

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN
AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

**ESTADO DE CONTAMINACIÓN Y RIESGO ECOLÓGICO
POTENCIAL DE LOS ELEMENTOS TRAZA (Pb, Cd,
Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) PRESENTES EN
LÍQUENES Y SUELOS SOBRE LAS LOMAS
DE TACAHUAY, TACNA -2023**

TESIS

PRESENTADA POR:

NURIA VIOLETA NINA HUARAHUARA

Para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS (*MAGISTER SCIENTIAE*) CON MENCIÓN
EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**


TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE


ESTADO DE CONTAMINACIÓN Y RIESGO ECOLÓGICO POTENCIAL DE
LOS ELEMENTOS TRAZA (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg)
PRESENTES EN LÍQUENES Y SUELOS SOBRE LAS LOMAS
DE TACAHUAY, TACNA -2023

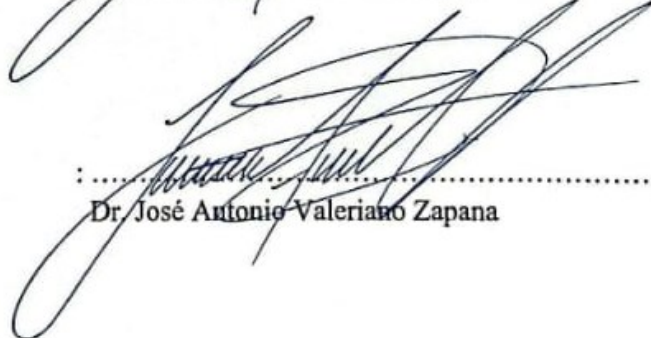
Tesis sustentada y aprobada el 30 de diciembre del 2024; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE :

Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

SECRETARIO :

Dr. Marilú Hilda Manchego Colque

MIEMBRO :

Dr. José Antonio Valeriano Zapana

ASESOR :

Dr. José Antonio Valeriano Zapana

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. **JOSE ANTONIO VALERIANO ZAPANA**, en mi condición de asesor acreditado con Resolución de Escuela de Posgrado N° 12417-2023-ESPG/UNJBG del 31 de marzo del 2023, del trabajo de tesis titulado: **“ESTADO DE CONTAMINACIÓN Y RIESGO ECOLÓGICO POTENCIAL DE LOS ELEMENTOS TRAZA (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) PRESENTES EN LÍQUENES Y SUELOS SOBRE LAS LOMAS DE TACA HUAY, TACNA - 2023”**, presentado por el Srta. **NURIA VIOLETA NINA HUARAHUARA**, para optar el Grado Académico de Maestro en Ciencias (*Magíster Scientiae*) con mención en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible.

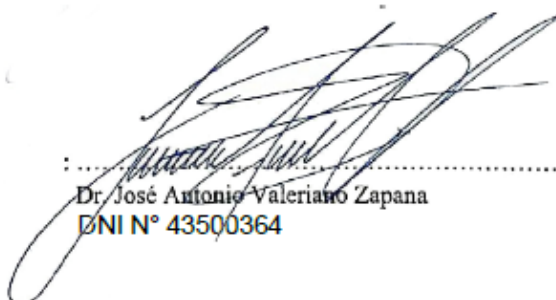
Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 4%.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los trámites respectivos para la obtención del Grado Académico de Maestro en Ciencias (*Magíster Scientiae*) con mención en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible.


Tacna, 27 de septiembre 2024

FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos


:
Dr. José Antonio Valeriano Zapana
DNI N° 43500364



FIRMA TESISTA
Nombres y apellidos


:
Srta. Nuria Violeta Nina Huarahuara
DNI N° 73466499



DEDICATORIA

A Jehová por darme vida, salud y fortaleza para poder salir adelante en los momentos difíciles.

A mis queridos Padres Rosa y Rogelio, y mi hermana Marilú por su amor y apoyo incondicional y ser mi soporte en todo momento.

AGRADECIMIENTO

A Jehová Dios, por ser mi guía.

A mis docentes y jurados de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann quienes aportaron sus enseñanzas para la ejecución y culminación de mi proyecto de tesis.

A mi asesor, Dr. José Antonio Valeriano Zapana, por su tiempo brindado, orientación y asesoría para la ejecución de tesis.

Nada de esto hubiera sido posible sin la orientación y el soporte de cada uno de ustedes, solo tengo palabras de Gratitud.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Identificación de la problemática.....	3
1.2. Formulación del problema	4
1.2.1. Problema General	4
1.2.2. Problema Específicos	4
1.3. Situación contextual de la investigación.....	4
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
1.5. Hipótesis	8
1.6. Variables	8
1.6.1. Identificación de las variables	8
1.7. Operacionalización de variables	9
1.8. Limitaciones de la investigación.....	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2.1. Antecedentes del estudio	12
2.2. Bases teóricas.....	16
2.2.1. Fuente de contaminantes orgánicos.....	16
2.2.2. Metales pesados.....	16
2.2.3. Los metales pesados y sus efectos nocivos en la salud humana.....	17
2.2.4. El desierto costero del oeste de Sudamérica.....	17
2.2.5. Lomas costeras	18
2.2.6. Los líquenes como bioindicadores y biomonitores de la contaminación del aire	20
2.2.7. Absorción de metales por líquenes.....	22

2.2.8.	Respuesta de los líquenes a los contaminantes del aire.....	24
2.2.9.	Análisis de la contaminación causada por metales pesados	28
2.3.	Marco Conceptual.....	29
2.3.1.	Liquen.....	29
2.3.2.	Bioacumulación	29
2.3.3.	Biomonitor.....	30
2.3.4.	Evaluación de Riesgo ambiental.....	30
2.3.5.	Evaluación de servicios ecosistémicos (SE).....	30
2.3.7.	Variables químicas	31
2.3.8.	Variables biológicas	31
	CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	32
3.1.	Tipo, nivel y diseño de la investigación	32
3.2.	Población y muestra de estudio	32
3.2.1.	Población	32
3.2.2.	Muestreo	33
3.2.3.	Determinación del tamaño de las estaciones de muestreo.....	33
3.2.4.	Técnica para el análisis de biodiversidad de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay.....	34
3.3.	Técnica para la determinación de metales traza en Líquenes.....	36
3.4.	Técnicas para evaluar el riesgo ecológico potencial (IR _e) de los metales traza presentes en líquenes y suelos sobre las lomas de Tacahuay	36
3.5.	Metodología para determinar el riesgo ecológico potencial de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en las especies de líquenes identificados y suelos.....	37
3.6.	Estrategia de recolección de datos	37
3.6.1.	Análisis de la biodiversidad de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay. 37	
3.6.2.	Estudio de la composición química de los metales traza presentes en las especies de líquenes identificados en las lomas de Tacahuay	38
3.6.3.	Evaluación del riesgo ecológico potencial de los metales traza (Fe, Ti, Ni, Cr, Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Mn, Hg) presentes en las especies de líquenes identificados en las Lomas de Tacahuay	38
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	39

4.1. Identificación de la diversidad de líquenes que se encuentran en las Lomas de Tacahuay.....	39
4.1.1. Identificación taxonómica	39
4.1.2. Determinación de la cobertura de líquenes identificados en las lomas de Tacahuay.....	40
4.1.3. Análisis de la biodiversidad.....	42
4.2. Evaluación de la concentración de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en las especies de líquenes identificados y suelos	43
4.2.1. Análisis de la Concentración de Metales Traza en las especies de líquenes identificados.....	43
4.2.2. Determinación de la concentración de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en los suelos.....	54
4.3. Análisis del Nivel de Contaminación y Evaluación del Potencial de Riesgo de los Metales Traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg)	55
4.3.1. Factores de Contaminación (FC).....	55
4.3.2. Grado de Contaminación (GC).....	56
4.4. Análisis del riesgo ecológico potencial de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) detectados en líquenes y suelos de las lomas de Tacahuay, región Tacna - 2023	64
4.4.1. Estudio del riesgo ecológico potencial asociado a los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) encontrados en líquenes.....	64
4.4.2. Evaluación del riesgo ecológico potencial asociado a metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en suelos.....	72
DISCUSIÓN	75
5.1. Discusión	75
5.1.1. Determinación de la diversidad de especies de líquenes presentes en las Lomas de Tacahuay	75
5.1.2. Determinación de la concentración de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en la especies de líquenes identificados y suelos sobre las lomas de Tacahuay, región Tacna – 2023	76
5.1.3. Análisis del nivel de contaminación de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes identificados en las Lomas de Tacahuay	79

5.1.4. Evaluación del riesgo ecológico potencial de metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en suelos sobre.....	81
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Mecanismo mediado por líquenes</i>	26
Tabla 2 <i>Mecanismo mediado por líquenes</i>	27
Tabla 3 <i>Especies de Líquenes identificadas</i>	41
Tabla 4 <i>Cantidad metales traza (mg/kg)</i>	44
Tabla 5 <i>Cantidad de metales traza (mg/kg) detectados</i>	49
Tabla 6 <i>Concentración de fondo geoquímico</i>	54
Tabla 7 <i>Factores de contaminación y niveles de grado de contaminación</i>	55
Tabla 8 <i>Clasificación del grado de contaminación</i>	57
Tabla 9 <i>Clasificación del grado de contaminación</i>	59
Tabla 10 <i>Clasificación del grado de contaminación</i>	60
Tabla 11 <i>Clasificación del grado de contaminación</i>	62
Tabla 12 <i>Clasificación del grado de contaminación</i>	63
Tabla 13 <i>Evaluación del riesgo ecológico y del índice (RE)potencial</i>	65
Tabla 14 <i>Clasificación del grado de riesgo ecológico</i>	66
Tabla 15 <i>Clasificación del grado de riesgo ecológico</i>	67
Tabla 16 <i>Clasificación del grado de riesgo ecológico</i>	69
Tabla 17 <i>Clasificación del grado de riesgo ecológico</i>	70
Tabla 18 <i>Clasificación del grado de riesgo ecológico</i>	72
Tabla 19 <i>Especies de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay</i>	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Paisaje del desierto costero</i>	18
Figura 2 <i>Formación de niebla</i>	19
Figura 3 <i>Corte transversal liquen folioso</i>	20
Figura 4 <i>Morfología de líquenes</i>	21
Figura 5 <i>Proceso de absorción</i>	23
Figura 6 <i>Ubicación Geográfica Lomas de Tacahuay</i>	32
Figura 7 <i>Muestreo de líquenes</i>	33
Figura 8 <i>Recolección de muestras de líquenes</i>	34
Figura 9 <i>Preparación de muestras de líquenes</i>	35
Figura 10 <i>Diagrama de Pareto</i>	42
Figura 11 <i>Comparación Índices de Biodiversidad</i>	43
Figura 12 <i>Concentración de Aluminio (Al)</i>	45
Figura 13 <i>Concentración de Arsénico (As)</i>	46
Figura 14 <i>Concentración de Cadmio (Cd)</i>	46
Figura 15 <i>Concentración de Cobre (Cu)</i>	47
Figura 16 <i>Concentración de Cromo (Cr)</i>	48
Figura 17 <i>Concentración de Hierro (Fe)</i>	50
Figura 18 <i>Concentración de Manganeso (Mn)</i>	51
Figura 19 <i>Concentración de Mercurio (Hg)</i>	51
Figura 20 <i>Concentración de Níquel (Ni)</i>	52
Figura 21 <i>Concentración de Plomo (Pb)</i>	53
Figura 22 <i>Concentración de Zinc (Zn)</i>	53
Figura 23 <i>Grado de contaminación</i>	58
Figura 24 <i>Grado de contaminación</i>	59
Figura 25 <i>Grado de contaminación</i>	61
Figura 26 <i>Grado de contaminación</i>	62
Figura 27 <i>Grado de contaminación</i>	64
Figura 28 <i>Grado de riesgo ecológico</i>	66
Figura 29 <i>Grado de riesgo ecológico</i>	68
Figura 30 <i>Grado de riesgo ecológico</i>	69

Figura 31 <i>Grado de riesgo ecológico</i>	71
Figura 32 <i>Grado de riesgo ecológico</i>	72
Figura 33 <i>Toma de muestra de líquenes</i>	108
Figura 34 <i>Liquen presente en el forofito Tara (Caesalpinia spinosa)</i>	108
Figura 35 <i>Toma de coordenada GPS</i>	109
Figura 36 <i>Actividad antrópica en la zona de estudio</i>	109
Figura 37 <i>Actividad antrópica en la zona de estudio</i>	110
Figura 38 <i>Presencia de tara, molle y grindelia</i>	110
Figura 39 <i>Identificación de líquenes</i>	111
Figura 40 <i>Pantalla de observación de muestras</i>	111
Figura 41 <i>Vista frontal de la observación de muestra de líquenes</i>	112
Figura 42 <i>Vista lateral de la observación de muestras de líquenes</i>	112
Figura 43 <i>Vista con 35x de Flavopunctilia flaventior</i>	113
Figura 44 <i>Vista con 40x de Carnoparmelea sp</i>	113
Figura 45 <i>Vista con 40x de Dirinia Applanata</i>	114
Figura 46 <i>Vista con 40x de Carnoparmelea texana</i>	114

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo en las Lomas de Tacahuay, ubicadas en la región de Tacna, con el objetivo de analizar el estado de contaminación y evaluar el riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en líquenes y suelos. Este ecosistema, que depende de la niebla costera, enfrenta una creciente presión por el crecimiento urbano, la industrialización y las actividades mineras. Se estableció una línea base sobre la concentración de estos elementos para la gestión ambiental, mediante la instalación de cinco estaciones de muestreo a diferentes altitudes. Las muestras de líquenes y suelos fueron recolectadas y analizadas utilizando espectrometría de masas (ICP-MS), además de calcular los factores de geoacumulación (Igeo) y de enriquecimiento (EF) para determinar el origen y grado de contaminación. Los resultados revelaron una notable variabilidad en la biodiversidad de líquenes, destacando a *Candelaria concolor* y *Chrysothrix granulosa* como las especies dominantes. Se identificaron niveles elevados de arsénico (As) y cobre (Cu), lo que sugiere una influencia antropogénica, mientras que el cadmio (Cd) y el mercurio (Hg) mostraron concentraciones más bajas. El análisis de la contaminación evidenció una mayor acumulación de As y Cu en altitudes más bajas, y los factores de geoacumulación y enriquecimiento indicaron que la principal fuente de ciertos elementos, como Cd y Hg, es de origen antropogénico. Estos hallazgos subrayan la efectividad de los líquenes como biomonitores y la necesidad de un monitoreo continuo para proteger este ecosistema sensible.

Palabras clave: Lomas de Tacahuay, líquenes, contaminación, elementos traza, geoacumulación, factor de enriquecimiento, riesgo ecológico, biomonitores.

ABSTRACT

The present study was carried out in the Lomas de Tacahuay, located in the Tacna region, with the aim of analysing the contamination status and assessing the potential ecological risk of trace elements (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) in lichens and soils. This ecosystem, which depends on coastal fog, faces increasing pressure from urban growth, industrialization and mining activities. A baseline concentration of these elements was established for environmental management by setting up five sampling stations at different altitudes. Lichen and soil samples were collected and analyzed using mass spectrometry (ICP-MS), and geoaccumulation (Igeo) and enrichment factors (EF) were calculated to determine the origin and degree of contamination. The results revealed a remarkable variability in lichen biodiversity, with *Candelaria concolor* and *Chrysothrix granulosa* as the dominant species. High levels of arsenic (As) and copper (Cu) were identified, suggesting anthropogenic influence, while cadmium (Cd) and mercury (Hg) showed lower concentrations. Contamination analysis showed a higher accumulation of As and Cu at lower altitudes, and geoaccumulation and enrichment factors indicated that the main source of certain elements, such as Cd and Hg, is of anthropogenic origin. These findings underline the effectiveness of lichens as biomonitors and the need for continuous monitoring to protect this sensitive ecosystem.

Keywords: Lomas de Tacahuay, lichens, pollution, trace elements, geoaccumulation, enrichment factor, ecological risk, biomonitors.

INTRODUCCIÓN

Las lomas, conocidos como oasis estacionales sostenidos por la niebla del océano, han sido esenciales en la ecología humana antigua en la costa desértica del Pacífico de Perú, siendo uno de los pocos territorios donde floreció la agricultura y civilización (Beresford et al., 2015; Dillon et al., 2011; Gonzales et al., 2023; Kalicki & Kalicki, 2020). En la actualidad, estos ecosistemas enfrentan diversas amenazas debido a las actividades humanas, como la expansión urbana, la industrialización y las actividades mineras, las cuales introducen elementos traza (ET) potencialmente dañinos en el ambiente (Neumann et al., 2015; Vikas & Dwarakish, 2015). Estos contaminantes incluyen una variedad de metales pesados que, debido a su naturaleza no degradable, se acumulan en los suelos durante largos periodos, afectando los ecosistemas costeros como las lomas (Hu et al., 2024; Ju et al., 2021).

En el contexto de las Lomas de Tacahuay, situadas en la región de Tacna, estos ecosistemas presentan una gran vulnerabilidad a la contaminación por ET, especialmente debido al crecimiento industrial acelerado en la región. Tacna y Moquegua albergan importantes yacimientos de cobre y otras actividades industriales que generan emisiones atmosféricas, con la consiguiente deposición de ET sobre las lomas costeras (Amoquinto, Huacaluna y Tacahuay) (Balbin, 1995; De La Cruz et al., 2018; Fourati et al., 2017; Perez et al., 2020). La deposición atmosférica de ET puede resultar en serios impactos para la salud de los ecosistemas, ya que estos elementos, a través de procesos de bioacumulación y biomagnificación, pueden ser tóxicos para los organismos que habitan las lomas, incluyendo los líquenes (Allen et al., 2019; Asplund & Wardle, 2017).

Los líquenes, que dominan aproximadamente el 8 % de la superficie terrestre, son organismos simbióticos altamente susceptibles a la contaminación atmosférica y se utilizan ampliamente como biomonitores de la calidad de ecosistemas naturales (Bird et al., 2019). Debido a su capacidad para absorber contaminantes del aire, los líquenes han demostrado ser herramientas efectivas en el monitoreo de la contaminación, especialmente en ecosistemas costeros (Vithanage et al., 2022). En particular, las Lomas de Tacahuay, reconocidas como áreas prioritarias de conservación por los gobiernos regionales de Tacna y Moquegua, presentan un ecosistema frágil que requiere de un

monitoreo constante para evaluar el estado de contaminación y los riesgos ecológicos asociados a la deposición de ET (IPAMA, 2018).

A pesar de la importancia de este ecosistema y de los estudios globales que demuestran el impacto de los ET en áreas naturales, en las Lomas de Tacahuay no se han realizado estudios específicos centrados en la contaminación por ET (Allen & Lendemer, 2022; Günthardt et al., 2019). Esto deja una brecha en el conocimiento sobre la magnitud del impacto de estos contaminantes en el área. La ausencia de datos detallados y confiables sobre los niveles de contaminación por ET en estas lomas dificulta el desarrollo de estrategias efectivas por parte de los gobiernos locales para la conservación y protección de estos ecosistemas frágiles.

El propósito de este estudio es identificar el grado de contaminación y evaluar el riesgo ecológico potencial asociado a elementos traza como Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, y Hg presentes en líquenes y suelos de las Lomas de Tacahuay, en la región de Tacna. Esta investigación pretende establecer un punto de referencia sobre los niveles de estos elementos, proporcionando información esencial para el desarrollo de planes de gestión ambiental orientados a proteger la biodiversidad y mantener la funcionalidad ecológica de este singular ecosistema costero.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación de la problemática

Las Lomas constituyen unidades fitogeográficas que albergan una gran diversidad de géneros y especies, muchas de las cuales son endémicas. Aproximadamente el 42 % de la flora está formada por especies exclusivas, destacando entre ellas los géneros *Mathewsia*, *Palaua*, *Weberbauerella*, *Domeykoa* y *Nolana*, entre otros. Hace unos 60 años, estas lomas cubrían alrededor de 600,000 hectáreas; sin embargo, debido a factores como la deforestación, el sobrepastoreo y la expansión urbana e industrial, actualmente solo abarcan cerca de 100,000 hectáreas (IPAMA, 2018; PUCP, 2020).

Durante las últimas tres décadas, el aumento en los niveles de material particulado (PM) proveniente de las actividades industriales en muchas regiones ha provocado un profundo deterioro de los ecosistemas (Cheng et al., 2014; Luo, Zhao, et al., 2019). La contaminación por material particulado y aerosoles ha provocado alteraciones significativas en los procesos de transferencia radiativa, lo cual podría estar afectando la actividad fotosintética de los ecosistemas naturales (Luo et al., 2019).

Muchos estudios han mostrado las características de la deposición atmosférica húmeda y seca a través de protocolos analíticos, para verificar el impacto de la carga de metales traza en el aire en diferentes áreas, lo cual es vital para evaluar la calidad ambiental general. Aunque la deposición atmosférica funciona como un mecanismo para la eliminación de metales traza que están unidos al PM atmosférico, al mismo tiempo, actúa como una vía para la incorporación de estos elementos en los ecosistemas terrestres y acuáticos (Vithanage et al., 2022).

En los últimos años las regiones de Tacna y Moquegua han tenido un crecimiento económico acelerado esto se debe a que son regiones que cuenta con los mayores yacimientos de cobre, albergan industrias dedicadas a la producción de harina de pescado, hidrocarburos, terminal portuario y el parque automotor sumado a ello clima árido estarían teniendo impacto en la degradación progresiva sobre sus lomas costeras

(Amoquinto, Huacaluna y Tacahuay) (Balbin, 1995; Fourati et al., 2017; Günthardt et al., 2019). Diversos estudios a nivel mundial han demostrado que los MT contaminan significativamente los ecosistemas naturales (Allen et al., 2019; Asplund & Wardle, 2017; Bidussi et al., 2016; Bird et al., 2019). Sin embargo, en las regiones de Tacna y Moquegua no se ha realizado ningún estudio centrado en la contaminación por MT sobre las lomas de Tacahuay.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál es el nivel de contaminación y el riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Zn, Cu, Pb, Cd, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos de las Lomas de Tacahuay, en la región de Tacna en el año 2023?

1.2.2. Problema Específicos

- a) ¿Cuál es la diversidad de líquenes presentes en las Lomas de Tacahuay, en la región de Tacna durante el año 2023?
- b) ¿Qué concentración presentan los metales traza (Zn, Cu, Pb, Cd, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en los líquenes de las Lomas de Tacahuay, en la región de Tacna durante el año 2023?
- c) ¿Cuál es el nivel de contaminación de los metales traza Zn, Cu, Pb, Cd, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg, en líquenes y suelos de las Lomas de Tacahuay, región de Tacna, durante el año 2023?
- d) ¿Qué nivel de riesgo ecológico representan los metales traza de Zn, Cu, Pb, Cd, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg, en los líquenes y suelos de las Lomas de Tacahuay, en la región de Tacna en el año 2023?

1.3. Situación contextual de la investigación

Las lomas, que son oasis estacionales temporales sostenidos por la niebla oceánica, desempeñaron un papel crucial en la antigua ecología humana a lo largo de la costa desértica del Pacífico de Perú, siendo uno de los pocos sitios donde se desarrolló una civilización y agricultura autosuficiente (Beresford et al., 2015). Sin embargo, las

actividades de desarrollo en la zona costera, junto con el crecimiento más rápido de la población humana (Neumann et al., 2015), las actividades industriales incluida la deposición atmosférica de aerosoles, fertilizantes agrícolas, estiércol de ganado, urbanización, actividades mineras, erosión de la corteza, movilización de los metales traza que están naturalmente presentes en las rocas, etc., que han introducido elementos traza (ET) potencialmente dañinos en el medio ambiente circundante (Vikas & Dwarakish, 2015). Estas actividades generan graves problemas de contaminación por ET y rompen el ciclo geoquímico en los ecosistemas costeros (Liu et al., 2019; Zhao et al., 2022).

Los materiales, tanto naturales como sintéticos, que son liberados en grandes cantidades a la atmósfera tienen efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, y se categorizan como contaminantes del aire (Manisalidis et al., 2020). Entre los principales contaminantes que se transportan por el aire se encuentran el ozono, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y las partículas (PM) (Vithanage et al., 2022). Este último es particularmente preocupante porque actúa como portador de una amplia gama de contaminantes, como ET, hidrocarburos, sulfatos y nitratos, por mencionar solo algunos (Landis et al., 2019; Sun et al., 2021).

Los ET se han convertido en importantes contaminantes del medio ambiente. La relevancia de este problema es obvia debido a su naturaleza no degradable, ya que, durante la migración, los ET solo pueden cambiar su nivel de concentración, ubicación y forma. Estos contaminantes pueden acumularse en los suelos durante mucho tiempo, por lo que los ecosistemas costeros en especial la lomas se encuentran muy fuertemente amenazados (Liu et al., 2018; Zhang et al., 2019). Los ET participan en diversos mecanismos biogeoquímicos que tienen una movilidad importante afectando los ecosistemas a través de procesos de bioacumulación y biomagnificación y son potencialmente tóxicos para el medio ambiente y la vida humana (Ali et al., 2019; Wang et al., 2020).

Los suelos tienen la capacidad de acumular diversos contaminantes, como plomo, cromo (Cr), níquel (Ni), (Pb), zinc (Zn), selenio (Se), cadmio (Cd), arsénico (As), mercurio (Hg) y cobre (Cu). Estos elementos traza han sido clasificados por la Agencia

de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) como contaminantes prioritarios debido a su toxicidad, su tendencia a la bioacumulación y su baja degradabilidad (Wang et al., 2020). Según Padeiro et al. (2016), el contenido de Cr y Ni está significativamente correlacionado con el sitio de eliminación de desechos, el Pb y el Cd están vinculados con los tanques de combustible, y la distribución de Zn está relacionada tanto con los tanques de combustible como con los sitios de disposición de desechos (Bhakta et al., 2022).

En las últimas décadas, han surgido estudios de investigación sobre contaminantes del aire que han prestado mucha atención a los transportes de ET y su cuantificación mediante el uso de diferentes sistemas de monitoreo, incluidos los sistemas biológicos o no, es decir, líquenes, musgos y vegetación urbana (Demková et al., 2017; Kumar et al., 2021). Recientes investigaciones se han centrado en los elementos traza presentes en la deposición atmosférica, adoptando una perspectiva ecológica con el propósito de analizar la acumulación a corto plazo y el riesgo de causar efectos adversos para la salud (Vithanage et al., 2022).

Agentes biológicos como musgos, líquenes y plantas superiores pueden fijar, absorber e inmovilizar biológicamente los metales atmosféricos depositados (Cloquet et al., 2006). Sin embargo, las plantas superiores no pueden absorber las partículas depositadas a través de su capa de cutícula. Por lo tanto, las plantas superiores también actúan como superficies impermeables para la deposición. Los musgos y líquenes pueden actuar como bioindicadores de la deposición atmosférica (Geiser et al., 2010). Al tener una alta relación superficie/volumen, acumulan una mayor cantidad de polvo y MTs de la atmósfera. Además, una mayor capacidad de intercambio de iones de musgos y líquenes conduce a una absorción eficiente de ET y otros iones. Además, la falta de cutícula y la variabilidad morfológica los convierten en sitios adecuados para la deposición atmosférica (Vithanage et al., 2022).

Los líquenes dominan aproximadamente el 8 % de la superficie terrestre de la Tierra (Asplund & Wardle, 2017) y pueden comprender la mayor parte de la biomasa de la capa del suelo en algunos bosques, tierras secas y tundras. Son un bioindicador fiable de la salud de los ecosistemas y un excelente biomonitor de los cambios ambientales,

climáticos y del paisaje global (Bird et al., 2019). Los líquenes también están involucrados en diversos procesos ecológicos y físicos, por ejemplo, influyen en el clima global al cambiar el albedo de la superficie terrestre (Bidussi et al., 2016), y son un componente importante, pero a menudo pasado por alto en los ciclos globales de carbono y nitrógeno (Allen et al., 2019). De hecho, la deposición atmosférica es una de las principales fuentes de nutrición mineral para los líquenes. Los líquenes son altamente susceptibles a la deposición y absorción de metales traza (MT) mediante procesos de deposición húmeda y seca, debido a que no cuentan con un sistema de raíces (He et al., 2021a).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el estado de contaminación y el riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos sobre las lomas de Tacahuay, región Tacna -2023

1.4.2. Objetivos específicos

- a) Identificar la diversidad de líquenes que se encuentran en las Lomas de Tacahuay, región de Tacna - 2023.
- b) Cuantificar la concentración de elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en líquenes y suelos en las Lomas de Tacahuay, región de Tacna - 2023.
- c) Analizar el grado de contaminación asociado a los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes en las Lomas de Tacahuay, región de Tacna - 2023.
- d) Evaluar el riesgo ecológico relacionado con los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en suelos de las Lomas de Tacahuay, región de Tacna - 2023.

1.5. Hipótesis

H_0 = La concentración de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos permiten evaluar el estado de contaminación y el riesgo ecológico potencial sobre las lomas de Tacahuay

H_1 = La concentración de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos no permiten evaluar el estado de contaminación y el riesgo ecológico potencial sobre las lomas de Tacahuay

1.6. Variables

1.6.1. Identificación de las variables

a) Variable independiente

Elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos:

b) Variable dependiente

b.1. Estado de contaminación:

- El factor de enriquecimiento
- Índice de geoacumulación

b.2. Riesgo ecológico

- Grado de contaminación (GC)
- Factor de respuesta tóxica (RT)
- Factor de riesgo ecológico potencial (RE).

1.7. Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Subdimensión	Indicador	Escala
Estado de contaminación y riesgo ecológico (Dependiente)	Estado de contaminación	El factor de enriquecimiento (FE)	$FE = \text{Log}(C_n/B_n)$ C_n = concentración de metal medida. B_n = concentración de fondo geoquímica del metal $I_{geo} = \text{Log}_2 \{C_n / (1,5 \times B_n)\}$ > 5 Muy fuerte > 4 – 5 Fuerte para muy fuerte > 3 – 4 Fuerte > 2 – 3 Moderado a fuerte > 1 - 2 Moderado > 0 – 1 No contaminado para moderado > 0 Prácticamente no contaminado	Numérica razón continua
		Índice de geoacumulación (I_{geo})	$GC_i f = C_i D / C_i R$ $GC < 1$ baja contaminación $1 \leq GC < 3$ moderado contaminación. $3 \leq GC < 6$ considerable contaminación. $GC \geq 6$ muy alta contaminación.	Numérica razón continua
	Riesgo ecológico	Factor de respuesta tóxica (RT)	$RT_R^i = T_R^i \times C_f^i$ $RT < 40$ Bajo riesgo ecológico potencial $40 \leq RT < 80$ moderado riesgo ecológico potencial. $80 \leq RT < 160$ considerable riesgo ecológico potencial. $160 \leq RT < 320$ alto riesgo ecológico potencial.	Numérica razón continua

			RT ≥ 320 muy alto riesgo ecológico potencial.	
			$RE = \sum_{i=1}^m E_R^i$	
		Factor de riesgo ecológico potencial (RE).	RE < 150 Bajo riesgo ecológico 150 ≤ RT < 300 moderado riesgo ecológico 300 ≤ RT < 600 considerable riesgo ecológico. RT ≥ 600 muy alto riesgo ecológico.	Numérica razón continua
Elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos (Independiente)	Elementos traza en líquenes	Bioacumulación	[] de elementos traza (ppb)	Numérica razón continua
		Biodiversidad	Biodiversidad alta Biodiversidad media Biodiversidad baja	Numérica razón continua
	Elementos traza en suelos		[] de elementos traza (ppb)	Numérica razón continua

1.8. Limitaciones de la investigación

Para investigar adecuadamente la contaminación y el riesgo ecológico de los elementos traza en líquenes y suelos, es esencial realizar un muestreo longitudinal en diferentes periodos. Este enfoque captura las variaciones temporales en la concentración de contaminantes, influenciadas por factores estacionales, cambios ambientales y actividades humanas, lo que afecta los resultados del estudio. Un diseño de muestreo con múltiples puntos temporales mejoraría la calidad de los datos y permitiría una evaluación más precisa del riesgo ecológico. Aunque el muestreo transversal ayuda a mapear la contaminación en líquenes, el muestreo longitudinal proporciona una visión más completa. Los resultados obtenidos no dejan de tener validez, importancia y significancia en el campo de la gestión ambiental y del desarrollo sostenible.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Uno de los entornos naturales menos investigados del Perú, que ha adquirido recientemente mayor relevancia, son los desiertos costeros, también llamados "Lomas" o "ecosistemas estacionales", ubicados a lo largo del desierto costero del Pacífico, tanto en Perú como en Chile (Flores & Van, 2024).

Se ha observado que los ecosistemas de montaña y de lomas, debido a sus gradientes topográficos y climáticos, así como a sus marcados contrastes estacionales, son especialmente sensibles a las variaciones en la temperatura media, las precipitaciones y la radiación solar. Estos ambientes se consideran únicos para evaluar el impacto del cambio climático (Berauer et al., 2019). Ancora et al. (2021), estudiaron el monte Amiata, un pico volcánico en el centro de Italia, está cubierto de bosques de robles, castaños y hayas, y forma parte de un sitio Natura 2000, Este ecosistema, ubicado sobre un gran acuífero, es susceptible al cambio climático y a la contaminación por transporte atmosférico a larga distancia, lo que podría afectar tanto las poblaciones de plantas relictas como la calidad del agua. Para evaluar la deposición atmosférica de oligoelementos, se analizaron la capa superior del suelo, líquenes epífitos (*Parmelia*) y musgo epigeo (*Hypnum cupressiforme*) en un gradiente altitudinal de 120 a 1730 m en la ladera noroeste. Los resultados indicaron que la composición del suelo está influenciada por la litología, mientras que las criptógamas, especialmente a más de 1300 m, mostraron una mayor acumulación de metales como Pb, Cd, Hg y Zn, debido a la mayor exposición a niebla, lluvia y nieve en los bosques de hayas.

Al igual que las zonas costeras sin hielo en la Antártida, los ecosistemas de lomas, caracterizados por su estacionalidad y sensibilidad a las condiciones climáticas, también dependen del agua para sostener su biodiversidad. En ambos casos, el agua, ya sea proveniente del deshielo antártico o de la neblina estacional en las lomas, no solo es vital para la supervivencia de organismos como musgos y líquenes, sino que también puede movilizar contaminantes, como metales pesados, afectando el equilibrio ecológico. En

este sentido, los ecosistemas de lomas, similares a los antárticos, son vulnerables al transporte de contaminantes que pueden comprometer su biota y procesos naturales, aunque en el caso de las lomas, el conocimiento sobre estos impactos sigue siendo limitado (Terauds & Lee, 2016). Los investigadores He et al. (2021b) descubrieron que los contaminantes metálicos en los suelos antárticos se concentran principalmente alrededor de las estaciones de investigación situadas en áreas costeras sin hielo. A pesar de la importancia de estos contaminantes, el riesgo que representan para el ecosistema antártico no está completamente claro, debido a las particularidades del clima y la biota de la región. En su estudio, evaluaron la deposición de metales mediante gradientes de difusión en películas delgadas (DGT), un método pasivo que mide el flujo de metales lábiles desde el suelo hasta los poros. Compararon estas mediciones con extractantes químicos de diversa fuerza (agua de alta pureza, ácido diluido y ácidos concentrados) para evaluar las diferencias geoquímicas y su impacto ambiental. Los hallazgos mostraron que, aunque algunos metales como el plomo presentaron altas concentraciones en extractos ácidos, su labilidad fue baja, mientras que, en otros casos, como el zinc, hubo una alta labilidad detectada por DGT, lo que indica una fuente activa de este metal en los suelos. Este estudio concluye que el método DGT es eficaz para identificar sitios contaminados y ofrece mediciones más relevantes ambientalmente sobre la labilidad de los metales en los suelos antárticos, en comparación con los extractantes químicos tradicionales.

De manera similar a los líquenes y musgos que crecen en sustratos de basalto, los líquenes de las lomas costeras también tienen una notable capacidad para prosperar en superficies rocosas y absorber elementos del entorno. En ambos ecosistemas, los líquenes actúan como bioindicadores al absorber elementos provenientes de la erosión y la atmósfera. En las lomas costeras, donde las condiciones de humedad varían de manera estacional debido a la influencia de la neblina, los líquenes desempeñan un rol fundamental en la absorción de nutrientes y contaminantes, lo que los convierte en organismos especialmente sensibles para monitorear los efectos ambientales y los cambios climáticos en estas zonas (Xu et al., 2013). El trabajo desarrollado por Bao et al. (2016) analizaron la capacidad de los líquenes y musgos para acumular oligoelementos en sus tejidos cuando crecen sobre sustratos basálticos. En su investigación, se evaluaron

oligoelementos presentes tanto en el basalto, recolectado desde centros volcánicos hasta lugares de placas de chorro (representando cuatro fases eruptivas diferentes), como en los líquenes y musgos cercanos para examinar su relación como fuente-receptor de elementos. Los resultados mostraron que elementos como As, Sr, Mo, Cd y Ba estaban enriquecidos en el basalto, pero empobrecidos en líquenes y musgos. Por el contrario, Zn, Hg y Pb se encontraban en mayores concentraciones en los líquenes y musgos que en el basalto. Con el envejecimiento del basalto, elementos como Cr, Mn, Fe, Ni y Cu se enriquecieron en los líquenes y musgos, mientras que se agotaron en el basalto. Además, los líquenes, especialmente el número 1, mostraron una mayor capacidad de absorción de elementos como Cr, Co, Cu, Zn y Os. El azufre (S) fue el elemento más asimilado por la vegetación, seguido de I, C, Pb, Zn y Hg. También se destacó que las composiciones isotópicas de hidrógeno y oxígeno en las muestras de agua indicaron diferencias en las fuentes de agua superficial y subterránea, dependiendo de la estación del año y la humedad relativa en la zona estudiada.

Los líquenes, por su sensibilidad a la contaminación, se utilizan como bioindicadores para evaluar la calidad del aire. En áreas muy contaminadas, pueden detectar cambios en las concentraciones de elementos tóxicos en semanas, mientras que en zonas menos afectadas estos cambios pueden tardar décadas. Los investigadores emplean líquenes tanto en su entorno natural como trasplantados a sitios donde no crecen de forma natural, lo que es útil para monitorear la contaminación en lugares como las lomas costeras. En estos ecosistemas, los líquenes reflejan la acumulación de contaminantes locales y transportados, proporcionando una herramienta clave para medir la calidad del aire, aunque aún se desconocen algunos aspectos sobre la absorción de metales en ellos (Bao et al., 2016).

En un estudio realizado por Bubach et al. (2024), investigaron la capacidad de los líquenes para monitorear la contaminación ambiental. Estos organismos, que resultan de la simbiosis entre hongos y algas, tienen la capacidad de absorber gases, agua, nutrientes y contaminantes a través de su corteza, lo que los convierte en bioindicadores ideales de los procesos ambientales. Aunque los líquenes están ampliamente distribuidos, algunas especies no se encuentran en ciertas áreas, por lo que se utilizan trasplantes para estudiar

la contaminación del aire. En este estudio, se trasplantaron líquenes de la especie fruticosa *Protousnea magellanica* en la Estación EMMA, ubicada en un área suburbana de San Carlos de Bariloche, dentro del Parque Nacional Nahuel Huapi, en el norte de la Patagonia, Argentina, como parte del Sistema Global de Observación de Mercurio (GMOS). El objetivo fue evaluar la absorción de elementos, con un enfoque particular en el mercurio. Durante un periodo de 483 días de exposición, se realizaron muestreos periódicos de los líquenes trasplantados de *P. magellanica* y de la especie local *Usnea pusilla*. A través de un análisis de activación de neutrones en un reactor nuclear, se determinó la composición elemental y la cantidad de mercurio presente en los talos. Además, la concentración de mercurio atmosférico (en su forma gaseosa elemental, GEM) fue monitoreada en la estación EMMA mediante un sistema de fluorescencia atómica. Los líquenes demostraron una gran capacidad para acumular mercurio, con concentraciones que superaron en tres órdenes de magnitud los niveles de mercurio atmosférico, lo cual subraya su efectividad como bioacumuladores. Las concentraciones de mercurio en *P. magellanica* (0,080–0,327 µg/g de peso seco) estuvieron en el rango de valores observados en líquenes de la región con bajo impacto humano. Ambas especies de líquenes mostraron una tendencia similar en la acumulación de mercurio, con un aumento hasta el día 25 y una posterior disminución hasta el día 385. En *U. pusilla*, la relación entre el mercurio y elementos *litofílicos* como el lantano sugirió que el mercurio provenía principalmente de partículas de polvo en el aire.

El derretimiento del hielo en la Antártida está provocando una rápida expansión de las áreas lacustres y cambios en su composición biogeoquímica, lo que convierte a estos cuerpos de agua en indicadores clave del cambio climático en los ecosistemas polares. Los metales pesados, como plomo, cadmio, cobre, zinc y níquel, llegan a los lagos a través del deshielo y la deposición de aerosoles, y su presencia ha sido detectada en varios estudios. Dado que estos sistemas están bajo presión por la actividad humana, es crucial un monitoreo continuo para evaluar su impacto en un clima cambiante. De manera similar, los líquenes de las lomas costeras también pueden actuar como bioindicadores al acumular metales pesados y reflejar las influencias tanto naturales como antropogénicas en su entorno.

M.B. et al. (2024) analizaron el sistema lacustre antártico y destacaron su papel fundamental en la absorción y reducción de los impactos antropogénicos asociados con el cambio climático. Un estudio sobre los lagos cercanos a las colinas Schirmacher en la Antártida Oriental revela que los lagos cerrados, rodeados por barreras topográficas, presentan concentraciones moderadamente más altas de iones principales y metales traza en comparación con los lagos proglaciares. Los índices de calidad del agua (ICA: 7,58–12,63) y de evaluación de la contaminación (PEI: 1,36–2,35) indican que el agua es de buena calidad. No obstante, la correlación entre elementos litogénicos como el aluminio y hierro, y metales tóxicos como cadmio, cromo y bario, señala un incremento de los impactos antropogénicos. Los análisis mostraron que las principales fuentes de metales traza son el entorno geológico y las partículas de polvo en aerosol, influenciadas por la topografía local. Este estudio proporciona datos importantes para monitorear y predecir la contaminación futura en los lagos de Schirmacher Hills, destacando la necesidad de programas continuos de evaluación debido a la presencia de estaciones de investigación, actividades turísticas y otros factores antropogénicos. Estos esfuerzos son esenciales para proteger este ecosistema prístino en el contexto de un clima antártico en constante cambio.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Fuente de contaminantes orgánicos

Los metales como el Hg, Pb, Cd, Se y As son esparcidos en los ecosistemas por diversas actividades humanas y estos se depositan en el agua y suelo lentamente (Babel et al, 2003), así mismo en algunos países, estos contaminantes se les presta poca atención en el impacto ambiental que ocasionan con el drenaje de desechos en lagos y ríos el cual es más común (Gupta et al., 2015), las actividades no controladas causan envenenamiento de los recursos hídricos y todo el ecosistema de los alrededores (Tabla 3).

2.2.2. Metales pesados

Los metales pesados son vertidos en cuerpos de agua por diversas industrias, como las de papel, textiles, plásticos, cerámica, cemento, minería, y chapado electrónico, entre otras. Estos metales resultan perjudiciales para las plantas, los animales y los seres

humanos. Además, los metales pesados se bioacumulan en las células a lo largo de la cadena alimentaria (Vargas et al., 2017). Para tratar aguas contaminadas por estos metales, se emplean diversas tecnologías de tratamiento, como la precipitación química, extracción, filtración, y ósmosis inversa, entre otras (Santos et al., 2015).

2.2.3. Los metales pesados y sus efectos nocivos en la salud humana

Los metales pesados son, en general, aquellos metales y metaloides que poseen una densidad atómica superior a 4 g/cm^3 , es decir, aproximadamente cinco veces mayor que la del agua. Entre los metales pesados más comunes se encuentran el arsénico, cromo, cadmio, plomo, cobre, zinc, níquel, hierro y bario. El carácter tóxico de los metales pesados se agrava debido a su incapacidad para degradarse de manera natural con el tiempo. La acumulación de estos metales en las plantas, el suelo y los ecosistemas acuáticos facilita su ingreso en la cadena alimentaria. La acumulación de metales pesados en el organismo humano puede provocar graves problemas de salud, tales como cáncer, alteraciones en el crecimiento y la reproducción, daños neurológicos, lesiones cerebrales permanentes, encefalopatías y trastornos crónicos en el sistema nervioso (Syeda et al., 2022).

2.2.4. El desierto costero del oeste de Sudamérica

No hay un consenso claro sobre el origen del desierto costero en el oeste de América del Sur. Las estimaciones sobre la paleolatitud y la tectónica sugieren que este desierto pudo haberse formado hace entre 90 y 150 millones de años. El hundimiento del aire a gran escala, la presencia de aguas frías en la costa debido a la corriente de Humboldt, y el levantamiento de la cordillera de los Andes son factores que, en conjunto, generan la extrema aridez de la región. Además, el efecto de continentalidad restringe la entrada de precipitaciones desde el este hacia el interior del continente. La sequedad del desierto parece haber aumentado de forma considerable hacia finales del Plioceno, hace aproximadamente 5 millones de años, lo que ha convertido a esta zona en uno de los desiertos más áridos del planeta (Gonzales et al., 2023).

Figura 1*Paisaje del desierto costero*

Nota. América del Sur – Desierto de Patagonia. Foto: Expansión.

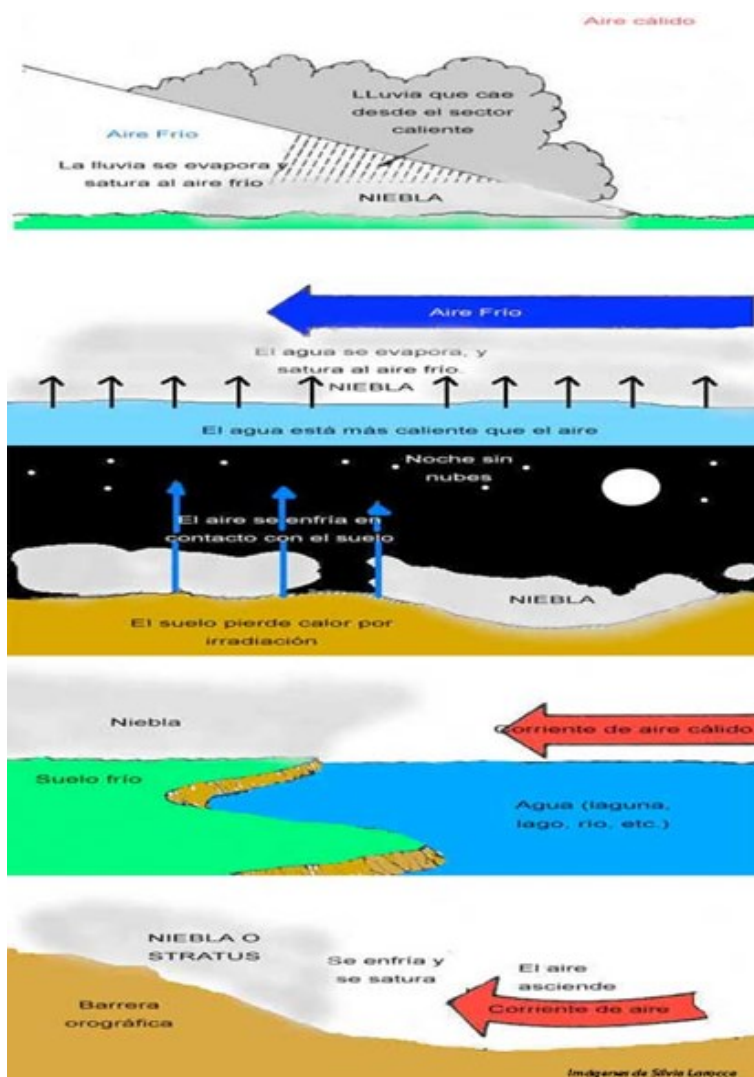
2.2.5. Lomas costeras

En los desiertos costeros, las precipitaciones son extremadamente escasas, irregulares y difíciles de predecir, lo que convierte al agua en el factor clave que regula los procesos biológicos esenciales, con una limitada capacidad de resiliencia. La condensación de niebla oceánica es una fuente crucial de humedad en varios ecosistemas costeros, como los bosques de secuoyas de California, el bosque relicto de Fray Jorge, los cafetales de Angola, las comunidades de abetos en los Apalaches del sur y las lomas costeras. Esta niebla oceánica aporta una parte significativa de la humedad total en estos ecosistemas. En los desiertos costeros, la mayor parte de la niebla es generada por la corriente fría de Humboldt en el Océano Pacífico, lo que provoca una inversión térmica que forma una densa capa de niebla, conocida como "garúa", que se deposita en las colinas más bajas de los Andes occidentales. La vegetación en estos desiertos costeros está limitada a las comunidades de las lomas costeras, generalmente ubicadas en laderas orientadas hacia el océano, y a las comunidades ribereñas. Se debe resaltar que millones de personas en diversas partes del mundo, particularmente en América Latina, habitan grandes ciudades situadas en la costa y dependen de los desiertos costeros para obtener

servicios ecosistémicos esenciales, los cuales están siendo esta cada vez más amenazados por el cambio climático así también la desertificación (Flores & Van, 2024; Gonzales et al., 2023; Kalicki & Kalicki, 2020).

Figura 2

Formación de niebla



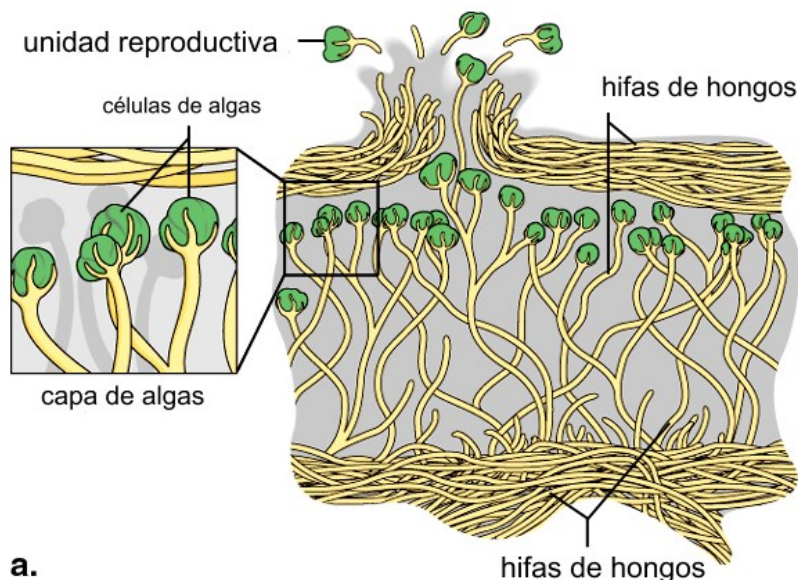
Nota. Interacción entre aire frío, evaporación y saturación del aire. la niebla puede formarse cuando el aire frío queda atrapado por una barrera geográfica, provocando la condensación debido al enfriamiento y ascenso del aire.

2.2.6. Los líquenes como bioindicadores y biomonitores de la contaminación del aire

El liquen talo es una planta inferior vegetativa simbiótica compleja compuesta por dos organismos: un hongo y un alga o cianobacteria. La pared celular está formada por una capa multilaminada y una granular. Adherida al exterior de las células hay una fibrosa de polisacárido capa. Las hifas del liquen pueden orientarse de forma aleatoria o regular de forma paralela; estos dos tipos forman la estructura básica de las capas. La corteza (capa exterior) del liquen sirve como regulador del intercambio de gases y soporte protector del liquen y es en esta capa donde se encuentran pequeños huecos que permiten que los soredia (las estructuras reproductivas de los líquenes) pasen a la atmósfera. Esta capa está cubierta por una epicorteza, que es un polisacárido poroso y no celular. Se cree que la naturaleza porosa de la epicorteza es lo que permite un intercambio gaseoso eficiente (M.B. et al., 2024). La figura 3 muestra la sección transversal de un liquen folioso.

Figura 3

Corte transversal liquen folioso



Los líquenes se dividen en tres tipos principales: fruticosos, foliosos y crustosos. Se reconoce que los líquenes foliosos tienen la mayor relación entre superficie y peso seco, lo que facilita su capacidad para atrapar partículas en suspensión en comparación con los líquenes fruticosos (Overview et al., 1978). Debido a su estructura con pocos puntos de anclaje al sustrato, los líquenes foliosos están completamente expuestos al aire ambiente. En cambio, los líquenes fruticosos tienen una estructura más plana, parecida a una hoja, con capas superiores e inferiores diferenciadas, lo que limita el contacto de la capa inferior con el aire ambiente. Por su parte, los líquenes crustosos se adhieren fuertemente a sus sustratos, lo que dificulta su recolección para análisis y reduce su exposición directa al entorno (Oksanen, 2006).

Figura 4

Morfología de líquenes



Nota. A: Fruticoloso - *Pseudevernia furfuracea*. B: Foliáceo - *Xanthoria parietina*. C: Crustáceos - *Lecanora chlarotera*. D. Compuesto - *Cladonia* sp.

Los líquenes se han utilizado para controlar la contaminación del aire de tres maneras diferentes:

1. Determinar la concentración de contaminantes específicos acumulados en el talo;
2. Utilizar el efecto de las fuentes de contaminación sobre la vida útil y la presencia o ausencia de especies de líquenes para trazar un mapa de la distribución y el efecto de la contaminación en un área específica; y,
3. Tomar líquenes sanos con poca acumulación de contaminantes de fondo y trasplantarlos a áreas contaminadas para medir la acumulación de contaminantes o la consiguiente degradación del talo.

2.2.7. Absorción de metales por líquenes

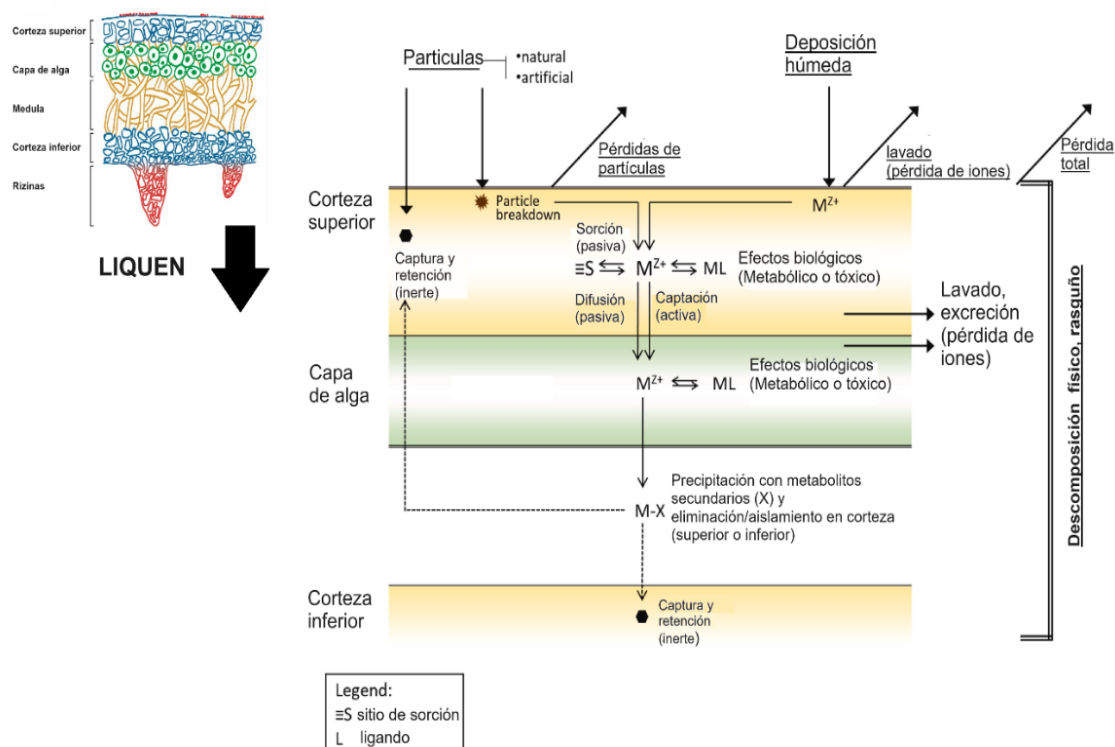
Los líquenes están formados por una simbiosis entre hongos (micobiontes) y algas o cianobacterias (ficobiontes), en la cual el micobionte depende de las algas para obtener carbono orgánico a través de la fotosíntesis, mientras que las algas se benefician al recibir agua, minerales y protección contra factores ambientales adversos. Esta simbiosis les permite colonizar ambientes extremos y desempeñar un rol clave en la captura de contaminantes atmosféricos. Los líquenes, al no poseer raíces, absorben agua, minerales y contaminantes directamente del entorno a través de su talo, lo cual los convierte en excelentes indicadores biológicos de la calidad del aire. Estos organismos tienen la capacidad de acumular metales pesados, como Pb, Cd, Cu, Zn, y radionúclidos en sus talos, además de otros contaminantes orgánicos persistentes, en concentraciones que suelen ser mucho mayores que las presentes en el aire ambiental (Grube & Berg, 2009).

La capacidad de los líquenes para retener contaminantes varía según su morfología: los líquenes fruticosos, con su talo ramificado, y los foliosos, con estructura en forma de lámina, tienen mayor superficie de exposición al aire, lo que facilita la captura de partículas suspendidas, en comparación con los líquenes crustosos, que están más adheridos a los sustratos. Debido a esto, los líquenes se utilizan desde hace décadas para monitorear la deposición atmosférica en ecosistemas como los polares y alpinos, donde representan una gran parte de la biomasa terrestre.

La absorción de metales en los líquenes puede ocurrir de tres formas: (1) partículas adsorbidas en la superficie del talo o dentro de sus espacios intercelulares, (2) iones como Al^{3+} , Fe^{2+} , y Ti^{4+} unidos a sitios de intercambio extracelulares o intracelulares, y (3) iones intracelulares solubles como Ca^{2+} o Mg^{2+} . Los líquenes capturan partículas de origen tanto natural como antropogénico (procedentes de actividades como minería, metalurgia o combustión de combustibles fósiles). Este proceso de captación de metales es diferente al de los dispositivos automáticos de monitoreo de partículas, y las concentraciones de metales en líquenes pueden no correlacionarse directamente con las medidas de PM en el aire. En ambientes secos, como desiertos fríos o cálidos, los líquenes epilíticos son especialmente efectivos como biomonitores, mostrando altas concentraciones de elementos litofílicos como Al, Ti y Si (Abas, 2021).

Figura 5

Proceso de absorción



Nota. Radiocontaminantes en líquenes (M y M^{Z+}) (Anderson et al., 2022).

La absorción extracelular de metales en los líquenes es un proceso físico-químico rápido y pasivo, donde cationes como Na^+ , K^+ , y Mg^{2+} se unen a grupos funcionales como hidroxilos ($-\text{OH}$), fosfatos (PO_4^{3-}), y aminas ($-\text{NH}_2$). Este proceso es reversible, ya que cationes con mayor afinidad pueden desplazar a otros previamente absorbidos. Nieboer y Richardson (1980) clasificaron los metales en tres categorías: (A) aceptores “duros” como Li^+ , Al^{3+} , y Fe^{3+} , que interactúan con ligandos que contienen oxígeno; (B) elementos tóxicos como Hg^{2+} , Pb^{2+} , y Cd^{2+} , que forman enlaces estables con ligandos que contienen azufre o nitrógeno; y (C) elementos intermedios como Zn^{2+} , que pueden interactuar con una variedad de ligandos.

Finalmente, la absorción intracelular de metales es un proceso más lento y dependiente de energía, mediado por la membrana plasmática de las células fúngicas, que constituyen aproximadamente el 90 % de la biomasa del líquen. Aunque los ficobiontes (algas) también pueden contribuir en la acumulación de algunos elementos, la mayor parte de la absorción de metales es realizada por el micobionte (hongo), lo que convierte a los líquenes en importantes bioacumuladores de metales en distintos ecosistemas (Abas, 2021; Grube & Berg, 2009).

2.2.8. Respuesta de los líquenes a los contaminantes del aire

En estudios centrados en la calidad atmosférica, los líquenes se emplean comúnmente como biomonitores basados en receptores. Numerosos esfuerzos de investigación han explorado la morfología y fisiología de los líquenes en relación con el dióxido de azufre, los compuestos que lo componen, el ozono, los principales metales y diversos contaminantes atmosféricos. Muchos investigadores han reconocido y empleado los líquenes como herramientas auxiliares para evaluar la calidad atmosférica. Las propiedades de los líquenes utilizadas para cuantificar la contaminación abarcan características morfológicas, fisiológicas y ecológicas. Múltiples estudios han enfatizado la importancia de la morfología y fisiología de los líquenes en la selección de especies indicadoras. Se ha explorado la eficacia de los análisis microscópicos y moleculares, que abarcan matrices de células de Protoctista dentro de la organización del talo, para evaluar la calidad atmosférica. Estos análisis implican la cuantificación de la eficacia de reducción, alteraciones ultraestructurales del talo, cambios en las variables de emisión de

pigmentos, degradación de compuestos complejos. pigmentos y actividad química modificada junto con las tasas de respiración (Garty, 2001; Port et al., 2018; Thakur et al., 2024).

Tabla 1*Mecanismo mediado por líquenes*

Especies de líquenes	Metales/otros contaminantes	Resultados/ Mecanismo	Referencias
<i>Canoparmelia texana</i> (Tuck.) Elix & Hale, <i>Pyxine subcinerea</i> Stirt. y <i>P. hispidula</i> (Ach.) Essl.	Cr, Cu Fe y Zn,	En una zona contaminada de la ciudad de Srinagar y las colinas Garhwal del Himalaya occidental, se observó la acumulación de seis metales pesados, tales como hierro (Fe), cromo (Cr), cobre (Cu), zinc (Zn), plomo (Pb), y níquel (Ni) en varias especies de líquenes foliáceos epífitos (<i>Canoparmelia texana</i> , <i>Pyxine subcinerea</i> , y <i>P. hispidula</i>). <i>C. texana</i> mostró una menor acumulación de Fe, Zn, Cr y Cu en comparación con <i>P. subcinerea</i> y <i>P. hispidula</i> , las cuales mostraron una mayor absorción de metales pesados debido a una mayor exposición a los contaminantes. <i>P. subcinerea</i> fue la especie que presentó la máxima acumulación (Singh et al., 2018).	Singh et al., (2018)
<i>Lepraria lobificans</i> Nyl	Cr, Ni, Al, Fe, Cu, Cd and Zn	El líquen de lepra, <i>Lepraria lobificans</i> , crece de manera natural sobre edificios y monumentos de Mandav, en la India central, y es capaz de regular de forma eficiente los metales del ambiente. Se observó que el hierro (Fe) presentaba una elevada absorción, tanto en el talo como en la superficie, con un valor promedio de 2195,63 µg/g, además de siete metales adicionales (Bajpai et al., 2010d).	Bajpai et al. (2010d)
<i>Parmotrema teñido</i> (Nyl.)	Cd, Pb, Zn, Cr, Cu, K y Ni	El estudio sobre <i>Parmotrema tintorum</i> en las ciudades del valle de Brahmaputra (Tezpur y Guwahati) mostró cómo los factores ambientales afectan la anatomía y fisiología del líquen, así como la acumulación de contaminantes. Los resultados indicaron que los trasplantes de <i>Parmotrema teñido</i> presentaban un contenido máximo de clorofila en los líquenes de la ciudad de Tezpur en comparación con Guwahati (Daimari et al., 2021).	Daimari et al. (2021)
<i>Parmotrema reticulatum</i> (Taylor) M. Choisy	Cr, Cu, Pb y Zn	A lo largo de dos años, se rastrearon tres clases de líquenes utilizando biomonitoreo activo y pasivo para determinar los niveles de metales pesados “en el talo” y “dentro del talo”. En general, la investigación indica que los líquenes absorben contaminantes del aire de manera constante antes de que se restablezca el equilibrio y <i>P. reticulatum</i> fue la especie activa para rastrear las concentraciones de emisiones espaciotemporales.	Kularatne y De Freitas (2013)

Nota. Tomado de Thakur et al. (2024)

Tabla 2*Mecanismo mediado por líquenes*

Especies de líquenes	Metales/otros contaminantes	Resultados/ Mecanismo	Referencias
<i>Phaeophyscia hispidula</i> (Ach.) Essl	Cd, Cu, Fe y Zn	La proteína se asoció significativa y negativamente con las cantidades de pigmento entre las variables biológicas ($r = -0,3838$, Chl. b); $-0,5809$ (carotenoide); $-0,5034$ (OD), pero se asoció de manera muy significativa con el Cd ($r = -0,6822$, $P < 0,01$). Entre los contaminantes, Cu ($r = -0,4639$), Fe ($r = -0,2676$) y Zn ($r = -0,0549$) se asociaron negativamente con el Cd. También se observó que la cantidad de clorofila, así como de proteína, aumentaba proporcionalmente a la cantidad de contaminantes metálicos, lo que sugiere la vía de respuesta al estrés en <i>P. hispidula</i> (región del Himalaya).	Shukla et al. (2012b)
<i>Cocos de Pyxine</i> (Sw.) Nyl y <i>Phaeophyscia hispidula</i> (Ach.) Essl	Pb, Cd, Fe, Al, Zn, As, Cr.	En las ciudades de Katni y Rewa de Madhya Pradesh, en el centro de la India, se evaluó el alcance de las emisiones ambientales de metales pesados. <i>Se evaluó que los cocos de Pyxine y Phaeophyscia hispidula se utilizarían como especies indicadoras de siete contaminantes. Los conjuntos de eficacia de metales fueron Fe > Al > Zn > As > Cr > Pb > Cd en la ciudad de Katni y Al > Fe > Zn > Cr > As > Pb > Cd en la ciudad de Rewa.</i>	Bajpai et al., (2011)
<i>Cocos de pyxina</i> (Sw.) Nyl	Cu, Pb, Al, As, Cd, Cr, Fe y Zn	Se investigó la especie como marcador bioindicador, así como la influencia de los contaminantes ambientales en la integridad fisiológica. Se calcularon Fv/Fm, la proporción de degradación de clorofila y las estimaciones dimensionales de Cd, Cr, Al, As, Cu, Pb, Fe y Zn encontradas en el talo. El análisis de datos del informe mostró asociaciones importantes entre Fv/Fm así como la calidad de los elementos (Al y Cr).	Karakoti et al. (2014)

Nota. Evaluación de diferentes contaminantes en el medio ambiente. Fuente: Thakur et al. (2024).

2.2.9. Análisis de la contaminación causada por metales pesados

La evaluación de riesgos ambientales en ecosistemas por metales pesados es un proceso destinado a identificar, analizar y gestionar los efectos potencialmente dañinos de estos contaminantes sobre los ecosistemas. Los metales pesados, como el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el cadmio (Cd) y el arsénico (As), son persistentes en el ambiente y pueden acumularse en el suelo, el agua y los organismos vivos, afectando gravemente a la biodiversidad y a los procesos ecológicos (Pecina et al., 2021).

a) Índice de geoacumulación (I_{geo})

El Índice de Geoacumulación (GAI) es una herramienta para evaluar los niveles de contaminantes en suelos, propuesto por el científico alemán Muller. Este método considera la influencia de la contaminación antropogénica, los valores de fondo geoquímicos ambientales y los cambios en estos valores debido a la formación natural de rocas (Hou et al., 2023).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_i}{k * B_i} \quad [1]$$

La fórmula para calcular el IR incluye el Er_i , que representa el índice de riesgo ecológico para cada elemento individual, y el Tr_i , que es el factor de respuesta tóxica. Los valores de Tr para los elementos Hg, Cd, As, Ni, Pb, Cu, Cr, y Zn son 40, 30, 10, 6, 5, 5, 2 y 1, respectivamente. C_i corresponde a la concentración del elemento traza, mientras que B_i se refiere al contenido de fondo del mismo.

Los niveles de riesgo para un único elemento (Er_i) se clasifican en: bajo ($Er_i < 40$), moderado ($40 \leq Er_i < 80$), considerable ($80 \leq Er_i < 160$), alto ($160 \leq Er_i < 320$), y muy alto ($Er_i \geq 320$). De manera similar, el índice de riesgo ecológico total (IR) se categoriza como: bajo ($IR \leq 150$), moderado ($150 < IR \leq 300$), considerable ($300 < IR \leq 600$), y muy alto ($IR > 600$).

b) Evaluación de riesgos ecológicos

El Índice de Riesgo Ecológico Potencial (IR) se utiliza para evaluar la sensibilidad de las comunidades biológicas frente a elementos traza. En este estudio, se empleó este índice para analizar el riesgo ambiental de la UGS (Hou et al., 2023; Pecina et al., 2021).

$$IR_E = \sum_{i=1}^m RT_R^i \quad [2]$$

La fórmula para calcular el IR incluye el cálculo del Er_i , que representa el índice de riesgo ecológico para un solo elemento, y el Tr_i , que es el factor de respuesta tóxica. Los valores de Tr para elementos como Hg, Cd, As, Ni, Pb, Cu, Cr y Zn son 40, 30, 10, 6, 5, 5, 2 y 1, respectivamente. C_i se refiere al contenido de cada elemento traza y Bi al contenido de fondo correspondiente. Los niveles de riesgo para un solo elemento (Er_i) se clasifican en: riesgo bajo ($Er_i < 40$), moderado ($40 \leq Er_i < 80$), considerable ($80 \leq Er_i < 160$), alto ($160 \leq Er_i < 320$), y muy alto ($Er_i \geq 320$). De forma similar, el IR total se clasifica en riesgo bajo ($RI \leq 150$), moderado ($150 < RI \leq 300$), considerable ($300 < RI \leq 600$), y muy alto ($RI > 600$).

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Liquen

Los líquenes de algas y/o cianobacterias son el fenotipo simbiótico de hongos nutricionalmente especializados que viven como biotrofos ecológicamente obligados en simbiosis con fotobiontes (Giordani et al., 2013)

2.3.2. Bioacumulación

La bioacumulación en líquenes se refiere al proceso mediante el cual estos organismos absorben y retienen sustancias, como metales pesados y otros contaminantes, del aire, agua y suelo en su entorno. Los líquenes, que son asociaciones simbióticas entre hongos y algas o cianobacterias, carecen de estructuras especializadas como raíces, por lo que obtienen todos sus nutrientes directamente del ambiente, incluyendo contaminantes presentes en la atmósfera (Kienzl et al., 2003; Wolterbeek et al., 2003).

2.3.3. Biomonitor

Es un organismo vivo que se utiliza para evaluar la calidad del medio ambiente, detectando y acumulando contaminantes presentes en el aire, agua o suelo. Estos organismos, como los líquenes, musgos, plantas, animales o incluso microorganismos, son sensibles a cambios en su entorno, lo que los convierte en indicadores naturales de la presencia de sustancias nocivas o alteraciones ecológicas (Garty, 2001) .

2.3.4. Evaluación de Riesgo ambiental

Es una metodología espacialmente explícita que examina los riesgos que plantean las actividades o intervenciones humanas sobre la salud humana y los receptores ecológicos como animales, plantas o un ecosistema completo. Mientras que la ERA para la salud estima la probabilidad de efectos adversos para la salud cuando los humanos están expuestos a agentes nocivos presentes en el aire, el suelo o el agua, la ERA ecológica se centra en la probabilidad de que puedan ocurrir efectos ecológicos adversos cuando los receptores ecológicos están expuestos a uno o más factores estresantes químicos (p. ej., metales tóxicos, pesticidas), biológicos (p. ej., especies invasoras) o físicos (p. ej. , cambio climático , cambio de uso de la tierra) (Pecina et al., 2021)

2.3.5. Evaluación de servicios ecosistémicos (SE)

Es una metodología diseñada para brindar una mejor comprensión de los ecosistemas y sus funciones, cómo los valoramos y cómo contribuyen al bienestar humano. Se han desarrollado varios marcos para comprender los vínculos y las interacciones entre los ecosistemas y el bienestar humano. El marco de cascada de SE propuesto por Haines y Potschin (2010) ha sido ampliamente adoptado como modelo conceptual que guía el camino sobre cómo evaluar los SE (Hou et al., 2023).

2.3.6. Variables físicas

Las variables físicas como la temperatura y las precipitaciones desempeñan un papel fundamental en el seguimiento de los cambios atmosféricos. La temperatura sirve como indicador crucial y resultado final de los procesos ambientales relacionados con los recursos energéticos y su dinámica. Los ejemplos incluyen el flujo de calor derivado del

suelo, la evapotranspiración, la radiación solar y la convección. Numerosos estudios en diferentes regiones del mundo demuestran que la temperatura media global y la ocurrencia de precipitaciones intensas han aumentado significativamente en los últimos tiempos (De Luca et al., 2022).

2.3.7. Variables químicas

Las variables compuestas utilizadas para el monitoreo de la contaminación abarcan la determinación de elementos potencialmente tóxicos como mercurio (Hg), zinc (Zn), plomo (Pb), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cromo (Cr), aluminio (Al), cobre (Cu), hierro (Fe), cadmio (Cd), níquel (Ni) y otros. Además, se monitorean gases contaminantes como SO_x, NO_x, etc. Los investigadores estudian el seguimiento de los metales pesados a través de especies de plantas y evalúan la calidad atmosférica en diversas condiciones (De Luca et al., 2022).

2.3.8. Variables biológicas

Numerosas investigaciones han evaluado la calidad de la atmósfera mediante la utilización de microorganismos (virus, bacterias), plantas (musgo, líquenes) y animales (arañas, peces, larvas de luciérnaga, libélulas) como indicadores biológicos. Se ha determinado que las variaciones en los procesos biológicos de animales y plantas están profundamente influenciadas por variables ambientales y niveles de contaminación de la región (De Luca et al., 2022).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo, nivel y diseño de la investigación

El enfoque del estudio es cuantitativo de nivel descriptivo causal/comparativo y de diseño no experimental, transversal (Hernández et al., 2014).

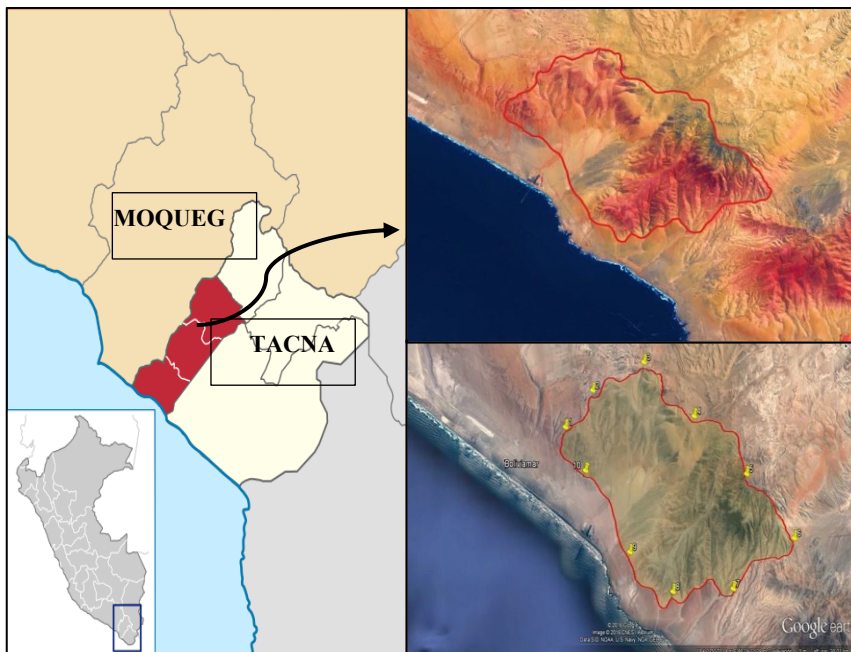
3.2. Población y muestra de estudio

3.2.1. Población

La población objeto de estudio en esta investigación incluyó diversas especies de líquenes presentes en distintas altitudes y tipos de suelos en las Lomas de Tacahuay.

Figura 6

Ubicación Geográfica Lomas de Tacahuay



Nota. Distrito de Ite provincia Jorge Basadre al norte de la Región Tacna.

3.2.2. Muestreo

El muestreo llevado a cabo fue de tipo no probabilístico (Hernández et al., 2014), determinado por la conveniencia del investigador. Se establecieron tanto el tamaño de las estaciones de muestreo como las unidades de muestreo a diferentes altitudes seleccionadas (641, 654, 685, 709 y 779 msnm).

3.2.3. Determinación del tamaño de las estaciones de muestreo

Se establecieron cinco estaciones de muestreo en altitudes de 641, 654, 685, 709 y 779 metros sobre el nivel del mar. Cada estación, con un área rectangular de 12 m² (3 x 4 m), se delimitó mediante cinco estacas colocadas en las esquinas y en el centro, utilizando GPS para registrar los puntos de referencia geográfica (Valeriano, 2024). En total, se establecieron 25 unidades de muestreo.

En cada estación se diseñaron cinco cuadrantes de muestreo, que incluyen: una parcela de 3 x 4 m, dos cuadrantes en el suelo (50 x 50 cm) y tres cuadrantes para muestrear árboles y arbustos (25 x 25 cm) (Figura 7), con el propósito de medir la abundancia y diversidad de especies de líquenes entre diferentes sitios y zonas.

Figura 7

Muestreo de líquenes



Nota. Diferentes Superficies y Tipos de Vegetación.

3.2.4. Técnica para el análisis de biodiversidad de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay

Para el análisis de la biodiversidad de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay, se establecieron las técnicas siguiendo los métodos descritos por Ramos (2014), Valeriano (2024), y Vargas et al. (2017), tanto para los trabajos de campo como de gabinete.

3.2.4.1. Etapa de campo

Durante la etapa de campo, para definir la zona de muestreo, se tramitaron los permisos correspondientes otorgados por SERFOR (ver Anexo 2). Los líquenes se recolectaron manualmente en árboles, arbustos y sustratos rocosos ubicados a diferentes altitudes, conforme a las directrices establecidas por Ramos et al. (2013). Se obtuvieron 45 muestras duplicadas, con un peso de 5 gramos cada una. Estas muestras se destinaron tanto a la identificación de las especies como al análisis de metales traza. Luego, fueron almacenadas y etiquetadas en sobres de papel Kraft, para su posterior análisis taxonómico en el Instituto Científico Michael Owen Dillon (IMOD) (Ver Anexo 1).

Figura 8

Recolección de muestras de líquenes



Nota. Trabajo en campo para la recolección de muestras de líquenes en la loma de Tacahuay.

3.2.4.2. Etapa de gabinete

Esta labor fue realizada por el Instituto Científico Michael Owen Dillon (IMOD) (Ver Anexo 1), se utilizaron las guías clasificación y claves de identificación taxonómica de Sipman (2005a, b), Ramírez y Cano (2005), Hestmark (2009) y Lücking et al. (2016, 2017).

a) Estudio de Biodiversidad

Para el análisis de diversidad se utilizó el software Past versión 2.14, realizando los análisis de riqueza y la abundancia de especies, utilizando el método modificado de Braun-Blanquet (Bezuidenhout et al., 1994), empleando una escala de abundancia basada en el porcentaje de cobertura de cada especie y siguiendo el criterio de Valeriano Zapana (2024). Además se realizó los análisis de biodiversidad con el índice de Shannon-Wiener (H') (> 3 indica alta diversidad, $2 <$ señala una baja diversidad), **Índice de Simpson** (≥ 1 alta biodiversidad) y el **Índice de Margalef**

Figura 9

Preparación de muestras de líquenes



Nota. Trabajo de gabinete para la preparación de muestras de líquenes, así como su identificación correspondiente.

3.3. Técnica para la determinación de metales traza en Líquenes

Los líquenes recolectados fueron limpiados a mano para eliminar tejidos muertos, corteza y otros residuos, de acuerdo con los criterios establecidos para biomonitoreo (Conti & Tudino, 2016). Posteriormente, las muestras se secaron a 65 °C, se trituraron, tamizaron y almacenaron en tubos Falcon; de cada muestra, se separaron 50 mg por duplicado para análisis posteriores (Scerbo et al., 2002). La descomposición química se llevó a cabo mediante digestión por microondas usando ácidos nítrico y clorhídrico ultrapuros, junto con peróxido de hidrógeno. Tras finalizar la digestión, los tubos fueron enfriados. Los elementos traza (Al, Fe, Ti, Ni, Pb, Cd, Zn, Cu, , Cr, Mn, Hg) se analizaron con ICP-Masa en un laboratorio certificado, y la metodología utilizada, así como los límites de detección y cuantificación, se documentaron en los informes técnicos.

3.4. Técnicas para evaluar el riesgo ecológico potencial (IR_c) de los metales traza presentes en líquenes y suelos sobre las lomas de Tacahuay

El factor de enriquecimiento (FE) y el índice de geoacumulación (I_{geo}) son dos indicadores de carga de contaminación que se utilizaron para obtener información acerca de las fuentes de metales contaminantes y evaluar el estado de contaminación. El FE se calculará usando la fórmula desarrollada por Taylor, (1964).

$$EF = \log (C_n/B_n) \quad [3]$$

donde C_n representó la concentración de metal en la muestra de interés y B_n la concentración de fondo geoquímica del metal (valor de referencia de la corteza terrestre).

Asimismo, se empleó el índice de geoacumulación para identificar las fuentes de metales contaminantes y determinar el nivel de contaminación. El I_{geo} , desarrollado por Muller (1969), se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \{C_n / (1.5 \times B_n)\} \quad [4]$$

donde C_n fue la concentración de metal en la muestra de interés y B_n representó la concentración de fondo geoquímica. El factor de 1,5 se incluyó para considerar posibles

variaciones en los valores de fondo debido a influencias antropogénicas o naturales. Los resultados se clasificaron según los niveles establecidos en la tabla correspondiente

Si el Índice de I_{geo} indica que la contaminación es:

- > 5 Muy fuerte
- > 4 – 5 Fuerte para muy fuerte
- > 3 – 4 Fuerte
- > 2 – 3 Moderado a fuerte
- > 1 - 2 Moderado
- > 0 – 1 No contaminado para moderado
- > 0 Prácticamente no contaminado

3.5. Metodología para determinar el riesgo ecológico potencial de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en las especies de líquenes identificados y suelos

El análisis del riesgo ecológico potencial de los metales pesados se realizó utilizando el índice de riesgo ecológico potencial (IRE) desarrollado por Hakanson (1980). Este índice incorpora de manera integral los efectos sinérgicos, la toxicidad, la concentración de los metales pesados y su sensibilidad ecológica (Hou et al., 2023; Kumar et al., 2015). El IRE se dividió en tres componentes fundamentales: grado de contaminación (GC), factor de respuesta tóxica (RT), y el factor de riesgo ecológico potencial (RE). Los cálculos del riesgo ecológico para un elemento específico (EiR) y del índice de riesgo ecológico total (IRE) se llevaron a cabo utilizando las ecuaciones presentadas en el Anexo 8.

3.6. Estrategia de recolección de datos

3.6.1. Análisis de la biodiversidad de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay

Los datos recolectados en campo se almacenaron en hojas de Excel y se organizaron mediante tablas dinámicas para facilitar su análisis. Los parámetros

estadísticos descriptivos fueron calculados utilizando el OriginPro Software 2021b, mientras que los índices de biodiversidad se estimaron con el software Past versión 4,04.

Con el objetivo de evaluar las diferencias estadísticas entre los sectores en relación con la riqueza, abundancia y los índices de biodiversidad, se llevó a cabo una prueba de normalidad. Al no cumplir la mayoría de las variables con una distribución normal, se optó por aplicar pruebas no paramétricas, utilizando el test de Kruskal-Wallis y el método de comparación múltiple de Holm-Bonferroni ($p < 0,05$).

3.6.2. Estudio de la composición química de los metales traza presentes en las especies de líquenes identificados en las lomas de Tacahuay

Los datos proporcionados por el laboratorio CERPER se siguió el mismo procedimiento conforme al ítem 3.5.1.

3.6.3. Evaluación del riesgo ecológico potencial de los metales traza (Fe, Ti, Ni, Cr, Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Mn, Hg) presentes en las especies de líquenes identificados en las Lomas de Tacahuay

El estudio del riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes de las Lomas de Tacahuay se llevó a cabo mediante la recolección de muestras representativas de distintas altitudes. Estas muestras fueron limpiadas cuidadosamente y luego sometidas a un análisis químico que involucró la digestión ácida y la espectrometría de masas (ICP-MS). Para estimar el impacto de cada uno de estos elementos sobre el entorno, se utilizó el índice de riesgo ecológico potencial (IRE), el cual permitió evaluar los efectos de contaminación y la toxicidad de cada metal, considerando el grado de contaminación y el factor de respuesta tóxica. Los resultados obtenidos fueron posteriormente analizados para determinar los posibles riesgos y su implicación en la salud ambiental de la zona.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Identificación de la diversidad de líquenes que se encuentran en las Lomas de Tacahuay

4.1.1. Identificación taxonómica

Durante la clasificación taxonómica de los líquenes recolectados en las Lomas de Tacahuay, se identificaron diversas especies pertenecientes a diferentes órdenes y familias de hongos liquenizados. Dentro de la clase **Arthoniomycetes**, se registró la especie *Chrysothrix granulosa* G.Thor, perteneciente al orden *Arthoniales* y a la familia **Chrysotricaceae**. En la clase **Lecanoromycetes**, se identificaron varias especies distribuidas en distintos órdenes. En el orden *Caliciales*, se halló *Physcia undulata* Moberg, de la familia **Physciaceae**. En el orden *Candelariales*, se registró *Candelaria concolor* (Dicks.) Arnold, perteneciente a la familia **Candelariaceae**.

Por otro lado, en el orden *Lecanorales*, se encontraron especies de la familia **Parmeliaceae**, incluyendo *Canoparmelia texana* (Tuck.) Elix & Hale, y dos especies del género *Parmotrema*, designadas como *Parmotrema* sp.1 y *Parmotrema* sp.2, además de una especie de *Usnea* designada como *Usnea* sp.1. En la misma clase, la familia **Stereocaulaceae** estuvo representada por *Lepraria tenella* (Tuck.) Lendemer & B.P. Hodk. Finalmente, dentro del orden *Teloschistales*, se registró *Xanthomendoza cf. mendozae* (Räsänen) S.Y. Kondr. & Kärnefelt, perteneciente a la familia **Teloschistaceae**. Estos resultados indican la presencia de una considerable diversidad de líquenes en el área de estudio, abarcando distintas clases, órdenes y familias, lo cual es indicativo de la variabilidad de las condiciones ambientales en las Lomas de Tacahuay.

Arthoniomycetes

Arthoniales

Chrysotricaceae

Chrysothrix granulosa G.Thor

Lecanoromycetes

Caliciales

Physciaceae

Physcia undulata Moberg**Candelariales**

Candelariaceae

Candelaria concolor (Dicks.) Arnold**Lecanorales**

Parmeliaceae

Canoparmelia texana (Tuck.) Elix & Hale*Usnea* sp.*Parmotrema* sp.2*Parmotrema* sp.1

Stereocaulaceae

Lepraria tenella (Tuck.) Lendemer & B.P. Hodk.**Teloschistales**

Teloschistaceae

Xanthomendoza cf. *mendozae* (Räsänen) S.Y. Kondr. & Kärnefelt**4.1.2. Determinación de la cobertura de líquenes identificados en las lomas de Tacahuay**

En la Tabla 3., los resultados obtenidos muestran que *Candelaria concolor* es la especie dominante en términos de frecuencia y cobertura en el área de estudio, con un valor de frecuencia relativa de 16,47 % y una cobertura absoluta de 46,21 %. Esto indica que esta especie no solo está presente en la mayor cantidad de sitios, sino que también ocupa la mayor proporción de área. Otras especies como *Lepraria tenella* y *Usnea* sp.1 presentan una menor frecuencia y cobertura, lo que sugiere que su distribución es más restringida en comparación con *Candelaria concolor*. Estos resultados destacan la importancia de *Candelaria concolor* en la estructura de la comunidad de líquenes en esta región, proporcionando información valiosa para estudios ecológicos y de conservación de la biodiversidad. Además, los valores de contribución total refuerzan la relevancia de

esta especie, lo que puede ser útil para futuras investigaciones sobre el impacto ecológico y la resiliencia de los líquenes frente a cambios ambientales.

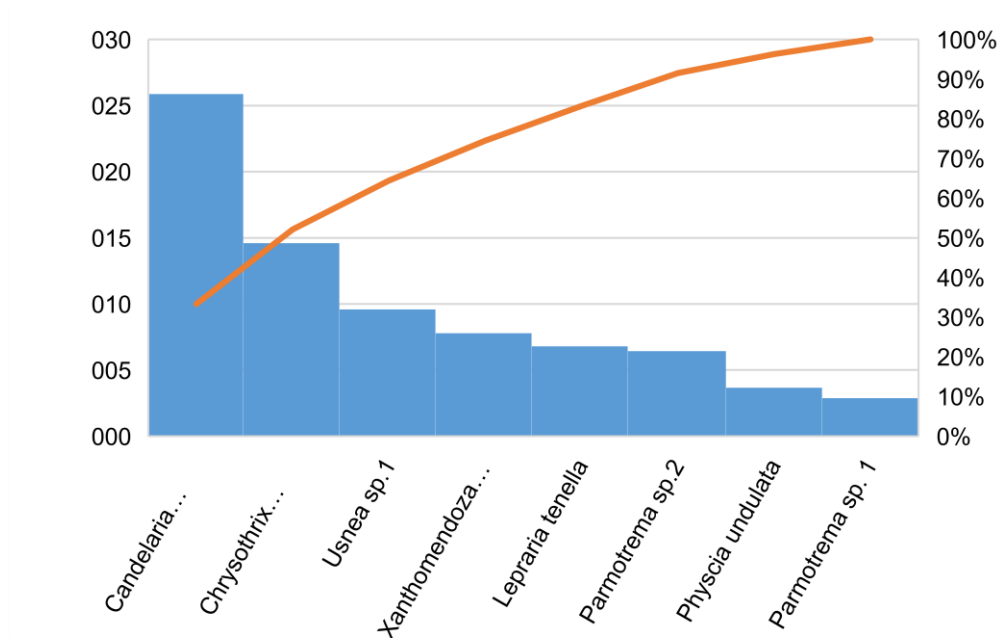
Tabla 3

Especies de Líquenes identificadas

ESPECIES	FA	FR	CA	CR	CT
<i>Lepraria tenella</i>	0,32	9,41	21,25	0,12	6,80
<i>Candelaria concolor</i>	0,56	16,47	46,21	0,27	25,88
<i>Usnea sp.1</i>	0,4	11,76	24,00	0,14	9,60
<i>Xanthomendoza mendozae</i>	0,36	10,59	21,67	0,13	7,80
<i>Chrysothrix granulosa</i>	0,52	15,29	28,08	0,16	14,60
<i>Parmotrema sp.2</i>	0,44	12,94	14,64	0,08	6,44
<i>Parmotrema sp. 1</i>	0,36	10,59	8,00	0,05	2,88
<i>Physcia undulata</i>	0,44	12,94	8,36	0,05	3,68
Total, general	3,4	100	172,21	1	77,68

Nota. Cobertura, Frecuencia y Abundancia de las Especies en las Lomas de Tacahuay.

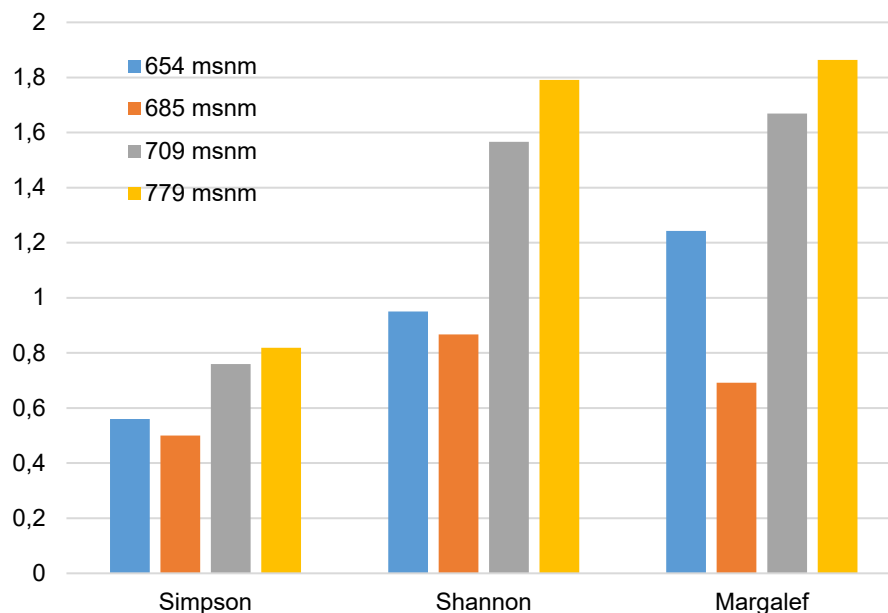
El gráfico de Pareto (Figura 10) revela que *Candelaria concolor* y *Chrysothrix granulosa* son las especies más dominantes en la comunidad de líquenes estudiada, contribuyendo con más del 50 % de la diversidad total en términos de cobertura y frecuencia relativa. Esto indica que estas especies tienen un impacto significativo en la estructura del ecosistema, mientras que otras especies como *Parmotrema sp.1* y *Physcia undulata* aportan menos del 5 % cada una, reflejando su menor relevancia ecológica. La línea acumulada muestra que las primeras tres especies explican aproximadamente el 65 % de la biodiversidad, lo que sugiere una marcada concentración de la diversidad en unas pocas especies. Este patrón de dominancia es típico en ecosistemas donde un número reducido de especies tiene una mayor influencia sobre la comunidad, lo que podría tener implicaciones en la gestión y conservación de estos hábitats. Estos resultados son clave para entender la dinámica de las comunidades de líquenes y proponer estrategias que promuevan la conservación de la biodiversidad.

Figura 10*Diagrama de Pareto*

Nota. Cobertura de Líquenes identificados en las Lomas de Tacahuay.

4.1.3. Análisis de la biodiversidad

En la Figura 11, se observa que el Índice de Simpson mide la dominancia de las especies en la comunidad. Valores más bajos indican una mayor diversidad, mientras que valores altos indican que una o pocas especies son dominantes. A 654 msnm y 779 msnm se observan los valores más bajos (indica mayor diversidad), mientras que a 685 msnm el valor es el más bajo, sugiriendo menor dominancia de una sola especie. En relación al Índice de Shannon: Este índice tiene en cuenta tanto la abundancia como la equidad de las especies. Valores más altos indican una mayor diversidad. A 654 msnm y 779 msnm presentan los valores más altos, lo que sugiere una mayor diversidad en esas altitudes. El valor más bajo se observa a 685 msnm, lo que podría indicar una menor equidad o riqueza de especies en ese punto. Índice de Margalef: Este índice mide la riqueza de especies (cantidad de especies en relación con el número de individuos). Valores altos indican mayor riqueza de especies. El valor más alto se observa a 779 msnm, lo que sugiere que esta altitud presenta la mayor cantidad de especies. La menor riqueza se observa a 685 msnm.

Figura 11*Comparación Índices de Biodiversidad*

Nota. (Simpson, Shannon, Margalef) en diferentes Altitudes de las Lomas de Tacahuay.

4.2. Evaluación de la concentración de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en las especies de líquenes identificados y suelos

4.2.1. Análisis de la Concentración de Metales Traza en las especies de líquenes identificados

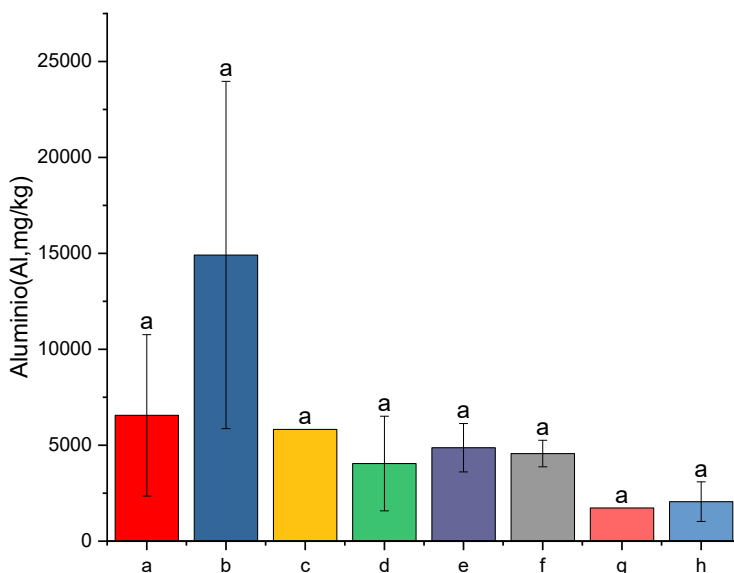
En el presente estudio se determinó la concentración de metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en diversas especies de líquenes recolectadas en las Lomas de Tacahuay. Los líquenes se utilizan comúnmente como bioindicadores para evaluar la calidad ambiental, debido a su capacidad para absorber y acumular metales presentes en el aire. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4, donde se indican los valores promedio (\bar{x}) y la desviación estándar (DS) de la concentración de cada elemento traza en cada una de las especies estudiadas. Esto nos permite evaluar de manera precisa la distribución y el nivel de contaminación presente en el ecosistema analizado.

Tabla 4*Cantidad metales traza (mg/kg)*

Especie	n	Aluminio	Arsénico	Cadmio	Cobre	Cromo
		(Al) mg/kg $\bar{x} \pm DS$	(As) mg/kg $\bar{x} \pm DS$	(Cd) mg/kg $\bar{x} \pm DS$	(Cu) mg/kg $\bar{x} \pm DS$	(Cr) mg/kg $\bar{x} \pm DS$
<i>Candelaria</i>	2	6558 ±	12,3 ±	0,77 ±	106,60 ±	6,34 ±
<i>concolor</i>		4206	0,42	0,06	17,54	2,07
<i>Chrysothrix</i>	2	14914 ±	19,35 ±	0,51 ±	193,50 ±	16,90 ±
<i>granulosa</i>		9048	0,92	0,69	20,51	10,89
<i>Lepraria tenella</i>	1	5826 ±--	6,59 ± --	0,50 ± --	48,10 ± --	5,05 ± --
<i>Parmotrema sp.1</i>	2	4045,5 ±	6,24 ±	0,43 ±	50,75 ±	3,88 ±
		2464	0,71	0,16	0,64	2,08
<i>Parmotrema sp.2</i>	3	4868 ±	6,88 ±	0,19 ±	75,60 ±	4,86 ±
		1260	0,73	0,15	11,49	1,60
<i>Physcia undulata</i>	2	4566,5 ±	6,54 ±	0,10 ±	60,05 ±	4,79 ±
		689	2,96	0,11	18,03	0,33
<i>Usnea sp.1</i>	1	1733 ± --	5,32 ± --	0,58 ± --	61,90 ± --	0,20 ± --
<i>Xanthomendoza</i>	2	2058 ±	3,86 ±	1,00 ±	46,95 ±	2,08 ±
		1032	2,92	0,18	23,41	1,04

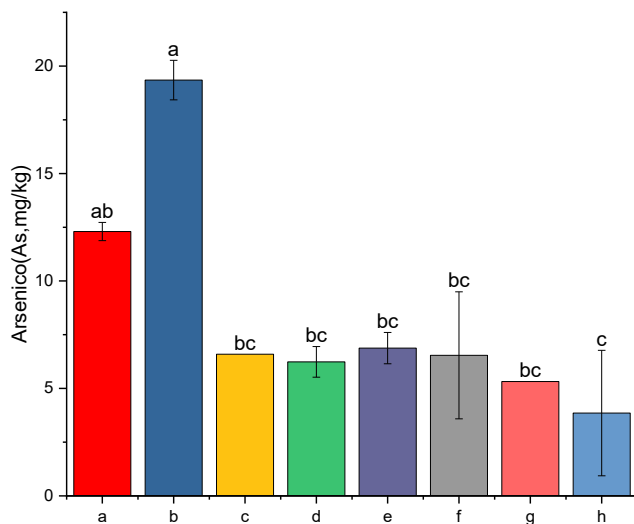
Nota. Detectados en especies de líquenes de las Lomas de Tacahuay.

En la Figura 12., el aluminio fue el elemento traza presente en mayores concentraciones en las especies analizadas. En promedio, *Chrysothrix granulosa* presentó la mayor concentración de aluminio (14 914 ± 9 048 mg/kg), lo que sugiere una alta capacidad de acumulación de este metal o una mayor exposición a fuentes de contaminación en su entorno. Le siguieron *Candelaria concolor* con 6 558 ± 4 206 mg/kg y *Lepraria tenella* con 5 826 mg/kg. Por otro lado, *Usnea sp.1* fue la especie con la menor concentración de aluminio (1 733 mg/kg), lo que podría indicar una menor exposición a fuentes de contaminación o una menor capacidad de bioacumulación en comparación con las otras especies.

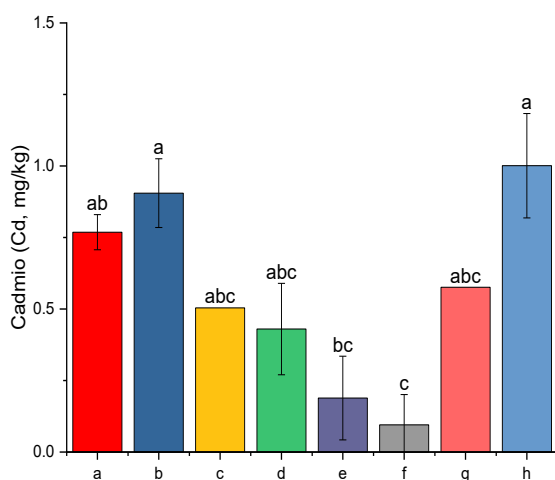
Figura 12*Concentración de Aluminio (Al)*

Nota. Los valores están expresados en mg/kg. Las columnas que presentan la misma letra indican diferencias que no son estadísticamente significativas según el test de Kruskal-Wallis y el ajuste de Holm-Bonferroni ($p < 0,05$). (a) *Candelaria concolor*, (b) *Chrysothrix granulosa*, (c) *Lepraria tenella*, (d) *Parmotrema sp.1*, (e) *Parmotrema sp.2*, (f) *Physcia undulata*, (g) *Usnea sp.1* (h) *Xanthomendoza mendozae*.

En la Figura 13, el arsénico, un elemento potencialmente tóxico, mostró sus mayores concentraciones en *Chrysothrix granulosa* ($19,35 \pm 0,92$ mg/kg) y *Candelaria concolor* ($12,3 \pm 0,42$ mg/kg). Estas especies parecen ser más sensibles a la acumulación de este metal, lo que podría estar relacionado con fuentes locales de contaminación. En comparación, otras especies como *Usnea sp.1* ($5,32$ mg/kg) y *Xanthomendoza mendozae* ($3,86 \pm 2,92$ mg/kg) presentaron concentraciones más bajas, lo que podría indicar una menor exposición o menor capacidad de absorción de arsénico.

Figura 13*Concentración de Arsénico (As)*

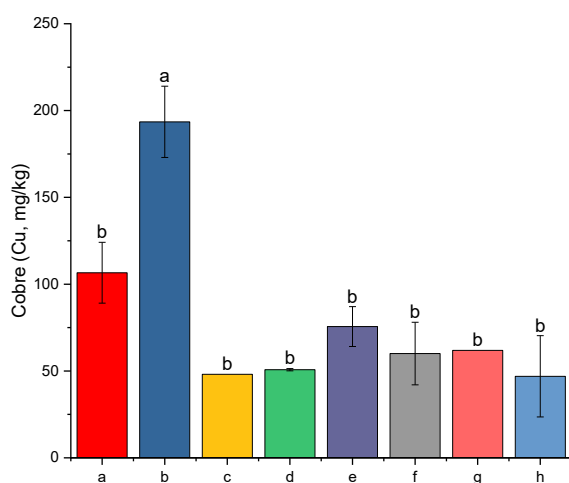
La Figura 14. se observa que las concentraciones de cadmio fueron relativamente bajas en todas las especies analizadas, lo cual es consistente con los niveles esperados de este metal en áreas naturales no expuestas a fuentes industriales significativas. La mayor concentración de cadmio se observó en *Candelaria concolor* ($0,77 \pm 0,06$ mg/kg), mientras que *Physcia undulata* y *Parmotrema sp.2* mostraron concentraciones cercanas a los 0,10 mg/kg, lo que sugiere una acumulación moderada en estas especies.

Figura 14*Concentración de Cadmio (Cd)*

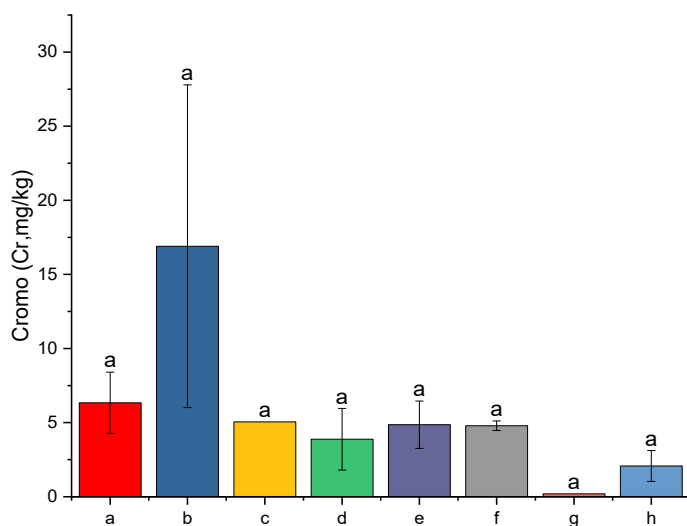
En la Figura 15., el cobre, otro metal esencial en bajas concentraciones, pero tóxico en niveles elevados, presentó la mayor concentración en *Chrysothrix granulosa* ($193,50 \pm 20,51$ mg/kg), lo que podría estar relacionado con la influencia de actividades antropogénicas cercanas, como actividades mineras o agrícolas que utilicen este metal. En comparación, *Candelaria concolor* presentó una concentración significativamente menor ($106,60 \pm 17,54$ mg/kg), aunque aún elevada, mientras que la especie *Usnea sp.1* mostró concentraciones más bajas ($61,00 \pm 0,61$ mg/kg).

Figura 15

Concentración de Cobre (Cu)



En la Figura 16., el cromo, un elemento que puede ser tóxico en concentraciones elevadas, mostró su mayor concentración en *Chrysothrix granulosa* ($16,90 \pm 10,89$ mg/kg), seguido por *Candelaria concolor* ($6,34 \pm 2,07$ mg/kg). Otras especies, como *Physcia undulata* ($4,79 \pm 0,33$ mg/kg) y *Xanthomendoza mendozae* ($2,08 \pm 1,04$ mg/kg), presentaron concentraciones considerablemente más bajas, lo que podría estar vinculado a una menor exposición o menor capacidad de acumulación de este metal en dichas especies.

Figura 16*Concentración de Cromo (Cr)*

La **Tabla 5** proporciona un resumen cuantitativo de las concentraciones de elementos traza (Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Zn) en las distintas especies de líquenes recolectadas en las Lomas de Tacahuay. Estas concentraciones nos permiten analizar la capacidad de bioacumulación de las especies y su potencial uso como bioindicadores. A continuación, se describen los resultados principales y se vinculan con las figuras respectivas para reforzar las observaciones.

Tabla 5*Cantidad de metales traza (mg/kg) detectados*

Especie	n	Hierro	Mangane	Mercuri	Níquel	Plomo	Zinc
		(Fe)	so (Mn)	o (Hg)	(Ni)	(Pb)	(Zn)
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
		$\bar{x} \pm DS$	$\bar{x} \pm DS$	$\bar{x} \pm DS$	$\bar{x} \pm DS$	$\bar{x} \pm DS$	$\bar{x} \pm DS$
<i>Candelaria</i>	2	9893 ±	230,00 ±	0,03 ±	4,82 ±	15,75	79,80 ±
<i>concolor</i>		6912	182,43	0,00	1,63	± 3,04	28,57
<i>Chrysothrix</i>	2	20894 ±	228,50 ±	0,03 ±	10,40	24,55	131,00
<i>granulosa</i>		12238	70,00	0,00	± 3,97	± 2,19	± 29,70
<i>Lepraria tenella</i>	1	8316 ±--	105,00 ± -	0,03 ±	3,36 ±	10,40	36,00 ±
			-	0,00	--	± --	--
<i>Parmotrema</i>	2	5781 ±	81,20 ±	0,03 ±	2,61 ±	8,05 ±	34,45 ±
<i>sp.1</i>		3672	39,32	0,00	0,99	3,19	4,60
<i>Parmotrema</i>	3	6855 ±	82,80 ±	0,03 ±	3,38 ±	11,22	48,40 ±
<i>sp.2</i>		1796	11,43	0,00	0,85	± 3,79	3,64
<i>Physcia</i>	2	6341 ±	74,70 ±	0,03 ±	3,13 ±	7,71 ±	52,60 ±
<i>undulata</i>		1047,23	28,43	0,00	0,59	1,70	43,84
<i>Usnea sp.1</i>	1	2318 ± -	52,90 ± --	0,55 ±	2,50 ±	7,21 ±	68,90 ±
		-		0,00	--	--	--
<i>Xanthomendoza</i>	2	3283 ±	107,50 ±	0,03 ±	1,67 ±	4,44 ±	41,00 ±
<i>cf. mendozae</i>		744,6	2,12	0,00	0,98	3,10	8,34

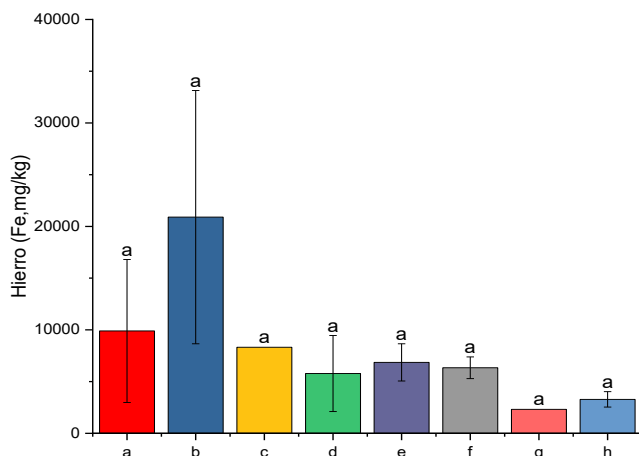
Nota. Especies de líquenes identificados en las Lomas de Tacahuay.

En la **Tabla 5**, las concentraciones de Fe varían considerablemente entre las especies, siendo *Chrysothrix granulosa* (20,894 mg/kg) y *Candelaria concolor* (9,893 mg/kg) las especies que acumulan mayores cantidades de hierro. Esta tendencia también se refleja en la **Figura 17**, donde ambas especies presentan barras significativamente más altas en comparación con las demás, aunque no se observan diferencias estadísticas notables entre ellas. Las especies *Usnea sp.1* (2,318 mg/kg) y *Xanthomendoza cf. mendozae* (3,283 mg/kg) muestran las menores concentraciones de hierro tanto en la tabla

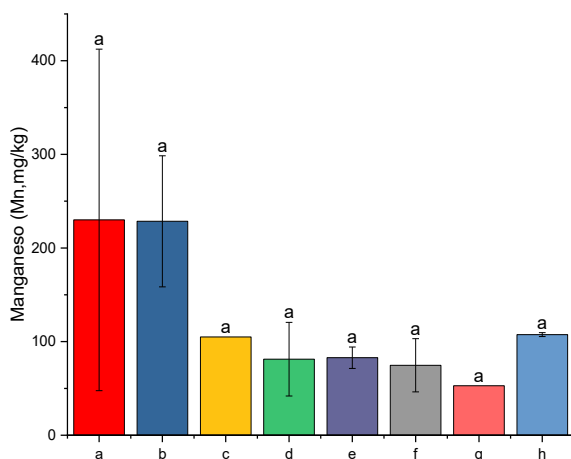
como en el gráfico, sugiriendo una capacidad limitada para acumular este elemento o una menor exposición a fuentes de hierro en su entorno.

Figura 17

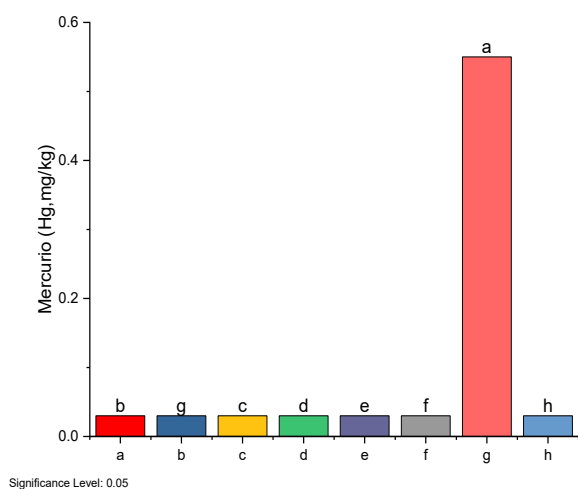
Concentración de Hierro (Fe)



El manganeso también sigue un patrón similar. Según la **Tabla 6**, *Candelaria concolor* (230 mg/kg) y *Chrysothrix granulosa* (228,5 mg/kg) presentan las mayores concentraciones de Mn. Esto se reafirma en la **Figura 18**, donde ambas especies tienen las barras más altas, aunque no existen diferencias estadísticamente significativas entre las distintas especies, lo que indica que todas pueden estar expuestas a niveles similares de manganeso en su hábitat. *Usnea sp.1* se encuentra nuevamente entre las especies con menores niveles de acumulación, reflejándose en su baja concentración en la tabla y una barra más corta en el gráfico.

Figura 18*Concentración de Manganeso (Mn)*

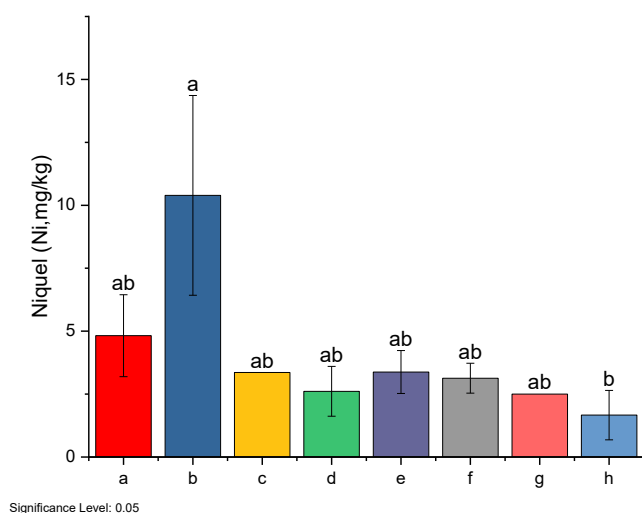
El mercurio es un caso excepcional, ya que *Usnea sp.1* presenta una concentración considerablemente más alta de Hg (0,55 mg/kg) que las demás especies, que permanecen en 0,03 mg/kg. Esto se observa claramente en la **Figura 19**, donde *Usnea sp.1* se destaca con una barra mucho más alta, lo que sugiere una alta sensibilidad a la contaminación por mercurio o una mayor exposición a este metal. Las diferencias son estadísticamente significativas, lo que refuerza la importancia de esta especie como bioindicador de mercurio en la zona.

Figura 19*Concentración de Mercurio (Hg)*

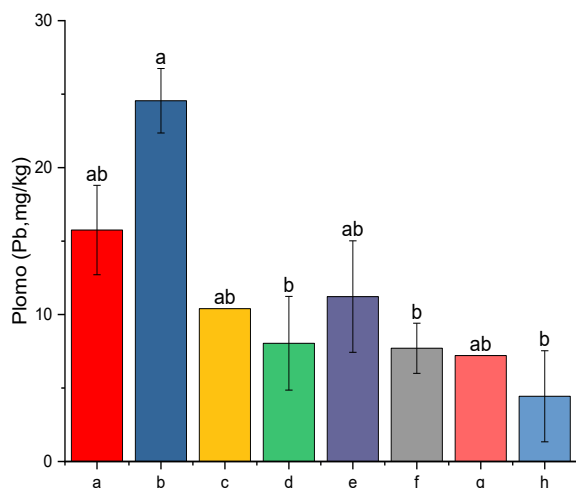
En cuanto al níquel, la **Tabla 6** indica que *Chrysothrix granulosa* (10,40 mg/kg) presenta la mayor concentración de Ni, mientras que *Xanthomendoza cf. mendozae* (1,67 mg/kg) acumula la menor cantidad. La **Figura 20** confirma esta diferencia, con *Chrysothrix granulosa* mostrando la barra más alta. Aunque algunas diferencias no son estadísticamente significativas, el gráfico sugiere una variabilidad en la acumulación de níquel entre las especies, siendo *Chrysothrix granulosa* la especie más eficiente en acumular este metal.

Figura 20

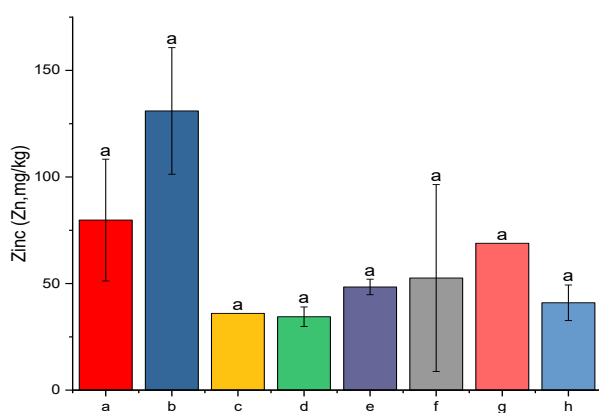
Concentración de Níquel (Ni)



El plomo sigue una tendencia similar al níquel. *Chrysothrix granulosa* (24,55 mg/kg) y *Candelaria concolor* (15,75 mg/kg) son las especies con mayor concentración de Pb, como lo muestra la **Tabla 6**, y esto se refleja visualmente en la **Figura 10**, donde las barras de estas especies son las más altas. Aunque las concentraciones de Pb en *Usnea sp.1* y *Xanthomendoza cf. mendozae* son considerablemente más bajas, estas diferencias no son necesariamente significativas según el análisis estadístico.

Figura 21*Concentración de Plomo (Pb)*

Finalmente, el zinc es otro metal donde *Chrysothrix granulosa* (131 mg/kg) destaca con la mayor concentración, como se observa en la **Tabla 6**. Este resultado también se ve claramente en la **Figura 22**, donde esta especie tiene la barra más alta, indicando su alta capacidad para acumular Zn en comparación con otras especies. Las especies *Lepraria tenella* (36 mg/kg) y *Xanthomendoza cf. mendozae* (41 mg/kg) presentan las concentraciones más bajas de Zn, lo que coincide con las barras más cortas en la figura.

Figura 22*Concentración de Zinc (Zn)*

4.2.2. Determinación de la concentración de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en los suelos

La tabla 6 muestra la concentración de fondo geoquímico de metales en los suelos de las lomas de Tacahuay, Ilo, Perú, donde se analizaron 23 metales en tres muestras de suelo. Los resultados indican que algunos metales, como el aluminio ($13,177,33 \pm 693,36$ mg/kg) y el hierro ($22\ 728,67 \pm 9\ 806,06$ mg/kg), presentan las concentraciones más elevadas, mientras que otros como el mercurio ($0,03 \pm 0,00$ mg/kg) y el antimonio ($0,04 \pm 0,00$ mg/kg) tienen concentraciones mucho más bajas. Se observa una alta variabilidad en las concentraciones de metales como el cobre, con un valor promedio de $86,70 \pm 55,46$ mg/kg, lo que sugiere una posible influencia antropogénica o variabilidad geológica en las muestras. En contraste, metales como el cadmio y el níquel presentan menor variabilidad.

Tabla 6

Concentración de fondo geoquímico

Metal	N	Media \pm DE (mg/Kg)	Min	Max
Aluminio (Al)	3	13177,33 \pm 693,36	12539,00	13915,00
Antimonio (Sb)	3	0,04 \pm 0,00	0,04	0,04
Arsénico (As)	3	8,15 \pm 1,56	6,68	9,79
Bario (Ba)	3	85,90 \pm 16,66	66,90	98,00
Berilio (Be)	3	0,21 \pm 0,00	0,21	0,21
Cadmio (Cd)	3	0,38 \pm 0,18	0,22	0,57
Calcio (Ca)	3	5389,33 \pm 3091,76	3205,00	8927,00
Cobalto (Co)	3	11,95 \pm 4,20	8,44	16,60
Cobre (Cu)	3	86,70 \pm 55,46	42,70	149,00
Cromo (Cr)	3	11,74 \pm 3,38	9,31	15,60
Hierro (Fe)	3	22728,67 \pm 9806,06	14815,00	33699,00
Magnesio (Mg)	3	6263,00 \pm 1427,48	5327,00	7906,00
Manganeso (Mn)	3	427,00 \pm 129,69	317,00	570,00
Mercurio (Hg)	3	0,03 \pm 0,00	0,03	0,03
Níquel (Ni)	3	6,79 \pm 1,20	5,95	8,16
Plata (Ag)	3	0,02 \pm 0,00	0,02	0,02
Plomo (Pb)	3	7,70 \pm 3,09	4,18	9,95
Potasio (K)	3	3935,33 \pm 416,38	3476,00	4288,00
Selenio (Se)	3	0,56 \pm 0,50	0,03	1,02
Sodio (Na)	3	362,67 \pm 142,17	239,00	518,00
Talio (Tl)	3	0,02 \pm 0,00	0,02	0,02

Vanadio (V)	3	51,50 ± 2,01	49,20	52,90
Zinc (Zn)	3	34,33 ± 7,74	27,10	42,50

Nota. Concentración de metales en los suelos de las lomas de Tacahuay, Ilo, Perú, Los datos se expresan como media ± desviación estándar (DE)

4.3. Análisis del Nivel de Contaminación y Evaluación del Potencial de Riesgo de los Metales Traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg)

Para establecer el grado de contaminación asociado a los elementos traza identificados en los líquenes recolectados de las Lomas de Tacahuay, se realizó en primer lugar el cálculo del factor de contaminación (FC) para las distintas altitudes estudiadas. Posteriormente, se procedió a determinar de manera detallada el grado total de contaminación, teniendo en cuenta las concentraciones halladas en las diferentes muestras.

4.3.1. Factores de Contaminación (FC)

En la Tabla 7 se observan los valores del Factor de Contaminación (FC) calculados para cada metal en las distintas alturas, los cuales son una medida del nivel de contaminación del área en relación con los niveles de fondo. Un FC mayor a 1 indica una contaminación significativa. Los valores de FC varían entre los diferentes metales y altitudes, lo que refleja diferencias en la intensidad de la contaminación en función de la altitud.

Tabla 7

Factores de contaminación y niveles de grado de contaminación

Altura (msnm)	FC								GC	Grado de contaminación
	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn		
641	9,46	0,98	12,42	2,02	0,06	1,95	0,25	0,53	28	Contaminación muy alta
654	12,06	0,58	14,24	1,52	0,06	1,86	0,34	0,82	31	Contaminación muy alta
685	12,37	1,07	13,82	1,33	0,06	1,69	0,34	0,70	31	Contaminación muy alta
709	6,98	0,85	7,75	0,64	0,42	1,04	0,19	0,46	18	Contaminación considerable
779	7,75	0,90	6,84	1,23	0,06	1,36	0,25	0,36	19	Contaminación considerable

Nota. Para diversos metales en las lomas de Tacahuay.

Los valores de FC para As son elevados en todas las alturas, con un máximo en los 654 msnm (12,06) y 685 msnm (12,37), lo que sugiere una fuerte contaminación por As en estos sitios. Esto es preocupante, ya que el arsénico es un metal altamente tóxico. El cadmio presenta FC menores a 1 en algunas alturas, indicando que la contaminación por Cd no es tan severa, excepto en los 685 msnm (1,07), donde el FC supera ligeramente 1, sugiriendo una leve contaminación. El cobre tiene niveles elevados de contaminación en todas las alturas, con un FC máximo en los 654 msnm (14,24). Estos valores indican una fuente considerable de contaminación por Cu, especialmente en las zonas más bajas. El cromo muestra niveles moderados de contaminación, con FC generalmente por encima de 1. Sin embargo, en 709 msnm (0,64), el FC está por debajo de 1, lo que indica un nivel bajo de contaminación en esta altitud. El mercurio presenta valores de FC bajos (alrededor de 0,06) en la mayoría de las altitudes, excepto en 709 msnm, donde el FC aumenta a 0,42, lo que sugiere una ligera contaminación. Los niveles de FC para el níquel son en general bajos, con valores máximos en 641 msnm (1,95). Sin embargo, en las otras alturas los valores están por debajo de 1, lo que indica que la contaminación por Ni es moderada. El plomo tiene los niveles de FC más bajos, con un máximo de 0,34, lo que sugiere que la contaminación por Pb es baja en todas las altitudes analizadas. El zinc tiene valores de FC bajos, con un máximo de 0,82 en 654 msnm, lo que indica una contaminación moderada a baja en la región.

4.3.2. Grado de Contaminación (GC)

El **Grado de Contaminación (GC)** es una medida compuesta que considera los **Factores de Contaminación (FC)** de todos los metales en cada altitud y clasifica el nivel de contaminación general del sitio. Los sitios ubicados a 641, 654 y 685 msnm presentan los valores más altos de **GC** (28, 31 y 31, respectivamente), lo que indica que estas áreas experimentan una **contaminación muy alta**, principalmente debido a los elevados niveles de As, Cu y Cr. En cambio, las altitudes de 709 y 779 msnm muestran un **grado de contaminación considerable**, con valores de **GC** de 18 y 19, respectivamente. Aunque la contaminación sigue siendo significativa en estas zonas, es menor en comparación con las altitudes más bajas, presentando niveles más moderados de Cu y As.

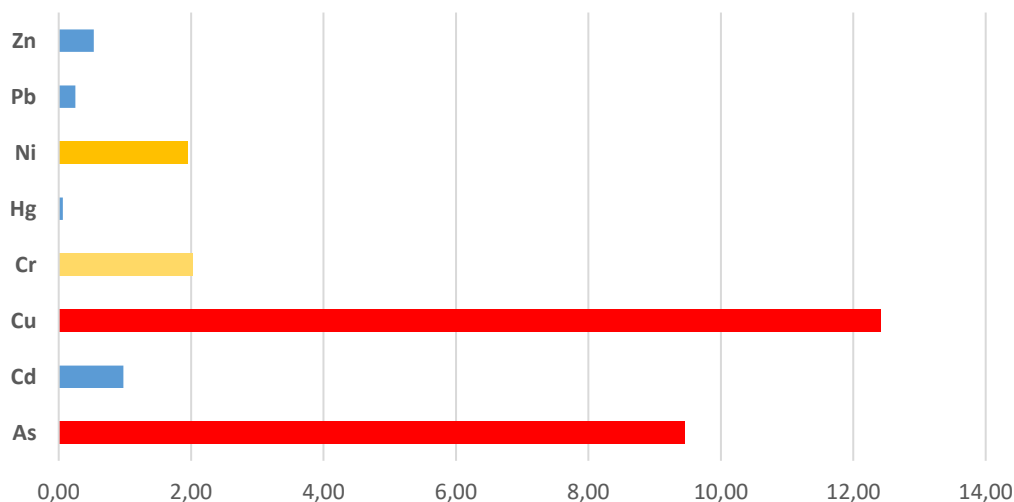
La **Tabla 8** y la **Figura 23** muestran la clasificación del grado de contaminación para varios metales a una altitud de 641 msnm, en función del **Factor de Contaminación (FC)**. Según la tabla, los metales con los mayores valores de **FC** son el arsénico (As) y el cobre (Cu), con valores de 9,46 y 12,42, respectivamente, lo que indica un **grado de contaminación muy alta** para estos metales. Esto se refleja claramente en la **Figura 23**, donde las barras correspondientes al As y Cu están marcadas en rojo, destacando su gran aporte a la contaminación en esa altitud. En contraste, otros metales como el cadmio (Cd), cromo (Cr) y níquel (Ni) presentan valores más bajos de **FC** (0,98, 2,02 y 1,95, respectivamente), siendo clasificados como **contaminación moderada** con respecto al Ni y Cr, y **baja contaminación** para Cd. Los metales con los valores más bajos de **FC** son el mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn), con factores de contaminación que no superan 1, lo que sugiere un **grado de contaminación baja**, como se observa en las barras azules de la figura. En resumen, la tabla y la figura evidencian que el arsénico y el cobre son los principales contribuyentes a la alta contaminación en esta zona, mientras que otros metales representan un riesgo menor.

Tabla 8

Clasificación del grado de contaminación

Metal	FC	Grado de contaminación
As	9,46	Contaminación muy alta
Cd	0,98	Baja contaminación
Cu	12,42	Contaminación muy alta
Cr	2,02	Contaminación moderada
Hg	0,06	Baja contaminación
Ni	1,95	Contaminación moderada
Pb	0,25	Baja contaminación
Zn	0,53	Baja contaminación

Nota. Función del factor de contaminación de cada metal para una altitud de 641 msnm.

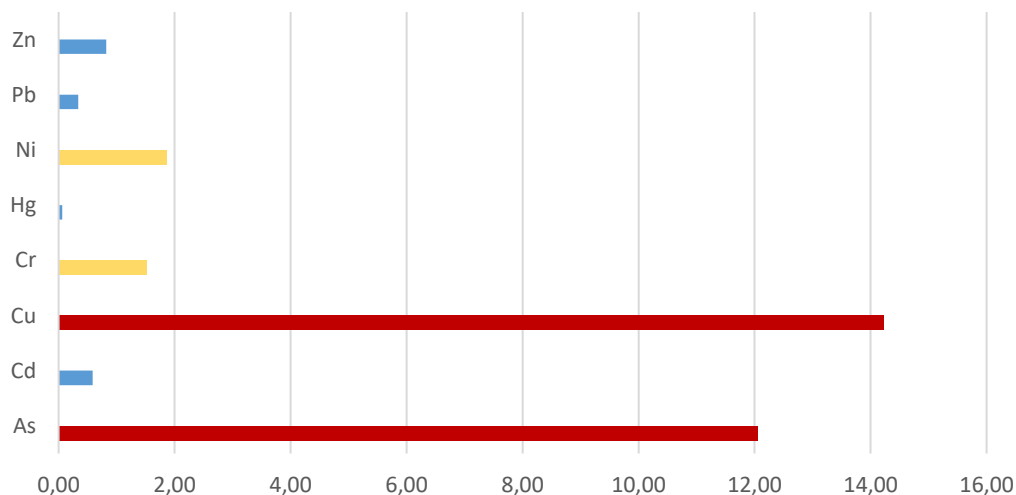
Figura 23*Grado de contaminación*

Nota. aporta cada uno de los metales en relación al factor de contaminación (FC) para una altitud de 641 msnm. Contaminación muy alta (rojo), Contaminación moderada (amarillo) y Baja contaminación (azul).

La **Tabla 9** y la **Figura 24** proporcionan información sobre la clasificación del grado de contaminación para varios metales a una altitud de 654 msnm, en función del **Factor de Contaminación (FC)**. De acuerdo con la tabla, el arsénico (As) y el cobre (Cu) son los metales con los valores más altos de **FC** (12,06 y 14,24, respectivamente), lo que indica una **contaminación muy alta** para estos elementos. Esto se refleja en la **Figura 24**, donde las barras rojas para As y Cu son significativamente más largas, destacando su contribución predominante a la contaminación en esta altitud. En contraste, metales como el cromo (Cr) y el níquel (Ni) presentan valores de **FC** de 1,52 y 1,86, respectivamente, lo que clasifica su contaminación como **moderada**, tal como se observa en las barras amarillas en la figura. Por otro lado, el cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), y zinc (Zn) tienen **FC** por debajo de 1, lo que indica **baja contaminación**, representada por las barras azules en la figura. En resumen, tanto la tabla como la figura evidencian que el arsénico y el cobre son los principales responsables de la alta contaminación en esta zona, mientras que los otros metales contribuyen en menor medida, con niveles de contaminación moderada o baja.

Tabla 9*Clasificación del grado de contaminación*

Metal	FC	Grado de contaminación
As	12,06	Contaminación muy alta
Cd	0,58	Baja contaminación
Cu	14,24	Contaminación muy alta
Cr	1,52	Contaminación moderada
Hg	0,06	Baja contaminación
Ni	1,86	Contaminación moderada
Pb	0,34	Baja contaminación
Zn	0,82	Baja contaminación

Figura 24*Grado de contaminación*

Nota. Grado de contaminación que aporta cada uno de los metales en relación al factor de contaminación (FC) para una altitud de 654 msnm. Contaminación muy alta (rojo), Contaminación moderada (amarillo) y Baja contaminación (azul).

La **Tabla 10** y la **Figura 25** muestran la clasificación del grado de contaminación de varios metales a una altitud de 685 msnm, basado en el **Factor de Contaminación (FC)**. En la tabla, los metales como el arsénico (As) y cobre (Cu) presentan los valores más altos de **FC** (12,37 y 13,82, respectivamente), clasificándose como de

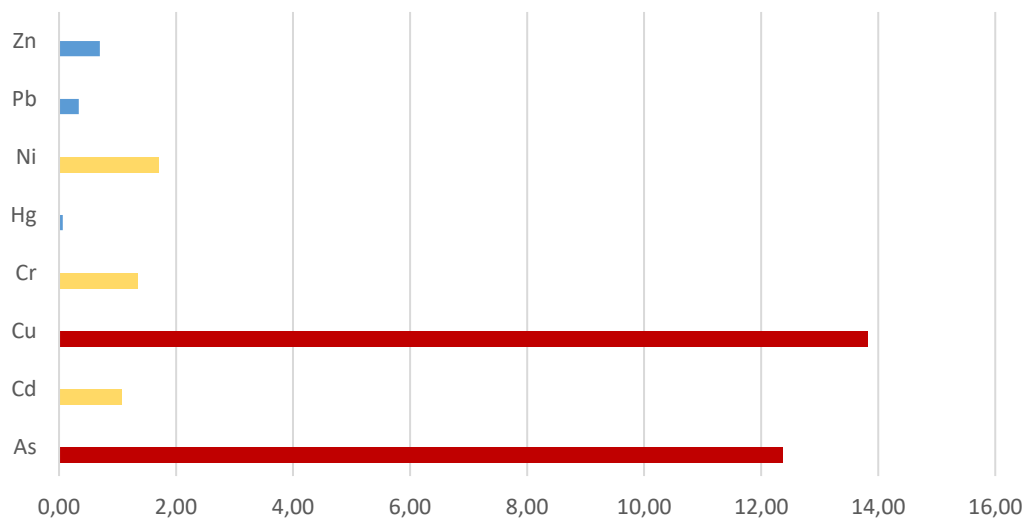
contaminación muy alta. Esto se refleja claramente en la **Figura 25**, donde las barras correspondientes a As y Cu están marcadas en rojo, representando la mayor contribución de estos metales a la contaminación en esta altitud. Otros metales traza como el cadmio (Cd), cromo (Cr) y níquel (Ni) tienen valores de **FC** de 1,07, 1,33 y 1,69, lo que indica una **contaminación moderada** y se visualiza en las barras amarillas de la figura. Finalmente, metales como el mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) presentan factores de contaminación bajos (inferiores a 1), lo que los clasifica como de **baja contaminación**, representado en las barras azules de la figura. En resumen, el arsénico y el cobre son los metales más preocupantes en esta zona, con una contaminación significativamente alta, mientras que los demás metales contribuyen de manera más moderada o baja a la contaminación total del área.

Tabla 10

Clasificación del grado de contaminación

Metal	FC	Grado de contaminación
As	12,37	Contaminación muy alta
Cd	1,07	Contaminación moderada
Cu	13,82	Contaminación muy alta
Cr	1,33	Contaminación moderada
Hg	0,06	Baja contaminación
Ni	1,69	Contaminación moderada
Pb	0,34	Baja contaminación
Zn	0,70	Baja contaminación

Nota. Factor de contaminación de cada metal para una altitud de 685 msnm

Figura 25*Grado de contaminación*

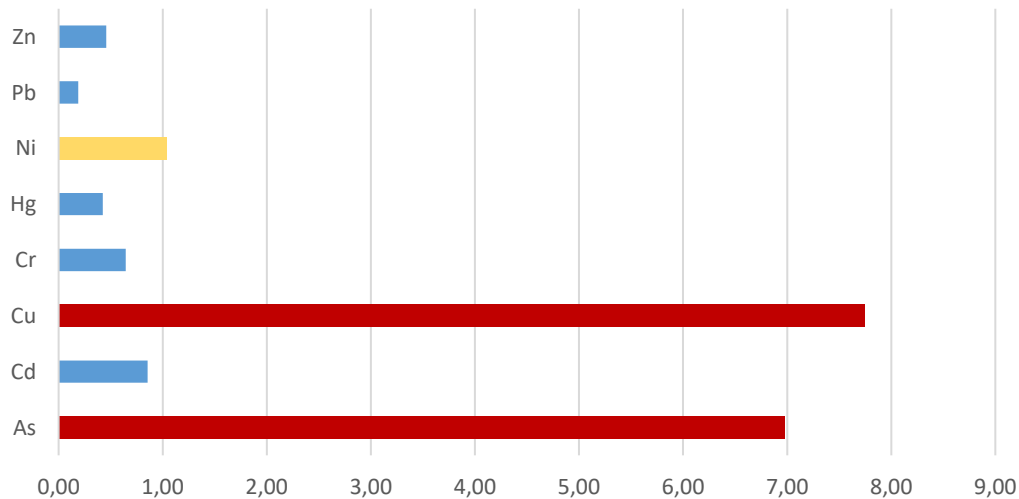
Nota. Aporta cada uno de los metales en relación al factor de contaminación (FC) para una altitud de 685 msnm. Contaminación muy alta (rojo), Contaminación moderada (amarillo) y Baja contaminación (azul).

La **Tabla 11** y la **Figura 26** presentan la clasificación del grado de contaminación para varios metales a una altitud de 709 msnm, basados en el **Factor de Contaminación (FC)**. De acuerdo con la tabla, el arsénico (As) y el cobre (Cu) muestran los valores más altos de **FC** (6,98 y 7,75, respectivamente), clasificándose como **contaminación muy alta**, lo cual queda visualmente representado en las barras rojas de la **Figura 26**, que indican que estos dos metales son los principales contribuyentes a la contaminación en esta altitud. Por otro lado, el níquel (Ni) tiene un **FC** de 1,04, lo que lo clasifica como **contaminación moderada**, tal como se refleja en la barra amarilla correspondiente en la figura. Finalmente, metales como el cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) tienen valores de **FC** menores a 1, lo que indica **baja contaminación** y se representan con las barras azules más cortas en la figura. En resumen, la combinación de la tabla y la figura destaca que el arsénico y el cobre son los principales contaminantes en esta altitud, mientras que el níquel presenta un nivel moderado de contaminación y los demás metales contribuyen de manera menor a la contaminación general del área.

Tabla 11*Clasificación del grado de contaminación*

Metal	FC	Grado de contaminación
As	6,98	Contaminación muy alta
Cd	0,85	Baja contaminación
Cu	7,75	Contaminación muy alta
Cr	0,64	Baja contaminación
Hg	0,42	Baja contaminación
Ni	1,04	Contaminación moderada
Pb	0,19	Baja contaminación
Zn	0,46	Baja contaminación

Nota. Factor de contaminación de cada metal para una altitud de 709 msnm

Figura 26*Grado de contaminación*

Nota. Grado de contaminación que aporta cada uno de los metales en relación al factor de contaminación (FC) para una altitud de 709 msnm. Contaminación muy alta (rojo), Contaminación moderada (amarillo) y Baja contaminación (azul).

La **Tabla 12** y la **Figura 27** muestran la clasificación del grado de contaminación para diferentes metales a una altitud de 779 msnm, basado en el **Factor de Contaminación (FC)**. En la tabla, el arsénico (As) y el cobre (Cu) presentan los valores más altos de **FC** (7,75 y 6,84, respectivamente), lo que indica una **contaminación muy**

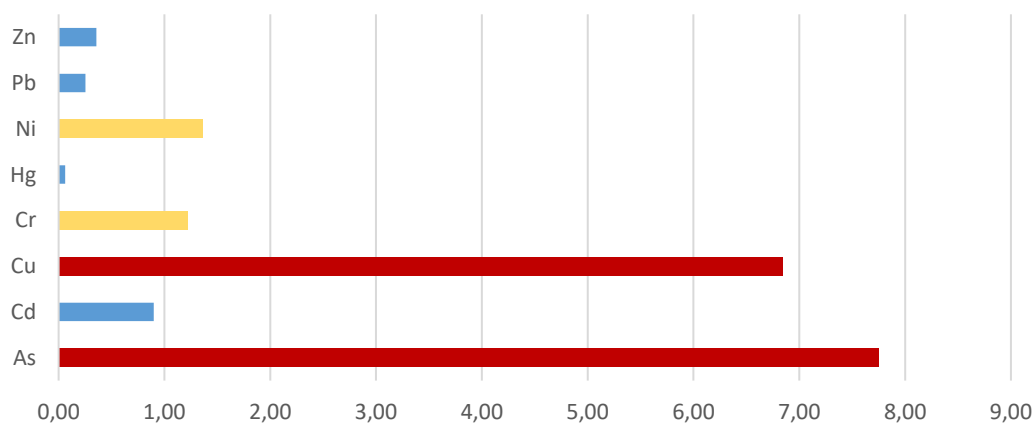
alta para estos metales. Esto se refleja claramente en las barras rojas de la **Figura 27**, donde As y Cu son los principales contribuyentes a la contaminación en esta altitud. Por otro lado, metales como el níquel (Ni) y el cromo (Cr) tienen valores de **FC** de 1,36 y 1,23, clasificándose como **contaminación moderada**, lo que se visualiza en las barras amarillas correspondientes en la figura. Finalmente, el cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) muestran valores de **FC** menores a 1, indicando **baja contaminación**, representada por las barras azules más cortas en la figura. En resumen, la contaminación en esta altitud está dominada por los niveles altos de arsénico y cobre, mientras que el níquel y el cromo presentan niveles moderados, y los demás metales contribuyen mínimamente a la contaminación total del área.

Tabla 12

Clasificación del grado de contaminación

Metal	FC	Grado de contaminación
As	7,75	Contaminación muy alta
Cd	0,90	Baja contaminación
Cu	6,84	Contaminación muy alta
Cr	1,23	Contaminación moderada
Hg	0,06	Baja contaminación
Ni	1,36	Contaminación moderada
Pb	0,25	Baja contaminación
Zn	0,36	Baja contaminación

Nota. Factor de contaminación de cada metal para una altitud de 779 msnm

Figura 27*Grado de contaminación*

Nota. Grado de contaminación que aporta cada uno de los metales en relación al factor de contaminación (FC) para una altitud de 709 msnm. Contaminación muy alta (rojo), Contaminación moderada (amarillo) y Baja contaminación (azul).

4.4. Análisis del riesgo ecológico potencial de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) detectados en líquenes y suelos de las lomas de Tacahuay, región Tacna - 2023

4.4.1. Estudio del riesgo ecológico potencial asociado a los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) encontrados en líquenes

La **Tabla 13** presenta el riesgo ecológico (RE) de los distintos metales y el índice de riesgo ecológico potencial (IRE) en varias altitudes de las Lomas de Tacahuay. El arsénico (As) se destaca como el metal con el mayor RE en todas las alturas, alcanzando su máximo valor en 685 msnm (123,69), lo que lo convierte en el principal contaminante de la región. El cobre (Cu) también contribuye significativamente al riesgo ecológico, con un máximo de RE en 654 msnm (71,18). Aunque el cadmio (Cd) muestra valores relativamente altos en comparación con otros metales, especialmente en 685 msnm (32,20), sigue siendo menos crítico que el As y Cu. Los metales como mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) tienen valores bajos de RE en todas las alturas, sugiriendo un menor riesgo ecológico. El IRE total, que combina los riesgos de todos los metales, indica un **riesgo considerable** en todas las altitudes estudiadas, con valores de IRE que oscilan

entre 152,12 y 241,00, Esto implica que la presencia acumulada de metales pesados en estas áreas representa un impacto potencialmente perjudicial para los ecosistemas locales.

Tabla 13

Evaluación del riesgo ecológico y del índice (RE) potencial

Altura	RE								GC	IRE
	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn		
641	94,59	29,36	62,09	4,04	2,50	9,74	1,27	0,53	204,11	Riesgo considerable
654	120,65	17,54	71,18	3,03	2,50	9,29	1,70	0,82	226,71	Riesgo considerable
685	123,69	32,20	69,11	2,67	2,50	8,47	1,69	0,70	241,01	Riesgo considerable
709	69,76	25,64	38,74	1,29	16,94	5,21	0,95	0,46	158,99	Riesgo considerable
779	77,53	27,00	34,21	2,45	2,50	6,80	1,27	0,36	152,12	Riesgo considerable

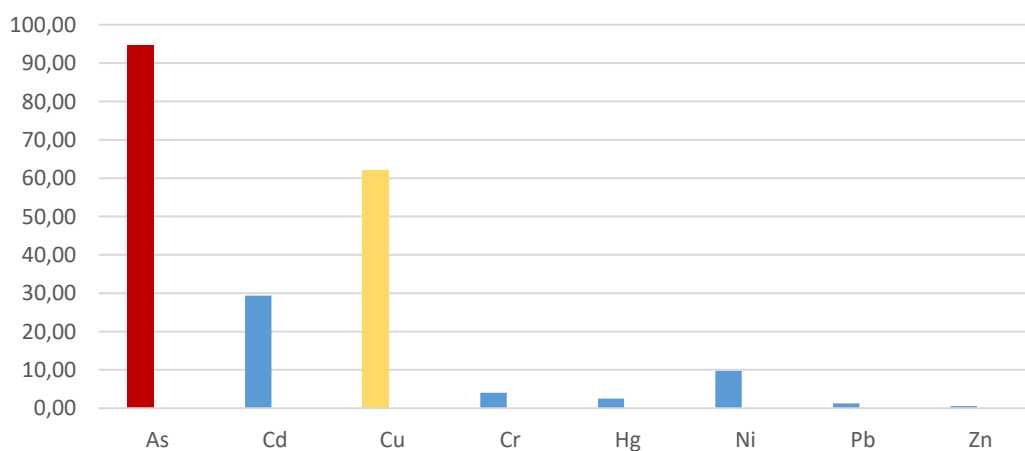
Nota. Distintas altitudes por la presencia de metales en líquenes de las lomas de Tacahuay.

La **Tabla 14** y la **Figura 28** presentan la clasificación del **riesgo ecológico (RE)** para diferentes metales a una altitud de 641 msnm. El **arsénico (As)**, con un **RE** de 94,59, es clasificado como de **riesgo ecológico considerable**, lo que indica que es el metal más preocupante en esta altitud, como se refleja en la barra roja de la figura. El **cobre (Cu)**, con un **RE** de 62,09, se clasifica como de **riesgo ecológico moderado**, lo que también se representa claramente con la barra amarilla en la figura, indicando una contribución significativa al riesgo ambiental. Otros metales como el **cadmio (Cd)** presentan un **RE** más bajo, pero aún notable (29,36), siendo clasificado como de **bajo riesgo ecológico**, lo que se refleja en la barra azul de tamaño intermedio. Metales como el **chromo (Cr)**, **mercurio (Hg)**, **níquel (Ni)**, **plomo (Pb)** y **zinc (Zn)** muestran valores bajos de **RE**, indicando **bajo riesgo ecológico**, como se observa en las barras más cortas y azules de la figura. En resumen, tanto la tabla como la figura destacan al arsénico como el principal contaminante en esta altitud, seguido por el cobre, mientras que los otros metales tienen un impacto menor en el ecosistema.

Tabla 14*Clasificación del grado de riesgo ecológico*

Metal	RE	Grado de riesgo ecológico
As	94,59	Riesgo ecológico considerable
Cd	29,36	Bajo riesgo ecológico
Cu	62,09	Riesgo ecológico moderado
Cr	4,04	Bajo riesgo ecológico
Hg	2,50	Bajo riesgo ecológico
Ni	9,74	Bajo riesgo ecológico
Pb	1,27	Bajo riesgo ecológico
Zn	0,53	Bajo riesgo ecológico

Nota. Según riesgo ecológico de cada metal, a una altitud de 641 msnm.

Figura 28*Grado de riesgo ecológico*

Nota. Aporta cada uno de los metales en relación al Índice de riesgo ecológico (IR_E) para una altitud de 641 msnm. Riesgo ecológico considerable (rojo), Riesgo ecológico moderado (amarillo) y Bajo riesgo ecológico (azul).

La **Tabla 15** y la **Figura 29** presentan la clasificación del **riesgo ecológico (RE)** para diversos metales a una altitud de 654 msnm. El **arsénico (As)** es el metal con mayor impacto, con un **RE** de 120,65, clasificándose como de **riesgo ecológico considerable**. Esto se refleja visualmente en la **Figura 29**, donde la barra roja indica la gran contribución de As al riesgo ecológico total en esta altitud. El **cobre (Cu)** también es un contaminante

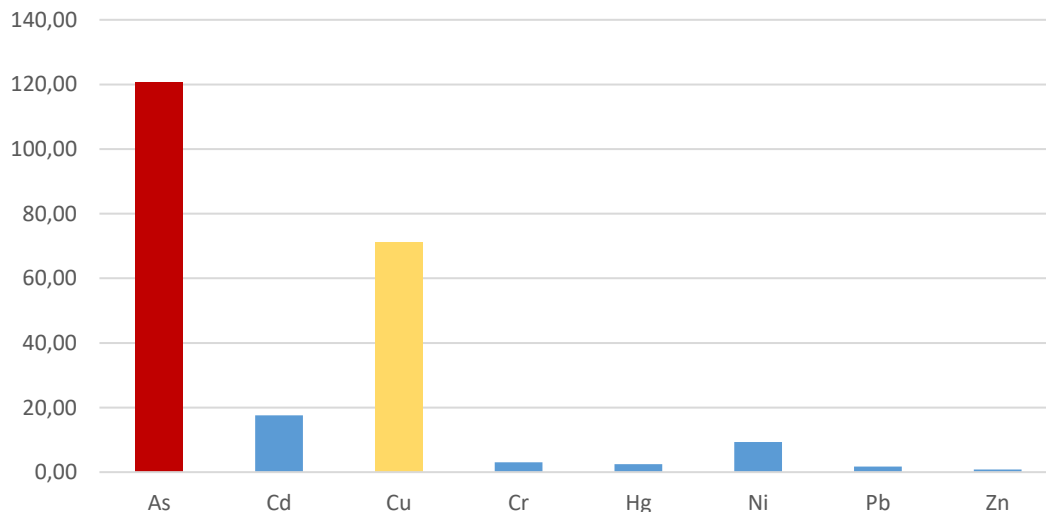
importante, con un **RE** de 71,18, clasificado como de **riesgo ecológico moderado**, lo cual se muestra en la barra amarilla de la figura. En contraste, otros metales como el **cadmio (Cd)**, **níquel (Ni)**, **chromo (Cr)**, **mercurio (Hg)**, **plomo (Pb)** y **zinc (Zn)** presentan **bajo riesgo ecológico**, con valores mucho más bajos de **RE**, reflejados en las barras azules más cortas de la figura. En resumen, tanto la tabla como la figura destacan que el arsénico y el cobre son los principales responsables del riesgo ecológico en esta altitud, mientras que los otros metales contribuyen de manera mucho más limitada al riesgo total del ecosistema.

Tabla 15

Clasificación del grado de riesgo ecológico

Metal	RE	Grado de riesgo ecológico
As	120,65	Riesgo ecológico considerable
Cd	17,54	Bajo riesgo ecológico
Cu	71,18	Riesgo ecológico moderado
Cr	3,03	Bajo riesgo ecológico
Hg	2,50	Bajo riesgo ecológico
Ni	9,29	Bajo riesgo ecológico
Pb	1,70	Bajo riesgo ecológico
Zn	0,82	Bajo riesgo ecológico

Nota. Riesgo ecológico de cada metal, a una altitud de 654 msnm.

Figura 29*Grado de riesgo ecológico*

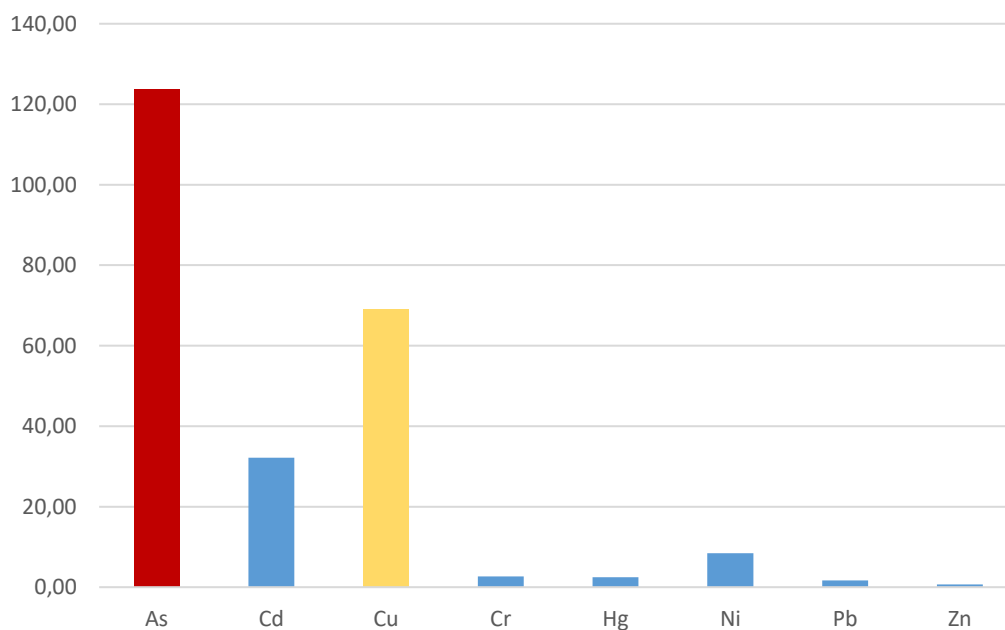
Nota. Aporta cada uno de los metales en relación al Índice de riesgo ecológico (IR_E) para una altitud de 654 msnm. Riesgo ecológico considerable (rojo), Riesgo ecológico moderado (amarillo) y Bajo riesgo ecológico (azul).

La **Tabla 16** y la **Figura 30** muestran el **riesgo ecológico (RE)** de diferentes metales a una altitud de 685 msnm. El **arsénico (As)** tiene el mayor valor de **RE** (123,69), lo que lo clasifica como de **riesgo ecológico considerable**, claramente reflejado en la **Figura 30** con la barra roja más alta. El **cobre (Cu)**, con un **RE** de 69,11, está clasificado como de **riesgo ecológico moderado**, lo que también se ve en la barra amarilla de la figura, indicando su relevancia en el riesgo ambiental. El **cadmio (Cd)** tiene un **RE** de 32,20, lo que sigue siendo un factor importante en el ecosistema, aunque se clasifica como de **bajo riesgo ecológico**, representado por la barra azul más larga en comparación con otros metales. En contraste, el **chromo (Cr)**, **mercurio (Hg)**, **níquel (Ni)**, **plomo (Pb)** y **zinc (Zn)** presentan valores bajos de **RE**, todos clasificados como de **bajo riesgo ecológico**, como se puede observar en las barras más cortas y azules de la figura. En resumen, el arsénico y el cobre son los metales que más contribuyen al riesgo ecológico en esta altitud, mientras que el resto de los metales tiene un impacto mucho menor en el ecosistema.

Tabla 16*Clasificación del grado de riesgo ecológico*

Altura	RE	Grado de riesgo ecológico
As	123,69	Riesgo ecológico considerable
Cd	32,20	Bajo riesgo ecológico
Cu	69,11	Riesgo ecológico moderado
Cr	2,67	Bajo riesgo ecológico
Hg	2,50	Bajo riesgo ecológico
Ni	8,47	Bajo riesgo ecológico
Pb	1,69	Bajo riesgo ecológico
Zn	0,70	Bajo riesgo ecológico

Nota. Riesgo ecológico de cada metal, a una altitud de 685 msnm.

Figura 30*Grado de riesgo ecológico*

Nota. Aporta cada uno de los metales en relación al Índice de riesgo ecológico (IR_E) para una altitud de 685 msnm. Riesgo ecológico considerable (rojo), Riesgo ecológico moderado (amarillo) y Bajo riesgo ecológico (azul).

La tabla 17 presenta la clasificación del grado de riesgo ecológico de varios metales presentes en los líquenes a una altitud de 709 msnm en las Lomas de Tacahuay. El índice de riesgo ecológico (RE) se utilizó para determinar el nivel de riesgo asociado a cada metal. El arsénico (As) mostró un riesgo ecológico moderado, con un valor de RE de 69.76, lo cual indica que su presencia puede representar un impacto significativo en el ambiente. El cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), cromo (Cr), plomo (Pb) y zinc (Zn) presentaron valores de RE más bajos, indicando un bajo riesgo ecológico. Esto significa que estos metales, en las concentraciones registradas, no presentan una amenaza significativa para el ecosistema en esta altitud.

Tabla 17

Clasificación del grado de riesgo ecológico

Metal	RE	Grado de riesgo ecológico
As	69,76	Riesgo ecológico moderado
Cd	25,64	Bajo riesgo ecológico
Cu	38,74	Bajo riesgo ecológico
Cr	1,29	Bajo riesgo ecológico
Hg	16,94	Bajo riesgo ecológico
Ni	5,21	Bajo riesgo ecológico
Pb	0,95	Bajo riesgo ecológico
Zn	0,46	Bajo riesgo ecológico

Nota. Riesgo ecológico de cada metal, a una altitud de 709 msnm.

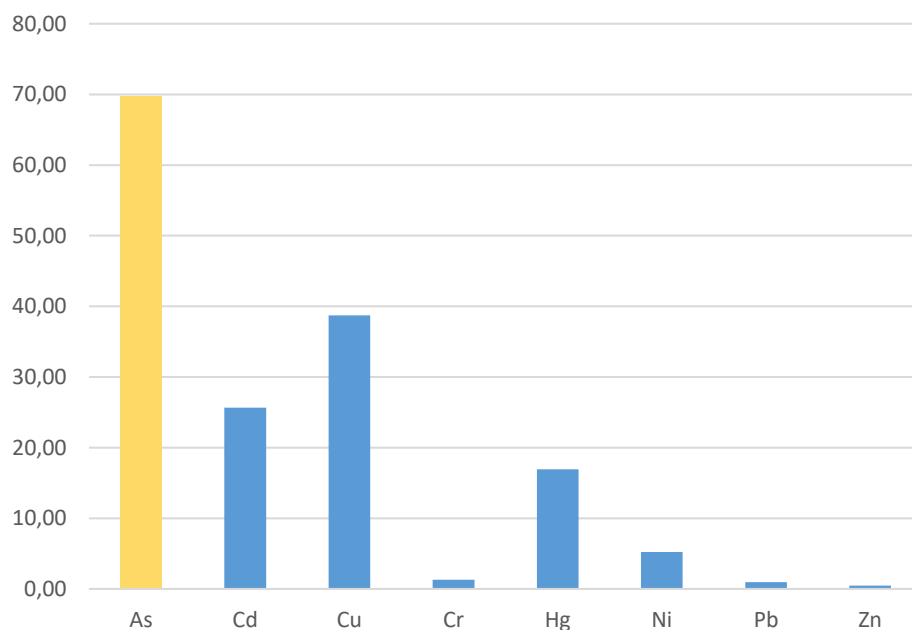
La Figura 31., muestra el grado de riesgo ecológico asociado a cada uno de los metales traza presentes en los líquenes a una altitud de 709 msnm, según el Índice de Riesgo Ecológico (IRE). En la gráfica se observa que el arsénico (As) presenta un valor de riesgo ecológico considerablemente más alto (clasificado como riesgo ecológico moderado) en comparación con los otros metales, destacándose en color amarillo.

El resto de los metales, como el cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), cromo (Cr), plomo (Pb), y zinc (Zn), se encuentran representados en color azul, indicando un **bajo riesgo ecológico**. Entre estos metales, el cadmio y el cobre presentan

los valores más altos dentro de la categoría de bajo riesgo, mientras que el cromo, plomo y zinc presentan los valores más bajos, lo cual indica un riesgo ecológico insignificante.

Figura 31

Grado de riesgo ecológico



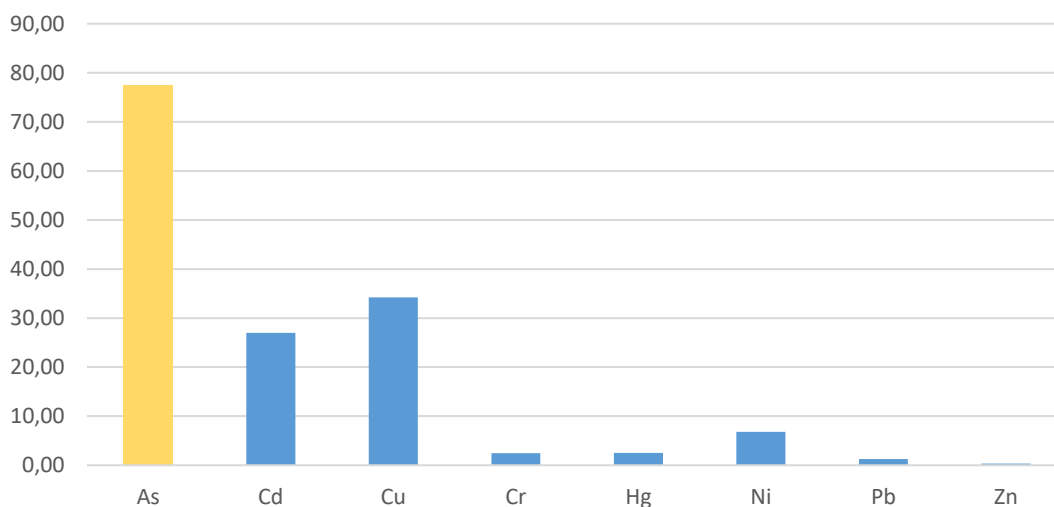
Nota. Aporta cada uno de los metales en relación al Índice de riesgo ecológico (IR_E) para una altitud de 709 msnm. Riesgo ecológico moderado (amarillo) y Bajo riesgo ecológico (azul).

La **Tabla 18** y la **Figura 32** muestran el **riesgo ecológico (RE)** de varios metales a una altitud de 779 msnm. El **arsénico (As)** es el principal contaminante en esta altitud, con un **RE** de 77,53, clasificado como de **riesgo ecológico moderado**, lo que se representa en la barra amarilla más alta en la figura. El **cobre (Cu)** y el **cadmio (Cd)** también contribuyen al riesgo ecológico, con valores de **RE** de 34,21 y 27,00, respectivamente, aunque ambos se clasifican como de **bajo riesgo ecológico**, lo que se muestra en las barras azules intermedias de la figura. Otros metales como el **cromo (Cr)**, **mercurio (Hg)**, **níquel (Ni)**, **plomo (Pb)** y **zinc (Zn)** presentan valores de **RE** considerablemente más bajos, también clasificados como de **bajo riesgo ecológico**, lo que se refleja en las barras azules más cortas de la figura. En resumen, aunque el arsénico sigue siendo el metal más relevante en términos de riesgo ecológico, su impacto es moderado, mientras que los demás metales presentan un riesgo bajo para el ecosistema en esta altitud.

Tabla 18*Clasificación del grado de riesgo ecológico*

Altura	RE	Grado de riesgo ecológico
As	77,53	Riesgo ecológico moderado
Cd	27,00	Bajo riesgo ecológico
Cu	34,21	Bajo riesgo ecológico
Cr	2,45	Bajo riesgo ecológico
Hg	2,50	Bajo riesgo ecológico
Ni	6,80	Bajo riesgo ecológico
Pb	1,27	Bajo riesgo ecológico
Zn	0,36	Bajo riesgo ecológico

Nota. Riesgo ecológico de cada metal, a una altitud de 779 msnm.

Figura 32*Grado de riesgo ecológico*

Nota. Grado de riesgo ecológico que aporta cada uno de los metales en relación al Índice de riesgo ecológico (IRE) para una altitud de 779 msnm. Riesgo ecológico moderado (amarillo) y Bajo riesgo ecológico (azul).

4.4.2. Evaluación del riesgo ecológico potencial asociado a metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en suelos

En la tabla 19 se presenta que las diferentes especies de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay exhiben variaciones en la acumulación de metales pesados. Para

Arsénico, especies como *Candelaria concolor* y *Parmotrema sp.2* muestran niveles de contaminación moderada a fuerte ($I_{geo} > 1$), mientras que para Níquel, especies como *Parmotrema sp.1*, *Parmotrema sp.2* y *Xanthomendoza mendozae* presentan contaminación moderada a fuerte ($I_{geo} > 2$), destacando esta última con la mayor contaminación ($I_{geo} = 3,4$). El Cadmio presenta un leve enriquecimiento y contaminación en especies como *Parmotrema sp.2*, mientras que el Cobre y el Plomo no muestran contaminación significativa. El Zinc tiene leves indicios de contaminación en algunas especies, y el Cromo presenta una contaminación leve únicamente en *Xanthomendoza mendozae*. Estos resultados sugieren que los líquenes son bioindicadores útiles para monitorear la contaminación por metales pesados, especialmente Níquel y Arsénico, en el área estudiada.

Tabla 19*Especies de líquenes presentes en las lomas de Tacahuay*

Especie	Arsénico (As)		Cadmio (Cd)		Cobre (Cu)		Níquel (Ni)		Plomo (Pb)		Zinc (Zn)		Cromo (Cr)	
	FE	I _{geo}	FE	I _{geo}	FE	I _{geo}	FE	I _{geo}	FE	I _{geo}	FE	I _{geo}	FE	I _{geo}
Candelaria concolor	0,57	1,30	0,42	0,80	-0,05	-0,75	0,82	2,15	0,32	0,46	-0,04	-0,70	0,11	-0,21
Chrysothrix granulosa	0,49	1,06	0,56	1,27	0,06	-0,40	0,69	1,70	0,14	-0,12	0,16	-0,05	-0,15	-1,09
Lepraria tenella	0,50	1,09	0,20	0,08	-0,03	-0,69	0,58	1,35	0,06	-0,37	-0,11	-0,94	-0,22	-1,32
Parmotrema sp.1	0,73	1,86	0,43	0,85	0,20	0,06	0,95	2,57	0,44	0,89	0,14	-0,13	0,16	-0,05
Parmotrema sp.2	0,86	2,28	0,63	1,52	0,35	0,58	0,99	2,72	0,48	1,02	0,45	0,90	0,20	0,08
Physcia undulata	0,58	1,34	0,15	-0,10	0,13	-0,15	0,86	2,27	0,38	0,66	0,07	-0,34	0,13	-0,16
Usnea sp.1	0,39	0,72	-0,07	-0,82	-0,07	-0,80	0,73	1,85	0,11	-0,21	-0,27	-1,47	0,06	-0,40
Xanthomendoza mendozae	0,78	2,01	0,75	1,91	0,34	0,53	1,15	3,24	0,45	0,92	0,26	0,27	0,51	1,11

Nota. Resultados del Factor de Enriquecimiento (FE) y Índice de Geo acumulación (I_{geo})

DISCUSIÓN

5.1. Discusión

5.1.1. Determinación de la diversidad de especies de líquenes presentes en las Lomas de Tacahuay

Para cumplir con el objetivo de determinar la biodiversidad de líquenes presentes en las Lomas de Tacahuay, se realizó un análisis exhaustivo de las especies, su cobertura y el riesgo ecológico potencial de los elementos traza. Los resultados mostraron una notable diversidad de líquenes, con especies pertenecientes a diferentes clases, órdenes y familias, destacando la clase **Lecanoromycetes**, que presentó la mayor riqueza de especies. *Candelaria concolor* se destacó como la especie dominante, con alta cobertura y frecuencia, reflejando su capacidad de adaptación a las condiciones locales. Esta dominancia es consistente con lo observado en otros estudios en ambientes similares, como el estudio en las lomas costeras de Moquegua, donde también se identificaron especies dominantes que influyeron significativamente en la estructura de la comunidad de líquenes (Valeriano, 2024)

Los índices de biodiversidad analizados (Simpson, Shannon, y Margalef) mostraron variaciones en la riqueza y equidad de las especies en diferentes altitudes. Los valores más altos del Índice de Shannon y del Índice de Margalef a 779 msnm indicaron una mayor diversidad y riqueza en esa altitud, lo cual podría deberse a condiciones ambientales más favorables, como mayor disponibilidad de humedad o menor exposición a factores de estrés. Estos resultados coinciden con lo encontrado en la Cordillera Blanca, donde se observó que la variabilidad en la riqueza de especies de líquenes estaba estrechamente relacionada con las condiciones microclimáticas y la disponibilidad de sustratos (Arroyo, 2022).

En cuanto al análisis del riesgo ecológico potencial de los elementos traza, se observó que el arsénico (As) presentó un riesgo ecológico moderado, mientras que otros elementos, como cadmio (Cd), cobre (Cu) y mercurio (Hg), mostraron un bajo riesgo ecológico. Este patrón es similar al reportado en las lomas costeras de Moquegua, donde se evidenció una acumulación significativa de ciertos metales pesados, y algunos

elementos presentaron niveles de riesgo críticos (Valeriano, 2018) . El análisis de riesgo ecológico en ambos estudios refuerza la utilidad de los líquenes como biomonitores eficientes de la contaminación ambiental, especialmente en regiones que reciben aportes de contaminantes por mecanismos atmosféricos.

La alta dominancia de *Candelaria concolor* y *Chrysothrix granulosa*, que juntas representaron más del 50 % de la diversidad total en términos de cobertura, sugiere que estas especies tienen una mayor adaptabilidad a las condiciones predominantes en las Lomas de Tacahuay. Este hallazgo es consistente con estudios previos, como el de Valeriano Zapana (2024), donde las especies mejor adaptadas a las condiciones locales mostraron una mayor cobertura y frecuencia, afectando la estructura general de la comunidad de líquenes. Por otro lado, la menor cobertura de especies como *Lepraria tenella* y *Usnea sp.1* indica una distribución más restringida, probablemente debido a requerimientos específicos de microhábitat o menor competitividad, como también se observó en la Cordillera Blanca (Arroyo, 2022).

Las diferencias en los valores de los índices de biodiversidad y el riesgo ecológico potencial en las Lomas de Tacahuay resaltan la influencia de factores ambientales como la altitud y las características del sustrato en la distribución de los líquenes y su capacidad de acumular elementos traza. Comparando con estudios en Moquegua y la Cordillera Blanca, estos resultados sugieren que la variabilidad ambiental juega un papel crucial en la determinación de la estructura de la comunidad de líquenes y en la magnitud de los impactos ecológicos debidos a la contaminación por metales pesados.

5.1.2. Determinación de la concentración de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en la especies de líquenes identificados y suelos sobre las lomas de Tacahuay, región Tacna – 2023

1. Concentración de Elementos Traza en líquenes identificados

El estudio reveló una considerable variabilidad en la concentración de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) en las diferentes especies de líquenes de las Lomas de Tacahuay. Entre los elementos analizados, el aluminio (Al) presentó las mayores concentraciones en todas las especies evaluadas, siendo *Chrysothrix*

granulosa la especie con la mayor acumulación de aluminio ($14\,914 \pm 9\,048$ mg/kg). Esto sugiere una alta capacidad de bioacumulación o una mayor exposición a fuentes de aluminio en el entorno, posiblemente vinculadas a características geológicas locales o actividades antropogénicas.

El arsénico (As), elemento potencialmente tóxico, mostró sus mayores concentraciones en *Chrysothrix granulosa* ($19,35 \pm 0,92$ mg/kg) y *Candelaria concolor* ($12,3 \pm 0,42$ mg/kg). Estas especies parecen ser más sensibles a la acumulación de arsénico, lo cual podría estar relacionado con fuentes locales de contaminación, como actividades agrícolas o mineras en la región. En contraste, otras especies, como *Usnea sp.1* ($5,32$ mg/kg) y *Xanthomendoza cf. mendozae* ($3,86 \pm 2,92$ mg/kg), presentaron concentraciones significativamente menores, lo que podría indicar una menor exposición o una capacidad limitada de absorción de arsénico.

Los niveles de cadmio (Cd) en los líquenes fueron relativamente bajos, lo cual es consistente con lo esperado en áreas naturales no expuestas a fuentes industriales significativas. La mayor concentración de cadmio se observó en *Candelaria concolor* ($0,77 \pm 0,06$ mg/kg), lo cual aún se encuentra dentro de los rangos considerados como acumulación moderada. En general, la baja concentración de cadmio en todas las especies sugiere una exposición limitada a fuentes contaminantes de este metal.

El cobre (Cu), un metal esencial en bajas concentraciones, pero tóxico en niveles elevados, mostró su mayor concentración en *Chrysothrix granulosa* ($193,50 \pm 20,51$ mg/kg), lo cual podría estar relacionado con la influencia de actividades antropogénicas cercanas. El hierro (Fe) también presentó concentraciones elevadas, especialmente en *Chrysothrix granulosa* ($20\,894$ mg/kg) y *Candelaria concolor* ($9\,893$ mg/kg), lo cual indica la alta capacidad de estas especies para acumular este elemento.

2. Concentración de Elementos Traza en Suelos

La concentración de metales en los suelos de las Lomas de Tacahuay mostró una alta variabilidad entre las diferentes muestras. Los elementos con mayores concentraciones fueron aluminio ($13\,177,33 \pm 693,36$ mg/kg) y hierro ($22\,728,67 \pm 9\,806,06$ mg/kg), mientras que el mercurio ($0,03 \pm 0,00$ mg/kg) y el antimonio ($0,04 \pm 0,00$

mg/kg) presentaron concentraciones mucho más bajas. La variabilidad observada en algunos metales, como el cobre ($86,70 \pm 55,46$ mg/kg), sugiere la posible influencia de actividades antropogénicas o características geológicas locales.

La alta concentración de aluminio y hierro tanto en líquenes como en suelos indica una posible relación entre la composición del suelo y la acumulación de estos metales en los líquenes. *Chrysothrix granulosa* y *Candelaria concolor* mostraron una mayor capacidad para acumular estos elementos, lo que podría estar relacionado con su exposición directa a depósitos de polvo en la atmósfera y su capacidad para retener partículas del suelo.

Los resultados de este estudio son consistentes con investigaciones previas que indican que los líquenes son excelentes bioindicadores de la calidad ambiental debido a su capacidad para acumular metales presentes en la atmósfera. Estudios previos realizados en Moquegua (Valeriano, 2018) y en la Cordillera Blanca (Arroyo, 2020) también reportaron variabilidad en la capacidad de acumulación de elementos traza entre diferentes especies de líquenes, destacando el papel de factores ambientales y antropogénicos en la acumulación de metales. La evaluación de la concentración de elementos traza como Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn y Hg en líquenes y suelos de las lomas de Tacahuay revela que estos ecosistemas actúan como sumideros naturales de contaminantes, similar a lo observado en otros estudios de biomonitorio de metales pesados en ecosistemas sensibles. Por ejemplo, en los líquenes del Parque Nacional Nahuel Huapi en Argentina, se observó la acumulación significativa de mercurio, incluso en áreas con bajo impacto antropogénico, lo cual subraya la capacidad de bioacumulación de estos organismos y su papel como biomonitores efectivos (Bubach et al., 2024).

Los resultados de Tacahuay mostraron una alta variabilidad en la concentración de elementos traza entre las diferentes altitudes, lo cual podría estar relacionado con las condiciones edáficas y la proximidad a fuentes de contaminación antropogénica. En el estudio de la región del Punjab, se observó que actividades como la irrigación con aguas subterráneas ricas en metales y prácticas agrícolas contribuyen a las concentraciones elevadas de elementos tóxicos en suelos y plantas, como el arroz (Natasha et al., 2022).

De manera similar, en las lomas de Tacahuay, la actividad antropogénica local podría estar influyendo en la distribución de metales pesados.

Se identificó una mayor concentración de algunos metales, como el Hg y el Pb, en las zonas más cercanas a fuentes de actividad humana, lo cual concuerda con la literatura sobre la influencia de actividades industriales y vehiculares en la acumulación de metales pesados en el ambiente (Padeiro et al., 2016).

La alta acumulación de aluminio y hierro en *Chrysothrix granulosa* y *Candelaria concolor* en las Lomas de Tacahuay coincide con observaciones similares en otros estudios, lo cual sugiere que estas especies podrían ser particularmente útiles para el monitoreo de contaminación por metales en regiones con alta exposición a polvo y partículas en suspensión.

5.1.3. Análisis del nivel de contaminación de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes identificados en las Lomas de Tacahuay

El análisis del nivel de contaminación de los metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes de las Lomas de Tacahuay se realizó mediante el cálculo del Factor de Contaminación (FC) y el Grado de Contaminación (GC) en diferentes altitudes. Los resultados evidenciaron variaciones significativas en el grado de contaminación dependiendo de la altitud y el metal analizado.

1. Factores de Contaminación y Grado de Contaminación

Los valores de FC para arsénico (As) fueron elevados en todas las altitudes, alcanzando un máximo en los 654 y 685 msnm (12,06 y 12,37, respectivamente), lo que sugiere una fuerte contaminación por As en estos sitios. Este resultado es preocupante ya que el arsénico es altamente tóxico y ha sido asociado con riesgos significativos para la salud y el ambiente (Zhang et al., 2020).

De manera similar, el cobre (Cu) también mostró altos niveles de contaminación en todas las altitudes, con un valor máximo de 14,24 en 654 msnm, indicando una fuente

considerable de contaminación, posiblemente vinculada a actividades antropogénicas como la minería, que es común en esta región.

En estudios previos, como el realizado en la Cordillera Blanca, se identificaron patrones similares de acumulación elevada de arsénico y cobre en líquenes debido a fuentes de contaminación cercanas (Arroyo, 2020). En comparación con las lomas de Tacahuay, se observa que las zonas de mayor altitud presentan un menor grado de contaminación en algunos metales, lo cual podría deberse a una menor influencia de las actividades humanas en estas áreas más alejadas.

Por otro lado, el cadmio (Cd) y el mercurio (Hg) presentaron niveles de contaminación bajos, con valores de FC inferiores a 1 en la mayoría de las altitudes, lo cual indica una menor presencia de estas sustancias en el ambiente. Sin embargo, en la altitud de 685 msnm, el cadmio superó ligeramente el valor de 1, sugiriendo una leve contaminación. Este patrón también se encontró en las lomas costeras de Moquegua, donde el cadmio mostró concentraciones más elevadas en zonas específicas, probablemente debido a fuentes de contaminación localizadas, como prácticas agrícolas (Valeriano, 2018).

2. Contaminación por Altitud

El análisis del Grado de Contaminación (GC) mostró que las altitudes de 641, 654 y 685 msnm presentaron los valores más altos (28, 31 y 31, respectivamente), lo que indica un grado de contaminación muy alto, principalmente debido a los elevados niveles de As y Cu. Estos resultados coinciden con estudios que indican que la exposición a fuentes de polvo contaminado y la influencia de la actividad humana, como el transporte y la minería, contribuyen a altos niveles de elementos traza en los ecosistemas (Somasundharanair et al., 2022).

En altitudes superiores (709 y 779 msnm), el grado de contaminación fue considerable, pero menor que en las zonas más bajas. Esto puede estar relacionado con una menor deposición de partículas contaminantes en altitudes más elevadas, lo cual es consistente con lo observado en el estudio de los sistemas lacustres en la Antártida, donde

la distancia a las fuentes de contaminación directa influye significativamente en la distribución de los elementos traza (Bhakta et al., 2022).

La comparación de estos resultados con la literatura muestra que los líquenes son efectivos biomonitores de la contaminación por metales pesados, especialmente en áreas remotas o de difícil acceso, como se ha indicado en estudios de biomonitoreo en diversos contextos geográficos (Garty, 2001). La alta concentración de As y Cu en líquenes en las Lomas de Tacahuay coincide con los hallazgos de Padeiro et al. (2016) sobre la capacidad de los líquenes para acumular grandes cantidades de metales pesados debido a la absorción pasiva de contaminantes atmosféricos.

La capacidad de ciertas especies de líquenes para acumular altos niveles de metales tóxicos destaca su utilidad como bioindicadores en zonas donde la contaminación puede no ser visible, pero tiene un impacto significativo en la calidad del aire y la salud del ecosistema. Estos resultados también subrayan la importancia de realizar estudios a diferentes altitudes, ya que las variaciones en los patrones de acumulación de metales pueden proporcionar información sobre la distribución de la contaminación y los posibles riesgos para la biodiversidad local (Ferreira et al., 2022).

5.1.4. Evaluación del riesgo ecológico potencial de metales traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en suelos sobre

El análisis de los factores de geoacumulación (I_{geo}) y de enriquecimiento (EF) en las muestras de líquenes y suelos de las lomas de Tacahuay proporcionó una visión clara sobre la presencia y la distribución de elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg). Los resultados indican variaciones significativas en los niveles de estos elementos, tanto por altitud como por la capacidad de bioacumulación de cada especie de líquen.

1. Índice de Geoacumulación (I_{geo})

El índice de geoacumulación mostró que los elementos como el arsénico (As) y el cobre (Cu) presentan un nivel considerable de acumulación en la mayoría de las altitudes evaluadas, lo cual indica que estos elementos podrían estar siendo transportados

y depositados en las áreas más expuestas. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos en diferentes contextos geográficos, como el realizado por Quevedo y Meneses (2014), quienes encontraron un enriquecimiento significativo de As y Cu en suelos agrícolas, atribuido principalmente a las prácticas agrícolas y a la utilización de productos químicos que contienen estos metales. En comparación, la acumulación de estos elementos en las lomas de Tacahuay podría estar relacionada con la exposición a fuentes de contaminación locales, como la actividad minera o el transporte de partículas atmosféricas.

El análisis de la tesis de Valeriano (2018) también reveló patrones similares, mostrando que los niveles de As y Cu en líquenes y suelos estaban significativamente elevados en zonas cercanas a fuentes de contaminación humana. Esto refuerza la idea de que la actividad antropogénica podría estar desempeñando un papel importante en la acumulación de estos elementos en el área de estudio.

2. Factor de Enriquecimiento (EF)

El Factor de Enriquecimiento (EF) se utilizó para determinar si los elementos traza presentes en las muestras de líquenes y suelos provienen de fuentes naturales o si están enriquecidos debido a actividades antropogénicas. Los resultados indican que elementos como el cadmio (Cd) y el mercurio (Hg) presentan un alto factor de enriquecimiento, lo cual sugiere una fuente predominantemente antropogénica. Este tipo de enriquecimiento ha sido reportado en estudios realizados en otras áreas geográficas donde las actividades industriales y mineras han generado un aumento significativo en los niveles de estos elementos (Rai et al., 2015; Somasundharanair et al., 2022).

En la investigación llevada a cabo por Naranjo (2020), se observó que los niveles de Cd y Hg en líquenes de zonas altas del volcán Antisana, en Ecuador, también presentaban un enriquecimiento significativo, posiblemente asociado a la deposición atmosférica de partículas provenientes de fuentes industriales distantes. Similarmente, en las lomas de Tacahuay, el alto factor de enriquecimiento de estos metales puede deberse a la influencia de las corrientes atmosféricas que transportan contaminantes desde áreas industriales cercanas.

El uso de líquenes como biomonitores de la contaminación ambiental es ampliamente aceptado debido a su capacidad para acumular metales pesados y reflejar la calidad del aire. La tesis de Valeriano Zapana y el estudio de Naranjo, junto con los artículos revisados (Pecina et al., 2021; Vithanage et al., 2022), han demostrado que los líquenes son herramientas efectivas para evaluar el grado de contaminación y el impacto de los elementos traza en diferentes ecosistemas. En el caso de Tacahuay, los resultados obtenidos muestran una situación similar a otros ecosistemas estudiados, donde los líquenes presentan una alta capacidad de acumular elementos traza, especialmente en áreas con alta exposición a fuentes de contaminación antropogénica.

En cuanto a los resultados de geoacumulación y enriquecimiento, estudios como el de Anderson et al. (2022) sugieren que el transporte de contaminantes atmosféricos, junto con actividades locales como la minería, puede contribuir a los altos niveles de ciertos metales, como As y Cu, en los ecosistemas naturales. Los patrones de acumulación de metales encontrados en las lomas de Tacahuay son consistentes con esta idea, indicando que tanto la geología local como las actividades humanas contribuyen al estado actual de contaminación de la zona.

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos en el estudio de los líquenes de las Lomas de Tacahuay evidencian una notable diversidad de especies, con una clara dominancia de *Candelaria concolor* y *Chrysothrix granulosa*. Esta diversidad varió según la altitud, siendo mayor en las zonas con condiciones ambientales más favorables (como 779 msnm), lo cual destaca la influencia de factores ambientales en la estructura de la comunidad de líquenes. El análisis del riesgo ecológico de los elementos traza indicó que el arsénico presenta un riesgo ecológico moderado, mientras que otros elementos, como cadmio, cobre y mercurio, mostraron un bajo riesgo. Estos resultados confirman la utilidad de los líquenes como biomonitores ambientales, destacando su capacidad para acumular elementos traza y su sensibilidad a las variaciones microclimáticas y a la contaminación atmosférica.
2. El análisis de la concentración de elementos traza en líquenes y suelos de las Lomas de Tacahuay mostró una considerable variabilidad entre las especies de líquenes y las muestras de suelo. *Chrysothrix granulosa* y *Candelaria concolor* demostraron una alta capacidad para acumular elementos como aluminio, hierro y cobre, lo que indica una posible relación con la composición del suelo y la influencia de actividades antropogénicas en la región. La acumulación de elementos tóxicos como el arsénico y el cadmio, aunque en niveles moderados, sugiere la necesidad de monitoreo continuo para evitar efectos adversos en el ecosistema local.
3. El análisis del grado de contaminación potencial de los elementos traza presentes en los líquenes de las Lomas de Tacahuay mostró que los niveles de arsénico y cobre presentan una contaminación muy alta en las altitudes más bajas, mientras que otros metales, como el cadmio y el mercurio, mostraron niveles bajos de contaminación en la mayoría de las altitudes. Estos resultados resaltan la necesidad de continuar con el monitoreo de metales pesados en estos ecosistemas, ya que el grado de contaminación varía considerablemente según la altitud y la proximidad a fuentes antropogénicas.

4. El análisis de los factores de geoacumulación y enriquecimiento en los líquenes y suelos de las lomas de Tacahuay reveló una alta acumulación de elementos como As, Cu, Cd y Hg, con factores de enriquecimiento que sugieren una fuente antropogénica predominante. Los líquenes demostraron ser biomonitores efectivos para evaluar la calidad del ambiente y la distribución de los metales pesados en el ecosistema. Estos resultados resaltan la importancia de las actividades humanas en la contaminación de estos ecosistemas naturales y la necesidad de una mayor comprensión de la dinámica de los metales pesados en áreas remotas y expuestas a la deposición atmosférica.

RECOMENDACIONES

Se recomienda al Gobierno Regional de Tacna (GORE TACNA):

1. Implementación de un monitoreo continuo de los líquenes en las Lomas de Tacahuay para evaluar la variación temporal en la acumulación de elementos traza y su relación con cambios ambientales. Además, se deben priorizar áreas de alta biodiversidad, como aquellas a 779 msnm, para estrategias de conservación, ya que estas zonas representan puntos críticos de biodiversidad que contribuyen a la resiliencia del ecosistema frente a perturbaciones externas.
2. realizar un monitoreo continuo de los elementos traza en líquenes y suelos de las Lomas de Tacahuay, con especial atención a *Chrysothrix granulosa* y *Candelaria concolor*, debido a su alta capacidad de acumulación de metales. Además, se sugiere evaluar la influencia de actividades antropogénicas cercanas, como la minería o la agricultura, para determinar posibles fuentes de contaminación y tomar medidas de mitigación adecuadas.
3. implementar programas de monitoreo continuo en las Lomas de Tacahuay, con especial atención a las zonas con alta contaminación por arsénico y cobre. Estos programas deberían incluir estudios de fuentes potenciales de contaminación, como actividades mineras y agrícolas, y la implementación de medidas para mitigar la emisión de metales pesados. Además, es esencial evaluar el impacto de la contaminación en la biodiversidad local, considerando el papel crucial de los líquenes como indicadores de la salud del ecosistema y como un recurso para la conservación en áreas sensibles.
4. implementar un programa de monitoreo continuo en las lomas de Tacahuay para evaluar los cambios en los niveles de geoacumulación y enriquecimiento de metales pesados. Además, se deberían tomar medidas de mitigación para reducir las emisiones de metales traza, especialmente en áreas cercanas a fuentes industriales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abas, A. (2021). A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: A decade of practices, progress and challenges. *Ecological Indicators*, *121*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107197>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. In *Journal of Chemistry*, *2019*. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Allen, J. L., & Lendemer, J. C. (2022). A call to reconceptualize lichen symbioses. In *Trends in Ecology and Evolution*, *37*(7), 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.03.004>
- Allen, J. L., McMullin, R. T., Tripp, E. A., & Lendemer, J. C. (2019). Lichen conservation in North America: a review of current practices and research in Canada and the United States. In *Biodiversity and Conservation*, *28*(12), 3103–3138. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01827-3>
- Ancora, S., Dei, R., Rota, E., Mariotti, G., Bianchi, N., & Bargagli, R. (2021). Altitudinal variation of trace elements deposition in forest ecosystems along the NW side of Mt. Amiata (central Italy): Evidence from topsoil, mosses and epiphytic lichens. *Atmospheric Pollution Research*, *12*(10). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101200>
- Anderson, J., Lévesque, N., Caron, F., Beckett, P., & Spiers, G. A. (2022). A review on the use of lichens as a biomonitoring tool for environmental radioactivity. In *Journal of Environmental Radioactivity*, *243*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106797>
- Arroyo, J. A. (2022). *Los líquenes como bioindicadores de presencia de metales pesados en ecosistemas de montaña: experiencia en la cordillera blanca, Ancash-Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5249>

- Asplund, J., & Wardle, D. A. (2017). How lichens impact on terrestrial community and ecosystem properties. *Biological Reviews*, *92*(3), 1720–1738.
<https://doi.org/10.1111/brv.12305>
- Balbin, D. (1995). *Agua, minería y contaminación*. Labor.
- Bao, Y., Ju, Y., Li, B., & Sun, Y. (2016). Migration of trace elements from basalt substrate to co-located vegetation (lichens and mosses) at the Wudalianchi volcanos, Northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, *118*, 95–100,
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.12.027>
- Berauer, B. J., Wilfahrt, P. A., Arfin, M. A. S., Eibes, P., Von, A., Ingrisich, J., Schloter, M., Schuchardt, M. A., & Jentsch, A. (2019). Low resistance of montane and alpine grasslands to abrupt changes in temperature and precipitation regimes. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, *51*(1), 215–231.
<https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1618116>
- Beresford, D., Pullen, A. G., Whaley, O. Q., Moat, J., Chauca, G., Cadwallader, L., Arce, S., Orellana, A., Alarcón, C., Gorriti, M., Maita, P. K., Sturt, F., Dupeyron, A., Huaman, O., Lane, K. J., & French, C. (2015). Re-evaluating the resource potential of lomas fog oasis environments for Pre-ceramic hunter-gatherers under past ENSO modes on the south coast of Peru. *Quaternary Science Reviews*, *129*, 196–215. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.10.025>
- Bezuidenhout, H., Bredenkamp, G. J., Theron, G. K., & Morrissett, J. W. (1994). A Braun-Blanquet reclassification of the Bankenveld Grassland in the Lichtenburg area, south-western Transvaal. In *S. Afr. J. Bot.*, *60*(6).
- Bhakta, S., Rout, T. K., Karmakar, D., Pawar, C., & Padhy, P. K. (2022). Trace elements and their potential risk assessment on polar ecosystem of Larsemann Hills, East Antarctica. *Polar Science*, *31*.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100788>

- Bidussi, M., Solhaug, K. A., & Gauslaa, Y. (2016). Increased snow accumulation reduces survival and growth in dominant mat-forming arctic-alpine lichens. *Lichenologist*, *48*(3), 237–247. <https://doi.org/10.1017/S0024282916000086>
- Bird, A., Watmough, S. A., Carson, M. A., Basiliko, N., & McDonough, A. (2019). Nitrogen Retention of Terricolous Lichens in a Northern Alberta Jack Pine Forest. *Ecosystems*, *22*(6), 1308–1324. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00337-1>
- Bubach, D. F., Pérez, S., Arribére, M. A., Diéguez, M. C., García, P. E., & Messuti, M. I. (2024). Mercury content and elemental composition of fruticose lichens from Nahuel Huapi National park (Patagonia, Argentina): Time trends in transplanted and in situ grown thalli. *Atmospheric Pollution Research*, *15*(2). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101988>
- Cheng, H., Li, M., Zhao, C., Li, K., Peng, M., Qin, A., & Cheng, X. (2014). Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China. *Journal of Geochemical Exploration*, *139*, 31–52. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.012>
- Cloquet, C., Carignan, J., & Libourel, G. (2006). Atmospheric pollutant dispersion around an urban area using trace metal concentrations and Pb isotopic compositions in epiphytic lichens. *Atmospheric Environment*, *40*(3), 574–587. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.073>
- Conti, M. E., & Tudino, M. B. (2016). Lichens as Biomonitors of Heavy-Metal Pollution. *Comprehensive Analytical Chemistry*, *73*, 117–145. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.02.005>
- De La Cruz, A. R. H., De La Cruz, J. K. H., Tolentino, D. A., & Gioda, A. (2018). Trace element biomonitoring in the Peruvian andes metropolitan region using *Flavoparmelia caperata* lichen. *Chemosphere*, *210*, 849–858. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.013>

- De Luca, L. V., Taelman, S. E., Pr at, N., Boone, L., Van, K., Cust dio, M., Hernandez Lucas, S., Everaert, G., & Dewulf, J. (2022). Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems: Review of the integration of Life Cycle Assessment, Environmental Risk Assessment and Ecosystem Services Assessment. In *Science of the Total Environment*, 808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152125>
- Demkova, L., Baranova, B., Obona, J., Arvay, J., & Losak, T. (2017). Assessment of air pollution by toxic elements on petrol stations using moss and lichen bag technique. *Plant, Soil and Environment*, 63(8), 355–361. <https://doi.org/10.17221/297/2017-PSE>
- Dillon, M. O., Leiva, S., Zapata, M., Asencio, P. L., & Silvestre, V. Q. (2011). Floristic Checklist of the Peruvian Lomas Formations Lomas peruanas. *Arnaldoa*, 8(1), 7–32.
- Flores, S., & Van, K. (2024). Endangered Lomas plant communities and their potential on green roofs in Peru. *Landscape and Urban Planning*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105061>
- Fourati, R., Scopa, A., Ben Ahmed, C., Ben, F., Terzano, R., Gattullo, C. E., Allegretta, I., Galgano, F., Caruso, M. C., & Sofo, A. (2017). Leaf biochemical responses and fruit oil quality parameters in olive plants subjected to airborne metal pollution. *Chemosphere*, 168, 514–522. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.041>
- Garty, J. (2001). Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: Theory and application. In *Critical Reviews in Plant Sciences*, 20(4), 309–371. <https://doi.org/10.1080/20013591099254>
- Geiser, L. H., Jovan, S. E., Glavich, D. A., & Porter, M. K. (2010). Lichen-based critical loads for atmospheric nitrogen deposition in Western Oregon and Washington Forests, USA. *Environmental Pollution*, 158(7), 2412–2421. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.04.001>

- Giordani, P., Brunialti, G., Frati, L., Incerti, G., Ianesch, L., Vallone, E., Bacaro, G., & Maccherini, S. (2013). Spatial scales of variation in lichens: Implications for sampling design in biomonitoring surveys. *Environmental Monitoring and Assessment*, *185*(2), 1567–1576. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2651-8>
- Gonzales, F. N., Craven, D., & Armesto, J. J. (2023). Islands in the mist: A systematic review of the coastal lomas of South America. In *Journal of Arid Environments*, *211*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104942>
- Grube, M., & Berg, G. (2009). Microbial consortia of bacteria and fungi with focus on the lichen symbiosis. In *Fungal Biology Reviews*, *23*(3), 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2009.10.001>
- Günthardt, M. S., Vollenweider, P., Hermle, S., & Schulin, R. (2019). Growth and metal accumulation of young forest trees and understorey plants on contaminated topsoil: influence of subsoil and time. *Plant and Soil*, *437*(1–2), 375–395. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03986-2>
- He, L., Chen, W., Leblanc, S. G., Lovitt, J., Arsenault, A., Schmelzer, I., Fraser, R. H., Latifovic, R., Sun, L., Prévost, C., White, H. P., & Pouliot, D. (2021a). Integration of multi-scale remote sensing data for reindeer lichen fractional cover mapping in Eastern Canada. *Remote Sensing of Environment*, *267*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112731>
- He, L., Chen, W., Leblanc, S. G., Lovitt, J., Arsenault, A., Schmelzer, I., Fraser, R. H., Latifovic, R., Sun, L., Prévost, C., White, H. P., & Pouliot, D. (2021b). Integration of multi-scale remote sensing data for reindeer lichen fractional cover mapping in Eastern Canada. *Remote Sensing of Environment*, *267*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112731>
- Hou, Y., Zhao, Y., Lu, J., Wei, Q., Zang, L., & Zhao, X. (2023). Environmental contamination and health risk assessment of potentially toxic trace metal elements in soils near gold mines – A global meta-analysis. In *Environmental Pollution*, *330*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121803>

- Hu, J., Zhang, L., Zhang, W., Muhammad, I., Yin, C., Zhu, Y., Li, C., & Zheng, L. (2024). Significant influence of land use types and anthropogenic activities on the distribution of microplastics in soil: A case from a typical mining-agricultural city. *Journal of Hazardous Materials*, 477. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135253>
- IPAMA. (2018). *SERFOR incorpora a 35 Lomas y a 1 Humedal en la Lista de Ecosistemas Frágiles - Instituto Peruano de Protección Ambiental*. Instituto Peruano de Protección Ambiental. <http://ipama.org.pe/2018/07/20/serfor-incorporo-35-lomas-1-humedal-la-lista-ecosistemas-fragiles/>
- Ju, H., Niu, C., Zhang, S., Jiang, W., Zhang, Z., Zhang, X., Yang, Z., & Cui, Y. (2021). Spatiotemporal patterns and modifiable areal unit problems of the landscape ecological risk in coastal areas: A case study of the Shandong Peninsula, China. *Journal of Cleaner Production*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127522>
- Kalicki, T., & Kalicki, P. (2020). Fluvial activity in the Lomas de Lachay during the upper Pleistocene and Holocene. *Geomorphology*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107087>
- Kienzl, K., Riss, A., Vogel, W., Hackl, J., & Götz, B. (2003). Chapter 3 Bioindicators and biomonitors for policy, legislation and administration. *Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*, 6(C), 85–122. [https://doi.org/10.1016/S0927-5215\(03\)80133-9](https://doi.org/10.1016/S0927-5215(03)80133-9)
- Kumar, A., Kumar, P., Singh, H., & Kumar, N. (2021). Adaptation and mitigation potential of roadside trees with bio-extraction of heavy metals under vehicular emissions and their impact on physiological traits during seasonal regimes. *Urban Forestry and Urban Greening*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126900>
- Landis, M. S., Berryman, S. D., White, E. M., Graney, J. R., Edgerton, E. S., & Studabaker, W. B. (2019). Use of an epiphytic lichen and a novel geostatistical

- approach to evaluate spatial and temporal changes in atmospheric deposition in the Athabasca Oil Sands Region, Alberta, Canada. *Science of the Total Environment*, 692, 1005–1021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.011>
- Liu, Q., Jia, Z., Li, S., & Hu, J. (2019). Assessment of heavy metal pollution, distribution and quantitative source apportionment in surface sediments along a partially mixed estuary (Modaomen, China). *Chemosphere*, 225, 829–838. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.063>
- Liu, Q., Wang, F., Meng, F., Jiang, L., Li, G., & Zhou, R. (2018). Assessment of metal contamination in estuarine surface sediments from Dongying City, China: Use of a modified ecological risk index. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.017>
- Lücking, R., Hodkinson, B. P., & Leavitt, S. D. (2016). The 2016 classification of lichenized fungi in the Ascomycota and Basidiomycota—Approaching one thousand genera. *Bryologist*, 119(4), 361–416. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-119.4.361>
- Lücking, R., Hodkinson, B. P., & Leavitt, S. D. (2017). Erratum: The 2016 classification of lichenized fungi in the Ascomycota and Basidiomycota (Bryologist (2016)). In *Bryologist* (Vol. 120, Issue 1, pp. 58–69). <https://doi.org/10.1639/0007-2745-120,1,058>
- Luo, X., Bing, H., Luo, Z., Wang, Y., & Jin, L. (2019). Impacts of atmospheric particulate matter pollution on environmental biogeochemistry of trace metals in soil-plant system: A review. *Environmental Pollution*, 255, 113138. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113138>
- Luo, X., Zhao, Z., Xie, J., Luo, J., Chen, Y., Li, H., & Jin, L. (2019). Pulmonary bioaccessibility of trace metals in PM_{2.5} from different megacities simulated by lung fluid extraction and DGT method. *Chemosphere*, 218, 915–921. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.079>

- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. In *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- M.B., B., Tiwari, A. K., N.S., M., Mohan, M., & C.M., L. (2024). Source apportionment of major ions and trace metals in the lacustrine systems of Schirmacher Hills, East Antarctica. *Science of the Total Environment*, 946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174189>
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment. *PLoS ONE*, 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Oksanen, I. (2006). Ecological and biotechnological aspects of lichens. In *Applied Microbiology and Biotechnology*, 73(4), 723–734. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0611-3>
- Overview, A., Nieboer, E., Richardson, D. H. S., & Tomassini, F. D. (1978). Mineral Uptake and Release by Lichens. In *Source: The Bryologist*, 81(2).
- Padeiro, A., Amaro, E., Dos Santos, M. M. C., Araújo, M. F., Gomes, S. S., Leppe, M., Verkulich, S., Hughes, K. A., Peter, H. U., & Canário, J. (2016). Trace element contamination and availability in the Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 18(6), 648–657. <https://doi.org/10.1039/c6em00052e>
- Pecina, V., Brtnický, M., Baltazár, T., Juříčka, D., Kynický, J., & Vašínová, M. (2021). Human health and ecological risk assessment of trace elements in urban soils of 101 cities in China: A meta-analysis. In *Chemosphere*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129215>
- Perez, D. J., Toro, C., Ayala, F., Brito, B., Iturra, L., Arriagada, M., Seguel, M., Barrios, C., Sepúlveda, M., Oliva, D., Cárdenas-Alayza, S., Urbina, M. A., Jorquera, A., Castro, E., & Galbán, C. (2020). Monitoring the occurrence of microplastic


- ingestion in Otariids along the Peruvian and Chilean coasts. *Marine Pollution Bulletin*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110966>
- Port, R. K., Käffer, M. I., & Schmitt, J. L. (2018). Morphophysiological variation and metal concentration in the thallus of *Parmotrema tinctorum* (Despr. ex Nyl.) Hale between urban and forest areas in the subtropical region of Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(33), 33667–33677. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3246-x>
- PUCP. (2020). *Lomas costeras: un paraíso por proteger - Clima de cambios PUCP*. Clima de Cambios. <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/lomas-costeras-un-paraiso-por-proteger/>
- Hernández, R., & Collado, C. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill.
- Santos, C. M., Dweck, J., Viotto, R. S., Rosa, A. H., & de Moraes, L. C. (2015). Application of orange peel waste in the production of solid biofuels and biosorbents. *Bioresource Technology*, 196, 469–479. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.114>
- Scerbo, R., Ristori, T., Possenti, L., Lampugnani, L., Barale, R., & Barghigiani, C. (2002). Lichen (*Xanthoria parietina*) biomonitoring of trace element contamination and air quality assessment in Pisa Province (Tuscany, Italy). *Science of the Total Environment*, 286(1–3), 27–40, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00959-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00959-7)
- Sun, L., Zhang, X., Zheng, J., Zheng, Y., Yuan, D., & Chen, W. (2021). Mercury concentration and isotopic composition on different atmospheric particles (PM₁₀ and PM_{2.5}) in the subtropical coastal suburb of Xiamen Bay, Southern China. *Atmospheric Environment*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118604>
- Syeda, H. I., Sultan, I., Razavi, K. S., & Yap, P. S. (2022). Biosorption of heavy metals from aqueous solution by various chemically modified agricultural wastes: A

- review. In *Journal of Water Process Engineering*, 46.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102446>
- Taylor, S. R. (1964). *Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table*, 28.
- Terauds, A., & Lee, J. R. (2016). Antarctic biogeography revisited: updating the Antarctic Conservation Biogeographic Regions. *Diversity and Distributions*, 22(8), 836–840, <https://doi.org/10.1111/ddi.12453>
- Thakur, M., Bhardwaj, S., Kumar, V., & Rodrigo, J. (2024). Lichens as effective bioindicators for monitoring environmental changes: A comprehensive review. *Total Environment Advances*, 9, 200085.
<https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200085>
- Valeriano, J. A. (2024). *Variabilidad espacial y riesgo ecológico potencial de los elementos traza presentes en líquenes de las lomas costeras y zonas altoandinas de la región de Moquegua* [Tesis de Maestría, Universidad Católica de Santa María]. <https://hdl.handle.net/20.500.12920/13640>
- Vargas, R., Stanton, D., & Nelson, P. R. (2017). Aportes al conocimiento de la biota líquénica del oasis de neblina de Alto Patache, Desierto de Atacama. *Revista de geografía Norte Grande*, (68), 49-64. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022017000300049>
- Vikas, M., & Dwarakish, G. S. (2015). Coastal Pollution: A Review. *Aquatic Procedia*, 4, 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.051>
- Vithanage, M., Bandara, P. C., Novo, L. A. B., Kumar, A., Ambade, B., Naveendrakumar, G., Ranagalage, M., & Magana-Arachchi, D. N. (2022). Deposition of trace metals associated with atmospheric particulate matter: Environmental fate and health risk assessment. *Chemosphere*, 303.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135051>


- Wang, P., Zhang, L., Lin, X., Yan, J., Zhang, P., Zhao, B., Zhang, C., & Yu, Y. (2020). Spatial distribution, control factors and sources of heavy metal in the surface sediments of Fudu Estuary waters, East Liaodong Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111279>
- Wolterbeek, H. T., Garty, J., Reis, M. A., & Freitas, M. C. (2003). Chapter 11 Biomonitoring in use: lichens and metal air pollution. *Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*, 6(C), 377–419. [https://doi.org/10.1016/S0927-5215\(03\)80141-8](https://doi.org/10.1016/S0927-5215(03)80141-8)
- Xu, S., Zheng, G., Nakai, S., Wakita, H., Wang, X., & Guo, Z. (2013). Hydrothermal He and CO₂ at Wudalianchi intra-plate volcano, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 526–530, <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.001>
- Zhang, M., He, P., Qiao, G., Huang, J., Yuan, X., & Li, Q. (2019). Heavy metal contamination assessment of surface sediments of the Subei Shoal, China: Spatial distribution, source apportionment and ecological risk. *Chemosphere*, 223, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.058>
- Zhao, K., Bao, K., Yan, Y., Neupane, B., & Gao, C. (2022). Spatial distribution of potentially harmful trace elements and ecological risk assessment in Zhanjiang mangrove wetland, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114033>

ANEXOS

Anexo 1: Constancia de determinación de muestras realizados el IMOD



INSTITUTO CIENTIFICO MICHAEL OWEN DILLON (IMOD)
 Investigación, Conservación, Educación y Transformación de Recursos
 Reconocido por Resolución de Dirección General Nro. 140-2016-SERFOR/DGGSPFFS



" Año de la unidad, la paz y el desarrollo "

CONSTANCIA DE DETERMINACIÓN DE MUESTRAS N° 011-2023

El Director del Instituto Científico Michael Owen Dillon (IMOD).


HACE CONSTAR:

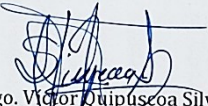
Que las 24 muestras presentadas por la Srta. **Nuria Violeta Nina Huarahuara**, recolectadas en las Lomas de Tacahuay, distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, departamento Tacna, para la realización de la tesis: "**Estado de contaminación y riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos sobre las Lomas de Tacahuay, Tacna-2023**". Fueron determinadas taxonómicamente en las instalaciones del Herbario Sur Peruano (HSP), del Instituto Científico Michael Owen Dillon, se adjunta una lista con las determinaciones:

La clasificación se ha realizado según lo propuesto por: Lücking *et al.* (2016) *The 2016 classification of lichenized fungi in the Ascomycota and Basidiomycota- Approaching one thousand genera* y su actualización Lücking *et al.* (2017) *Corrections and amendments to the 2016 classification of lichenized fungi in the Ascomycota and Basidiomycota*


Se expide la presente, a solicitud de la interesada, para los fines que estime conveniente.

Arequipa, 18 de diciembre del 2023





Dr. Blgo. Víctor Quipuscoa Silvestre
C. B.P. N° 2484
Director del Instituto Científico Michael Owen Dillon (IMOD)
Herbario Sur Peruano (HSP)
vquipuscoa@hotmail.com
vquipuscoa@imod.org.pe



Dirección: Av. Jorge Chávez No. 610 Cercado, Arequipa - Perú
 Página web: <http://www.imod.org.pe/>
 Correo: imod.per@gmail.com



INSTITUTO CIENTIFICO MICHAEL OWEN DILLON (IMOD)

Investigación, Conservación, Educación y Transformación de Recursos

Reconocido por Resolución de Dirección General Nro. 140-2016-SERFOR/DCGSPFFS



Item	Provincia	Distrito	Estación	Clase	Orden	Familia	Especie
1	Jorge Basadre	Ite	P1-001	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	Indet. sp.1
2	Jorge Basadre	Ite	P1-002	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.1
3	Jorge Basadre	Ite	P1-002	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.2
4	Jorge Basadre	Ite	P1-002	Lecanoromycetes	Lecanorales	Stereocaulaceae	<i>Leparia tenella</i> (Tuck.) Lendemer & B.P. Hodk.
5	Jorge Basadre	Ite	P1-003	Lecanoromycetes	Teloschistales	Teloschistaceae	<i>Xanthomendoza cf. mendozae</i> (Räsänen) S.Y. Kondr. & Kärnefelt
6	Jorge Basadre	Ite	P1-004	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.2
7	Jorge Basadre	Ite	P2-001	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Usnea</i> sp.1
8	Jorge Basadre	Ite	P2-002	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.1
9	Jorge Basadre	Ite	P2-002	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.2
10	Jorge Basadre	Ite	P3-001	Lecanoromycetes	Candelariales	Candelariaceae	<i>Candelaria concolor</i> (Dickens) Arnold
11	Jorge Basadre	Ite	P3-002	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.2
12	Jorge Basadre	Ite	P3-003	Lecanoromycetes	Candelariales	Candelariaceae	<i>Candelaria concolor</i> (Dickens) Arnold
13	Jorge Basadre	Ite	P3-003	Arthoniomycetes	Arthoniales	Chysothricaceae	<i>Chysothrix granulosa</i> G.Thor
14	Jorge Basadre	Ite	P4-001	Arthoniomycetes	Arthoniales	Chysothricaceae	<i>Chysothrix granulosa</i> G.Thor
15	Jorge Basadre	Ite	P4-001	Lecanoromycetes	Candelariales	Candelariaceae	<i>Candelaria concolor</i> (Dickens) Arnold
16	Jorge Basadre	Ite	P4-002	Lecanoromycetes	Caliciales	Physciaceae	<i>Physcia undulata</i> Moberg
17	Jorge Basadre	Ite	P4-003	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.2
18	Jorge Basadre	Ite	P4-004	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Parmotrema</i> sp.2
19	Jorge Basadre	Ite	P4-004	Lecanoromycetes	Caliciales	Physciaceae	<i>Physcia undulata</i> Moberg
20	Jorge Basadre	Ite	P4-004	Lecanoromycetes	Lecanorales	Parmeliaceae	<i>Canoparmelia texana</i> (Tuck.) Elix & Hale
21	Jorge Basadre	Ite	P5-001	Lecanoromycetes	Caliciales	Physciaceae	<i>Physcia undulata</i> Moberg
22	Jorge Basadre	Ite	P5-002	Arthoniomycetes	Arthoniales	Chysothricaceae	<i>Chysothrix granulosa</i> G.Thor
23	Jorge Basadre	Ite	P5-002	Lecanoromycetes	Caliciales	Physciaceae	<i>Physcia undulata</i> Moberg
24	Jorge Basadre	Ite	P5-003	Lecanoromycetes	Teloschistales	Teloschistaceae	<i>Xanthomendoza cf. mendozae</i> (Räsänen) S.Y. Kondr. & Kärnefelt



Las determinaciones fueron realizadas por Daniel F. Ramos Arambur especialista en Líquenes.

Dirección: Av. Jorge Chávez No. 610 Cercado, Arequipa - Perú
 Página web: <http://www.imod.org.pe/>
 Correo: imod_per@gmail.com

Anexo 2: Autorización de colecta de SERFOR



SERFOR

Firmado digitalmente por ARELLANO
OLAND Williams FAU 20562836927
soft
Cargo: Director
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 03.10.2023 19:13:55 -05:00

RESOLUCIÓN DIRECTORAL

Magdalena Del Mar, 03 de Octubre del 2023

RD N° D000152-2023-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPF

VISTOS:

La carta s/n, registrada con número de expediente 2023-0030925 (2023-0037717) de fecha 10 de julio de 2023, conteniendo la solicitud de autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, fuera de áreas naturales protegidas (ANP), presentada por la señora **NURIA VIOLETA NINA HUARAHUARA**¹ (en adelante, la administrada), ciudadana peruana, identificada con DNI N° 73466499; así como, el Informe Técnico N° D000053-2023-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPF-ICV, de fecha 03 de octubre de 2023, y;

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 66 de la Constitución Política del Perú de 1993 establece que los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación; y el Estado es soberano en su aprovechamiento;

Que, el artículo 9 de la Ley N° 26821, Ley Orgánica para el aprovechamiento sostenible de los Recursos Naturales, establece que el Estado promueve la investigación científica y tecnológica sobre la diversidad, calidad, composición, potencialidad y gestión de los recursos naturales. Promueve, asimismo, la información y el conocimiento de los recursos naturales. Para estos efectos, podrán otorgarse permisos para investigación;

Que, mediante el artículo 13 de la Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, se creó el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR, como un organismo público técnico especializado con personería jurídica de derecho público interno, como pliego presupuestal adscrito al Ministerio de Agricultura, actualmente el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego; artículo en el que además se señala que el SERFOR es la autoridad nacional forestal y de fauna silvestre, ente rector del Sistema Nacional de Gestión Forestal y de Fauna Silvestre, constituyendo su autoridad técnico normativa a nivel nacional, encargada de dictar las normas y establecer los procedimientos relacionados a su ámbito;

Que, el artículo 137 de la precitada Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, declara de interés nacional realizar la investigación, el desarrollo tecnológico, la mejora del conocimiento y el monitoreo del estado de conservación del patrimonio forestal y de fauna silvestre de la Nación;

Que, según lo dispuesto por el artículo 140 de la Ley en mención, señala que el SERFOR evalúa y otorga la autorización para extracción de recursos forestales y de fauna silvestre con fines de investigación científica cuando: (i) se incluye especies

¹ Tesista de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-UNJBG.



RESOLUCIÓN DIRECTORAL

amenazadas^{2,3}, (ii) especies consideradas en los Apéndices de CITES⁴, (iii) se realiza acceso a recursos genéticos sin fines de lucro; y (iv) propósitos culturales. Asimismo, en el citado artículo de la Ley indica que la colecta o extracción de recursos forestales y de fauna silvestre con fines de investigación orientada a determinación de genotipo, filogenia, sistemática y biogeografía es autorizada siguiendo procedimientos simplificados establecidos por el SERFOR;

Que, mediante el artículo 1 de la Resolución de Dirección General N° D000627-2021-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS, de fecha 15 de noviembre de 2021, la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre (DGGSPFFS) del SERFOR resolvió delegar en la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal (DGSPF), las funciones de otorgar permisos de investigación o de difusión cultural con o sin colecta de flora silvestre y sus recursos genéticos, contenida en el literal g) del artículo 53 del Reglamento de Organización y Funciones del SERFOR, aprobado por Decreto Supremo N° 007-2013-MINAGRI y modificado por Decreto Supremo N° 016-2014-MINAGRI; delegación efectuada en aplicación del numeral 78.1 del artículo 78 del Texto Único Ordenado - TUO de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado por Decreto Supremo N° 004-2019-JUS;

Que, el Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, que aprueba el Reglamento para la Gestión Forestal, en el artículo 154 regula el procedimiento de otorgamiento de autorizaciones con fines de investigación científica, señalando que la investigación del Patrimonio Forestal se aprueba mediante autorizaciones, salvaguardando los derechos del país respecto a su patrimonio genético nativo; y establece para tal efecto los requisitos y consideraciones para su otorgamiento, de acuerdo con los lineamientos aprobados por el SERFOR, concordante con el numeral 5.3.2 de los lineamientos aprobados por Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE; así como, las obligaciones materia de cumplimiento por parte de la titular de la autorización;

Que, mediante la Cuarta Disposición Complementaria Transitoria del Decreto Legislativo N° 1497, publicado el 10 de mayo de 2020, se dispuso la suspensión hasta el 31 de diciembre de 2020, de la aplicación del numeral 134.3 del artículo 134 del Texto Único Ordenado - TUO de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado por Decreto Supremo N° 004-2019-JUS, respecto a la obligación de la presentación física del escrito o documentación por parte de los administrados; suspensión que mediante Decreto Supremo N° 187-2021-PCM, fue prorrogada hasta el 31 de diciembre de 2024;

Que, en ese contexto mediante carta s/n, registrada de fecha 10 de julio de 2023, la administrada solicitó a la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre, la autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, fuera de áreas naturales protegidas (ANP), para desarrollar el proyecto titulado *"Estado de contaminación y riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos sobre las Lomas de Tacahuay, Tacna-2023"*; a realizarse en las Lomas de Tacahuay, ubicada en



RESOLUCIÓN DIRECTORAL

el distrito y provincia de Ilo, departamento de Moquegua, y en el distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna;

Que, en el actual Texto Único de Procedimientos Administrativos - TUPA del SERFOR, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2016-MINAGRI y modificado por Resolución Ministerial N° 613-2016-MINAGRI, Resolución Ministerial N° 026-2019-MINAGRI, Resolución de Dirección Ejecutiva N° D000103-2020-MINAGRI-SERFOR-DE y Resolución de Dirección Ejecutiva N° D000099-2021-MIDAGRI-SERFOR-DE; no se contempla el procedimiento de autorización para realizar investigación científica fuera de ANP;

Que, en observancia del principio de impulso de oficio, el cual se encuentra previsto en el numeral 1.3 del artículo IV del Título Preliminar del Texto Único Ordenado - TUO de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado por Decreto Supremo N° 004-2019-JUS; se desprende que las autoridades deben dirigir e impulsar de oficio el procedimiento y ordenar la realización o práctica de los actos que resulten convenientes para el esclarecimiento y resolución de las cuestiones necesarias;

Que, de acuerdo con el artículo 140 de la Ley Forestal y de Fauna Silvestre, Ley N° 29763, es competencia del SERFOR la evaluación de la presente solicitud, toda vez que la investigación se desarrollará fuera de áreas naturales protegidas, y comprenderá el estudio de organismos (líquenes) asociados a la flora silvestre en dos (02) departamentos del Perú, Moquegua y Tacna;

Que, por tanto, en ese sentido, la solicitud en evaluación aplica lo dispuesto en el numeral 9 del ANEXO N° 1 del Reglamento para la Gestión Forestal, establece los requisitos para la solicitud de autorizaciones con fines de investigación de flora silvestre; en concordancia con el numeral 6.6 de los lineamientos aprobados por Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE, señalan los siguientes requisitos para la autorización con fines de investigación científica fuera de ANP: i) Solicitud con carácter de declaración jurada que contenga información sobre el investigador, según formato; ii) Hoja de vida del investigador principal y plan de investigación, según formato; iii) Carta de presentación de los investigadores participantes, emitida por la institución académica u organización científica nacional o extranjera de procedencia; iv) Documento que acredite el consentimiento informado previo, expedido por la respectiva organización comunal representativa, de corresponder; y v) Documento que acredite el acuerdo entre las instituciones que respaldan a los investigadores nacionales y extranjeros, en caso la solicitud sea presentada por un investigador extranjero;

Que, como parte de la evaluación realizada se encontraron observaciones referidas a requisitos y el plan de investigación, las cuales fueron remitidas por la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal a la dirección electrónica autorizada por la administrada (nurianinavh@gmail.com) mediante Carta N° D001159-2023-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPF, notificada en fecha 08 de agosto de 2023. La administrada remitió la subsanación de observaciones a través de la Carta N°0012-2023-NVNH/ILO, registrada con expediente N° 2023-0037717, de fecha 16 de agosto de 2023, para su evaluación correspondiente;

Que, en ese sentido, la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal a través del Informe Técnico N° D000053-2023-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPF-ICV, emitido de fecha 03 de octubre de 2023; concluye que, la solicitud de



RESOLUCIÓN DIRECTORAL

investigación científica cumple con los requisitos exigidos en el numeral 9 del Anexo N° 1 del Reglamento para la Gestión Forestal y con los "Lineamientos para el otorgamiento de la autorización con fines de investigación científica de flora y/o fauna silvestre", aprobado mediante Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE; así como, con las condiciones mínimas y los criterios técnicos para su ejecución, considerándose procedente el plazo propuesto para el desarrollo de las actividades con fines de investigación de flora silvestre, esto es, por el periodo de siete (07) meses;

Que, asimismo, a través de dicho Informe Técnico, se recomienda la emisión del acto administrativo que aprueba la solicitud de investigación científica de flora silvestre, fuera de ANP, para el desarrollo del proyecto titulado "*Estado de contaminación y riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos sobre las Lomas de Tacahuay, Tacna-2023*"; el cual es parte de la tesis de la administrada en el marco de la maestría en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, aprobado mediante Resolución Escuela de Posgrado N° 12137-2023-ESPG/UNJBG;

Que, finalmente, en dicho informe se señala que la presente investigación resalta porque permitirá conocer el estado y calidad del ecosistema de Lomas de Tacahuay respecto a la contaminación de metales pesados presentes en líquenes y suelos, a fin de que las autoridades y gestores utilicen la información generada como base para desarrollar acciones y planes sobre los problemas de contaminación del aire, suelo y monitorear sus efectos de este ecosistema frágil, prioritario para su conservación;

Que, por otro lado, el artículo 158 del Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, establece como obligaciones del investigador en flora silvestre las siguientes:

- a. No extraer especímenes, ni muestras biológicas, de flora silvestre no autorizada; no ceder los mismos a terceras personas, ni utilizarlos para fines distintos a lo autorizado.*
- b. Entregar al SERFOR un informe final en idioma español y en versión digital, como resultado de la autorización otorgada, así como copia de las publicaciones producto de la investigación realizada, e indicar el número de la Autorización en las publicaciones generadas. Esta información es ingresada al SNIFFS.*
- c. Depositar el material colectado en una institución científica nacional depositaria de material biológico, así como entregar al SERFOR la constancia de dicho depósito. En casos debidamente justificados, y siempre que el material colectado no constituya holotipos ni ejemplares únicos, el depósito se podrá realizar en una institución distinta a la mencionada; para ello se requiere la autorización del SERFOR.*
- d. Solicitar el correspondiente permiso de exportación ante el SERFOR a través de la Ventanilla Única de Comercio Exterior - VUCE, así como pasar el control respectivo, en caso se requiera enviar al extranjero parte del material colectado, por razones científicas acotadas. Los ejemplares únicos de los grupos taxonómicos colectados y holotipos solo podrán ser exportados en calidad de préstamo.*
- e. Incluir a por lo menos un investigador nacional, cuando la autorización de investigación sea requerida por extranjeros.*



RESOLUCIÓN DIRECTORAL

f. Incluir en las publicaciones el reconocimiento correspondiente al investigador nacional que participó en la investigación, en caso la autorización haya sido otorgada a investigadores extranjeros."

Que, asimismo, en el marco de la autorización otorgada, la administrada considerará los siguientes compromisos:

- a. *Comunicar con la debida anticipación a la Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre Moquegua-Tacna del SERFOR, el ingreso y salida a campo.*
- b. *Indicar el número de la resolución en las publicaciones generadas a partir de la autorización concedida.*
- c. *Solicitar anticipadamente ante la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal del SERFOR y dentro del periodo del cronograma de trabajo del plan de investigación, cualquier cambio en las características del estudio aprobado (por ejemplo, cronograma, inclusión de especialistas, etc.), que demande la modificación de la presente resolución.*
- d. *En caso sobrevenga algún hecho o evento que imposibilite la ejecución de la investigación autorizada o que origine que no se pueda continuar con el desarrollo de la misma, corresponde a la administrada solicitar por escrito ante la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal del SERFOR, la renuncia a la autorización otorgada; renuncia que deberá ser solicitada dentro del plazo de vigencia de la autorización, precisándose el hecho o evento que origina la imposibilidad de ejecutar o de continuar ejecutando la investigación aprobada, debiendo además la administrada adjuntar la documentación de sustento que estime necesaria, de ser el caso.*

Que, por otro lado, el artículo 100 del Reglamento para la Gestión Forestal y de Fauna Silvestre en Comunidades Nativas y Comunidades Campesinas, señala lo siguiente:

"Investigaciones científicas realizadas dentro de las tierras de comunidades campesinas y comunidades nativas"

Toda investigación científica en materia forestal y de fauna silvestre a realizarse dentro de tierras de comunidades campesinas o comunidades nativas, requiere de la autorización expresa de la comunidad y autorización otorgada por la autoridad correspondiente. (...)"

Que, en adición a ello, debemos precisar que, la presente autorización no habilita el ingreso a predios privados, en cuyos casos, deberán gestionar la autorización de ingreso correspondiente ante la autoridad o titular del área, según corresponda;

Que, en ese sentido, en caso la ejecución de la investigación comprenda el ingreso a territorios de Comunidades Campesinas o Comunidades Nativas, previamente deberá solicitarse la autorización correspondiente;

Que, en conformidad con la Ley Forestal y de Fauna Silvestre, aprobada por Ley N° 29763; el Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI; el Decreto Supremo N° 004-2019-JUS que aprueba el Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444 Ley del Procedimiento Administrativo General; el literal g) del Artículo 53 del Reglamento de Organización y Funciones



RESOLUCIÓN DIRECTORAL

aprobado por Decreto Supremo N° 007-2013-MINAGRI, y su modificatoria mediante Decreto Supremo N° 014-2016-MINAGRI; la Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE; así como, en ejercicio de la función delegada a través del artículo 1 de la Resolución de Dirección General N° D000627-2021-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS;

SE RESUELVE:

Artículo 1.- OTORGAR la autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, fuera de áreas naturales protegidas (ANP), a favor de la señora **Nuria Violeta Nina Huarahuara**, identificada con DNI N° 73466499, correspondiéndole el Código de Autorización N° **AUT-IFL-2023-074**; para desarrollar el proyecto titulado "*Estado de contaminación y riesgo ecológico potencial de los elementos traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg) presentes en líquenes y suelos sobre las Lomas de Tacahuay, Tacna-2023*"; a realizarse en las Lomas de Tacahuay, ubicada en el distrito y provincia de Ilo, departamento de Moquegua, y en el distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna; en conformidad con lo señalado en el Cuadro N° 1 del **Anexo 1**, cuya vigencia se contabilizará desde la fecha de emisión de la presente resolución⁵.

Artículo 2.- Autorizar la participación de los investigadores señalados por la administrada, conforme con el Cuadro N° 2 del **Anexo 2** de la presente resolución.

Artículo 3.- La administrada se encuentra sujeta al cumplimiento de lo presentado en el plan de investigación y al plazo correspondiente a siete (07) meses, así como con la colecta de muestras de ejemplares de líquenes (muestras asociadas a la flora silvestre) con fines de realizar la determinación taxonómica y determinar elementos de traza (Pb, Cd, Zn, Cu, Al, Fe, Ti, Ni, Cr, Mn, Hg); así como muestras de suelo asociadas a las plantas de las especies *Schinus molle* y *Caesalpinea spinosa*, para fines de determinar elementos de traza, de acuerdo con lo detallado en los Cuadros N° 3 y N° 4 del **Anexo 3** de la presente resolución. Los ejemplares de líquenes serán depositados en el Herbario del Sur Peruano (HSP) del Instituto Científico Michael Owen Dillon (IMOD), la cual forma parte del registro de Instituciones Científicas Nacionales Depositarias de Material Biológico – ICNDBM registradas por el SERFOR, asimismo, deberán cumplir con las obligaciones establecidas en la legislación forestal y de fauna silvestre, según lo señalado en la parte considerativa de la presente resolución.

Artículo 4.- La presentación del Informe Final, en versión digital como resultado de la autorización otorgada, se realizará de acuerdo con los términos señalados en el **Anexo 4** de la presente resolución, donde el informe final será presentado dentro de los noventa (90) días calendarios posteriores a la culminación de la investigación.

Artículo 5.- La presente autorización no limita el ejercicio de las funciones y/o requisitos de las entidades, en los ámbitos en los que se realice la investigación (ARFFS, ACR, ACP y otros).



RESOLUCIÓN DIRECTORAL

Artículo 6.- Toda modificación en el desarrollo de la investigación será comunicada al SERFOR dentro del plazo de vigencia de la presente resolución.

Artículo 7.- La presente autorización no habilita la exportación de muestras botánicas, en caso se requiera realizar esta actividad, la administrada y los investigadores identificados en la presente resolución, podrán gestionar el correspondiente Permiso de Exportación ante la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR. Los ejemplares únicos de los grupos taxonómicos colectados y holotipos sólo podrán ser exportados en calidad de préstamo.

Artículo 8.- La contravención a las obligaciones y/o condiciones establecidas en la presente resolución conllevará a la comisión de la infracción tipificada en el numeral 5) del Anexo 1 del Cuadro de Infracciones y Sanciones en materia forestal, aprobado mediante el Decreto Supremo N° 007-2021-MIDAGRI.

Artículo 9.- Notificar la presente resolución directoral a la señora Nuria Violeta Nina Huarahuara, a efectos de que tome conocimiento de su contenido. Contra la presente Resolución es posible la interposición de los recursos impugnativos contemplados en el Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado mediante Decreto Supremo N° 004-2019-JUS, dentro del plazo de quince (15) días hábiles más el término de la distancia en caso corresponda, contados a partir del día siguiente de notificada la misma.

Artículo 10.- Remitir la presente resolución a la Dirección de Información y Registro, a la Dirección de Control de la Gestión del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre y a la Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre Moquegua-Tacna del SERFOR; para su conocimiento y fines pertinentes.

Artículo 11.- Disponer la publicación de la presente resolución en el portal web del SERFOR: www.gob.pe/serfor

Regístrese y comuníquese,

Documento Firmado Digitalmente

WILLIAMS ARELLANO OLANO

Director

Dirección de Gestión Sostenible del
Patrimonio Forestal

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR

Anexo 3: Fotografías

Figura 33

Toma de muestra de líquenes



Nota. forofito Tara (*Caesalpinia spinosa*) en las lomas de Tacahuay

Figura 34

Liquen presente en el forofito Tara (Caesalpinia spinosa)



Figura 35

Toma de coordenada GPS



Nota. Muestreo de los líquenes de interés.

Figura 36

Actividad antrópica en la zona de estudio



Figura 37

Actividad antrópica en la zona de estudio



Nota. Se observa cabras y pastor pasteando.

Figura 38

Presencia de tara, molle y grindelia



Anexo 4: Trabajo en laboratorio

Figura 39

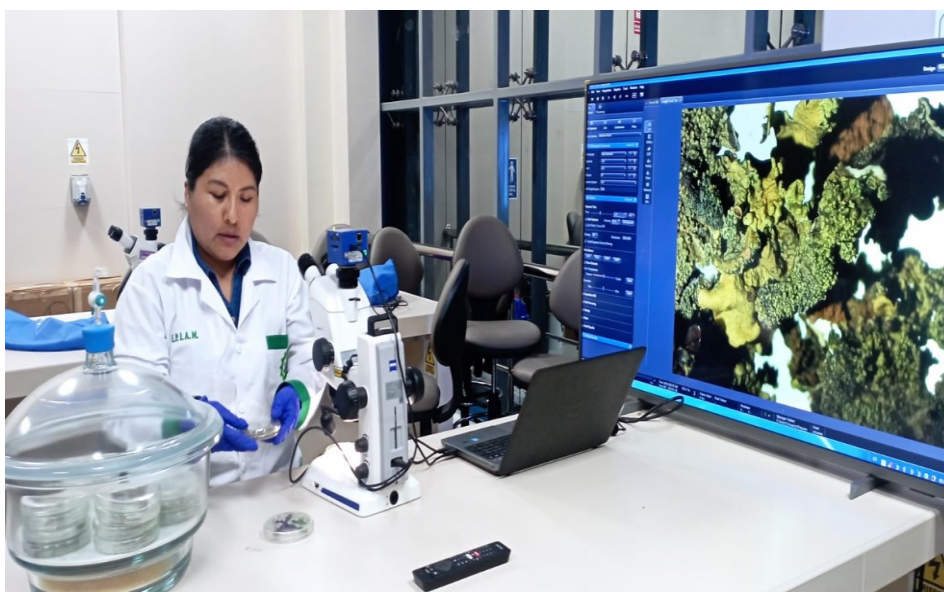
Identificación de líquenes



Nota. Área de trabajo, secador a lado del estereoscopio.

Figura 40

Pantalla de observación de muestras



Nota. Líquenes analizados para su posterior envío para el análisis químico.

Figura 41

Vista frontal de la observación de muestra de líquenes

**Figura 42**

Vista lateral de la observación de muestras de líquenes



Anexo 5: Foto de Líquenes**Figura 43**

Vista con 35x de Flavopunctilia flaventior

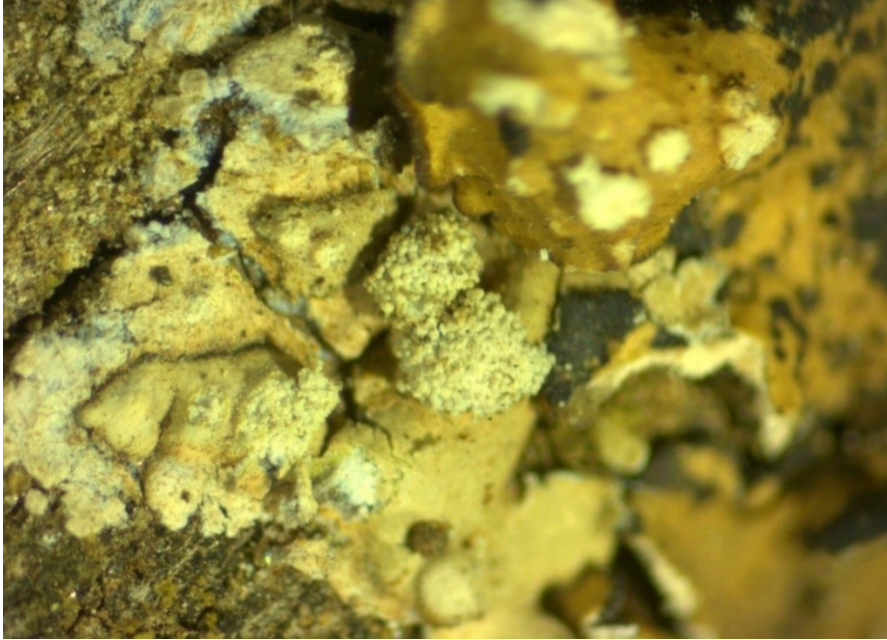
**Figura 44**

Vista con 40x de Carnoparmelea sp

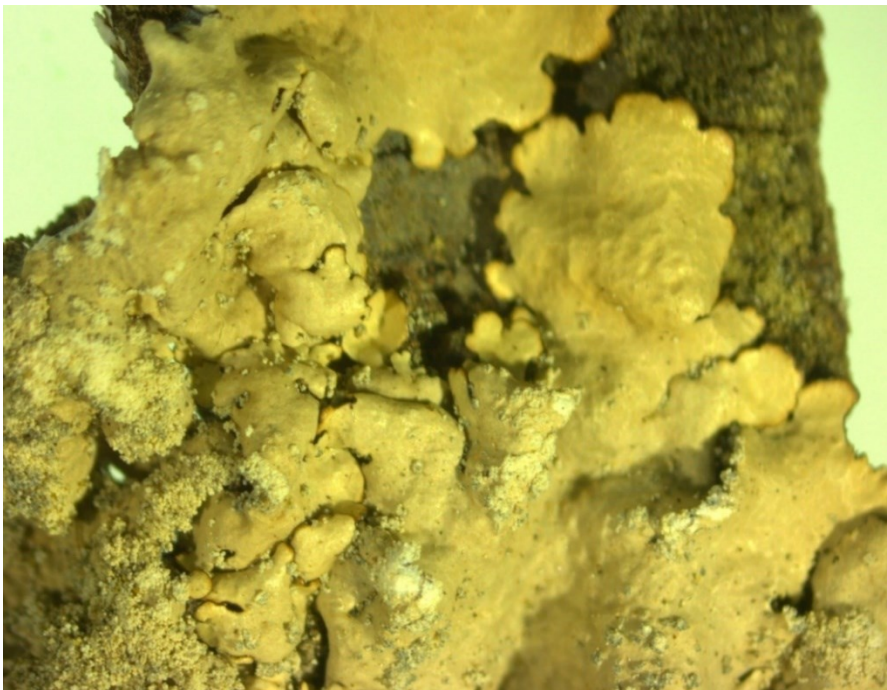


Figura 45

Vista con 40x de Dirinia Applanata

**Figura 46**

Vista con 40x de Carnoparmelea texana



Anexo 6. Certificación del material de referencia de elementos traza de los líquenes



EUROPEAN COMMISSION
JOINT RESEARCH CENTRE
Institute for Reference Materials and Measurements



CERTIFIED REFERENCE MATERIAL BCR[®] – 482

CERTIFICATE OF ANALYSIS

LICHEN			
	Mass fraction based on dry mass		Number of accepted sets of data p
	Certified value ¹⁾ [mg/kg]	Uncertainty ²⁾ [mg/kg]	
Al	1103	24	9
As	0.85	0.07	6
Cd	0.56	0.02	8
Cr	4.12	0.15	7
Cu	7.03	0.19	10
Hg	0.48	0.02	8
Ni	2.47	0.07	8
Pb	40.9	1.4	10
Zn	100.6	2.2	13

¹⁾ The certified value was calculated from the unweighted mean of the means of p accepted datasets. The certified value is traceable to the SI.

²⁾ Half-width of the 95 % confidence interval of the mean defined in ¹⁾.

This certificate is valid for one year after purchase.

Sales date:

The minimum amount of sample to be used is 250 mg.

DESCRIPTION OF THE SAMPLE


The material consists of a lichen powder in a glass bottle containing about 15 g of powder. Additional information on the preparation, the certified and indicative values is given in the certification report.

NOTE


This material has been certified by BCR (Community Bureau of Reference, the former reference materials programme of the European Commission). The certificate has been revised under the responsibility of IRMM.

Brussels, December 1995
Revised: May 2007

Signed: _____


Prof. Dr. Hendrik Emons
Unit for Reference Materials
EC-JRC-IRMM
Retieseweg 111
2440 Geel, Belgium

Anexo 7. Resultado de Análisis de elementos traza de líquenes y suelo



VCERPER
CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

CLIENTE: VARIAGUAYARA NUBIA VIOLETA
DIRECCION: LEGUIA LUIS E VALCARLOS MZ 44 - LOTE 8 - LO - MOQUEJUA
TELEFONO:
LUGAR DE MUESTREO: LOMAS


CONTACTO:
E-MAIL: informacion@peru.vcerper.edu.pe
CELLULAR: 95027204

HIS:
EXMA: 03844 - 2024
SECRETARÍA NACIONAL DE AGUA

CADENA DE CUSTODIA PARA PROTOTIPO

ALTIPO (PARAR) 2004 - 0002 (P.L.A.)

779 277398 8034500
 779 277398 8034500
 779 277398 8034500
 779 277332 8034871
 779 277332 8034871
 605 277338 8034798
 605 277338 8034798
 605 277338 8034798
 604 277228 8034540
 604 277228 8034540



05 JUL 2024
DEPARTAMENTO
AREA DE MUESTRAS
AREQUIPA

CODIGO DE ESTACION Y/O MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	FECHA DE MUESTREO	HORA DE MUESTREO	N° de BOMBAS	PARANET PLUS	
					TIPO DE BOMBA	TIPO DE MUESTRA
P1-005A	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	09:30		X	Netas SCMS
P1-005B	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	09:30		X	
P1-006	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	10:00		X	
P2-001	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	10:30		X	
P2-002	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	11:00		X	
P3-001	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	11:30		X	
P3-002	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	12:00		X	
P3-003	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	12:30		X	
P4-001	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	13:00		X	
P4-002	TEJIDO VEGETAL	16/11/2023	13:30		X	
TOTAL				0		

TIPO DE ENVASE: P/ FRASCO DE PLASTICO / VA/ FRASCO DE VIDRIO AMBAR / PA/ FRASCO DE PLASTICO
TIPO DE MUESTREO: P/ MUESTREO DE SUPERFICIE / S/ MUESTREO DE FONDO / M/ MUESTREO DE SUPERFICIE / S/ MUESTREO DE FONDO
TIPO DE MUESTRA: P/ MUESTRO DE PLASTICO / S/ MUESTRO DE VIDRIO / M/ MUESTRO DE SUPERFICIE / S/ MUESTRO DE FONDO
TIPO DE MUESTRO: P/ MUESTRO DE PLASTICO / S/ MUESTRO DE VIDRIO / M/ MUESTRO DE SUPERFICIE / S/ MUESTRO DE FONDO
TIPO DE MUESTRO: P/ MUESTRO DE PLASTICO / S/ MUESTRO DE VIDRIO / M/ MUESTRO DE SUPERFICIE / S/ MUESTRO DE FONDO

CONDICION DE RECEPCION DE LA MUESTRA:

En buen estado	SI	/	NO
Recipiente apropiado	SI	/	NO
Dentro del tiempo de conservación	SI	/	NO
Correctamente preservada	SI	/	NO

RECIBIDO POR: A. VALENZUELA / J. GUSPÉ

RESPONSABLE DE MUESTRAS / HORA Y FECHA: 11:30 05-07-24

FIRMA: T. G. S. C. 201-24 / 174



INFORME DE ENSAYO N° 2-00191/24

Página 1/6

DATOS DEL CLIENTE	
Solicitado por	: NINA HUARAHUARA, NURIA VIOLETA
Domicilio legal	: LUIS E. VALCARCEL MZ 44 - LOTE 8 - ILO - MOQUEGUA

DATOS DE LA MUESTRA	
Producto declarado ^(A)	: LIQUENES
Lugar de Muestreo ^(A)	: LOMAS
Fecha de Muestreo ^(A)	: 2023-11-16
Procedencia	: Muestra proporcionada por el solicitante
Cantidad recibida	: 01 unidad x muestra
Presentación y condición de recepción	: En frascos de plástico, refrigerados y preservados
Identificación y descripción ^(A)	: Según se indica
Fecha de recepción	: 2024-07-08
Fecha de inicio del ensayo	: 2024-07-15
Fecha de término del ensayo	: 2024-07-16
Ensayo realizado en	: Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	: EXMA-07844-2024
Validez del documento	: Este documento es válido solo para la muestra descrita

Puntos de muestreo ^(A)	Proyecto ^(A) :		Descripción de la Estación de Monitoreo ^(A)	Observaciones ^(A)
	Coordenadas UTM WGS 84 ^(A)			
	ESTE	NORTE		
P1-002-A	277398	8035520	-----	Altitud: 779 m.s.n.m.
P1-002-B	277398	8035520	-----	Altitud: 779 m.s.n.m.
P1-003	277398	8035520	-----	Altitud: 779 m.s.n.m.
P2-001	277332	8034971	-----	Altitud: 709 m.s.n.m.
P2-002	277332	8034971	-----	Altitud: 709 m.s.n.m.
P3-001	277338	8034796	-----	Altitud: 685 m.s.n.m.
P3-002	277338	8034796	-----	Altitud: 685 m.s.n.m.
P3-003	277338	8034796	-----	Altitud: 685 m.s.n.m.
P4-001	277228	8034540	-----	Altitud: 654 m.s.n.m.
P4-002	277228	8034540	-----	Altitud: 654 m.s.n.m.
P4-003	277228	8034540	-----	Altitud: 654 m.s.n.m.
P4-004	277228	8034540	-----	Altitud: 654 m.s.n.m.
P5-001	277196	8034510	-----	Altitud: 641 m.s.n.m.
P5-002	277196	8034510	-----	Altitud: 641 m.s.n.m.
P5-003	277196	8034510	-----	Altitud: 641 m.s.n.m.

^(A) Datos proporcionados por el solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el solicitante pueda afectar la validez de los resultados

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores – Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

INFORME DE ENSAYO N° 2-00191/24

Página 2/6

RESULTADOS

Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Estación de Muestreo			
			P1-002-A	P1-002-B	P1-003	P2-001
			Fecha y Hora de Muestreo	2023-11-16 09:00	2023-11-16 09:30	2023-11-16 10:00
Tipo de Muestra	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal		
Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados		
Metales por ICP-MS						
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	5 788	5 826	2 788	1 733
Antimonio (Sb)	0,04	mg/Kg	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Arsénico (As)	0,02	mg/Kg	6,74	6,59	5,92	5,32
Bario (Ba)	0,04	mg/Kg	41,4	40,8	23,6	16,3
Berilio (Be)	0,01	mg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cadmio (Cd)	0,02	mg/Kg	0,543	0,504	0,872	0,576
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	9 468	9 189	3 210	6 938
Cobalto (Co)	0,02	mg/Kg	3,22	3,13	1,64	<0,02
Cobre (Cu)	0,02	mg/Kg	50,3	48,1	63,5	61,9
Cromo (Cr)	0,2	mg/Kg	5,35	5,05	2,81	<0,2
Hierro (Fe)	0,05	mg/Kg	8 378	8 316	3 810	2 318
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	3 056	2 978	2 722	1 942
Manganeso (Mn)	0,03	mg/Kg	109	105	106	52,9
Mercurio (Hg)	0,03	mg/Kg	<0,03	<0,03	<0,03	0,550
Níquel (Ni)	0,01	mg/Kg	3,31	3,36	2,36	2,50
Plata (Ag)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/Kg	10,3	10,4	6,63	7,21
Potasio (K)	10	mg/Kg	3 917	3 833	3 944	6 558
Selenio (Se)	0,03	mg/Kg	1,10	0,961	1,35	1,38
Sodio (Na)	2	mg/Kg	524	515	937	1 018
Talio (Tl)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadio (V)	0,02	mg/Kg	20,6	20,7	9,55	6,35
Zinc (Zn)	0,02	mg/Kg	37,7	36,0	46,9	68,9

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
 Calle Teniente Rodríguez N° 1415
 Miraflores – Arequipa
 T. (054) 265572

CALLAO
 Oficina Principal
 Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
 T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

INFORME DE ENSAYO N° 2-00191/24

Página 3/6

RESULTADOS (Continuación)

Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Estación de Muestreo			
			P2-002	P3-001	P3-002	P3-003
			Fecha y Hora de Muestreo	2023-11-16 11:00	2023-11-16 11:30	2023-11-16 12:00
Tipo de Muestra	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal		
Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados		
Metales por ICP-MS						
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	2 303	9 532	4 519	3 584
Antimonio (Sb)	0,04	mg/Kg	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Arsénico (As)	0,02	mg/Kg	5,73	12,6	6,94	12,0
Bario (Ba)	0,04	mg/Kg	15,2	63,0	35,7	33,5
Berilio (Be)	0,01	mg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cadmio (Cd)	0,02	mg/Kg	0,317	0,812	0,266	0,725
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	3 736	3 286	2 985	6 799
Cobalto (Co)	0,02	mg/Kg	1,45	6,54	2,42	2,51
Cobre (Cu)	0,02	mg/Kg	51,2	94,2	78,3	119
Cromo (Cr)	0,2	mg/Kg	2,41	7,80	3,82	4,87
Hierro (Fe)	0,05	mg/Kg	3 185	14 781	6 159	5 006
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	2 249	5 374	3 000	4 065
Manganeso (Mn)	0,03	mg/Kg	53,4	359	81,8	101
Mercurio (Hg)	0,03	mg/Kg	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Níquel (Ni)	0,01	mg/Kg	1,91	5,97	2,91	3,67
Plata (Ag)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/Kg	5,79	17,9	9,90	13,6
Potasio (K)	10	mg/Kg	4 752	5 001	3 486	12 791
Selenio (Se)	0,03	mg/Kg	0,777	1,48	2,09	3,62
Sodio (Na)	2	mg/Kg	1 580	455	865	1 677
Talio (Tl)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadio (V)	0,02	mg/Kg	8,17	36,2	15,9	13,9
Zinc (Zn)	0,02	mg/Kg	31,2	59,6	50,3	100

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
 Calle Teniente Rodríguez N° 1415
 Miraflores – Arequipa
 T. (054) 265572

CALLAO
 Oficina Principal
 Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
 T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

INFORME DE ENSAYO N° 2-00191/24

Página 4/6

RESULTADOS (Continuación)

Parámetro	Limite de Detección	Unidad	Estación de Muestreo			
			P4-001	P4-002	P4-003	P4-004
			Fecha y Hora de Muestreo	2023-11-16 13:00	2023-11-16 13:30	2023-11-16 14:00
Tipo de Muestra	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal		
Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados		
Metales por ICP-MS						
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	8 516	5 054	6 266	3 819
Antimonio (Sb)	0,04	mg/Kg	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Arsénico (As)	0,02	mg/Kg	18,7	8,63	7,57	6,12
Bario (Ba)	0,04	mg/Kg	63,4	29,8	40,7	20,5
Berilio (Be)	0,01	mg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cadmio (Cd)	0,02	mg/Kg	0,990	<0,02	0,280	<0,02
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	7 240	3 730	3 252	3 023
Cobalto (Co)	0,02	mg/Kg	4,92	2,52	3,27	2,32
Cobre (Cu)	0,02	mg/Kg	179	72,8	85,5	63,0
Cromo (Cr)	0,2	mg/Kg	9,20	5,02	6,70	4,06
Hierro (Fe)	0,05	mg/Kg	12 241	7 082	8 895	5 511
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	7 104	3 715	3 160	2 594
Manganeso (Mn)	0,03	mg/Kg	179	94,8	94,7	71,9
Mercurio (Hg)	0,03	mg/Kg	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Níquel (Ni)	0,01	mg/Kg	7,59	3,55	4,36	2,86
Plata (Ag)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/Kg	23,0	8,91	15,5	8,27
Potasio (K)	10	mg/Kg	13 821	7 006	5 440	6 098
Selenio (Se)	0,03	mg/Kg	4,82	1,87	0,938	2,28
Sodio (Na)	2	mg/Kg	1 896	1 046	579	934
Talio (Tl)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadio (V)	0,02	mg/Kg	32,0	18,1	24,1	14,2
Zinc (Zn)	0,02	mg/Kg	152	83,6	44,2	50,7

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
 Calle Teniente Rodríguez N° 1415
 Miraflores – Arequipa
 T. (054) 265572

CALLAO
 Oficina Principal
 Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
 T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”



INFORME DE ENSAYO N° 2-00191/24

Página 5/6

RESULTADOS (Continuación)

Parámetro	Limite de Detección	Unidad	Estación de Muestreo			
			P5-001	P5-002	P5-003	
			Fecha y Hora de Muestreo	2023-11-16 15:00	2023-11-16 15:30	2023-11-16 16:00
Tipo de Muestra	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal	Resultados	Resultados	Resultados
Metales por ICP-MS						
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	4 079	21 312	1 328	
Antimonio (Sb)	0,04	mg/Kg	<0,04	<0,04	<0,04	
Arsénico (As)	0,02	mg/Kg	4,45	20,0	1,79	
Bario (Ba)	0,04	mg/Kg	22,4	109	39,2	
Berilio (Be)	0,01	mg/Kg	<0,01	<0,01	<0,01	
Cadmio (Cd)	0,02	mg/Kg	0,170	<0,02	1,13	
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	1 606	7 989	18 138	
Cobalto (Co)	0,02	mg/Kg	1,84	9,25	1,17	
Cobre (Cu)	0,02	mg/Kg	47,3	208	30,4	
Cromo (Cr)	0,2	mg/Kg	4,56	24,6	1,34	
Hierro (Fe)	0,05	mg/Kg	5 601	29 548	2 757	
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	2 111	10 641	1 868	
Manganeso (Mn)	0,03	mg/Kg	54,6	278	109	
Mercurio (Hg)	0,03	mg/Kg	<0,03	<0,03	<0,03	
Níquel (Ni)	0,01	mg/Kg	2,71	13,2	0,970	
Plata (Ag)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	
Plomo (Pb)	0,02	mg/Kg	6,50	26,1	2,25	
Potasio (K)	10	mg/Kg	2 815	11 930	1 485	
Selenio (Se)	0,03	mg/Kg	1,19	5,94	<0,03	
Sodio (Na)	2	mg/Kg	270	1 780	170	
Talio (Tl)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02	
Vanadio (V)	0,02	mg/Kg	16,0	85,6	5,41	
Zinc (Zn)	0,02	mg/Kg	21,6	110	35,1	

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores – Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

**INFORME DE ENSAYO N° 2-00191/24**

Página 6/6

MÉTODOS

Metales por ICP-MS: EPA Method 6020B (Preparación de muestra: EPA Method 3051A, 2007). 2014. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 22 de julio de 2024

BORRADOR

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores – Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”



INFORME DE ENSAYO N° 2-00192/24

Página 1/3

DATOS DEL CLIENTE

Solicitado por : NINA HUARAHUARA, NURIA VIOLETA
 Domicilio legal : LUIS E. VALCARCEL MZ 44 - LOTE 8 – ILO - MOQUEGUA

DATOS DE LA MUESTRA

Producto declarado ^(A) : SUELO
 Lugar de Muestreo ^(A) : LOMAS
 Fecha de Muestreo ^(A) : 2023-11-16
 Procedencia : Muestra proporcionada por el solicitante
 Cantidad recibida : 01 unidad x muestra
 Presentación y condición de recepción : En Bolsa Ziplock, Cerrada Y Conservada a Temperatura Ambiente
 Identificación y descripción ^(A) : Según se indica
 Fecha de recepción : 2024-07-05
 Fecha de inicio del ensayo : 2024-07-09
 Fecha de término del ensayo : 2024-07-10
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental Arequipa
 Identificado con : EXMA-07844-2024
 Validez del documento : Este documento es válido solo para la muestra descrita

Puntos de muestreo ^(A)	Proyecto ^(A) :		Descripción de la Estación de Monitoreo ^(A)	Observaciones ^(A)
	Coordenadas UTM WGS 84 ^(A)			
	ESTE	NORTE		
P1	277398	8035520	-----	Altitud: 779 m.s.n.m.
P2	277338	8034796	-----	Altitud: 685 m.s.n.m.
P3	277228	8034540	-----	Altitud: 654 m.s.n.m.

^(A) Datos proporcionados por el solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el solicitante pueda afectar la validez de los resultados

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
 Calle Teniente Rodríguez N° 1415
 Miraflores – Arequipa
 T. (054) 265572

CALLAO
 Oficina Principal
 Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
 T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

INFORME DE ENSAYO N° 2-00192/24

Página 2/3

RESULTADOS

Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Estación de Muestreo		
			P1	P2	P3
			Fecha y Hora de Muestreo	Fecha y Hora de Muestreo	Fecha y Hora de Muestreo
Tipo de Muestra	Suelo	Suelo	Suelo		
Resultados	Resultados	Resultados			
Metales por ICP-MS					
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	13 915	12 539	13 078
Antimonio (Sb)	0,04	mg/Kg	<0,04	<0,04	<0,04
Arsénico (As)	0,02	mg/Kg	7,98	9,79	6,88
Bario (Ba)	0,04	mg/Kg	92,8	98,0	66,9
Berilio (Be)	0,01	mg/Kg	0,209	0,206	0,212
Cadmio (Cd)	0,02	mg/Kg	0,224	0,350	0,571
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	4 036	3 205	8 927
Cobalto (Co)	0,02	mg/Kg	16,6	10,8	8,44
Cobre (Cu)	0,02	mg/Kg	149	42,7	68,4
Cromo (Cr)	0,2	mg/Kg	9,31	10,3	15,6
Hierro (Fe)	0,05	mg/Kg	33 689	19 672	14 815
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	7 906	5 327	5 556
Manganeso (Mn)	0,03	mg/Kg	570	394	317
Mercurio (Hg)	0,03	mg/Kg	<0,03	<0,03	<0,03
Níquel (Ni)	0,01	mg/Kg	6,26	5,95	8,16
Plata (Ag)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02
Plomo (Pb)	0,02	mg/Kg	4,18	8,97	9,95
Potasio (K)	10	mg/Kg	3 476	4 042	4 288
Selenio (Se)	0,03	mg/Kg	1,02	<0,03	0,624
Sodio (Na)	2	mg/Kg	518	239	331
Talio (Tl)	0,02	mg/Kg	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadio (V)	0,02	mg/Kg	52,9	52,4	49,2
Zinc (Zn)	0,02	mg/Kg	33,4	27,1	42,5

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
 Calle Teniente Rodríguez N° 1415
 Miraflores – Arequipa
 T. (054) 265572

CALLAO
 Oficina Principal
 Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
 T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

**INFORME DE ENSAYO N° 2-00192/24**

Página 3/3

MÉTODOS

Metales por ICP-MS: EPA Method 6020B (Preparación de muestra: EPA Method 3051A, 2007). 2014. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 22 de julio de 2024

BORRADOR

“Este documento sin firma digital carece de validez”

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores – Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla – Callao
T. (511) 319 9000

info@cerper.com – www.cerper.com

“ EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

Anexo 8: Calculo del riesgo ecológico

$$GC_f^i = \frac{C_D^i}{C_R^i} \quad [5]$$

Según los valores GC se puede clasificar de la siguiente manera:

- $GC < 1$ baja contaminación
- $1 \leq GC < 3$ moderado contaminación.
- $3 \leq GC < 6$ considerable contaminación.
- $GC \geq 6$ muy alta contaminación.

$$RT_R^i = T_R^i \times GC_f^i \quad [6]$$

Según los valores RT se puede clasificar de la siguiente manera:

- $RT < 40$ Bajo riesgo ecológico potencial
- $40 \leq RT < 80$ moderado riesgo ecológico potencial.
- $80 \leq RT < 160$ considerable riesgo ecológico potencial.
- $160 \leq RT < 320$ alto riesgo ecológico potencial.
- $RT \geq 320$ muy alto riesgo ecológico potencial.

$$IR_E = \sum_{i=1}^m RT_R^i \quad [7]$$

Según los valores RE se puede clasificar de la siguiente manera:

- $RE < 150$ Bajo riesgo ecológico
- $150 \leq RE < 300$ moderado riesgo ecológico
- $300 \leq RE < 600$ considerable riesgo ecológico.
- $RE \geq 600$ muy alto riesgo ecológico.