

Trabajo Fin de Estudios

Ciencias ambientales

Sensibilidad de los líquenes a la deposición
atmosférica y su uso como bioindicadores en
Aragón.

Sensitivity of lichens to atmospheric deposition and
their use as bioindicators in Aragon

Autora

Irene Garza Armengol

Directores

Andreu Cera Rull
Jorge Pey Betrán

Mentora

María Eugenia Marqués López

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
2021



AGRADECIMIENTOS

En especial, a mis directores, Andreu Cera y Jorge Pey, por permitirme realizar mi trabajo fin de estudios con dos grandes profesionales como ellos, por el conocimiento aportado en todo este mundillo y su implicación, ha sido un placer.

A mi ponente, María Eugenia Marqués, por el apoyo recibido y el interés mostrado tanto para este trabajo como durante toda mi carrera universitaria.

A todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado a lo largo de mi carrera. Especialmente a mis mejores amigas, Lorena y Ana, por ser mi apoyo fundamental. A Nieves y Juan por siempre creer en mí.

A mis padres, por darme la oportunidad de formarme y crecer tanto académica como personalmente. A mi hermana Lucía por estar siempre ahí.

Gracias a ellos todo ha sido mucho más fácil.



RESUMEN

La bioindicación es una técnica de evaluación de la calidad ambiental a partir de organismos o sistemas biológicos. Uno de los bioindicadores más utilizados son los líquenes, debido a su alta sensibilidad a alteraciones ambientales como la contaminación atmosférica. Estudios previos han mostrado fuertes contrastes en la composición de los aerosoles atmosféricos entre diferentes localidades de Aragón. En este sentido, este trabajo analiza la conexión entre la deposición atmosférica de aerosoles y las comunidades liquénicas epífitas (desarrolladas en los árboles) de 3 emplazamientos de la provincia de Huesca que muestran gradientes de deposición atmosférica contrastados: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, la ciudad industrial de Monzón y el entorno agrícola próximo a Almudévar. En las tres zonas se identificaron las diferentes especies de líquenes epífitos y se obtuvieron los valores de diversidad liquénica (LDV). Ordesa, como espacio natural con influencia mayoritaria del polvo sahariano, es el emplazamiento que mayor riqueza liquénica posee, con especies más sensibles a la perturbación y contaminación. Almudévar, posee una comunidad epífita más heterogénea, con especies moderadamente tolerantes a la eutrofización y perturbación. Monzón, en cambio, es el entorno donde la riqueza liquénica está dominada por especies más tolerantes a la contaminación por metales pesados. Los valores de LDV, no obstante, no son concluyentes per se a la hora de comprender el efecto individual de la deposición atmosférica sobre la comunidad liquénica puesto que los factores climáticos parecen ejercer un control dominante. Este trabajo me ha permitido estudiar los líquenes desde su aplicabilidad como bioindicadores, si bien he podido comprobar que es necesario conocer en detalle la fenomenología de los diferentes procesos atmosféricos que se producen en cada zona para poder explicar de una manera precisa el significado de la comunidad liquénica presente.

Palabras clave: líquenes, líquenes epífitos, deposición atmosférica, especies, Monzón, Almudévar, Ordesa.



ABSTRACT

Bioindication is a technique for assessing environmental quality based on organisms or biological systems. One of the most widely used bioindicators are lichens, due to their high sensitivity to environmental disturbances such as atmospheric pollution. Previous studies have shown strong contrasts in the composition of atmospheric aerosols between different locations in Aragon. In this sense, this work analyses the connection between atmospheric aerosol deposition and epiphytic (tree-developed) lichen communities in three sites in the province of Huesca that show contrasting atmospheric deposition gradients: the National Park of Ordesa and Monte Perdido, the industrial city of Monzon and the agricultural environment near Almudévar. In the three areas, the different epiphytic lichen species were identified and lichen diversity values (LDV) were obtained. Ordesa, as a natural area mainly influenced by Saharan dust, is the site with the greatest lichen richness, with species that are more sensitive to disturbance and pollution. Almudévar has a more heterogeneous epiphyte community, with species moderately tolerant to eutrophication and disturbance. Monzon, on the other hand, is the environment where the lichen richness is dominated by species more tolerant to heavy metal pollution. The LDV values, however, are not conclusive per se in understanding the individual effect of atmospheric deposition on the lichen community since climatic factors seem to exert a dominant control. This work has allowed me to study lichens from their applicability as bioindicators, although I have been able to see that it is necessary to know in detail the phenomenology of the different atmospheric processes that occur in each area to be able to precisely explain the significance of the lichen community present.

Key words: epiphytic lichens, atmospheric deposition, species, Monzon, Almudévar, Ordesa.



ÍNDICE

1	Introducción	9
1.1	Descripción y características generales	9
1.2	Líquenes epífitos y la bioacumulación.....	14
1.2.1	Características de los líquenes epífitos y sus factores determinantes ...	14
1.2.2	Bioindicación.....	17
1.3	Los aerosoles y su deposición atmosférica	19
2	Hipótesis y objetivos.....	22
2.1	Hipótesis	22
2.2	Objetivos generales	23
2.3	Objetivos específicos	23
3	Planificación/Metodología	23
3.1	Revisión bibliográfica	23
3.2	Localización y caracterización de las áreas de estudio	24
3.3	Compilación e interpretación datos atmosféricos	25
3.4	Técnicas de recolección/ muestreo y tratamiento de datos de biodiversidad liquénica	26
3.4.1	Metodología de muestreo.....	26
3.4.2	Análisis de datos.....	29
3.5	Proceso de identificación de líquenes	31
4	Resultados y discusión.....	32
4.1	Deposición atmosférica áreas de estudio	32
4.2	Líquenes.....	36
4.2.1	Listado de especies liquénicas	36
4.2.2	Valor de diversidad liquénica (LDV).....	37



4.2.3	Los líquenes epífitos como bioindicadores en Aragón	39
5	Conclusión.....	41
6	Bibliografía.....	42
	ANEXOS	45
	Anexo 1. Fotografías de las áreas muestreadas en cada emplazamiento.	45
	Anexo 2. Concentraciones de la fracción soluble e insoluble depositada en cada emplazamiento.	47
	Anexo 3. Plantilla y resultados trabajo de campo.....	49
	Anexo 4. Valores obtenidos de diversidad líquénica (VDL)	52



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipología, coordenadas y fechas de muestreo de cada emplazamiento estudiado. Fuente: elaboración propia	24
Tabla 2. Catálogo de especies epífitas identificadas en cada emplazamiento. Fuente: elaboración propia	37
Tabla 3. Flujo total de deposición soluble e insoluble.....	47
Tabla 4. Fracción soluble depositada en Monzón, Almudévar y Ordesa	47
Tabla 5. Fracción insoluble depositada en Monzón, Almudévar y Ordesa.....	48
Tabla 6. Plantilla de la frecuencia de cada especie en cada árbol y cada punto cardinal en Almudévar.....	49
Tabla 7. Plantilla de la frecuencia de cada especie en cada árbol y cada punto cardinal en Monzón.....	50
Tabla 8. Plantilla de la frecuencia de cada especie en cada árbol y cada punto cardinal en Ordesa.....	51
Tabla 9. Suma de frecuencias por árbol y punto cardinal y media de la suma de frecuencias y VDL en Almudévar.....	52
Tabla 10. Suma de frecuencias por árbol y punto cardinal y media de la suma de frecuencias y VDL en Monzón.	52
Tabla 11. Suma de frecuencias por árbol y punto cardinal y media de la suma de frecuencias y VDL en Ordesa.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales biotipos liquénicos. Fuente: Andreu Cera Rull y J.R. Carmichael.....	11
Figura 2. Estructuras de reproducción asexual de los líquenes. Fuente Ohio Plants.	13
Figura 3. Principales estructuras de reproducción sexual de los micobiontes. Fuente: Amadej Trmkoczy.....	13
Figura 4. Líquenes epífitos. Fuente: Andreu Cera Rull.....	14
Figura 5. Ubicación de las zonas de estudio entorno a la ciudad de Huesca. Fuente: Google maps.....	25
Figura 6. Esquema de un colector deposición atmosférica (izquierda) y colector real usado en la red DONAIRE (derecha). Fuente: Jorge Pey Betrán e Inés de la Parra.....	25
Figura 7. Ejemplo de aplicación del método de muestreo de líquenes epífitos. Fuente: Jorge Pey Betrán	27
Figura 8. Rejilla de 5 cuadrados de 10 x 10cm sobre tronco del árbol. Fuente: Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos (SSF).....	28
Figura 9. Escala LDV. Fuente Asta et al.	30
Figura 10. Lupa y método con el que se analizaron los líquenes. Fuente: Irene Garza Armengol	31
Figura 11. Visión de la organización del talo, estructuras sexuales y asexuales y el tipo e fotobionte desde la lupa del laboratorio. Fuente: Irene Garza Armengol.	32
Figura 12. Fracción soluble e insoluble depositada en cada emplazamiento	35
Figura 13. Representación de valores obtenidos para los emplazamientos de estudio en la escala de LDV. Fuente: Irene Garza Armengol.	38
Figura 14. Área muestreada de Almudévar. Fuente: Jorge Pey Betrán	45
Figura 15. Área muestreada de Monzón. Fuente: Irene Garza Armengol.....	45
Figura 16. Área muestreada en Ordesa. Fuente: Jorge Pey Betrán.....	46
Figura 17. Modelo de plantilla utilizado para anotar la frecuencia.	49



1 Introducción

1.1 Descripción y características generales

Los líquenes, u hongos liquenizados, son el resultado de una asociación simbiótica estable entre al menos dos organismos: un hongo (micobionte) y un organismo fotosintético (fotobionte), aunque puede albergar otros organismos como bacterias u hongos del género basidiomicetes. Los micobiontes son organismos heterótrofos que actúan como exhabitantes en la asociación, proporcionando un medio acuoso favorable para el fotobionte, protegiéndolo física y biológicamente frente a la radiación y desecación extrema, bacterias y hongos, además de absorber el agua y nutrientes necesarios para su desarrollo. Los fotobiontes, en cambio, son organismos autótrofos unicelulares que actúan como habitantes o endófitos. Los líquenes, pueden estar conformados o bien por una cianobacteria de color verde azulado, procariota, o bien por un alga verde, actuando como parte fotosintética y sintetizando los azúcares necesarios metabólicamente en la simbiosis. Se estima que el 92% de especies liquénicas posee como fotobionte un alga verde y solo un 8% está conformado por una cianobacteria (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Nash, 2008).

Cabe destacar el elevado número de especies fúngicas que actúan en esta asociación en comparación con el número de algas o cianobacterias. Aproximadamente 1500 especies fúngicas (una quinta parte de las especies conocidas) actúan como micobiontes en la simbiosis, principalmente Ascomicetes y algunos del grupo de los Basidiomicetes o Deuteromicetes. Sin embargo, únicamente unas 40 especies actúan como fotobionte, en donde 3 son los géneros más conocidos, dos de algas verdes, *Trebouxia* y *Trentepohlia*, y uno de cianobacteria, *Nostoc* (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Mares Rueda, 2017; Cubas, Núñez, Crespo y Divakar, 2010).

A partir de la asociación de estos dos simbioses se origina el talo, una estructura vegetativa estable, definida generalmente por el micobionte, que varía en estructura y fisiología dependiendo del grado de compatibilidad y equilibrio entre ambos biontes y su adaptación al medio en el que habitan, clasificándolos, de este modo, según su morfología

y fisiología, que otorgan unas características específicas para cada líquen (Amo de Paz y Burgaz, 2009; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

Según las características morfológicas externas encontramos 4 biotipos o formas de crecimiento en líquenes: foliáceos (en forma de hoja), crustáceos (forma de costra), fruticulosos (en forma de arbusto) y compuestos (dos talos: primario y secundario) (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Lillo Sánchez, 2018)

- Foliáceos (Figura 1, A). Tienen forma de hoja, están parcialmente unidos al sustrato, pudiendo separarse sin llegar a su rotura, y captan el agua tanto del sustrato como de la atmósfera. Poseen córtex inferior distinguido y en ocasiones ricinas o rizomorfos. Existen dos tipos: lobulados, prolongaciones en forma de lóbulo, como la especie *Lobaria*) y umbilicados, el talo se une por un ombligo, como la especie *Lasalia* (Ambrosio Mantilla y Bringas Becerra, 2017; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).
- Crustáceos (Figura 1, B). Es el tipo más tolerante, siendo capaces de colonizar medios con condiciones más extremas. Se caracterizan por ser líquenes fuertemente unidos al sustrato, carecen de córtex inferior y la mayoría son capaces de desarrollar el talo dentro de las rocas (como *Verrucaria*), bajo la cutícula de los vegetales (*Opegrapha*) o incluso algunos talos lobulados, (*Caloplaca*). Dentro de los crustáceos, podemos encontrar otras formas como las escamulosas, que tienden a separarse del sustrato por los bordes (Ambrosio Mantilla y Bringas Becerra, 2017; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).
- Fruticulosos (Figura 1, C). Tipo menos tolerante, su desarrollo está limitado a ambientes específicos y dependen además de la humedad relativa para su hidratación. Únicamente se encuentra unido al sustrato en un punto o superficie muy reducida a partir de un disco de fijación. Pertenecen a este grupo las especies *Usnea*, *Evernia* o *Ramalina* (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Lillo Sánchez, 2018)
- Compuestos (Figura 1, D). Talos con formas distintas: uno primario y otro secundario. El primario, unido al sustrato, puede ser de tipo foliáceo o crustáceo. El talo secundario (denominado podocio, donde se desarrollan los

cuerpos fructíferos, podrá ser simple o estar muy ramificado. Pertenecen a este grupo especies como *Cladonia* (Ambrosio Mantilla y Bringas Becerra, 2017; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003)

A) Foliáceo



B) Crustáceo



C) Fruticuloso



D) Compuesto



Figura 1. Principales biotipos líquénicos. Fuente: Andreu Cera Rull y J.R. Carmichael.

Y según la estructura anatómica del talo, encontramos dos grandes tipos: talos heterómeros u homómeros, que dependerán de la distribución anatómica y proporción en la que se encuentran los biontes.

- Heterómeros. Grupo más común, caracterizados por estar estratificados internamente, conformado por varias capas (córtex superior, fotobionte, médula y córtex inferior). En este grupo el micobionte ocupa la mayor parte del líquen y se encarga de construir parte de los tejidos estructurales y de formar las capas mencionadas, que se encuentran aglutinadas y no pueden individualizarse. En

cambio, el fotobionte queda reducido a ocupar una parte del líquen y construye, en el caso de las algas, una capa (capa algal) por debajo del córtex superior. Este córtex protege al fotobionte, y su grosor dependerá de las adaptaciones al medio, por ejemplo, en lugares con grado de insolación muy alta, el córtex será más grueso (Amo de Paz y Burgaz, 2009; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Cubas *et al.*, 2010).

- Homómeros. Su distribución es uniforme, la cianobacteria no tiene una organización tan estructurada y el alga está distribuida de forma prácticamente homogénea por toda la sección del cuerpo vegetativo del líquen (talo). Este tipo de estructura permite absorber importantes cantidades de agua de forma muy rápida, proporcionando anoxia a las bacterias y favoreciendo la fijación de nitrógeno. Estructura típica de los géneros *Leptogium* o *Collema* (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

En cuanto a su propagación, distinguimos reproducción sexual y asexual (o vegetativa), según las características propias de cada organismo, dado que se trata de biontes de reinos diferentes. De esta manera, el fotobionte se reproduce únicamente de manera asexual por fragmentación del talo o mediante propágulos vegetativos especializados, ubicados en estructuras denominadas soredios e isidios (Figura 2), englobadas en hifas que acaban desprendiéndose del talo y formando nuevos líquenes. Su identificación y diferenciación es sencilla puesto que los soredios carecen de córtex y los isidios presentan córtex y en muchas ocasiones están pigmentados. Por el contrario, el micobionte además es capaz de reproducirse sexualmente mediante esporas ubicadas en el interior de los ascos, en el extremo de una hifa fértil junto con otras hifas estériles (paráfisis), que se encargan de la ordenación y organización de los ascos para evitar solapamientos. Los ascos y paráfisis se agrupan en estructuras especializadas denominadas ascomas o ascocarpos, que según su forma se clasificaran en apotecios (ascomas abiertos) o peritecios (ascomas cerrados) (Figura 3) (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Calatayud, Corrales y Hernández, 2011)

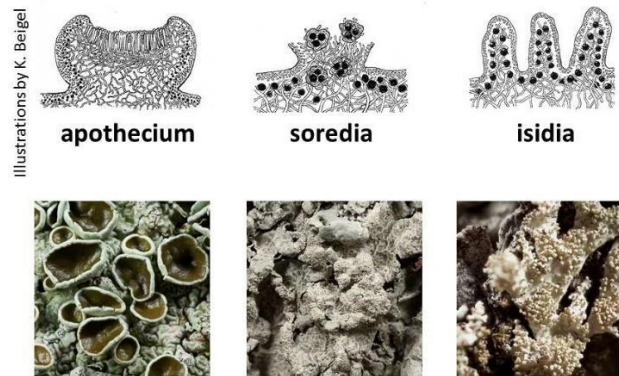


Figura 2. Estructuras de reproducción asexual de los líquenes. Fuente Ohio Plants.

A) Peritecios



B) Apotecios



Figura 3. Principales estructuras de reproducción sexual de los micobiontes. Fuente: Amadej Trmkoczy

Caracterizados por ser organismos cosmopolitas que se propagan en variedad de ambientes y sustratos, de este modo, se clasifican también según el sustrato sobre el que se asientan y colonizan en: líquenes saxícolas (si crecen en piedras y rocas), líquenes terrícolas (si crecen sobre el suelo), líquenes muscícolas (si crecen sobre musgos) y líquenes epífitos (ramas y troncos de los árboles), siendo estos últimos los más comunes y en los que se va a enfocar este trabajo (Cubas *et al.*, 2010; Torres Sánchez, 2019).

1.2 Líquenes epífitos y la bioacumulación

1.2.1 Características de los líquenes epífitos y sus factores determinantes

Epífito, denominación del griego *epi* que significa “sobre” y *phyte* “planta”, hace referencia a los líquenes que crecen sobre otras especies vegetales leñosas (árboles y arbustos), denominados forófito, que sirven como sustrato, pero sin llegar a alimentarse de él (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

Los líquenes epífitos (Figura 4) soportan unas condiciones diferentes al resto, puesto que, además de los factores ambientales generales, también se ven influidos por las condiciones particulares del forófito: fisiología, morfología y fenología de la planta. Más concretamente del espacio (tipo de planta, pH y altura en el que se instala) y el tiempo (crecimiento de la planta y formación de rugosidades y grietas que determinara su colonización). Lo que se traduce a que, en cada forófito se generan unas condiciones microclimáticas particulares y una diversidad liquénica muy específica con diversos nichos ecológicos y diferentes taxones según su grado de adaptación y tolerancia (Amo de Paz y Burgaz, 2009; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Cera y Pey, 2021).



Figura 4. Líquenes epífitos. Fuente: Andreu Cera Rull

Como factores ambientales generales encontramos la situación geográfica y las condiciones macro y micro climáticas características de cada ecosistema: disponibilidad



de agua y luz, temperatura, viento o deposición atmosférica. Estos factores ecológicos primarios determinarían y conformarían la comunidad líquénica (Amo de Paz y Burgaz 2009; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

La temperatura, dependiendo de la amplitud térmica, puede variar todos los demás factores ecológicos. No obstante, la fisiología líquénica confiere unas características que le permiten resistir a los extremos térmicos e hídricos. En un árbol las variaciones de temperatura dependerán de sus características: en árboles de corteza rugosa, situados en la cara norte, en un bosque estructurado o a una altura de unos 1,5 metros, las oscilaciones de temperatura serían mínimas, mientras que, en cortezas lisas, bosques aislados, cara sur de los árboles o zonas basales, las oscilaciones pueden ser importantes. Debe considerarse, además, que, por norma general, los árboles situados en el interior del bosque, a medida que un organismo asciende en posición por el tronco disminuye el efecto amortiguador del suelo respecto a la temperatura y humedad, mientras que aumenta la fuerza del viento y la evaporación. Sin embargo, la situación ocurre a la inversa en árboles aislados (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003; Mares Rueda, 2017).

La cantidad e intensidad de luz que recibe un árbol es un factor ecológico concluyente en el desarrollo líquénico. Ésta no es homogénea, sino que se crean diferentes niveles fóticos dependiendo de la incidencia lumínica que llega a las diferentes partes del árbol, distinguiendo 3 partes (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

- Zona con amplia incidencia de luz, como en los márgenes, en las copas o en árboles aislados, en donde se ubicarán organismos heliófitos y líquenes como *Ramalina*, *Evernia*, *Caloplaca*, *Lecanora* o *Usnea*, características de contener sustancias corticales como antratorina o ácido úsnico, confiriendo protección contra de la radiación excesiva (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).
- Zona intermedia, en donde la cantidad de luz que penetra concordará con las condiciones generales del territorio, por lo que la luz no será un factor limitante y la diversidad líquénica dependerá del resto de factores del medio (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).



- Zona con reducida o inexistente incidencia de luz, donde la cantidad que penetra es mínima o inexistente. Corresponden a zonas como el suelo, el interior del bosque o la zona base del tronco, aquí se encuentran ubicados los organismos esciófilos o nemorales y los líquenes con fotobionte cianofítico, más resistentes a la escasez de luz, que pueden sobrevivir a intensidades más bajas de luz, como *Lepraria*, *Chrysothrix*, *Phlyctis* o *Pertusaria* (Amo de Paz y Burgaz 2009; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

Como factores ambientales específicos encontramos el sustrato (corteza del árbol) y su acidez o basicidad. En la corteza, debemos considerar su textura (cortezas finas, suaves, duras, lisas o agrietadas), tonalidad e incluso su edad. Las cortezas de tonalidad oscura se calientan mucho más que las claras, las cortezas duras son más secas, las finas y suaves retienen más el agua y la evaporan rápidamente y la existencia de musgos y hepáticas constituyen un reservorio de agua (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

La edad del árbol determinará la textura de la corteza, de tal modo que cuando los árboles son más jóvenes poseen la corteza más fina, pero conforme envejecen ésta comienza a endurecerse y formar grietas, aumentando así la capacidad de retención de agua y polvo atmosférico. En los árboles jóvenes, con corteza reciente, predominan el tipo de líquen crustáceo, con especies pioneras como *Lecanora*, *Lecidea*, *Arthonia* o *Buellia*. En los árboles de mediana edad predomina el tipo foliáceo, con especies con estrategia competidora como *Parmelia*, *Plastimatia* o *Hypogymnia*. En los árboles más vetustos, caracterizados por disponer de una cantidad considerable de musgo, encontramos líquenes macrofoliáceos (como *Lobaria*, *Nephroma*, *Sticta* o *Pannaria*) o dimórfico de crecimiento lento (como *Cladonia*, y algunos de tipo escamuloso). Y en las cortezas muertas, que tienen una elevada capacidad de humectación y una reacción más ácida, encontramos líquenes lignícolas, con géneros diversos como *Calicium*, *Chaenotheca* o *Microcalcium* (Perez-Ortega, 2003).

El pH de la corteza varía en función de la especie arbórea. Se consideran de pH ácido los abedules, pinos y acebos, moderadamente ácido las hayas, encinas, melojos y robles y con un pH básico los arces, chopos, majuelos, fresnos y sauces. Existe una



proporcionalidad directa en cuanto al nivel de pH de la corteza y la diversidad de especies existentes, puesto que el rango de tolerancia liquénico a pH ácidos está limitado a géneros particulares, como *Lecanora* o *Xanthoria* (Amo de Paz y Burgaz 2009; Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).

1.2.2 Bioindicación

La bioindicación es una técnica de evaluación de la contaminación ambiental a partir de organismos integrantes de un ecosistema que, debido a sus características biológicas, presentan sensibilidad a cambios ambientales, siendo idóneos para identificar posibles alteraciones tanto a pequeña escala, en ecosistemas, como a mayor escala, en el contexto del cambio climático. El estudio y análisis de estos permitirá prevenir y evitar ciertas situaciones y consecuencias antes de que sean irreversibles, contribuyendo al alcance de los objetivos 13 y 15 del desarrollo sostenible (ODS): adopción de medidas para combatir el cambio climático y sus efectos y gestión sostenible de los bosques, lucha contra la desertificación, detenimiento e inversión de la degradación de las tierras y detenimiento de la pérdida de biodiversidad (Cera A., Pey J., 2021; ONU, 2021).

Esta técnica presenta numerosas ventajas frente a los métodos tradicionales de evaluación, puesto que además de no precisar equipos altamente sensibles con un coste tan elevado, tiene la capacidad de detectar las pequeñas alteraciones que pueden producirse en el medio, lo que incluye el componente temporal, al residir permanentemente en ese ecosistema integrando y acumulando las condiciones ambientales del presente, pasado y futuro (Mares Rueda, 2017; Vázquez Fentanes, 2015). De este modo, entendemos por bioindicador al organismo o sistema biológico sensible a las variaciones ambientales, que permite determinar los niveles y/o fluctuaciones de un contaminante en el aire debido a sus patrones de distribución, por su sensibilidad a determinadas concentraciones del contaminante (Mares Rueda, 2017).

Los líquenes epífitos, son actualmente, uno de los organismos más utilizados para este método, puesto que al ser organismos poiquilohídricos, absorben todas las sustancias contenidas en el medio (bioacumuladores) y dependiendo de la especie y su tolerancia,



sufrirán cambios estructurales, anatómicos en el talo, fisiológicos o biológicos, incluso terminar desapareciendo (Mares Rueda, 2017; Vásquez Fentanes, 2015).

No obstante, no todas las especies presentan el mismo grado de tolerancia o sensibilidad. Por lo que, identificando las especies que habitan en un ecosistema y sus características, podremos determinar el grado de salubridad de un área o ecosistema. En las zonas potencialmente contaminadas, ya sea por la explotación antropogénica a la que están sometidas o por recepción de sustancias de otras áreas fuentes de emisión de contaminantes, dispondrán de especies menos sensibles y más tolerantes. La especie epífita considerada por excelencia el mejor bioindicador de zonas contaminadas es *Straminella conizaeoides*, (Nyl. ex Cromb.) S.Y. Kondr., Lőkös & Farkas, especie acidófila, utilizada como bioindicador en áreas industriales y urbanas con alto grado de contaminación debido a su alto grado de tolerancia (Mares Rueda, 2017).

Los ambientes o zonas nitrófilas, están vinculadas con el sector industrial, agrícola o ganadero, en donde predominaran aquellas especies más tolerantes a los compuestos nitrogenados, como son las especies *Cladonia portentosa*, Dufour Coem o *Hypogymna physodes*, (L.) Nyl, consideradas las mejores especies bioindicadoras de este contaminante. En cambio, especies sensibles como *Lobarina scrobiculata*, (Scop.), Nyl. ex Cromb, acabarán por desaparecer de este ecosistema o incluso inexistir (De la Parra, 2018; Vásquez Fentanes, 2015).

Zonas con alta concentración de metales pesados, suelen corresponder con zonas urbanas, por la actividad antrópica asociada al tráfico rodado o a actividades industriales. Para determinar si un emplazamiento se encuentra con niveles alto de contaminación por metales pesados, debemos identificar géneros como *Candelariella*, *Lecanora* o *Caloplaca*, resistentes a la concentración excesiva de estos (Mares Rueda, 2017).

Ambientes con alta concentración de azufre, asociadas a procesos de combustión, al transporte marítimo y a emisiones de complejos petroquímicos, se localizan especies tolerantes como *Straminella conizaeoides*, que puede soportar concentraciones de hasta 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ de SO_2 , y algunas menos tolerantes como *Flavoparmelia caperata* (L.) y



Usnea cuyos límites oscilan entre 40 y 30 $\mu\text{g m}^{-3}$ de SO_2 , respectivamente (Cubas *et al.*, 2010; De la Parra, 2018).

De este modo, podemos comprobar que, atendiendo a la diversidad liquénica y a sus patrones de distribución, podremos distinguir ambientes con distinto grado de salubridad.

1.3 Los aerosoles y su deposición atmosférica

Los aerosoles atmosféricos son el conjunto de partículas, sólidas y/o líquidas, coloidales, de entre 0,001 y 100 μm de tamaño, que se encuentran en suspensión en la atmósfera junto con otros gases (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono o argón). (Baró, Jiménez, Palacio; 2014; Pey; 2015). Los aerosoles pueden ser primarios o secundarios según los mecanismos por los que se introducen en la atmósfera. Los aerosoles primarios son aquellos emitidos directamente a la atmósfera, mientras que los secundarios se forman en la atmósfera a partir la interacción de los primarios (tanto gases como partículas), por procesos químicos o fotoquímicos. A escala planetaria, encontraríamos un predominio de las partículas de origen primario procedentes de las masas marinas y el polvo mineral, emitido desde zonas desérticas (Palacios Peña *et al.*, 2014; Pey, 2015).

Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas a partir de procesos naturales o de fuentes antrópicas. Las emisiones naturales provienen de fuentes como la erosión eólica, las erupciones volcánicas, los incendios forestales, las emisiones biogénicas o de la superficie marina, generando diversos aerosoles como el polvo mineral arrastrado por el viento, el humo provocado por incendios, el polen y esporas, o las sales marinas. En cambio, las emisiones antrópicas proceden de procesos de combustión, incineración de residuos domésticos y agrícolas, calefacciones o por el tráfico (rodado, aéreo, marítimo, etc.) y el desgaste de vehículos y pavimentos, dando lugar a aerosoles como el humo emitido por las centrales termoeléctricas o por la quema de biomasa, las emisiones industriales o el smog urbano. (De la Parra, 2018; Palacios Peña *et al.*, 2014).

Una vez en la atmósfera, pueden persistir durante días o semanas, según su tamaño y composición, ser transportados por masas de aire y finalmente depositados, bien por vía húmeda, a partir de su incorporación en la precipitación (actuando como núcleos de



condensación de nubes) o arrastrados por las diferentes formas de precipitación (lluvia, nieve o granizo), o por vía seca por acción del viento o sedimentación gravitacional (Palacios Peña *et al.*, 2014; De la Parra, 2018).

En el caso de la Península Ibérica, se dan tres situaciones de manera frecuente que controlan la variabilidad y composición de los aerosoles atmosféricos presentes: las advecciones atlánticas, el transporte de polvo sahariano y las situaciones de recirculación regional de masas de aire. En menor medida se registran situaciones de advección desde el continente europeo y fenómenos de transporte de masas de aire desde la zona mediterránea de carácter sinóptico (Palacios Peña *et al.*, 2014; De la Parra, 2018).

Los aerosoles afectan negativamente a la salud humana, incrementando la mortalidad por diferentes causas y también los ingresos hospitalarios. Además, los aerosoles tienen impactos de diferente índole en el sistema climático, la hidrosfera y la biosfera. Además de diferentes procesos de nutrición en ecosistemas (aportes de nitrógeno, fósforo, hierro u otras sustancias), algunos aerosoles atmosféricos pueden ser nocivos para las especies que habitan en un determinado ecosistema. Por ejemplo, un nutriente como el nitrógeno, en dosis excesivas, puede originar acidificación o eutrofización en ciertos ecosistemas. De igual modo, la transferencia excesiva de metales pesados y otras sustancias que pueden llegar a inhibir la actividad biológica de ciertos organismos. Sin embargo, muchos aerosoles tienen efectos positivos en los ecosistemas, como el polvo africano que actúa como fertilizante en la selva tropical o el transporte de plumas de polvo mineral que aportan hierro en estado libre y fósforo (Palacios Peña *et al.*, 2014; De la Parra, 2018; Pey, 2015).

En la Península Ibérica, las regiones próximas a las cuencas del Mediterráneo y Atlántico muestran contribuciones desde fuentes naturales y antrópicas bastante homogéneas debido a la contribución del aerosol marino, cuya presencia se atenúa drásticamente hacia el interior peninsular. En estas regiones más interiores la contribución de fuentes antrópicas es, en términos relativos, más importante (De la Parra, 2018). En Aragón se registran fuertes contrastes a nivel climático, orográfico, demográfico y en las actividades socioeconómicas que tienen un reflejo evidente en la composición de los



aerosoles atmosféricos. Así, la atmósfera más pulverulenta se localiza en todo el Valle del Ebro dado que los usos del suelo de esta zona, junto con la fuerte aridez de la región y el régimen de vientos predominante favorece la emisión de grandes cantidades de partículas minerales. Además, en este sector se localiza la capital de la región y gran parte del tejido industrial, por lo que las emisiones de origen antrópico son variadas y mucho más abundantes que en otras zonas de la comunidad (De la Parra, 2018).

Y más específicamente, en las zonas estudiadas en este trabajo, Almudévar, Monzón y Ordesa, en el contexto del proyecto DONAIRE, se determinó la contribución de cada fuente al aerosol atmosférico, según su tipología de emplazamiento. En total, se identificaron 7 factores o fuentes de contaminación, clasificadas en naturales (polvo sahariano, polvo regional y aerosol marino) y antrópicas (polvo regional, tráfico, industria, combustión de fueloil y mezcla de emisiones agropecuarias e industriales). En el caso del polvo mineral regional se incluyó en ambos grupos, puesto que su origen puede proceder tanto de fenómenos naturales como por actividades antrópicas urbanas. (De la Parra, 2018; Pey, 2015). Las diferentes fuentes y sus trazadores químicos fueron las siguientes:

1. Tráfico de vehículos. Principalmente trazado por cobre, antimonio, cromo, bario, aluminio, níquel y en menor medida amonio.
2. Polvo mineral, de origen sahariano. Los principales trazadores son el titanio, hierro y aluminio.
3. Polvo mineral de origen regional. Con partículas de calcio y bicarbonato y en menor medida el arsénico.
4. Combinación de actividad agrícola y ganadera con industria. Emitiendo partículas de plomo, potasio, sílice, y en menor medida níquel, amonio, cromo y fosfato.
5. Combustión de fuel oil, procedente centrales térmicas y petroquímicas, y también, en zonas costeras, del transporte marítimo. Caracterizado por vanadio y níquel, y en menor medida por sulfatos.
6. Industrial. Principalmente trazado por cinc y manganeso.
7. Marino. Partículas de sodio, cloro y en menor medida sulfatos marinos derivados de la oxidación del sulfuro de dimetilo.



De entre los observatorios considerados en este trabajo, la fuente de emisión predominante fue: en Ordesa, el polvo sahariano y la combustión de fueloil que, sin producirse en las proximidades, se transporta a medias y largas distancias hasta este enclave; en Monzón, la actividad agrícola e industrial de carácter local-regional; y en Almudévar, el polvo sahariano y el polvo regional. Se comprobó como en los emplazamientos urbanos, aunque sean de pequeñas dimensiones como el caso de Monzón, se registra mayor carga de deposición de contaminantes que en zonas remotas próximas, cuya diferencia se atribuye al propio aporte de la ciudad o ciudad industrial (De la Parra, 2018).

2 Hipótesis y objetivos

2.1 Hipótesis

La hipótesis principal de nuestro estudio es que los líquenes epífitos pueden considerarse organismos bioindicadores de la deposición atmosférica, puesto que ésta puede modular la formación de las comunidades de líquenes epífitos. Por tanto, deberíamos apreciar diferencias en las comunidades de líquenes epífitos según la disimilar distribución de la deposición atmosférica en los 3 emplazamientos, ya descrita en Aragón. Así, en base a la cantidad y composición de la deposición atmosférica, esperamos que las comunidades epífitas de Almudévar y Ordesa tenga más diversidad liquénica y se asemejen entre ellas, por tener similar cantidad de deposición atmosférica, y encontremos menor diversidad y más diferencia con las comunidades de Monzón, ya que el origen de la deposición en este último emplazamiento viene de una actividad de origen industrial local, además de registrar importantes contribuciones del sector agrícola y ganadera.



2.2 Objetivos generales

- Estudiar la deposición atmosférica en Aragón.
- Examinar la relación existente entre los líquenes epífitos y el gradiente atmosférico en Aragón.
- Conocer y emplear los líquenes como bioindicadores de la calidad ambiental.

2.3 Objetivos específicos

- Recopilar la bibliografía más relevante sobre el origen, tipos y ciclo de los aerosoles atmosféricos concentrados en la región de Aragón y sus posibles efectos.
- Recopilar la bibliografía más relevante sobre la sensibilidad de los líquenes epífitos y sus formas vitales en relación a la calidad del aire.
- Realizar un estudio de bioindicación con líquenes en zonas características de Aragón con diferente deposición atmosférica, en concreto Almudévar, Monzón y Ordesa.
- Identificar los factores que regulan la distribución y la proporción de líquenes en Aragón, atendiendo sobre todo al aspecto climático y de calidad del aire.
- Calcular el valor de diversidad líquénica en los 3 emplazamientos y relacionar el valor obtenido con las características de cada emplazamiento.

3 Planificación/ Metodología

3.1 Revisión bibliográfica

Realicé la recopilación bibliográfica líquénica relativa a características morfológicas, reproductoras, formas de crecimiento, diversidad y taxonomía, e incorporé en esta parte los conocimientos y consejos recibidos por parte de mis directores. Igualmente, consulté diferentes artículos sobre contaminación atmosférica y el uso de líquenes como bioindicadores, que me ha servido para tener un conocimiento general y específico de las áreas de estudio de esta memoria. La recopilación bibliográfica me ha servido para escribir la introducción del Trabajo Final de Estudios. En última instancia completé el

análisis bibliográfico con el trabajo experimental, discutiendo a continuación los resultados obtenidos.

3.2 Localización y caracterización de las áreas de estudio

Para el diseño experimental de este estudio se seleccionaron 3 áreas en la provincia de Huesca: Ordesa, Monzón y Almudévar (Figura 5, Anexo 1). Emplazamientos que cuentan con estaciones de monitorización de la deposición atmosférica y que presentan diferente tipología (Tabla 1).

Monzón y Almudévar son emplazamientos más meridionales con condiciones meteorológicas similares de temperatura y precipitaciones (Cera y Pey, 2021). Monzón cuenta con una población de 17.469 habitantes (INE,2020), situada a 270 m de altitud con un carácter continental, con una temperatura media anual que alcanza los 14,2 °C y una precipitación que ronda los 511 mm (IAEST, 2020). Almudévar, cuenta una población de 2.377 habitantes (INE, 2020), a 456 m de altitud, con una temperatura media anual de 13,5 °C y una precipitación anual de 4238 mm (IAEST, 2020).

En cambio, el emplazamiento del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido se encuentra lejos de cualquier núcleo de población, siendo el más próximo Torla, con una población de 298 habitantes (INE, 2020). El entorno de monitorización se sitúa a una altitud de 1200 m, y es el emplazamiento más septentrional de entre los tres estudiados, con condiciones climáticas claramente distintas (Cera y Pey, 2021): precipitación mucho más elevada (1459 mm/año) y una temperatura media de 11,3 °C (IAEST, 2020), aunque presenta temperaturas muy bajas en invierno, siendo frecuentes las heladas y poca incidencia de la radiación solar.

Tabla 1. Tipología, coordenadas y fechas de muestreo de cada emplazamiento estudiado. Fuente: elaboración propia.

Emplazamiento	Tipología	Coordenadas	Fecha
Ordesa	Remoto	42°38'49.8"N 0°03'22.9"W	05/04/2021
Monzón	Industrial	41°55'02.0"N 0°12'01.4"E	16/04/2021
Almudévar	Agrícola	42°07'32.9"N 0°38'03.9"W	16/04/2021

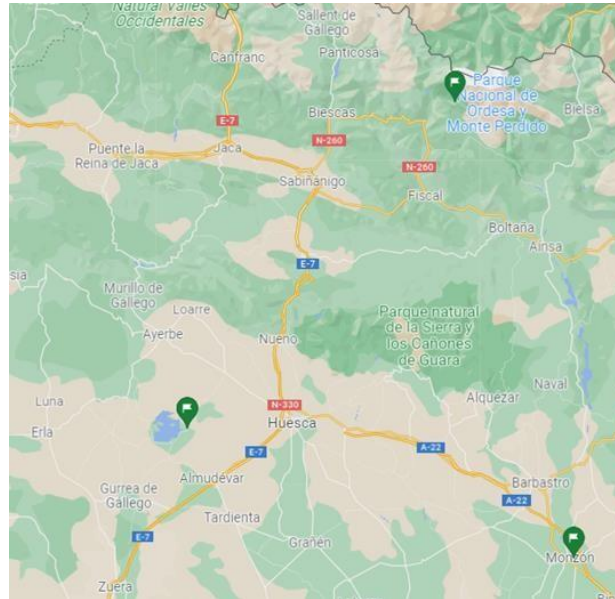


Figura 5. Ubicación de las zonas de estudio entorno a la ciudad de Huesca. Fuente: Google maps.

3.3 Compilación e interpretación datos atmosféricos

La toma de muestras de deposición de aerosoles se realiza mediante colectores sencillos y caseros (Figura 6), conformados por un tanque opaco en donde se almacena el material en un bidón de 10 L, conectado a un embudo de entre 26 y 35 cm de diámetro por un tubo de silicona, elevados al menos 2 metros del suelo para minimizar la influencia de la resuspensión local (De la Parra, 2018).

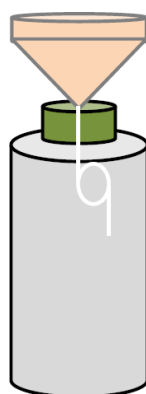


Figura 6. Esquema de un colector deposición atmosférica (izquierda) y colector real usado en la red DONAIRE (derecha). Fuente: Jorge Pey Betrán e Inés de la Parra



Cada 15 días durante junio 2016 y junio 2017, y posteriormente cada 30 días, se retiraba la muestra acumulada en el bidón de 10 L, se anotaba la fecha y hora de recogida, y se reemplazaba el bidón por uno nuevo. En general, antes de este proceso se usaba una cantidad conocida de agua bi-destilada (500 mL) para limpiar el embudo con ayuda de un pincel de plástico. Este paso se obviaba si el embudo estaba muy limpio debido a una lluvia reciente. Cada muestra recogida se transportaba al laboratorio, donde se realizaban diferentes procesos: 1) determinación del volumen, pH y conductividad; 2) filtrado mediante el uso de una rampa de filtración, usando para ello filtros de microfibras de cuarzo de 47 mm de diámetro previamente pesados; 3) acondicionamiento posterior de los filtros en desecador durante dos días y determinación del peso final mediante el uso de una microbalanza de precisión; determinación de la concentración de la fracción insoluble depositada por unidad de superficie, la masa de sólido retenido en los filtros se divide por la superficie del embudo utilizado en el muestreo; obtención de una alícuota de 250 mL que se deriva al laboratorio de análisis para determinar la concentración de aniones y cationes en disolución, y algunos metales pesados. Finalmente, el flujo de deposición total de cada muestra incluirá la suma de todas las concentraciones de especies solubles más el material insoluble acumulado en los filtros (De la Parra, 2018; Pey, 2015).

3.4 Técnicas de recolección/ muestreo y tratamiento de datos de biodiversidad liquénica

3.4.1 Metodología de muestreo

Se realizó un muestreo integral de la comunidad epífita los días 5 de abril de 2021 en Ordesa y el día 16 del mismo mes en Monzón y Almudévar, siguiendo la metodología estandarizada (Asta *et al.*, 2002). Para el muestreo se seleccionó un área determinada para muestrear 10 árboles que recogieran una muestra representativa de toda la zona, evitando aquellas áreas que hayan sido alteradas o pudiera existir influencia de factores locales (Figura 7). Las características idóneas para la selección de árboles fueron las siguientes:

- Árboles de la misma especie, para garantizar mismas condiciones de sustrato, con diámetro superior a 13cm y que no presentarán inclinación.

- La edad del árbol. Se localizaron árboles viejos, puesto que en los árboles jóvenes las cortezas son más finas y recientes y no representan o acumulan las condiciones de la zona. En cambio, con el paso del tiempo se comienzan a agrietar y entonces la retención de agua o de polvo atmosférico es mayor, recogiendo las condiciones del área y del dinamismo natural de las comunidades (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003).
- pH de la corteza y especie seleccionada. Recomendable la elección de especies arbóreas con corteza básica o moderadamente ácidas, como hayas o robles, puesto que árboles con pH ácido como pinos o abedules, influencia el dinamismo liquénico debido a la sensibilidad de algunas especies al efecto acidificante. (Barreno, Perez, 2003)
- Evitar partes dañadas, decorticadas del tronco, partes con nudos, con huellas de filtraciones después de la lluvia o con más del 25% de cobertura de briófitas (Asta *et al.*, 2002).



Figura 7. Ejemplo de aplicación del método de muestreo de líquenes epífitos. Fuente: Jorge Pey Betrán

Una vez se seleccionaron los árboles a muestrear, hayas en el caso de Ordesa y encinas en Monzón y Almudévar, se geolocalizaron y se identificó las especies contenidas en cada árbol con ayuda de una lupa y una cuadrícula de 50 x 10 cm, dividida en 5

cuadrados de 10 x 10 cm (Figura 7 y 8), que se colocó a 1,2-1,5 m por encima del punto más alto del suelo y en las 4 caras del árbol (o puntos cardinales), en caso de ubicarla en una parte del tronco que no sea adecuada para su muestreo, se podía reubicar los segmentos del cuadrante con un desplazamiento máximo de 20° en el sentido de las agujas del reloj, tal y como especifica la metodología estandarizada (Asta *et al.*, 2002).

Las especies identificadas en cada árbol y en cada cara se anotaban en una plantilla (Anexo 3) y se realizaron fotografías y recogida de muestras por si fueran necesarias posteriormente. Se clasificaron según su familia, forma vital (crustáceo, foliáceo, fruticuloso o dimórfico) y según el tipo de fotobionte (alga verde, *Trentepohlia* o cianobacteria). Una vez identificados, se determinó su sensibilidad ambiental y otras características basadas en los datos extraídos del sistema de información líquénico italiano, Italic 6.0.

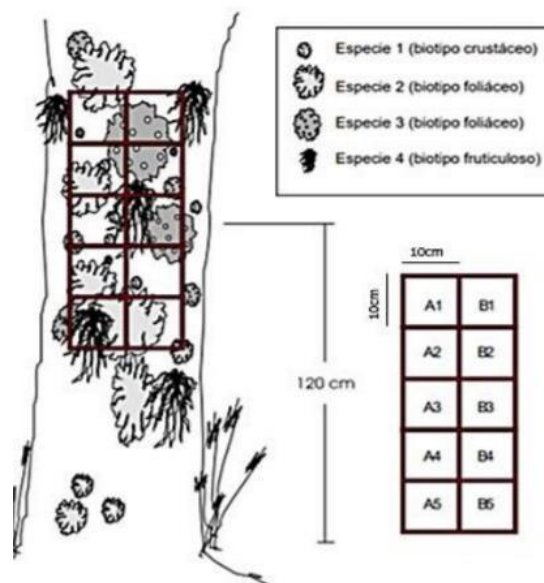


Figura 8. Rejilla de 5 cuadrados de 10 x 10cm sobre tronco del árbol. Fuente: Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos (SSF)



3.4.2 Análisis de datos

Los diversos cálculos y análisis estadísticos se han realizado usando la composición de especies identificadas con la cuadrícula (datos de presencia), y la cobertura calculada visualmente en el campo (datos de abundancia), con el fin de determinar el LDV (siglas en inglés de *Lichen Diversity Value*).

3.4.2.1 Valor diversidad líquénica (LDV)

El valor de diversidad de líquenes (LDV) de una unidad de muestreo es un estimador estadístico que puede utilizarse para estudiar la variación temporal del estrés ambiental en una misma zona o para comparar la calidad ambiental de diferentes áreas (Asta et al, 2016). El valor de diversidad obtenido (LDV_j) se interpreta según la escala alemana (Asta et al., 2002) que asigna evaluaciones verbales y códigos de colores para caracterizar los diferentes niveles de diversidad de líquenes y para garantizar una evaluación crítica de los proyectos. De este modo, la diversidad puede valorarse como muy alta, alta, moderada, baja o muy baja. No obstante. Si el valor obtenido está entre dos categorías, su expresión verbal de ambas categorías se combina y los códigos de color se somborean, ver ejemplo figura 9 (Asta et al., 2002).

De este modo, valores de LDV muy bajos indican una diversidad líquénica muy reducida, típico de zonas alteradas con unas condiciones ambientales desfavorables, mientras que valores de LDV altos (>60) diversidad líquénica alta, típico de ambientes naturales con unas condiciones favorables (Figura 9) (Asta et al, 2002).

Este valor es válido para todas las especies, a excepción de algunos pequeños líquenes crustáceos que son particularmente difíciles de identificar y / o se pasan por alto fácilmente tanto en el campo como en laboratorio. Cuando esto ocurra, se aconseja incluirlos en el cálculo de la diversidad como "Sp. Nr. X", estableciendo que no son formas dañadas o poco desarrolladas pero se encuentran en el cuadrante (Asta et al, 2016).

El método para calcular esta variable se divide en 3 pasos,

1. Sumar las frecuencias de todas las especies epifitas en cada cara del árbol (i). Así, para cada árbol hay cuatro sumas de frecuencias SF_{iN}, SF_{iE}, SF_{iS}, SF_{iW} (Anexo

2) (Asta *et al.*, 2002). Se realiza en cada cara debido a que pueden existir diferencias sustanciales en el crecimiento de líquenes en diferentes lados de los troncos (Asta *et al.*, 2002).

- Para cada punto cardinal, se realiza la media aritmética de las sumas de frecuencias (MSF) para la unidad de muestreo j (Anexo 3). De este modo:

$$MSFN_j = (SF1N_j + SF2N_j + SF3N_j + SF4N_j + \dots + SFnN_j) / n$$

En donde:

MSF: Media de las sumas de frecuencias de todos los árboles de la unidad j en un cada punto cardinal

SF: Suma de las frecuencias de todas las especies en un punto cardinal del árbol i

N, E, S, W: norte, este, sur, oeste

n : número de escaleras con una exposición determinada en j

- Se suma los MSF obtenidos de cada aspecto y el resultado es el valor de diversidad de líquenes de una unidad de muestreo j (LDV $_j$) (Anexo 4)

$$LDV_j = (MSFN_j + MSFE_j + MSFS_j + MSFW_j)$$

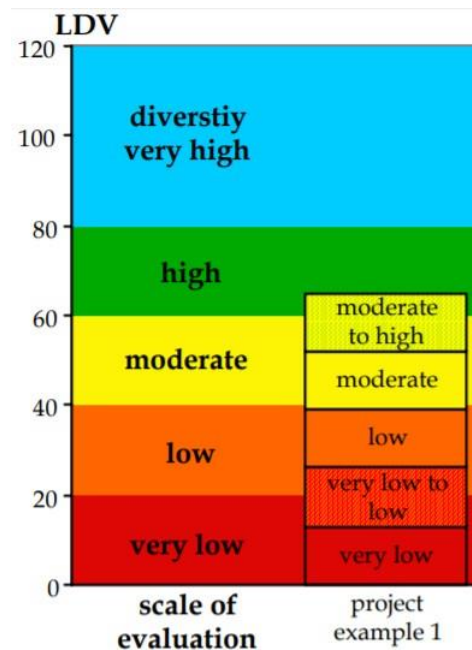


Figura 9. Escala LDV. Fuente Asta *et al.*

3.5 Proceso de identificación de líquenes

La identificación *in situ* de muchas especies se puede realizar con una pequeña lupa que permitía diferenciar diferentes especies según su estructura y color. No obstante, se realizó un análisis más preciso en laboratorio, con ayuda de una lupa, para identificar caracteres anatómicos, sustancias contenidas, estructuras de reproducción y tipo de fotobionte y micobionte. El trabajo de campo fue realizado por mí misma y mis dos directores, mientras que la identificación en laboratorio fue realizada por Andreu Cera.

Realizamos una primera aproximación en el campo, se identificó el biotipo o forma de crecimiento y su fijación, ya sea crustáceo, foliáceo, fruticuloso o dimórfico, según las características definidas anteriormente. Una segunda valoración, con la lupa del laboratorio del IPE-CSIC Jaca (Figura 10), para verificar el tipo y especie de la que se trata y determinar aquellos caracteres que no han podido ser determinados a simple vista: la organización del talo (homómero o heterómero), el tipo de hongo (discos o ascomicetes) y sus estructuras reproductoras sexuales como basidiomas, ascomas, apotecios (lecanorinos o lecideínos), peritecios, esporas (ascoesporas) y esporangios (ascos), y sus estructuras asexuales como la identificación de soledios, isidios o conidios. Y el tipo de fotobionte, distinguiendo entre algas verdes unicelulares (clorolíquenes), *Trentepohlia* y cianobacterias (cianolíquenes) (Nash, 2008)



Figura 10. Lupa y método con el que se analizaron los líquenes. Fuente: Irene Garza Armengol

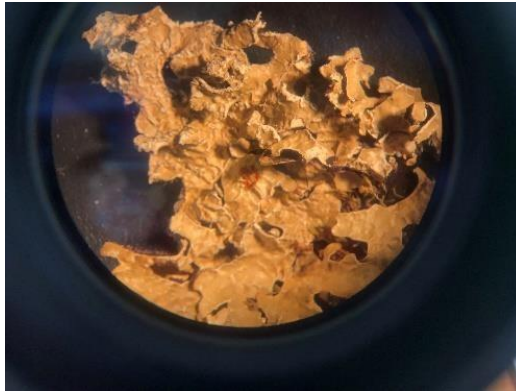


Figura 11. Visión de la organización del talo, estructuras sexuales y asexuales y el tipo e fotobionte desde la lupa del laboratorio. Fuente: Irene Garza Armengol.

4 Resultados y discusión

4.1 Deposición atmosférica áreas de estudio

Si analizamos los flujos de deposición que se registran en la zona de estudio (Anexo 2), podemos distinguir la fracción soluble o fase acuosa y la fracción insoluble. La primera puede, además, agruparse en 4 subgrupos: especies nitrogenadas (NO_2^- , NO_3^- y NH_4^+), diferentes metales, incluyendo metales pesados (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V y Zn), cationes (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+}) y otros aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_2). La fracción insoluble (Anexo 2) o fase sólida retenida en el filtro podemos dividirla en elementos minerales mayoritarios (K, Ca, Al, Fe, Na y Mg, Ti), metales pesados, materia orgánica y hollín (De la Parra, 2018; Pey *et al.*, 2020).

Realizando una comparación global entre los 3 emplazamientos y sus fracciones solubles e insolubles (Anexo 2) se obtuvieron valores totales de flujos de deposición soluble e insoluble muy similares (Anexo 2), controlados por la deposición de aerosoles carbonosos orgánicos (materia orgánica y hollín) en la fracción insoluble, y por el bicarbonato en la fracción soluble (Pey *et al.*, 2020). Destacan también las elevadas concentraciones de materia mineral depositadas, que se asocian tanto con fuentes de origen local-regional como con el transporte de polvo desde el Norte de África.



En la fracción soluble el bicarbonato (HCO_3^-) es el compuesto más abundante, con concentraciones anuales superiores a los 8000 mg/m² en todos los emplazamientos (ver Figura 12) cuyo origen está asociado tanto al polvo mineral de origen regional (antrópico en su mayoría), como al transporte de las masas de polvo de origen norteafricano. Además, puede comprobarse como el HCO_3^- es incluso mayor en Ordesa que en los dos emplazamientos del Valle del Ebro, y es que según Pey *et al.* (2020), la Cordillera Pirenaica actúa como una barrera natural (efecto Föhn) que fuerza la deposición de gran parte del polvo sahariano que viaja hacia el Norte, cuando el transporte de éste está generado por la acción de bajas presiones al Oeste de Iberia. Los resultados analizados muestran, además, que la concentración de SiO_2 se acentúa en Monzón debido a la contribución local procedente de las industrias que fabrican mineral de silicomanganeso y que se ubican allí ([Ferroglobe, Monzón](#)). El fosfato (PO_4^{3-}) se relaciona con ciertas fuentes de combustión y con fertilizantes agrícolas, y de hecho las mayores tasas de deposición se observan en Almudévar debido a la combinación de actividad agrícola y ganadera. Para el sulfato, (SO_4^{2-}), relacionado con la actividad industrial y los procesos de combustión de carbón, petróleo y metalurgia, encontramos concentraciones elevadas que oscilan entre los 700 y 900 mg/m², siendo mayor en Ordesa, donde no existen estas fuentes en las proximidades, pero este enclave sí es receptor de distintos contaminantes naturales y no naturales emitidos en zonas lejanas. Y, por último, el Cl^- , que se asocia al aerosol marino y en menor medida a emisiones industriales (De la Parra, 2018; Pey *et al.*, 2020).

Las especies nitrogenadas (NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+) de la fracción soluble ascienden a un total de 1505 mg/m² en Monzón, 1975 mg/m² en Almudévar y 1468 mg/m² en Ordesa. Estos compuestos secundarios tienen origen principalmente antrópico, formados en la atmósfera a partir principalmente de fuentes regionales y parte locales, como el tráfico rodado, procesos industriales a alta temperatura y de generación eléctrica o centrales petroquímicas. La contribución mayoritaria es de NO_3^- , debido a procesos de combustión, seguida de NH_4^+ , con concentraciones más elevadas en la zona de Almudévar, debido a la agricultura, por la adición de fertilizantes nitrogenados al suelo (De la Parra, 2018; Garzón y Cárdenas, 2013; MITECO, 2021).



El resto de la fracción catiónica la componen mayoritariamente K^+ , Ca^{2+} , Na^+ y Mg^{2+} , Ca^{2+} y Mg^{2+} , de origen principalmente sahariano, aunque también con influencia regional, lo que explicaría que las máximas concentraciones de estos compuestos se encuentren en Ordesa; Na^+ es trazador del aerosol marino (aunque también puede relacionarse con ciertos suelos salinos en áreas del Valle del Ebro), su baja concentración se debe a la localización peninsular de los emplazamientos y la lejanía a áreas de suelos salinos. El K^+ se considera como un buen trazador de la combustión de biomasa, muchas veces asociada a actividades de gestión de residuos agrícolas, lo que explicaría que la máxima concentración de este compuesto se encuentre en Monzón (De la Parra, 2018; Pey *et al.*, 2020).

En cuanto a la fracción insoluble, destacan las elevadas concentraciones de materia orgánica y hollín. La materia orgánica en forma de aerosol está constituida por fragmentos vegetales, granos de polen, y partículas secundarias formadas a partir de compuestos orgánicos volátiles. Se encuentra en concentraciones de entre 3000 y 5000 mg/m², lo que representa el 60% del total de la fracción insoluble. En cambio, el carbono elemental (EC), hollín, se encuentra en concentraciones de entre 300 y 800 mg/m², siendo la más elevada en Monzón, debido al impacto de los procesos industriales, al tráfico rodado y a la quema de biomasa de origen local (De la Parra, 2018; Pey *et al.*, 2020).

Dentro de los elementos minerales mayoritarios se encuentran el Al, Ca, Fe, K, Mg, Na y Ti. En condiciones normales incluiríamos dentro de este grupo también al Mn, pero las emisiones industriales de este elemento en la ciudad de Monzón, procedentes de la producción de mineral de silico-manganeso, hacen que haya sido excluido de este agrupamiento y que se haya considerado como un metal pesado. De entre los elementos mayoritarios destacan el Al y el Fe, ambos fuertemente asociados a intrusiones de polvo africano. De hecho, las concentraciones más elevadas se registran en Ordesa, al igual que sucede con el cómputo del polvo sahariano por el mencionado efecto Föehn, donde el Al alcanza una concentración de 1388 mg/m², y el Fe unos 700 mg/m² (De la Parra, 2018; Pey *et al.*, 2020). El resto de componentes, aun siendo parte de la fracción mineral muchas veces asociada al polvo sahariano o a la resuspensión de polvo de origen local y regional, se registran en concentraciones más bajas.

Cabe mencionar, por último, la diferencia de deposición metales pesados en la fracción soluble respecto a la insoluble (Figura 12). En la fracción soluble asciende a un total de 58,3 mg/m² en Monzón, 11,1 mg/m² en Almodévar y 19,5 mg/m² en Ordesa, mientras que en la fracción insoluble asciende a 410,5 mg/m², 30,3 mg/m² y 43,2 mg/m², respectivamente, siendo Monzón el emplazamiento con mayor concentración de metales pesados (De la Parra, 2018; Pey *et al.*, 2020).

Dentro de los metales pesados, destacan el Ba, Cu, Mn y Zn. El Ba se asocia tanto a procesos de combustión como a material mineral de origen regional y el Zn a procesos de combustión y fundición de la industria metalúrgica, alcanzando las mayores concentraciones de Ba de 7,4 mg/m² en Ordesa, seguido de 6,7 mg/m² en Monzón, y concentraciones de Zn de 15 mg/m² en Ordesa y 10,4 mg/m² en Monzón. El Cu, por otra parte, además de tener origen industrial, también se encuentra asociado a la actividad agrícola debido al uso de fertilizantes y plaguicidas y al tráfico rodado, con la concentración más elevada de 2,36 mg/m² en Monzón. Sin embargo, el metal pesado por excelencia es el Mn, en Monzón de origen claramente industrial, que alcanza concentraciones muy superiores (385 mg/m²) en comparación con el resto de emplazamientos (10-12 mg/m²) (De la Parra, 2018; Pey *et al.*, 2020).

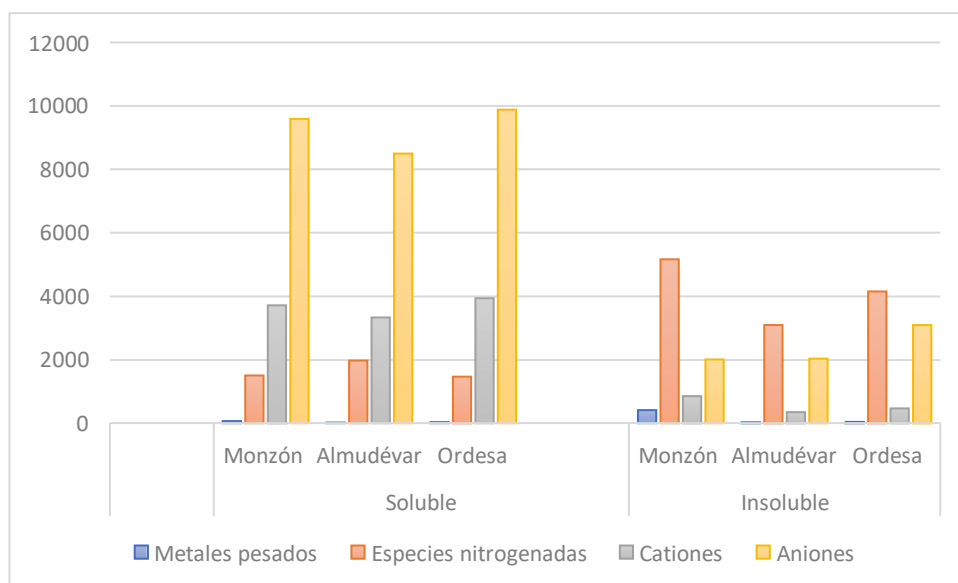


Figura 12. Fracción soluble e insoluble depositada en cada emplazamiento

4.2 Líquenes

4.2.1 Listado de especies líquénicas

En las 3 áreas estudiadas se encontraron un total de 23 especies de líquenes epífitos (Tabla 2). En Almudévar se han identificado un total de 10 especies, en Monzón 9 y en Ordesa 11. Encontramos 3 formas de crecimiento en las especies identificadas: la mayoría de tipo crustáceo, en concreto 24 especies, 6 especies de tipo foliáceo y sólo 1 de tipo fruticuloso. Todas las especies a excepción de una, *Graphis scripta* (L.) Ach, presentan como fotobionte género *Trentepohlia*, el resto de especies se consideran algas verdes.

Todas las localidades tienen *Lecanora chalotera* Nyl, especie crustácea distribuida por todo el continente, especie acidófila caracterizada por su elevada tolerancia a la contaminación atmosférica, común en áreas perturbadas y con distintos grados de eutrofización. Almudévar y Monzón comparten 6 especies, *Diplotomma alboatrum* (Hoffm.) Flot, *Candelariella aurella* (Hoffm.) Zahlbr, *Physcia adscendens* H. Olivier, *Physconia distorta* (With.) J.R. Laundon, *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., además de *Lecanora chalotera* Nyl. Todas ellas se caracterizan por crecer tanto en áreas perturbadas y ambientes eutrofizado, como en áreas naturales con alta radiación solar y cortezas con pH básico o moderadamente ácido.

En Ordesa encontramos especies como *Ramalina farinacea* (L.) Ach, *Arthopyrenia analepta* (Ach.) A. Massal, *Graphis scripta* (L.) Ach o *Lecanora circumborealis* Brodo & Vitik, con alta sensibilidad a la contaminación atmosférica, se desarrollan en ambientes naturales más oligotróficos con baja tolerancia a la eutrofización. En Almudévar especies como *Bacidia rubella* (Hoffm.) A. Massal o *Catillaria lenticularis* (Ach.) Th. Fr, típicas de ambientes naturales o semi perturbados, especies menos sensibles y de mayor resistencia a la eutrofización. En Monzón encontramos especies tolerantes, típicas de áreas perturbadas o eutrofizadas, con alto grado de resistencia a la contaminación atmosférica por metales pesados, como *Amandinea punctata* (Hoffm.) Coppins & Scheid o *Flavoplaca citrina* (Hoffm.) Arup, Frödén & Søchting.

Tabla 2. Catálogo de especies epífitas identificadas en cada emplazamiento. Fuente: elaboración propia.

Especie	Almudévar	Monzón	Ordesa
<i>Amandinea punctata</i> (Hoffm.) Coppins & Scheid		X	
<i>Arthopyrenia analepta</i> (Ach.) A. Massal.			X
<i>Bacidia rubella</i> (Hoffm.) A. Massal.	X		
<i>Blastenia ferruginea</i> (Huds.) A. Massal.	X		
<i>Candelariella aurella</i> (Hoffm.) Zahlbr.	X	X	
<i>Catillaria lenticularis</i> (Ach.) Th. Fr.	X		
<i>Diplotomma alboatrum</i> (Hoffm.) Flot.	X	X	
<i>Flavoplaca citrina</i> (Hoffm.) Arup, Frödén & Søchting		X	
<i>Graphis scripta</i> (L.) Ach.			X
<i>Lecanora allophana</i> (Ach.) Nyl			X
<i>Lecanora chalotera</i> Nyl.	X	X	X
<i>Lecanora circumborealis</i> Brodo & Vitik.			X
<i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.		X	
<i>Lecanora pulicaris</i> subsp. <i>rhododendri</i> (Harm.) Clauzade & Cl. Roux			X
<i>Lecidella elaeochroma</i> (Ach.) M. Choisy			X
<i>Lepra amara</i> (Ach.) Hafellner	X		
<i>Melanohalea olivacea</i> (L.) O. Blanco, A. Crespo, Divakar, Essl., D. Hawksw. & Lumbsch			X
<i>Parmelia sulcata</i> Taylor			X
<i>Pertusaria flavida</i> (DC.) J.R. Laundon			X
<i>Physcia adscendens</i> H. Olivier	X	X	
<i>Physconia distorta</i> (With.) J.R. Laundon	X	X	
<i>Ramalina farinacea</i> (L.) Ach.			X
<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.	X	X	
TOTAL	10	9	11

4.2.2 Valor de diversidad líquénica (LDV)

Los valores de frecuencias obtenidos a partir de los datos de las plantillas fueron 37.4 (Monzón), 34.33 (Almudévar) y 24.2 (Ordesa) (Anexo 4). En la Figura 13 pueden observarse las categorías en las que se encuentran ubicados los LDV para cada emplazamiento. Ordesa presenta el valor más bajo de diversidad líquénica y Monzón, en cambio, es el emplazamiento que presenta el valor de LDV más alto. Estos resultados son opuestos a la hipótesis de partida, que suponía que Monzón, al ser la zona más contaminada e influenciada por la actividad humana, debería presentar un LDV más bajo, limitado a especies tolerantes a las condiciones ambientales de la zona.

Por el contrario, Ordesa, debería ser el emplazamiento con mayor LDV, con especies tanto tolerantes como aquellas con mayor sensibilidad a la perturbación y contaminación (como las de tipo fruticuloso) al considerarse el área menos contaminada y natural de los 3 emplazamientos. El bajo valor de LDV obtenido en Ordesa puede deberse, probablemente, a la suma de las condiciones ambientales, condiciones ambientales duras, con bajas temperaturas y poca radiación solar, y al tipo sustrato sobre el que se desarrollan, hayas con una corteza más difícil de colonizar debido a su poca rugosidad

Se ha podido comprobar en este trabajo que el LDV no solo atiende al efecto de la deposición atmosférica sobre la comunidad líquénica, sino que está condicionado preferentemente, en la zona de trabajo elegida, por otros factores como las condiciones climáticas y por tanto no sería adecuado como proxy de calidad ambiental en esta región de ambientes climáticos tan contrastados.

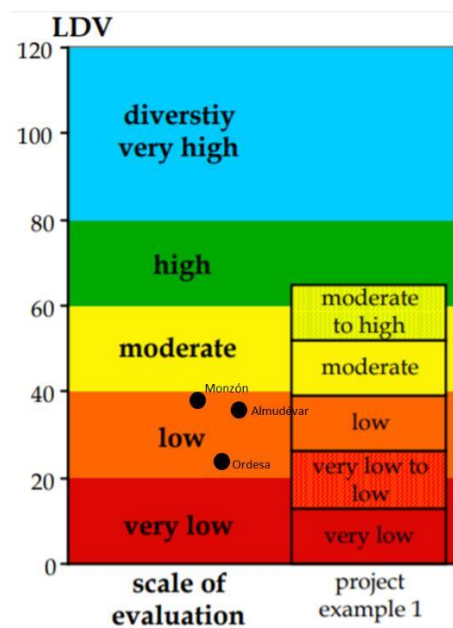


Figura 13. Representación de valores obtenidos para los emplazamientos de estudio en la escala de LDV.

Fuente: Irene Garza Armengol.



4.2.3 Los líquenes epífitos como bioindicadores en Aragón

Uno de los objetivos del trabajo es comprobar la viabilidad del uso de líquenes epífitos como bioindicadores de la deposición atmosférica en Aragón. La metodología utilizada en este estudio para el muestreo de líquenes epífitos en los 3 emplazamientos ha consistido en el muestreo e identificación de especies y en el cálculo del LDV. En el caso del estudio de las especies ha permitido obtener resultados representativos de la biodiversidad líquénica en Monzón, Almudévar y Ordesa según el tipo de emplazamiento y usos del suelo. Sin embargo, los valores obtenidos de LDV no permiten la comprensión del efecto que tiene la deposición atmosférica sobre la comunidad líquénica, debido a la influencia de las condiciones climáticas, por lo que se considera necesario un estudio preliminar de las especies.

Mediante la composición de las comunidades y su forma vital se ha podido diferenciar entre diferentes tipos de emplazamiento. En total se han identificado 23 especies de líquenes epífitos, con 19 especies de líquenes crustáceos, 4 de líquenes foliáceos y 1 fruticulosos. En primer lugar, Monzón, con una deposición de origen local por su carácter industrial, fue el emplazamiento que menor riqueza líquénica presentó, con especies de líquenes tolerantes a la contaminación y característicos de ambientes eutrofizados, como *Amandinea punctata* (Hoffm.) Coppins & Scheid, *Flavoplaca citrina* (Hoffm.) Arup, *Frödén & Sjøchting* o *Lecanora pulicaris* (Pers.) Ach. En segundo lugar, Almudévar, emplazamiento agrícola con una deposición local y regional con influencia del polvo mineral sahariano, presenta una comunidad epífita más heterogénea, con especies moderadamente tolerantes a la eutrofización y perturbación, características tanto de áreas perturbadas como de naturales. Sin embargo, la mayor riqueza y cobertura de especies se encontró en Ordesa, considerado espacio natural o remoto en donde la deposición atmosférica es mayoritariamente debido a la influencia de polvo mineral sahariano, albergando especies con mayor sensibilidad ambiental como *Graphis scripta* (L.) Ach o incluso de tipo fruticuloso, *Ramalina farinacea* (L.) Ach.

La hipótesis de partida suponía que las comunidades epífitas de Almudévar y Ordesa debían ser semejantes por el tipo de deposición atmosférica, pero se ha demostrado



errónea. La comunidad líquénica de Almudévar se asemeja mucho más a la comunidad epífita de Monzón que a la de Ordesa, mostrando las dos comunidades del Valle del Ebro una variedad de especies con mayor tolerancia a ambientes perturbados y eutrofizados. La explicación puede residir en dos motivos: 1) las condiciones climáticas son más importantes a la hora de favorecer un tipo de comunidad frente a otro, y por ello Monzón y Almudévar son semejantes entre ellas, y contrastan claramente con respecto a Ordesa o, 2) la mayor deposición atmosférica de especies nitrogenadas en Almudévar, que ocurre por vía seca y por tanto no sufre un lavado atmosférico inmediato como sí ocurre en Ordesa, sea determinante a la hora de favorecer un tipo de comunidad líquénica típica de ambientes más perturbados y eutrofizados.

En definitiva, en las zonas estudiadas del Valle del Ebro, ambientes más perturbados y asociados a la actividad humana, encontramos presencia de especies nitrófilas y de mayor tolerancia a la contaminación, mientras que conforme nos alejamos a ambientes más naturales, como el caso de los Pirineos, aparecen especies líquénicas más sensibles. Aunque la deposición de sustancias contaminantes y eutrofizantes no presenta diferencias significativas, salvo para el caso de los metales pesados (acentuados en Monzón dos órdenes de magnitud con respecto a Ordesa y Almudévar), los mecanismos de deposición en unos lugares u otros sí son muy contrastados. De este modo, la deposición de aerosoles por vía húmeda ocurre preferencialmente en Ordesa, mientras que la vía seca se produce frecuentemente en Almudévar y Monzón, ambas ubicaciones localizadas en el valle del Ebro. La vía seca provee de partículas de diferentes tipologías (generalmente partículas minerales ligadas a la resuspensión del suelo, que en zonas fuertemente agrícolas tienen una carga fertilizante importante. Por ello la disponibilidad de nutrientes en la superficie de las cubiertas líquénicas puede ser muy elevada en estas zonas. En este sentido podemos pensar que la similitud entre las comunidades de Monzón y Almudévar se relaciona con estos factores, que están modulados por el clima. Habría que valorar qué es lo que ocurre en otras comunidades de líquenes del Valle del Ebro alejadas de fuentes agrícolas próximas para verificar la validez de esta hipótesis final que nace tras la elaboración de este trabajo.



5 Conclusión

Con el objetivo de comprobar la viabilidad del uso de líquenes epífitos como bioindicadores de la deposición atmosférica en Aragón, el presente trabajo ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Los valores obtenidos de LDV no permiten la comprensión integral del efecto que tiene la deposición atmosférica sobre la comunidad liquénica, debido a la influencia de las condiciones climáticas y de la especie de árbol.
- Mediante la composición de las comunidades y su forma vital se ha podido diferenciar entre diferentes tipos de emplazamiento.

Los resultados de este trabajo de investigación me permiten concluir que los líquenes epífitos son un bioindicador relativamente fiable sobre la calidad ambiental de una zona, si bien es preciso conocer en detalle la fenomenología de los diferentes procesos atmosféricos que se producen en esa zona (clima, deposición, actividades cercanas). Además del estudio de los valores de LDV sería recomendable realizar la identificación de las comunidades de líquenes para determinar con mayor precisión el grado de calidad ambiental de una zona usando los líquenes epífitos como bioindicadores.



6 Bibliografía

Ambrosio Mantilla M.X., Bringas Becerra B., 2017. Evaluación de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica de origen vehicular en tres zonas del distrito de Cajamarca en el año 2017. Trabajo Fin de Carrera. Facultad de ingeniería. Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo.

Amo de Paz G., Burgaz A. R., 2009. Líquenes epífitos del Hayedo de Montejo de la Sierra (Madrid). Editorial Complutense.

Asta J., Erhardt W., Ferretti M., Fornasier F., Kirschbaum U., Nimis P.L., Purvis O. W., Pirintsos S., Scheidegger C., Van Haluwyn C., Wirth V., 2002. European guideline for mapping lichen diversity as an indicator of environmental stress.

Asta J., Erhardt W., Ferretti M., Fornasier F., Kirschbaum U., Nimis P.L., Purvis O. W., Pirintsos S., Scheidegger C., Van Haluwyn C., Wirth V., 2016. European guideline for mapping Lichen diversity as an indicator of environmental stress.

Barreno Rodríguez E., Pérez-Ortega S., 2003. Líquenes de la Reserva Natural Integral de Muniellos, Asturias. Conserjería de medio ambiente, ordenación del territorio e infraestructuras del principado de Asturias, KRK ediciones.

Calatayud V., Corrales J.M., Hernández S., 2011. Guía de los líquenes del Parque Nacional de Monfragüe. Universidad de Extremadura.

Garzón J.E., Cárdenas E.A., 2013. Emisiones antropogénicas de amoníaco, nitratos y óxido nitroso: Compuestos nitrogenados que afectan el medio ambiente en el sector agropecuario colombiano. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 60, 121-138.

Cera A., Pey J., 2021. La provincia de Huesca como área geográfica para estudiar la influencia de la deposición atmosférica y el clima en los líquenes de rocas carbonatadas. Memoria científica para la convocatoria de becas de investigación Félix de Azara 2020.

Nash, III, T. (Ed.), 2008. *Lichen Biology* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511790478



Cubas P., Núñez J., Crespo A., Divakar P.K., 2010. Líquenes: que son y su uso como bioindicadores. Proyecto de innovación 123 - UCM. https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintin_Innova/Liquenes_que_son_uso.pdf

De la Parra I., (2018). Análisis de la deposición atmosférica en ambientes naturales y antropizados del noreste de España mediante caracterización geoquímico-magnética y evaluación de efectos en ecosistemas microbianos. Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Zaragoza.

Ferroglobe, Monzón. <https://www.ferroglobe.com/about-ferroglobe/industrial-footprint/monz%C3%B3n/>

INE 2020. Padrón/ Población por municipios. Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero. Huesca. <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2875>

IAEST, 2020. Clima / Datos climatológicos. Precipitaciones, temperaturas y sus anomalías en varias estaciones meteorológicas, por meses. Aragón. <https://servicios3.aragon.es/iaeaxi/tabla.do?path=/14/05/02/&file=14050201.px&type=pcaxis&L=0>

Italic 6.0. Taxon query interface. Dipartimento di Scienze Della Vita. Università degli Studi di Trieste. <http://italic.units.it/?procedure=qtaxon>

Lillo Sánchez A., 2018. Líquenes como bioindicadores de la contaminación del aire. Trabajo Fin de Grado. Facultad de farmacia. Universidad Complutense. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/ALBERTO%20LILLO%20SANCHEZ.pdf>

Mares Rueda I., 2017. Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Trabajo Fin de Grado. Facultad de farmacia. Universidad Complutense. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/IRENE%20MARES%20RUEDA.pdf>



MITECO, 2021. Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Óxidos de nitrógeno. Gobierno de España. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>

ONU, 2021. Organización de Naciones Unidas. Objetivos Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Palacios Peña L., Baró R., Jiménez-Guerrero P., 2014. Estudio del efecto directo de los aerosoles atmosféricos sobre Europa. CONAMA Congreso Nacional de Medio ambiente 2014.

Pey J., 2015. Deposición atmosférica en ambientes naturales y antropizados del noreste de España; caracterización geoquímico-magnética integrada (DONAIRE). Memoria Científico-Técnica de proyectos individuales. Dirección General de Investigación Científica y Técnica, Subdirección General de Proyectos de Investigación.

Pey J., Cruz Larrasoña J., Pérez N., Cerro J.C., Castillo S., Tobar M.L., de Vergara A., Vázquez I., Reyes J., Mata M.P., Mochales T., Orellana J.M., Causapé J., 2020. Phenomenology and geographical gradients of atmospheric deposition in southwestern Europe: results from a multi-site monitoring network. *Science of the Total Environment*, 744, 140745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140745>

Torres Sánchez M.E., 2019. Líquenes: los bioindicadores de la calidad del aire. Trabajo Fin de Estudios. Facultad de ingeniería civil y ambiental. Escuela profesional de ingeniería ambiental. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

Vásquez Fentanes M.M., 2015. Estudios de los efectos de la contaminación atmosférica sobre los bioindicadores liquénicos y la degradación de los mismos. Tesis Doctoral. Departamento ingeniería de procesos. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de las áreas muestreadas en cada emplazamiento.



Figura 14. Área muestreada de Almodévar. Fuente: Jorge Pey Betrán



Figura 15. Área muestreada de Monzón. Fuente: Irene Garza Armengol



Figura 16. Área muestreada en Ordesa. Fuente: Jorge Pey Betrán

Anexo 2. Concentraciones de la fracción soluble e insoluble depositada en cada emplazamiento.

Flujo total de deposición soluble e insoluble

Tabla 3. Flujo total de deposición soluble e insoluble.

	Monzón	Almudévar	Ordesa
Fracción soluble (mg/m ²)	14880	13824	15317
Fracción insoluble (mg/m ²)	1506	1412	2167

Deposición fracción soluble periodo junio 2016-junio 2017

Tabla 4. Fracción soluble depositada en Monzón, Almudévar y Ordesa.

	Fracción soluble (mg/m ²)			Fracción soluble metales pesados (mg/m ²)			
	Monzón	Almudévar	Ordesa		Monzón	Almudévar	Ordesa
Cl⁻	436	438	426	Ag	0,000	0,000	0,002
SO₄²⁻	707	832	987	Al	5,66	4,18	8,77
HCO₃⁻	8072	7109	8432	As	0,048	0,048	0,021
NO₃⁻	1175	1187	1203	Ba	3,32	2,31	2,38
NO₂⁻	42	247	32	Cd	0,010	0,000	0,000
NH₄⁺	288	542	233	Co	0,002	0,001	0,000
PO₄³⁻	86	94	33	Cr	0,071	0,102	0,025
SiO₂	292	24	2	Cu	1,08	0,96	0,78
Na⁺	289	324	239	Fe	1,58	3,25	3,01
K⁺	504	148	186	Mn	46,8	0,60	1,04
Ca²⁺	1966	2026	2641	Mo	0,019	0,002	0,000
Mg²⁺	958	836	871	Ni	0,280	0,099	0,011
				Pb	0,125	0,016	0,034
				Sb	0,072	0,097	0,053
				Th	0,002	0,007	0,008
				Tl	0,057	0,050	0,110
				V	0,318	0,262	0,327
				Zn	6,0	6,5	14,7



Deposición fracción insoluble

Tabla 5. Fracción insoluble depositada en Monzón, Almudévar y Ordesa.

Fracción insoluble (mg/m ²)			Fracción insoluble de metales pesados (mg/m ²)				
	Monzón	Almudévar	Ordesa		Monzón	Almudévar	Ordesa
Na⁺	38	43	65	Ag	0,007	0,022	0,009
K⁺	170	210	348	As	0,11	0,14	0,17
Ca²⁺	519	166	211	Ba	6,7	5,2	7,4
Mg²⁺	155	200	307	Cd	0,09	0,07	0,03
Hollín	854	350	467	Co	0,32	0,20	0,21
Mat. Orgánica	5166	3095	4155	Cr	1,00	1,31	1,54
Ti	28	30	39	Cu	2,36	0,91	0,88
Fe	434	498	738	Mn	385	10	12
Al	663	885	1388	Mo	0,22	0,23	0,08
				Ni	0,68	0,71	0,85
				Pb	0,99	2,46	0,76
				Sb	0,05	0,09	0,03
				Th	0,09	0,13	0,20
				Tl	0,00	0,00	0,00
				V	1,02	1,27	1,73
				Zn	10,4	6,0	15,0
				U	0,022	0,030	0,037
				Se	0,034	0,079	0,144
				Sr	1,76	1,29	1,76
				Be	0,018	0,028	0,038



Anexo 3. Plantilla y resultados trabajo de campo

Modelo de plantilla

Figura 17. Modelo de plantilla utilizado para anotar la frecuencia.

Líquenes	Norte					Sur					Este					Oeste				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Plantilla de resultados obtenida en Almudévar

Tabla 6. Plantilla de la frecuencia de cada especie en cada árbol y cada punto cardinal en Almudévar.

	A1				A2				A3				A4				A5				A6				A7				A8				A9							
Taxones	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O
Xanthoria parietina	5	0	2	0	1	2	1	0	1	0	1	1	5	4	4	2	5	0	0	5	4	5	2	1	3	2	3	3	5	5	5	5	5	1	2	5				
Physconia distorta	1	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	3	1	3	1	0	0	0	0	0	1	1	3	5	2	0	1	3	5	5	5	5	2	0	0				
Lecanora chaloera	3	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	5	5	5	5	1	1	1	0				
Buellia alboatra	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Catillaria lenticularis	0	2	2	0	3	2	5	5	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Pertusaria amara	0	0	0	0	4	5	1	5	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Physcia adscendens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Candelariella aurella	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0				
Bacidia rubella	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Caloplaca ferruginea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				



Plantilla de resultados obtenida en Monzón

Tabla 7. Plantilla de la frecuencia de cada especie en cada árbol y cada punto cardinal en Monzón.

	A1			A2			A3			A4			A5			A6			A7			A8			A9			A10													
Taxones	N	E	S	C	N	E	S	C	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	C	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	
<i>Xanthoria parietina</i>	5	4	5	2	5	1	2	2	4	5	5	1	5	4	5	5	4	5	1	5	4	5	5	0	5	2	3	5	5	5	5	5	3	3	3	4	5	5	5	5	
<i>Physcia adscendens</i>	5	3	3	4	0	1	3	3	5	2	1	3	5	5	5	5	4	4	3	0	5	2	3	0	5	5	5	0	0	0	0	2	1	2	2	2	2	2	3	4	3
<i>Lecanora chalotera</i>	4	3	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	3	3	2	1	0	3	0	4	5	0	5	0	0	4	0	0	0	0	5	5	3	2	4	3	0	0	
<i>Candelariella aurella</i>	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Caloplaca citrina</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Physconia distorta</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
<i>Amanidea punctata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Lecanora pulicaris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Buellia alboatra</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	



Plantilla de resultados obtenida en Ordesa

Tabla 8. Plantilla de la frecuencia de cada especie en cada árbol y cada punto cardinal en Ordesa.

Taxones	A1		A2		A3		A4		A5		A6		A7		A8		A9		A10						
	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	N	E	S	O	
<i>Arthopyrenia analepta</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Graphis scripta subsp. serpentina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0
<i>Lecanora allophana</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Lecanora chalotera</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Lecanora circumbolearis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Lecanora pulicaris subsp. rhododendri</i>	5	5	5	5	3	0	4	0	3	5	5	4	4	5	5	3	5	5	4	1	1	3	1	4	
<i>Lecidella elaechroma</i>	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Melanohalea olivacea</i>	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	
<i>Parmelia sulcata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>Pertusaria amara</i>	3	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	
<i>Pertusaria flavida</i>	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	
<i>Ramalina farinacea</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	



Anexo 4. Valores obtenidos de diversidad liquénica (VDL)

VDL Almudévar

Tabla 9. Suma de frecuencias por árbol y punto cardinal y media de la suma de frecuencias y VDL en Almudévar.

Suma de frecuencias (SF)	N	E	S	O
SF A1	14	3	5	4
SF A2	8	11	8	10
SF A3	4	0	5	9
SF A4	13	8	17	8
SF A5	12	0	0	13
SF A6	13	11	8	5
SF A7	13	8	6	7
SF A8	13	15	15	20
SF A9	11	4	3	5
Media suma de frecuencias (MSF)	11,22	6,67	7,44	9,00
LDV	34,33			

VDL Monzón.

Tabla 10. Suma de frecuencias por árbol y punto cardinal y media de la suma de frecuencias y VDL en Monzón.

Suma de frecuencias (SF)	N	E	S	O
SF A1	14	10	8	8
SF A2	5	2	8	6
SF A3	9	7	7	4
SF A4	10	11	16	13
SF A5	10	10	5	8
SF A6	9	16	14	0
SF A7	15	7	8	14
SF A8	10	10	11	14
SF A9	10	9	8	9
SF A10	11	11	9	8
Media suma de frecuencias (MSF)	10,30	9,30	9,40	8,40
LDV	37,40			



VDL Ordesa

Tabla 11. Suma de frecuencias por árbol y punto cardinal y media de la suma de frecuencias y VDL en Ordesa.

Suma de frecuencias (SF)	N	E	S	O
SF A1	9	12	5	8
SF A2	4	0	4	0
SF A3	6	5	6	4
SF A4	7	5	6	6
SF A5	7	6	9	9
SF A6	3	4	5	4
SF A7	4	8	8	11
SF A8	5	5	8	0
SF A9	5	8	8	8
SF A10	5	7	7	11
Media suma de frecuencias (MSF)	5,5	6	6,6	6,1
LDV	24,2			