas entre los 0.5 y 1 mm son más abundantes en los puntos de sotavento (S) y barlovento (V), dándose una alta presencia, en los tres puntos, de partículas igual o menores a los 0.3 mm (Figura 3). Esto sin duda da pie a futuras investigaciones para conocer el origen del material depositado en este terreno.

La clasificación de las partículas encontradas en función de los colores también aporta una información valiosa. Se ha observado la existencia de una gran cantidad de partículas plásticas transparentes y blancas, dando la idea de su posible pérdida de color a causa de los agentes externos, que también son causantes de su fragmentación (Edo, Tamayo-Belda et al. 2019).

Tras la extrapolación de los resultados a toda la muestra, se ha estimado una concentración por litro de nieve de 28 MP/L en A (n=79), 20 MP/L en S (n=64) y 18 MP/L en V (n=52), sin contabilizar en esta estimación las partículas naturales con evidencias de procesamiento industrial encontradas en todos los puntos. Un dato que no crea grandes diferencias con los ya reportados hasta ahora en otros artículos que estudian la presencia de MP en ambientes remotos ([Anexo 6](#)).

Los resultados de este trabajo demuestran la presencia de MP en las nieves de la Sierra de Guadarrama. El microplástico, una vez depositado en el territorio comprendido por este parque nacional permanecerá durante un largo tiempo, aún no determinado, en contacto con el sedimento, la fauna y vegetación locales, y presumiblemente entrarán en el sistema hidrológico de la serranía llegando a contaminar acuíferos y aguas embalsadas para el consumo humano, entre otros. Como ya ocurre en otros lugares del planeta, el ser humano no deja de sufrir los impactos de esta contaminación, ya sea mediante la sal de cocina, los alimentos que compramos habitualmente, las bebidas refrescantes o al darse un baño en un río (Liebezeit and Liebezeit 2014, Yang, Shi et al. 2015, Lahens, Strady et al. 2018, Schwabl, Köppel et al. 2019).

Se ha demostrado ampliamente la biopersistencia de estos polímeros a través de las cadenas tróficas, acumulándose en los organismos que participan de ellas (Liebezeit and Liebezeit 2014), así como las afecciones que pueden sufrir las personas con una constante exposición a MP en el aire, dando lugar a enfermedades respiratorias (Gasperi, Wright et al. 2018) y diferentes cánceres (Pauly, Stegmeier et al. 1998), aunque aún es terreno de estudio ya se sospecha sobre las posibilidades de generar daños mayores a nivel orgánico al ser portadores de contaminantes adsorbidos, como oligómeros aditivos, y que junto con su comportamiento coloidal ven facilitada su dispersión (Gigault, Ter Halle et al. 2018).

Hay pocas dudas de que esta dispersión de contaminantes plásticos lleva ocurriendo desde la década de 1950, cuando comenzó a fabricarse y emplearse el plástico a gran escala, pero aún no conocemos el alcance de su impacto. Gracias a estudios como el de Luz Boyero, en la fauna anfibia del parque (et. al 2020), poco a poco se van arrojando algunas luces sobre las consecuencias de estos contaminantes en el ecosistema natural de los sistemas de montaña.

Aunque en la zona seleccionada para el estudio no se encontraban fragmentos plásticos visibles al ojo humano, hay puntos del parque donde sí se pueden apreciar, como por ejemplo en algunas cumbres emblemáticas, lagunas de interés, miradores, o alrededor de refugios entre otros que, por ser zonas de descanso o para pernoctar, dan lugar al tránsito habitual y el abandono de desperdicios, pues este parque nacional no deja de ser uno de los que más visitantes recibe en España.

5. CONCLUSIONES

Los muestreos de campo realizados han permitido detectar la presencia de microplásticos en el ambiente alpino del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, hallado en todos los puntos muestreados.

Los polímeros más frecuentes son materiales de poliésteres y acrílicos, poliuretano y poliamida. Además, se han encontrado materiales naturales como algodón y lana con evidencias de procesado artificial.

Todas ellas entrarán en el sistema de montaña y alcanzarán la cadena trófica y sistemas hídricos hasta llegar de nuevo al ser humano. Dándose una presencia mayor al muestrear sobre el sendero se entiende un posible origen en el turismo de montaña, por lo que se debería poner énfasis en su sensibilización.

Un impacto más suavizado, es el que se produce en el lado ventoso de la montaña, compatible con el depósito de los residuos que las ciudades e industrias al noroeste del parque emiten a la atmósfera.

Para finalizar consideramos necesario el avance científico en el estudio de estos materiales una vez acabada su vida útil, así como su relación con el medio ambiente tras el paso del tiempo. Igualmente hacemos un llamamiento a la divulgación de estudios como este, para concienciar y aportar de conocimientos

y cultura a la ciudadanía, el motor responsable del cambio que debe sufrir nuestro modelo de desarrollo actual, así como para servir de guía y ser tenidos en cuenta en la futura gestión de parques nacionales y espacios naturales.

6. AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a María Sandín por aceptar mi propuesta de TFG y creer en el proyecto en todo momento. A Roberto Rosal por permitirme colaborar en el departamento de ingeniería química (UAH), en el que tan bien me han acogido y tanto he aprendido. Así como a los compañeros del SIDI (UAM) y las personas encargadas del centro de visitantes de Peñalara. Y en especial a Carlos Edo y a Miguel González, ya que sin su ayuda este trabajo no habría visto la luz con este aspecto y sentido.

7. BIBLIOGRAFÍA

Allen, S., et al. (2019). "Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment." Nature Geoscience **12**(5): 339-344.

Ambrosini, R., et al. (2019). "First evidence of microplastic contamination in the supraglacial debris of an alpine glacier." Environmental Pollution **253**: 297-301.

Benítez, L. P. T., et al. (2007). "Acido poliláctico: Un plástico biodegradable a partir del almidón." Teknos revista científica.

Boyero, L., et al. (2020). "Microplastics impair amphibian survival, body condition and function." Chemosphere **244**: 125500.

Campanale, C., et al. (2020). "A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health." International Journal of Environmental Research and Public Health **17**(4): 1212.

Dris, R., et al. (2016). "Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?" Marine pollution bulletin **104**(1-2): 290-293.

Edo, C., et al. (2020). "Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge." Environmental Pollution **259**: 113837.

Edo, C., et al. (2019). "Occurrence and identification of microplastics along a beach in the Biosphere Reserve of Lanzarote." Marine pollution bulletin **143**: 220-227.

Free, C. M., et al. (2014). "High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake." Marine pollution bulletin **85**(1): 156-163.

Gasperi, J., et al. (2018). "Microplastics in air: are we breathing it in?" Current Opinion in Environmental Science & Health **1**: 1-5.

Gigault, J., et al. (2018). "Current opinion: What is a nanoplastic?" Environmental Pollution **235**: 1030-1034.

González-Pleiter, M., et al. (2020). "Fibers spreading worldwide: Microplastics and other anthropogenic litter in an Arctic freshwater lake." Science of the Total Environment: 137904.

Hitchcock, J. N. (2020). "Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems." Science of the Total Environment: 139436.

Jamieson, A. J., et al. (2019). "Microplastics and synthetic particles ingested by deep-sea amphipods in six of the deepest marine ecosystems on Earth." Royal Society open science **6**(2): 180667.

Karami, A., et al. (2018). "Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats." Science of the Total Environment **612**: 1380-1386.

Katsnelson, A. (2015). "News Feature: Microplastics present pollution puzzle." Proceedings of the National Academy of Sciences **112**(18): 5547-5549.

Kaya, A. T., et al. (2018). "Ubiquitous exposure to microfiber pollution in the air." The European Physical Journal Plus **133**(11): 488.

Lahens, L., et al. (2018). "Macroplastic and microplastic contamination assessment of a tropical river (Saigon River, Vietnam) transversed by a developing megacity." Environmental Pollution **236**: 661-671.

Liebezeit, G. and E. Liebezeit (2014). "Synthetic particles as contaminants in German beers." Food Additives & Contaminants: Part A **31**(9): 1574-1578.

Mendoza, L. M. R., et al. (2018). "Micro (nanoplastics) in the marine environment: current knowledge and gaps." Current Opinion in Environmental Science & Health **1**: 47-51.

Oßmann, B. E., et al. (2018). "Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water." Water research **141**: 307-316.

Pauly, J. L., et al. (1998). "Inhaled cellulosic and plastic fibers found in human lung tissue." Cancer Epidemiology and Prevention Biomarkers **7**(5): 419-428.

PlasticsEurope, E. (2019). *Plastics—the facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data*, Brussels Belgium.

Richards, A. J. (1992). The "Taraxacum" flora of the Sierra de Guadarrama and its surroundings (Spain). *Anales del Jardín Botánico de Madrid, Real Jardín Botánico*.

Rillig, M. C., et al. (2017). "Microplastic transport in soil by earthworms." Scientific reports **7**.

Schwabl, P., et al. (2019). "Detection of various microplastics in human stool: a prospective case series." Annals of internal medicine.

Silva-Cavalcanti, J. S., et al. (2017). "Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource." Environmental Pollution **221**: 218-226.

Steer, M., et al. (2017). "Microplastic ingestion in fish larvae in the western English Channel." Environmental Pollution **226**: 250-259.

Tamayo-Belda, M., et al. (2019). "Secondary nanoplastics released from a biodegradable microplastic severely impact freshwater environments." Environmental Science: Nano **6**(5): 1382-1392.

Thompson, R. C., et al. (2004). "Lost at sea: where is all the plastic?" Science **304**(5672): 838-838.

VishnuRadhan, R., et al. (2020). "Do atmospheric plastics act as fomites for novel viruses?"

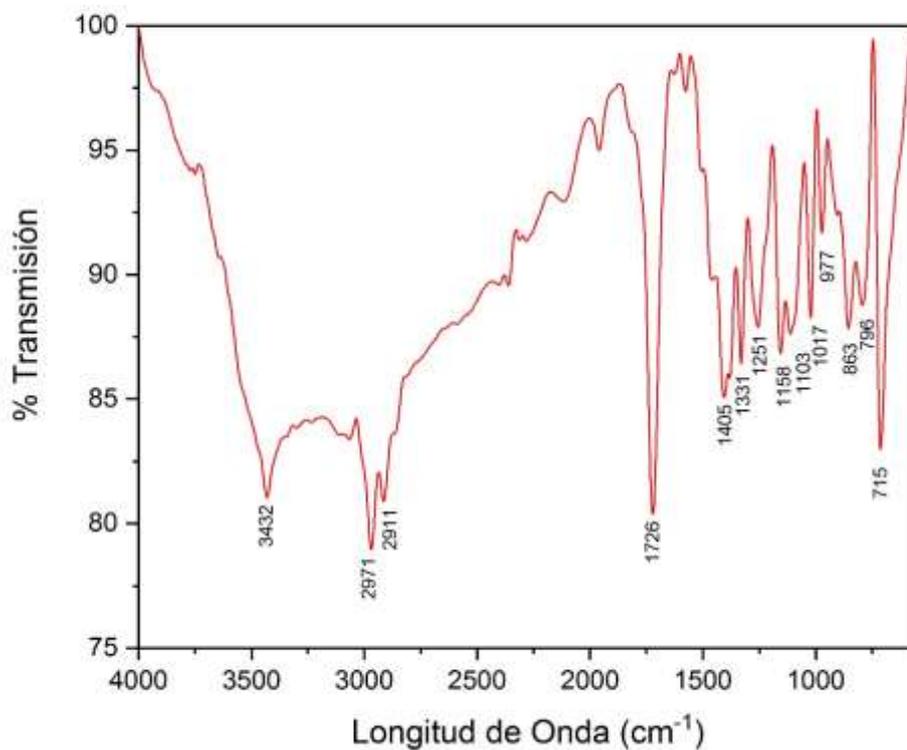
Woodall, L. C., et al. (2014). "The deep sea is a major sink for microplastic debris." Royal Society open science **1**(4): 140317.

Yang, D., et al. (2015). "Microplastic pollution in table salts from China." Environmental science & technology **49**(22): 13622-13627.

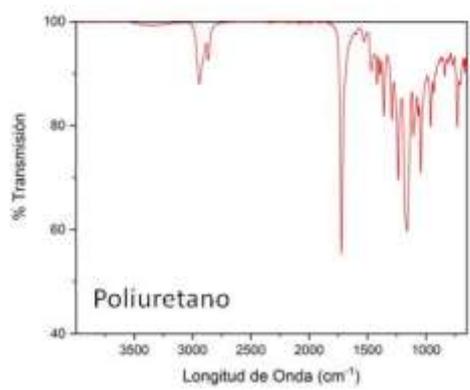
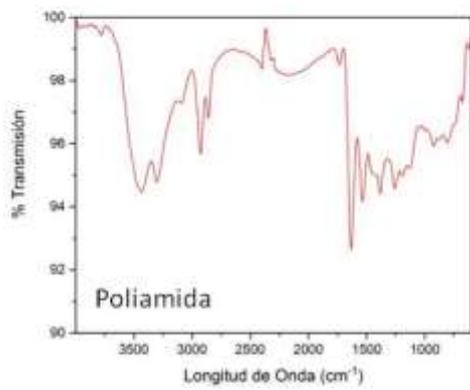
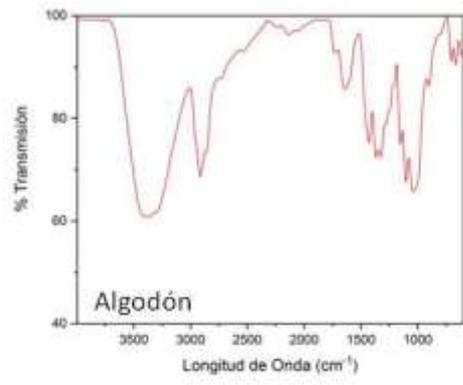
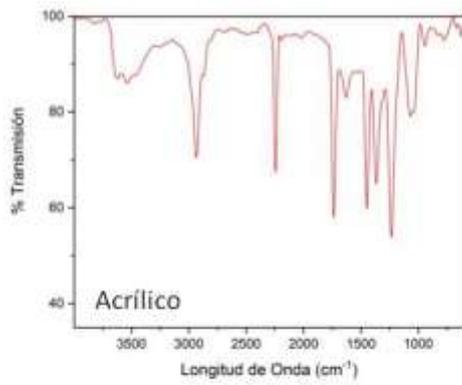
Zhang, Y., et al. (2019). "Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas." Environmental Pollution **254**: 112953.

ANEXOS

Anexo 1. Representación gráfica de los espectros de infrarrojo obtenidos



Muestra del espectro IR del Poliéster, el más común de los polímeros descritos en este trabajo.



Algunos espectros aparecidos en este trabajo.



Material particulado depositado en la pastilla de bromuro de potasio, listo para ser analizado.

Anexo 2. Aspecto visual de las muestras recolectadas

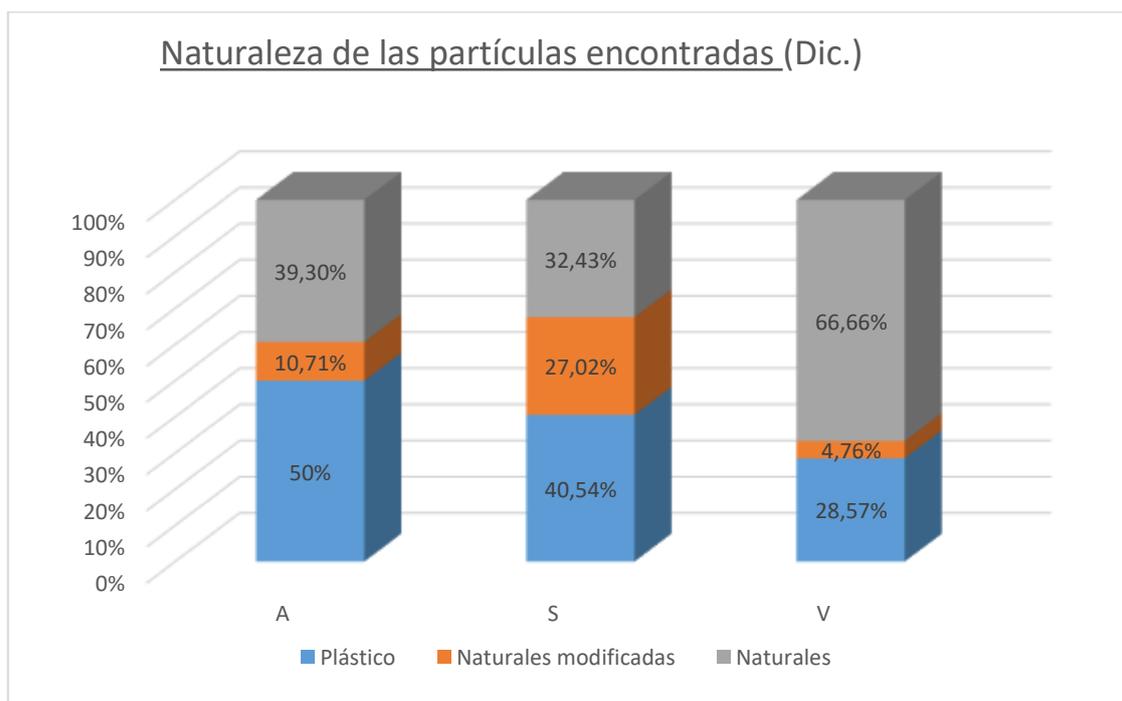
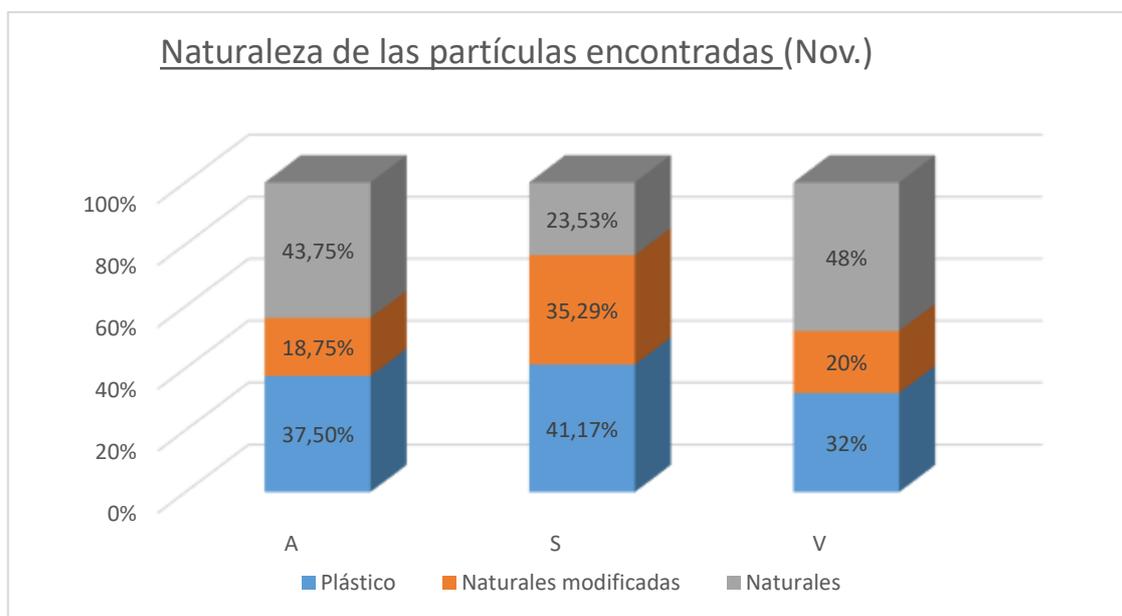


Anexo 3. Porcentaje de las partículas encontradas en cada puntos de muestreo atendiendo a su naturaleza

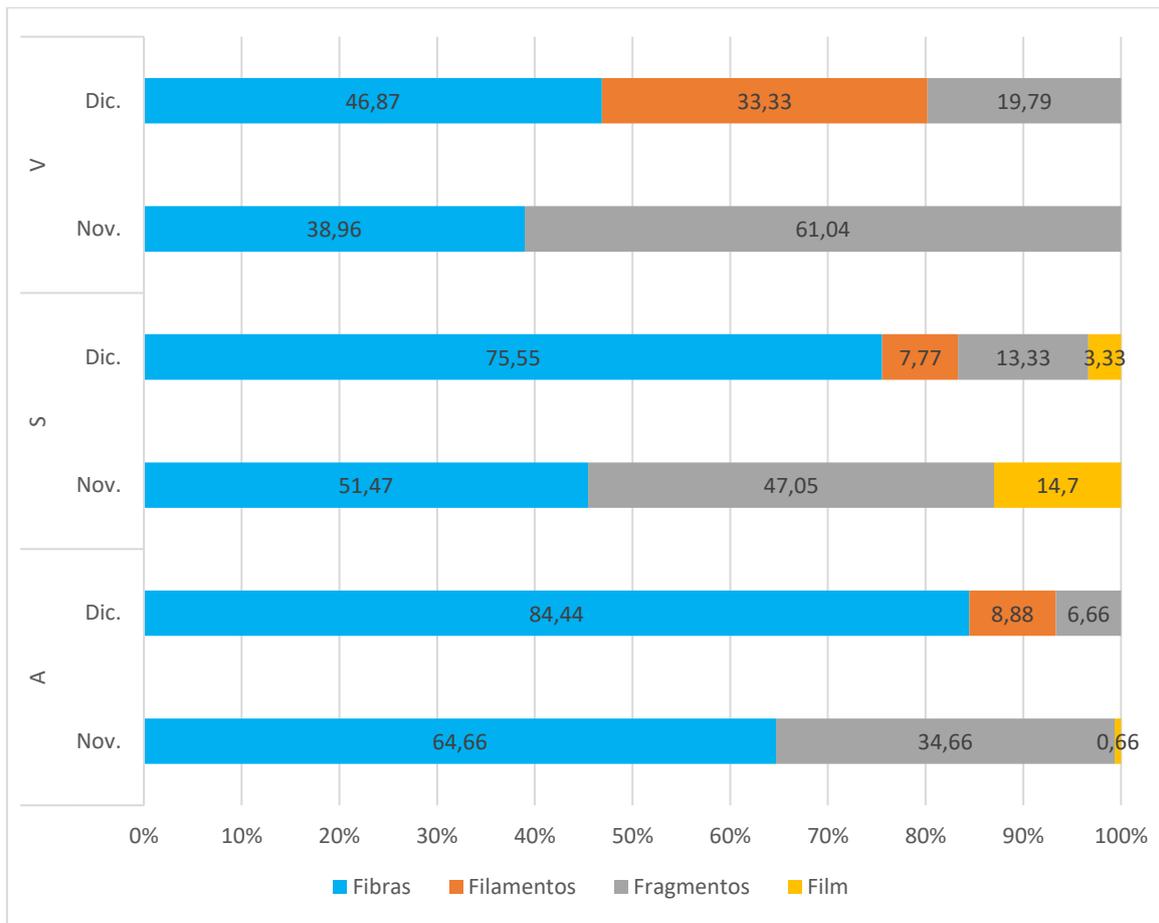
-Plástico: Partículas de origen antrópico, formadas por polímeros.

-Naturales modificadas: Partículas de origen natural, como lana o algodón, tintadas artificialmente.

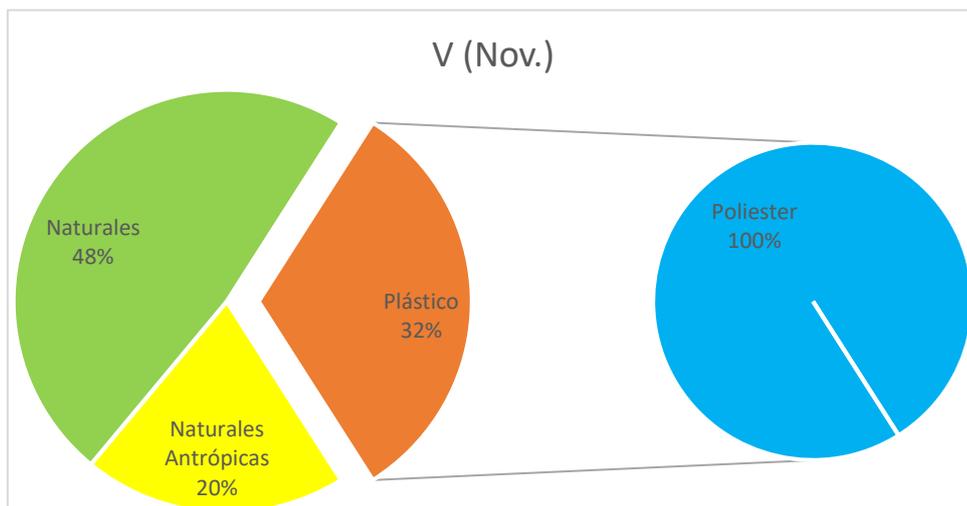
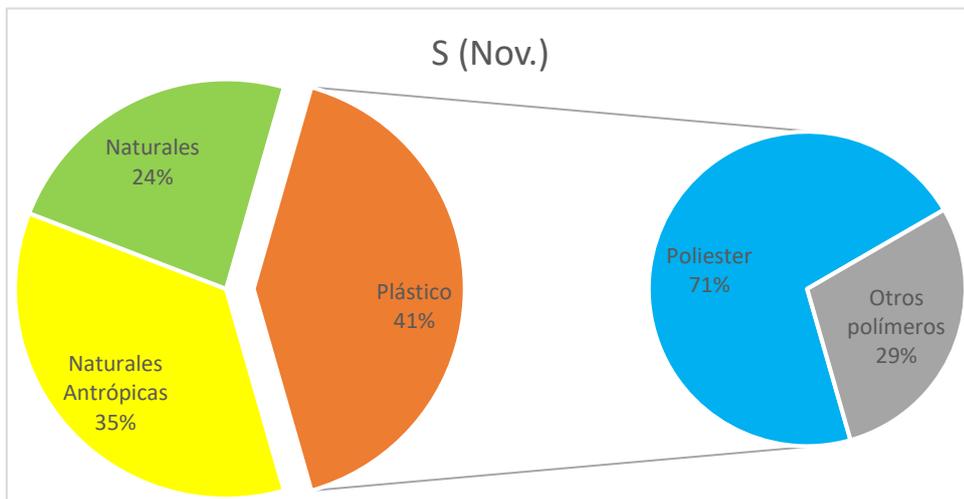
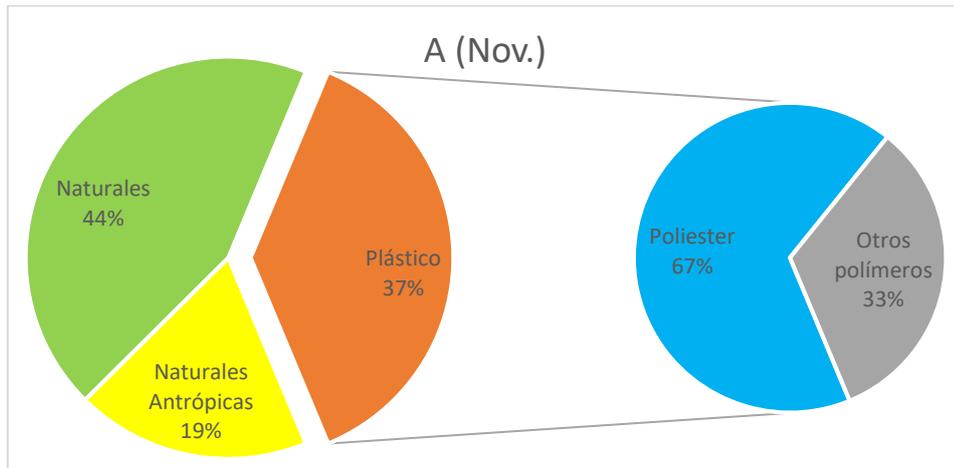
-Naturales: Partículas de origen natural sin tintar.

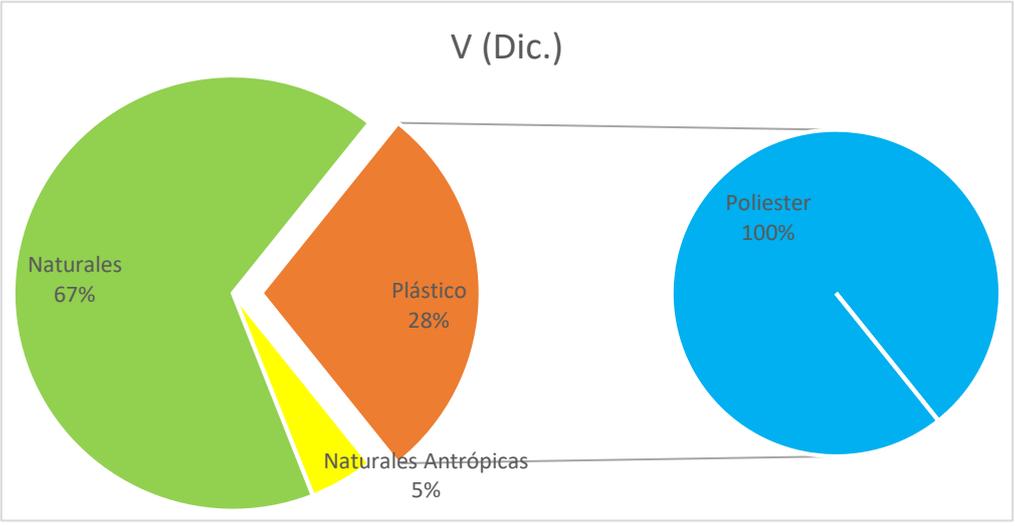
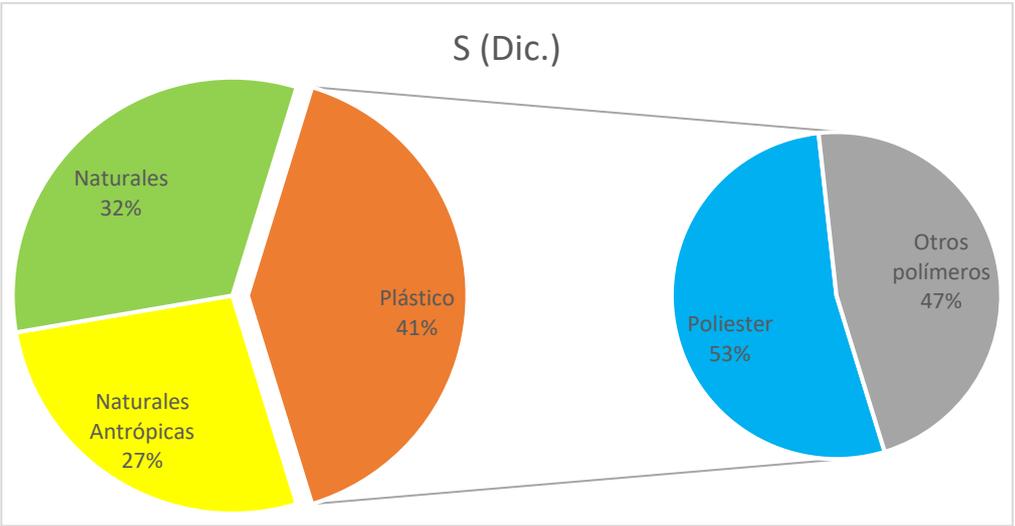
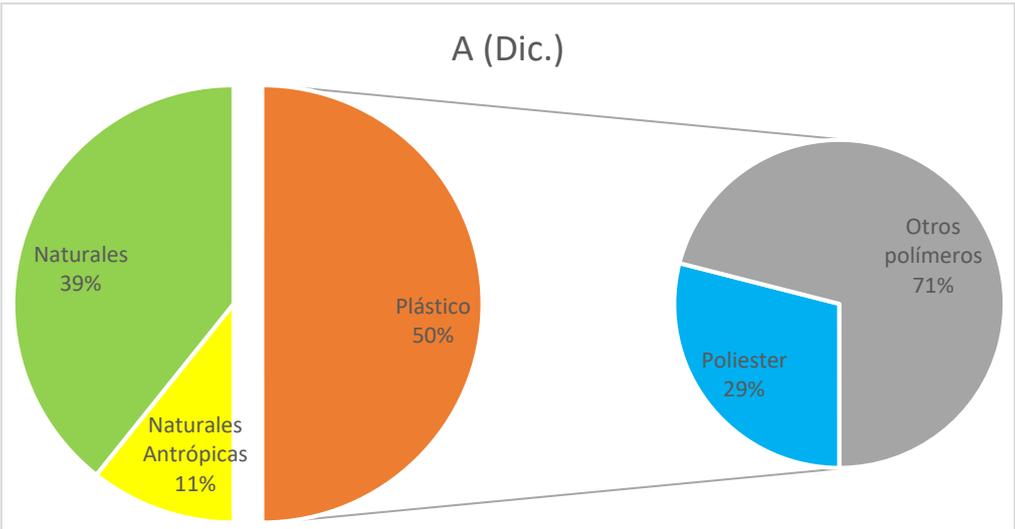


Anexo 4. Tipología de las partículas por cada punto de muestreo



Anexo 5. Distribución y naturaleza de los materiales encontrados en cada punto de muestreo





Anexo 6. Bibliografía actual con datos sobre la presencia de MP en ambientes alpinos.

LUGAR	CONCENTRACIÓN DE MP.	RANGO DE TAMAÑO	REFERENCIA
PN Sierra de Guadarrama (Madrid- SPAIN)	32,8 partículas/litro de nieve	De <0,3 mm hasta >5 mm	Este trabajo
Área montañosa remota del Pirineo francés	365 partículas/m ² al día (± 69 partículas)	<0,3 mm hasta 7,5 mm	Allen, Steve -2019
Lago remoto de agua dulce del Polo Norte	400 microparticles/m ² de sedimento	≤ 5 um	Gonzalez-Pleiter – 2020
Glaciar Forni, en los Alpes italianos.	74.4 \pm 28.3 partículas por cada kg de sedimento	-	Ambrosini Roberto - 2019