

1 Paideia XXI, Vol. 12, N°1, Lima, enero-junio 2022, pp. XX-XX.

2 doi: 10.31381/paideia xxi.v12i1.4798

3

4 REVIEW ARTICLE / ARTÍCULO DE REVISIÓN

5

6 APPLICATION OF LICHENS IN MINING IN HIGH ANDEAN AREAS OF PERU

7 APLICACIÓN DE LOS LÍQUENES EN MINERÍA EN ZONAS ALTOANDINAS

8 DEL PERÚ

9 Diego Valdivia^{1*} & José Iannacone^{2,3}

10 ¹ Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima,
11 Perú.

12 ² Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Ricardo Palma (URP). Lima, Perú.

13 joseiannacone@gmail.com

14 ³ Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA). Facultad de Ciencias
15 Naturales y Matemática. Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.

16

17 *Author for correspondence: daaron.valdiviah@gmail.com

18 Valdivia & Iannacone

19 Titulillo: Application of lichens in mining

20 Diego Valdivia:  <https://orcid.org/0000-0001-9673-2035>

21 José Iannacone:  <https://orcid.org/0000-0003-3699-4732>

22

23

24

25 ABSTRACT

26 The presence of mining in Peru is an essential factor in economic development. In this
27 context, this document aims to apply lichens in mining in high Andean areas of Peru and
28 establish a relationship between mining development and the application of lichens as
29 bioindicators pollution. The studies revealed the effectiveness of lichens as
30 bioaccumulator of metals such as lead, zinc, cadmium, nickel, copper, mercury, and
31 chromium. Likewise, the existence of methodologies for heavy metal analysis was
32 verified, the environmental scanning electron microscope (ESEM), the most useful in the
33 studies reviewed.

34 **Keywords:** bioindicator – heavy metals – lichens – mining – pollution

35

36 RESUMEN

37 La presencia de la minería en el Perú es un factor importante en el desarrollo económico.
38 En este contexto este documento tiene como objetivo aplicar los líquenes en minería en
39 zonas altoandinas del Perú y establecer una relación entre el desarrollo minero y la
40 aplicación de líquenes como bioindicadores de contaminación. El presente estudio tiene
41 como objetivo realizar un análisis bibliográfico de los casos de aplicación de líquenes en
42 zonas mineras y conocer la efectividad de líquenes como bioacumuladores. Los estudios
43 revelaron la efectividad de los líquenes como bioacumuladores de metales como plomo,
44 zinc, cadmio, níquel, cobre, mercurio y cromo. Asimismo, se comprobó la existencia de
45 metodologías para el análisis de metales pesados siendo el microscopio electrónico de
46 barrido ambiental (MEBA), el de mayor utilidad en los estudios revisados.

47 **Palabras clave:** bioindicadores – contaminación – líquenes – metales pesados – minería

48

49 **INTRODUCCIÓN**

50 América Latina indudablemente se ha convertido en el destino más importante de la
51 inversión minera en el mundo provocando que estos países centren en esta actividad gran
52 parte de su economía (Valdivia & Ramírez, 2018); sin embargo, se sabe que la minería
53 es una actividad que se desarrolla desde siglos atrás y a pesar de ser un potencial
54 económico para muchos países latinoamericanos, la explotación de metales diversos
55 genera indudablemente cambios y en ocasiones estos son irreversibles en el medio
56 ambiente, así como residuos que sin un correcto manejo puede ser perjudicial para el
57 medio donde se desarrolla esta actividad (Muñoz-Silva *et al.*, 2019).

58
59 El Perú no es ajeno a esto, y se ha venido desarrollando los procesos mineros desde hace
60 siglos atrás, pero desde hace unos años ha surgido una minería moderna y responsable, la
61 cual contempla planes de cierre y tecnologías avanzadas que permiten mantener
62 controlados los impactos al ambiente; sin embargo, antiguamente no era preocupación de
63 las empresas mineras hacer un adecuado cierre y remediación de la zona donde se
64 desarrolla la actividad minera, por lo que en el Perú se puede encontrar un número
65 considerable de instalaciones abandonadas, residuos, áreas contaminadas entre otros
66 pasivos ambientales, siendo estos expuestos a la superficie y al no contar con ningún tipo
67 de control ambiental ocasionan daños al ambiente y a la salud de las personas (Alquiza *et*
68 *al.*, 2017).

69
70 Es por eso que las empresas mineras vienen actualizando y mejorando constantemente su
71 planes de manejo ambiental para permitir prevenir y mitigar los posible impactos
72 ambientales que pudieran ser generadas con sus actividades (Valdivia & Ramírez, 2018),

73 mientras por otro lado el Ministerio de Energía y Minas (MEM) en el 2014 reveló que se
74 ha logrado ubicar hasta el momento 7000 pasivos ambientales provenientes de
75 actividades mineras (siendo entre los más comunes los depósitos de relaves, botaderos de
76 desmonte, pilas de lixiviación y labores subterráneas) y así determinar a los responsables
77 para que asuman su remediación o de lo contrario encargarse directamente de la solución
78 del problema. Estas iniciativas tanto de las empresas mineras como del ministerio de
79 energía y minas logran establecer el concepto de una minería responsable.

80

81 La utilización de líquenes para poder realizar una evaluación de impacto ambiental es un
82 tema que año tras año va ganando más adeptos, debido a las características que estos
83 poseen (Valdivia & Ramírez, 2018; Anderson *et al.*, 2022). Actualmente, existe mucha
84 literatura al respecto, que usan estos para establecer comparaciones entre niveles de
85 contaminación en áreas geográficas o en un tiempo (Ramírez-Morán *et al.*, 2016; Koval,
86 2022).

87 La aplicación de líquenes como bioindicadores recae en características que hace exitosa
88 su aplicación, como lo plantean Crespo *et al.* (2016):

89 1. Son ubicuos y actualmente se encuentran en aumento en muchos centros urbanos,
90 sobre todo en países desarrollados, gracias a la disminución en la concentración de
91 dióxido de azufre en la atmosfera de las ciudades.

92 2. No poseen una cutícula protectora y absorben nutrientes y contaminantes a través
93 de gran parte de su superficie.

94 3. Su naturaleza simbiótica, ya que, si cualquiera de los simbiontes se ve afectado
95 por algo, ambos organismos mueren.

96 4. Son relativamente longevos, permaneciendo expuestos al efecto nocivo por largos
97 periodos, por lo que proporcionan una imagen de estados crónicos y no de
98 variaciones puntuales del medio ambiente.

99 5. Son organismos perennes que pueden ser muestreados todo el año.

100

101 Estas características demuestran la importancia y sensibilidad que poseen frente a los
102 cambios que se puedan producir y así siendo considerados en la detección de
103 perturbaciones ambientales (Anderson *et al.*, 2022). El presente estudio tiene como
104 objetivo realizar un análisis bibliográfico de los casos de aplicación de líquenes en zonas
105 mineras y conocer la efectividad de líquenes como bioindicadores de contaminación.

106

107 **DESARROLLO**

108 **Líquenes y estudios de impacto ambiental**

109 El Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos
110 (Decreto Supremo N° 039-2014-EM) define los "Estudios de Impacto Ambiental" (EIA)
111 como los estudios sobre los elementos físicos naturales, biológicos, socioeconómicos y
112 culturales dentro del área de influencia del proyecto, teniendo como objetivo describir las
113 condiciones existentes y sus capacidades de respuesta a perturbaciones, así como prevenir
114 los impactos (efectos y consecuencias) de los proyectos y determinar las medidas de
115 control (mitigación) necesarias para asegurar la compatibilidad entre las actividades
116 extractivas y el medio ambiente.

117

118 Dentro de la estructura de los estudios de impacto ambiental, la participación de los
119 líquenes representaría un aporte significativo en primer lugar a la constitución de la línea

120 base ambiental, la cual describe el estado actual del área del proyecto, donde se podría
121 realizar un inventario de las especies presentes en la zona, así como la cantidad de
122 contaminantes bioacumulados en ese momento describiendo así la calidad del aire antes
123 de la ejecución del proyecto, para luego hacer una comparación temporal y en segundo
124 lugar dentro de los planes de manejo y mitigación formando parte de los monitoreos que
125 se deben realizar frecuentemente y otorgando así sin duda el uso de líquenes como
126 complemento a los monitoreos instrumentales brinda la confiabilidad y representatividad
127 de los datos (Salamon & Altarawneh, 2021).

128

129 **Líquenes y minería**

130 Si bien es cierto actualmente se habla de una minería responsable, las emanaciones de
131 grandes cantidades de elementos nocivos al ambiente por parte de las actividades mineras
132 es una realidad, la presencia de material particulado proveniente de voladuras, transporte,
133 molienda, escombreras o de la misma acción del viento es uno de los factores que
134 perjudica la calidad de las zonas aledañas a las empresas mineras al igual que la presencia
135 de metales pesados como plomo, arsénico, mercurio, cadmio entre otros, producen una
136 alteración en el medio afectando tanto procesos naturales y diversidad biológica (Alquiza,
137 *et al.*, 2017; Salamon & Altarawneh, 2021) . La necesidad de establecer redes de
138 monitoreo contemplados dentro de los planes de manejo de las compañías mineras es de
139 vital importancia, si se desea hablar de una minería responsable, la obtención de datos
140 confiables acerca de la calidad de la zona donde se desarrolla el proyecto no solo asegura
141 el compromiso de la empresa frente a las poblaciones, sino establece tranquilidad frente
142 a las poblaciones aledañas (Berdonces, 2016).

143

144 Sin embargo, los elevados costos para el establecimiento de estas redes de monitoreo
145 crean una limitación con respecto al número de estaciones de muestreos y contaminantes
146 considerados y aunque confiables estos registros podrían estar estadísticamente
147 incompletos generando información no confiable sobre el impacto real de los
148 contaminantes ambientales (Muñoz-Silva *et al.*, 2019).

149

150 El uso de líquenes como bioindicadores en minería es un tema que actualmente no se está
151 desarrollando, pero ya tiene trabajos relacionados que detallan la relación que existe entre
152 los efectos que ocasionan la minería y la presencia de líquenes en zonas cercanas a
153 proyectos mineros (Salamon & Altarawneh, 2021; Kuang *et al.*, 2022).

154

155 En ese contexto la minería puede afectar a los líquenes de dos formas, pero relacionadas
156 entre sí (Berdonces, 2016):

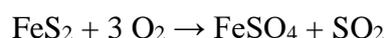
157

158 Los residuos de la concentración de minerales sulfurados por gravedad o flotación, siendo
159 características estos por la presencia de pirita (FeS₂) un mineral que es rechazado del
160 proceso concentrador.

161 1. La fundición de especies metalíferas sulfuradas.

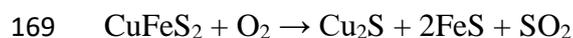
162 Con relación al primer caso el reconocimiento de la liberación de SO₂ es de fácil
163 reconocimiento por el olor penetrante que tiene este gas, expresando la reacción según lo
164 planteado por Ferrow *et al.* (2006):

165



166

167 Por otro lado el segundo caso relacionado con las fundiciones de sulfuros como el cobre
168 u otros metales, el proceso se da de la siguiente manera (Moore *et al.*, 2010):



170

171 Y tanto en las balsas como en las fundiciones, el resultado final es la producción de SO₂,
172 teniendo en cuenta que la sensibilidad de los líquenes frente al dióxido de azufre ha sido
173 ya tema de numerosos estudios llegándose a la conclusión que es el componente más
174 perjudicial para los líquenes ocasionado daños y siendo el factor principal de la
175 desaparición de estos en áreas contaminadas (Nash, 1973; Roziaty *et al.*, 2022),
176 desarrollándose trabajos que establecen relación entre los daños hacia los líquenes a
177 diferentes concentraciones (LeBlanc & Rao, 1973; Kuang *et al.*, 2022), efectos sobre el
178 proceso de fotosíntesis y pérdida de potasio (Tomassini *et al.*, 1977) o daños en el proceso
179 de respiración (Baddeley, 1972).

180

181 **Líquenes en zonas altoandinas, Perú**

182 La aplicación de líquenes como bioindicadores de contaminación en zonas mineras del
183 Perú aún es muy limitada en comparación a otros países como Canadá, Italia y en especial
184 los ubicados en el continente Europeo, la aplicación de protocolos de sistemas de
185 monitoreo con líquenes ya es una realidad; sin embargo, el Perú aún no toma conciencia
186 de lo provechoso que puede ser aplicar esta metodología tanto en proyectos mineros como
187 en otras actividades que causan perturbaciones al ambiente, la falta de trabajos
188 taxonómicos como el realizado por Ramírez & Cano (2005) son de gran utilidad para el
189 reconocimiento de la liquenobiota en el Perú; sin embargo, en relación a los trabajos
190 aplicados en zonas mineras existe estudios como el planteado por Rivas-Plata (2006) en

191 la provincia de Yauli, Región Junín, entre 4700 - 4900 msnm aledaña a la Unidad Minera
192 Andaychagua de “Volcan Compañía Minera” que a través de un análisis resaltan las
193 principales líquenes que pueden ser usados como buenos bioindicadores teniendo entre
194 las especies encontradas: *Coccocarpia palmicola* (Spreng.) Arv. & D.J.Galloway,
195 *Diploschistes scruposus* (Schreb.) Norman, *Protoparmeliopsis garovaglii* (Körb.) Arup,
196 Zhao Xin & Lumbsch, *Lecidea lithophila* (Ach.) Ach, *Rhizocarpon obscuratum* (Ach.)
197 A. Massal., *Rh. petraeum* (Wulfen) A.Massal., *Rh. Sublecanorinum* Anders, *Rimelia* sp.,
198 *Tephromela atra* Hafellner ex Kalb., *Umbilicaria calvescens* Nyl. y *U. kraschenikowskii*
199 (Savicz) Zahlbr., *Acarospora flava* (Wahlenb.) Stein, *Heterodermia* sp. y *Leprocaulon*
200 *gracilis*, mientras se demostró también que los líquenes foliosos *Xanthoparmelia* sp. y
201 *Paraparmelia* sp. son buenos bioacumuladores.

202
203 Por otro lado, Filamir (2011), en el Distrito de Pampas, provincia de Pallasca en la región
204 Ancash, Perú resaltan a: *Punctelia bolliana* (Müll. Arg.) Krog, *Hypotrachyna osorioi*
205 (Hale) Hale, *Xanthoparmelia huachucensis* T.H. Nash) Egan, *Rhizocarpon* sp,
206 *Diplochistes* sp., *Myriospora smaragdula* (Wahlenb. ex Ach.) Nägeli ex Uloth., *Buelia*
207 sp. y *Placopsis lambii* Hertel & V. Wirth pueden ser usados como bioindicadores en
208 presencia de metales pesados, mientras se evidencio que líquenes como el *Rhizocarpon*
209 funcionan como acumuladores biológicos eficientes.

211 **Equipo para el análisis de metales pesados**

212 Tras la revisión, se pudo encontrar diferentes metodologías a través del uso de equipos de
213 laboratorio para el análisis de metales pesados. Sin embargo, en muchos estudios se ha
214 realizado la aplicación de Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (MEBA) (Fig.

215 1), el cual permite la observación directa de todo tipo de superficies, así como la extensión
216 del rango de resolución de las imágenes (Gökçe, 2020).

217

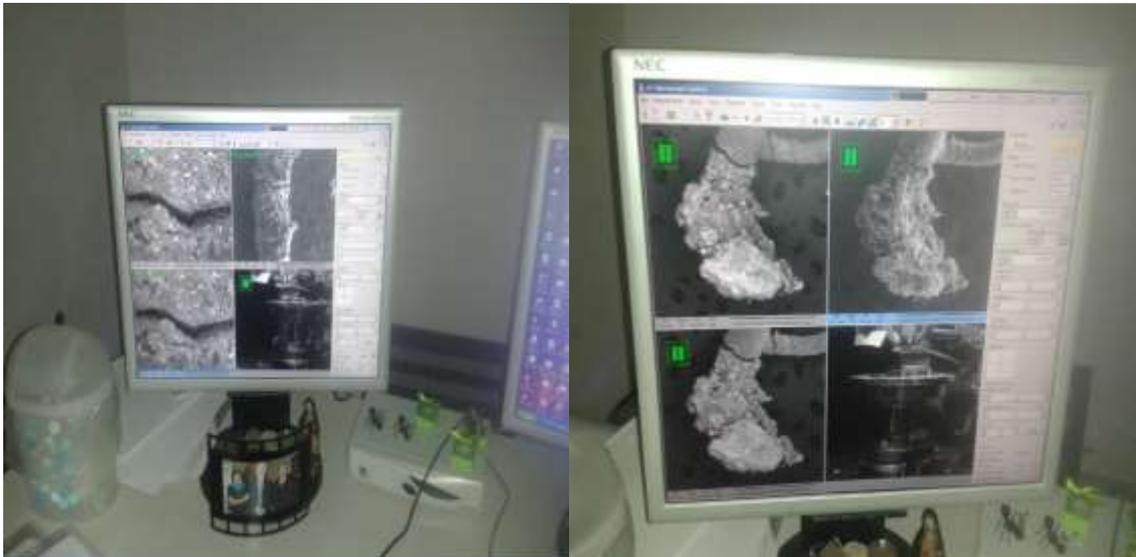
218

219

220

221

222



223 **Figura 1.** Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (MEBA). Fuente: Valdivia
224 (2015).

225 **Aplicación de líquenes en Minería**

226 La aplicación de los líquenes se puede establecer de dos maneras: 1) Realizando un
227 estudio de carácter cualitativo detallando de las especies presentes en la zona, dando a
228 conocer su nivel de abundancia y estableciendo relaciones entre su presencia y ausencia
229 con los niveles de contaminación 2) La toma de muestras en la zona de estudio que recae
230 en análisis químicos de concentraciones de distintos elementos de manera cuantitativa.

231

232 En el primer caso se tiene el método del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) (Rodríguez
233 *et al.*, 1981), como el método más usado, el IPA proporciona una evaluación de los niveles
234 de contaminación atmosférica basados en número (n), frecuencia (f) y tolerancia de los
235 líquenes en un área estudiada (Correa-Ochoa *et al.*, 2020).

236

237 La aplicación de este método hoy en día tiene muchas modificaciones, la variación con
238 respecto a lo propuesto por LeBlanc & DeSloover (1970), donde se describe la relación
239 y metodología del IPA aplicada a la ciudad de Montreal, si bien es cierto existen algunos
240 cambios la idea principal de establecer los niveles de contaminación frente a ausencia o
241 presencia de líquenes se mantiene vigente, sin embargo la aplicación del IPA presenta
242 algunas limitaciones como la homogeneidad del área de estudio y a la elección de las
243 estaciones de muestreo ya que el único factor variable debe ser la contaminación
244 atmosférica (Boonpeng *et al.*, 2018) , por otro lado la aplicación de estos estudios solo se
245 limitan a arboles (Lijteroff *et al.*, 2009; Estrabou *et al.*, 2011; Simijaca *et al.*, 2018), lo
246 que hace difícil su aplicación en zonas mineras, ya que éstas se encuentran en zonas alto
247 andinas donde la predominancia es de sustratos rocosos y la vegetación arbórea nativa
248 es escasa, sin embargo trabajos como el planteado por Lavernia (2009) en la ciudad de
249 Tandil (Argentina), aplican el IPA en zonas alto andinas obteniendo resultados
250 favorables.

251

252 En el segundo caso tenemos la toma de muestras en la zona de estudio que recae en
253 análisis químicos de concentraciones de distintos elementos de manera cuantitativa , así
254 como análisis de la actividad de los líquenes (fotosíntesis, intercambio de CO₂ , etc.) y
255 así comparar la concentración de elementos o vitalidad liquénica entre las estaciones
256 escogidas (Cubas *et al.*, 2010).

257

258 Existiendo una mayor cantidad de trabajos con diferencia al primer caso de aplicación
259 con relación a zonas mineras y esto por las condiciones de la zona para la aplicación de

260 métodos como el IPA (Gombert *et al.*, 2004), el muestreo de especies líquénicas en zonas
261 cercanas a empresas mineras o depósitos mineros en estado de abandono, recae en la
262 interacción entre los metales pesados y líquenes, dando a conocer su capacidad como
263 biocumuladores.

264

265 Un acumulador biológico es aquel organismo que va a reflejar el contenido químico de
266 su ambiente, y en este caso la aplicación de un monitoreo biológico con organismos
267 acumuladores proveerá datos esenciales para complementar datos a los registros
268 instrumentales, siendo la aplicación de estos de un costo considerablemente bajo en
269 comparación a métodos químicos y físicos (Rola *et al.*, 2021).

270

271 Por ende, la relación entre las concentraciones encontradas en sus talos y su entorno los
272 hacen buenos bioacumuladores de metales pesados. Rola (2020), aunque muchos autores
273 tienen la dificultad para establecer la relación entre la desaparición de un líquen y la
274 presencia de metales pesados, sin embargo, existen estudios que demuestran que a
275 diferentes fuentes y niveles de contaminación con metales pesados afecta a la estructura
276 de comunidades líquénicas (Lucadamo *et al.*, 2022). En la tabla 1 se muestra algunas
277 técnicas analíticas para el análisis de contaminantes ambientales.

278

279 **Tabla 1.** Técnicas analíticas utilizadas para análisis químico.

Contaminante	Método Instrumental
Dióxido de Azufre	-Fotómetro de llama -Cromatografía de gases con detector fotométrico de llama -Espectrofotometría -Electroquímica -Conductividad

Metales Pesados

-Espectrometría de absorción atómica
-Espectrometría de emisión atómica
-Espectrometría de emisión óptica de plasma de acoplamiento inductivo
-Espectrometría de masas con Plasma Acoplado Inductivamente
-Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente

280 Fuente: adaptado de Conti & Cecchetti (2001).

281

282 Los estudios dieron a conocer que la presencia de metales pesados provenientes de
283 empresas mineras se depositaba sobre la superficie del líquen o en la médula intracelular
284 generando la acumulación de metales pesados. Asimismo, se desprende de la revisión que
285 las principales afectaciones en los líquenes estarían relacionadas con su morfología,
286 variaciones en su vitalidad y cambios de respuesta funcional. Adicionalmente los metales
287 pesados plomo, zinc, cadmio, níquel, cobre, mercurio y cromo son los elementos que
288 causan mayor toxicidad. La presencia dióxido de azufre SO₂. Óxidos nitrosos (NO_x) y
289 Dióxido de carbono gases relacionados con la lluvia ácida (Figura 2).

290

291

292

293

294

295

296



297 **Figura 2.** Líquen *Parmotrema cf. andinum* (Müll. Arg.) Hale. bajo efectos de
298 contaminación. Fuente: Valdivia (2015).

299

300 Los estudios han revelaron la capacidad de fijación y acumulación de metales pesados tal
301 y como lo detallan estudios como el Osyczka & Rola (2019) quien analiza la capacidad
302 de bioacumulación a través de la membrada de los líquenes o el trabajo realizado por
303 Valdivia & Ramírez (2018) donde se analiza el impacto que produce un pasivo ambiental
304 minero en los líquenes ubicados en zonas colindantes. Por otro lado, Vitali *et al.* (2019)
305 utilizó a *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., para la evaluación de presencia de metales
306 pesados. Se constató que la presencia de metales pesados en los líquenes produce efectos
307 adversos tal y como lo detalla Rola (2020), y Rola *et al* (2021) donde analizan los efectos
308 en procesos como la fotosíntesis, afectación morfológica en el talo y modificaciones en
309 su composición genérica. Por otro lado, los trabajos realizados por Gökçe (2020),
310 Mattarozzi *et al.* (2015) y Agnan *et al.* (2014) destacan la utilidad del microscopio
311 electrónico de barrido ambiental (MEBA) para el análisis de metales pesados en líquenes.

312

313 **CONCLUSIONES**

314 Aunque exista la presencia de normativas ambientales establecidas como los límites
315 máximos permisibles (LMP) para las emisiones realizadas, no se puede comprobar que
316 estas se cumplan a cabalidad, necesitando de un monitoreo constante para del impacto
317 real causado. Los estudios desarrollados demuestran la utilidad de los líquenes como
318 bioindicadores en presencia de contaminación y su eficiencia como acumuladores
319 biológicos. La falta de estudios taxonómicos en las zonas altoandinas limita a la
320 realización de estudios donde se aplique a los líquenes como bioindicadores de
321 contaminación. La aplicación de líquenes en proyectos mineros reduciría el costo de estas
322 empresas en la obtención de numerosos instrumentales de monitoreo, complementando

323 la data existente y otorgando confiabilidad a los datos ya obtenidos por las estaciones
324 instrumentales.

325

326 **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

327 Agnan, Y.; Séjalon-Delmas, N. & Probst, A. 2014. Origin and distribution of rare earth
328 elements in various lichen and moss species over the last century in France.
329 Science of The Total Environment, 487: 1-12.

330 Alquiza, M.J.; Miranda-Aviles, R.; Zanol, G.A.; Salazar-Hernández, M.M. & Ordaz-
331 Zubia, V.Y. 2017. Study of the distribution of heavy metals in the atmosphere of
332 the Guanajuato City: Use of saxicolous lichen species as bioindicators. Ingeniería,
333 investigación y tecnología, 18: 111-126.

334 Anderson, J.; Lévesque, N.; Carona, F.; Beckett, P. & Spiers, G.A. 2022. A review on the
335 use of lichens as a biomonitoring tool for environmental radioactivity. Journal of
336 Environmental Radioactivity, 243: 106797.

337 Baddeley, B.W.F. 1972. The effects of Sulphur Dioxide on lichen espiration. The
338 Lichenologist, 5: 283–291.

339 Berdonces, A. 2016. *Las interacciones aire/suelo/plantas-líquenes/leguminosas-
340 Rhizobium del mercurio en áreas contaminadas*. Universidad de Castilla.

341 Boonpeng, C. S.; Sriviboon, C.; Polyiam, W.; Sangiamdee, D.; Watthana, S.;
342 Boonpragob, K. 2018. Assessing atmospheric pollution in a petrochemical
343 industrial district using a lichen-air quality index (LiAQI). Ecological Indicators,
344 95: 589-594.

345 Conti, M. E. & Cecchetti, G. 2001. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air
346 pollution assessment — a review. Environmental Pollution, 114: 471–482.

347 Correa-Ochoa, L.C.; Vélez-Monsalve, L.C.; Saldarriaga-Molina, J.C. & Jaramillo-Ciro,
348 M.M. 2020. Evaluation of the Index of Atmospheric Purity in an American
349 tropical valley through the sampling of corticolous lichens in different phorophyte
350 species. *Ecological Indicators*, 115: 106355.

351 Crespo, A.; Crous, P.W.; Divakar, P.K. & Lumbsch, H.T. 2016. A Festschrift for David
352 L. Hawksworth. *Fungal Biology*, 120: 1269-1271.

353 Cubas, P.; Nuñez, J.; Crespo, A. & Divakar, P. 2010. *Líquenes: que son y su uso como*
354 *bioindicadores*. Un Documento GEMM / Proyecto de Innovación 123 - UCM -
355 2010.
356 [https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintín_Innova/Liquenes_q](https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintín_Innova/Liquenes_que_son_uso.pdf)
357 [ue_son_uso.pdf](https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintín_Innova/Liquenes_que_son_uso.pdf)

358 Estrabou, C.; Filippini, E.; Soria, J.P.; Schelotto, G. & Rodriguez, J.M. 2011. Air quality
359 monitoring system using lichens as bioindicators in Central Argentina.
360 *Environmental Monitoring and Assessment*, 182: 375–383.

361 Ferrow, E.A.; Mannerstrand, M. & Sjöberg, B. 2006. Reaction kinetics and oxidation
362 mechanisms of the conversion of pyrite to ferrous sulphate: A Mössbauer
363 Spectroscopy Study. *Hyperfine Interactions*, 163:109–119.

364 Filamir, C. 2011. *Uso de líquenes como bioindicadores en presencia de metales pesados*
365 *en una zona de Pasivos Ambientales Mineros en abandono*. (Tesis). Universidad
366 Nacional Agraria La Molina.

367 Gombert, S.; Asta, J. & Seaward, M.R.D. 2004. Assessment of lichen diversity by index
368 of atmospheric purity (IAP), index of human impact (IHI) and other
369 environmental factors in an urban area (Grenoble, southeast France). *Science of*
370 *The Total Environment*, 324: 183–199.

371 Gökçe, M. 2020. Determining the physical properties of polymer in different admixtures
372 used for self-compacting cement paste by ESEM. *Micron*, 139: 102953.

373 Koval, Y.N. 2022. Lichen indication of surface air pollution in CATE Zheleznogorsk.
374 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 979: 012113.

375 Kuang, X.; Kyaw, W.T.; Soe, P.P.; Thandar, A.M.; Khin, H.E.; Zaw, N.M.P. &
376 Sakakibara, M. 2022. A Preliminary Study on Mercury Contamination in
377 Artisanal and Small-Scale Gold Mining Area in Mandalay Region, Myanmar by
378 using Plant Samples. *Pollution*, 8: 225-238.

379 Lavornia, J. M. 2009. Las Comunidades de Líquenes de Tandil (Buenos Aires) como
380 bioindicadores de la calidad del Aire. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional
381 de La Plata.

382 LeBlanc, F. & Rao, D. N. 1973. Effects of Sulphur Dioxide on lichen and moss
383 transplants. *Ecology*, 54: 612–617.

384 LeBlanc, S.C.F. & DeSloover, J. 1970. Relation between industrialization and the
385 distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian*
386 *Journal of Botany*, 48:1485–1496.

387 Lijteroff, R.; Lima, L. & Prieri, B. 2009. Uso de líquenes como bioindicadores de
388 contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista*
389 *Internacional de Contaminación Ambiental*, 25: 111–120.

390 Lucadamo, L.; Gallo, L. & Corapi, A. 2022. Detection of air quality improvement within
391 a suburban district (southern Italy) by means of lichen biomonitoring.
392 *Atmospheric Pollution Research*, 3: 101346.

393 Mattarozzi, M.; Visioli, G.; Sanangelantoni, A.M. & Careri, M. 2015. ESEM-EDS: *In*
394 *vivo* characterization of the Ni hyperaccumulator *Noccaea caerulescens*. *Micron*,
395 5: 18-26.

396 Moore, J., Stanitski, C., & Jurs, P. 2010. *Chemistry: The Molecular Science*. Cengage
397 Learning.

398 Muñoz-Silva, L.; Olivera-Gonzales, P.; Santillán-Torres, M. & Tamariz-Angeles, C.
399 2019. Microorganismos tolerantes a metales pesados del pasivo minero Santa
400 Rosa, Jangas (Perú). *Revista Peruana de Biología*, 26: 109-118.

401 Nash, T.H. 1973. Sensitivity of lichens to Sulfur Dioxide. *The Bryologist*, 76: 333–339.

402 Osyczka, P. & Rola, K. 2019. Integrity of lichen cell membranes as an indicator of heavy-
403 metal pollution levels in soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174: 26-
404 34.

405 Ramírez, Á. & Cano, A. 2005. Líquenes de Pueblo Libre, una localidad andina en la
406 Cordillera Negra (Huaylas, Ancash, Perú). *Revista Peruana de Biología*, 12: 383–
407 396.

408 Ramírez-Morán, N.A.; León-Gómez, M. & Lücking, R. 2016. Uso de biotipos de líquenes
409 como bioindicadores de perturbación en fragmentos de bosque Altoandino
410 (Reserva Biológica "Encenillo", Colombia. *Caldasia*, 38: 31-52.

411 Rivas-Plata, E.T. 2006. *Uso de líquenes como bioindicadores de presencia de metales*
412 *pesados en áreas cercanas a empresas mineras de altura del Perú*. (Tesis de
413 maestría). Universidad Nacional de Ingeniería.

414 Rola, K. 2020. Insight into the pattern of heavy-metal accumulation in lichen thalli.
415 *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 61: 126512.

- 416 Rola, K.; Lenart-Boroń, A.; Boroń, P. & Osyczka, P. 2021. Heavy-metal pollution
417 induces changes in the genetic composition and anatomical properties of
418 photobionts in pioneer lichens colonising post-industrial habitats. *Science of The*
419 *Total Environment*, 750: 141439.
- 420 Rodríguez, E.B.; Sancho, L.G.; Crespo, A. & Bueno, A.G. 1981. Establecimiento de una
421 red de valoración de pureza atmosférica en la provincia de La Coruña (España)
422 mediante bioindicadores liquénicos. *Lazaroa*, 3: 289–313.
- 423 Roziaty, E.; Suntoro, S. & Sugiyarto. 2022. Uptake test the content of ambient SO₂
424 (Sulphur Dioxide) and NO₂ (Nitrogen Dioxide) compounds in lichen thalli in
425 urban, sub urban and forest in Surakarta, Central Java, Indonesia. *Materials*
426 *Science Forum*, 1051: 71-78.
- 427 Salamon, I. & Altarawneh, R. 2021. Assessment of lichens as biomonitors of heavy metal
428 pollution in selected mining area, Slovakia. *Pakistan Journal of Analytical &*
429 *Environmental Chemistry*, [S.l.], 22: 53-59.
- 430 Simijaca, D.; Moncada, B. & Lücking, R. 2018. Bosque de roble o plantación de
431 coníferas, ¿qué prefieren los líquenes epífitos?. *Colombia Forestal*, 21: 123-141.
- 432 Tomassini, F.D.; Lavoie, P.; Puckett, K.J.; Nieboer, E. & Richardson, D.H.S. 1977. The
433 effect of time of exposure to Sulphur Dioxide on Potassium loss from and
434 photosynthesis in the lichen, *Cladina Rangiferina* (L.) Harm. *New Phytologist*,
435 79: 147–155.
- 436 Valdivia, D. & Ramírez, Á. 2018. Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación
437 atmosférica en el pasivo ambiental minero Santo Toribio, Áncash, Perú. *The*
438 *Biologist (Lima)*, 16: 77-95.

439 Valdivia, D. 2015. *Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica*
440 *en el pasivo ambiental minero Santo Toribio, Ancash. Perú.* (Tesis Título
441 Profesional). Universidad Nacional Federico Villarreal.

442 Vitali, M.; Antonucci, A.; Owczarek, M.; Guidotti, M.; Astolfi, M.L.; Manigrasso, M.;
443 Avino, P.; Bhattacharya, B. & Protano, C. 2019. Air quality assessment in
444 different environmental scenarios by the determination of typical heavy metals
445 and Persistent Organic Pollutants in native lichen *Xanthoria parietina*.
446 *Environmental Pollution*, 254, Part A: 113013.

447 Received January 27, 2022.

448 Accepted March 7, 2022.

Manuscript Accepted. Early view