

Biopelículas de microalgas y cianobacterias, pioneras en la colonización y deterioro del monumento de saqsaywaman

Biofilms of microalgae and cyanobacteria, pioneers in the colonization and deterioration of the monument of sSaqsaywaman

Yuri Nilton Cjuno Huaman^{1*} , Rogelio Siella Villanueva²  & Olga Libia Cjuno Huanca³ 

^{1, 2 y 3} Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú

*Autor correspondiente:

Yuri Nilton Cjuno Huaman
yuri_cjhma@yahoo.com

Citar como:

Cjuno Huaman, Y. N.,
Siella Villanueva, R., &
Cjuno Huanca, O. L. .
(2025). Biopelículas de
microalgas
y cianobacterias, pioneras
en la colonización y
deterioro del monumento
de saqsaywaman.
*Ambiente,
Comportamiento y
Sociedad*, 8(1), 1–20.
[https://doi.org/10.51343/
racs.v8i1.1503](https://doi.org/10.51343/racs.v8i1.1503)

Recibido: 21 de noviembre
de 2024

Aceptado: 7 de agosto de
2025



©Los autores. Este artículo es publicado por la revista Ambiente, Comportamiento Sociedad (RACS) de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

Resumen

El Parque Arqueológico Nacional de Saqsaywaman, en Cusco, Perú, enfrenta la problemática del deterioro causado por la colonización de biopelículas de microalgas y cianobacterias. Estos, junto a bacterias y hongos, participan en el deterioro de las estructuras líticas, alterando la cohesión de las partículas superficiales de dichos materiales. Este hecho representa un desafío en la conservación de este monumento de importancia histórica. El objetivo de este estudio fue identificar microalgas y cianobacterias presentes en las biopelículas que colonizan las estructuras líticas. Para ello, se colectaron muestras de biopelículas en 14 puntos, distribuidos en cinco sitios representativos de este complejo arqueológico. Las muestras se cultivaron en medios BG-11 y BBM para obtener especímenes descriptibles, que permitieran su caracterización morfológica mediante microscopía óptica. Los datos obtenidos se compararon con la base de datos disponible en AlgaeBase. Se logró identificar 9 géneros de cianobacterias, 5 géneros de Chlorophyta, 1 género de Charophyta y 1 género de Ochrophyta. Este estudio constituye el primer reporte taxonómico de cianobacterias y microalgas asociadas a biopelículas en las estructuras líticas del monumento de Saqsaywaman. Los hallazgos no solo amplían el conocimiento científico, sino también orientarán intervenciones futuras, mediante diseño de estrategias de conservación y manejo integral del patrimonio cultural.

Palabras clave: *Biopelículas; Microalgas; Cianobacterias; Estructuras líticas; Deterioro; Monumento arqueológico.*

Abstract

This The Saqsaywaman National Archaeological Park in Cusco, Peru, faces the problem of deterioration caused by the colonization of biofilms of microalgae and cyanobacteria. These, together with bacteria and fungi, participate in the deterioration of lithic structures, altering the cohesion of the surface particles of these

materials. This fact represents a challenge in the conservation of this historically important monument. The objective of this study was to identify microalgae and cyanobacteria present in the biofilms that colonize the lithic structures. For this purpose, biofilm samples were collected at 14 points, distributed in five representative sites of this archaeological complex. The samples were cultured in BG-11 and BBM media to obtain describable specimens, allowing their morphological characterization by optical microscopy. The data obtained were compared with the database available in AlgaeBase. We were able to identify 9 genera of cyanobacteria, 5 genera of Chlorophyta, 1 genus of Charophyta and 1 genus of Ochrophyta. This study constitutes the first taxonomic report of cyanobacteria and microalgae associated with biofilms in the lithic structures of the Saqsaywaman monument. The findings not only broaden scientific knowledge, but also will guide future interventions through the design of conservation strategies and integrated management of cultural heritage.

Key words: *Biofilms; Microalgae; Cyanobacteria; Lithic structures; Deterioration; Archaeological monument.*

Introducción

La ciudad de Cusco en Perú, capital del antiguo imperio del Tawantinsuyo (Alibrandi, 2011; Rouse, 1975) alberga una extraordinaria riqueza arquitectónica, una de las más representativas es la Zona Monumental (ZM) del Parque Arqueológico Nacional (PAN) de Saqsaywaman, declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO, 1983. Este monumento representa la máxima expresión de ingeniería y arquitectura del apogeo Inca, construido con motivos rituales durante el reinado de Pachacútec (Cartwright, 2016; Mar & Beltrán-Caballero, 2015). No obstante, la colonización de biopelículas sobre estas estructuras líticas plantea desafíos significativos debido a sus implicancias en el proceso del deterioro (Liu et al., 2020; Kala & Pandey, 2021; Saiz-Jimenez, 2023). La colonización de microorganismos en monumentos históricos es un tema ampliamente estudiado en distintas partes del mundo, lo que evidencia la importancia que desempeñan las biopelículas en la protección y cuidado de monumentos de importancia histórica. Estudios realizados a nivel in vitro (Pinheiro et al., 2019; Trovão et al., 2020) han demostrado la eficiencia de estos microorganismos para colonizar estos sustratos y conllevar a procesos biogeoquímicos y físicos que alteran la estructura del lito y promueven su corrosión (Liu et al., 2020). Las biopelículas son comunidades de microorganismos embebidas en el interior de una matriz extracelular que producen estos mismos (González et al., 2012), esta matriz está compuesta de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que son complejos de polisacáridos y proteínas que forman mucilagos o geles que dan protección y rigidez a estas estructuras, además de acumular agua (Domozych & LoRicco, 2023; Galindo-Alcázar et al., 2018). Las biopelículas pueden constituirse de una o varias de especies de microorganismos (Decho, 2000; Römling, 2023). Estas estructuras presentan diferentes formas

de mucilagos, como cápsulas, vainas y sustancias mucilaginosas las que son producidas por cianobacterias, o mayormente sustanciosas en microalgas eucariotas (Pinna, 2017). Las cianobacterias y microalgas son pioneros en la colonización de los sustratos rocosos en general, estos desempeñan el papel de productores primarios (Scheerer et al., 2009). Las biopelículas atraen y albergan a una gama de microorganismos heterotróficos como bacterias, hongos, líquenes y otros que se benefician de los nutritivos, la humedad y la protección de este microsistema. Estos microecosistemas presenta interacciones microbianas y con el medio externo con ingreso y salida de energía (Raghavan et al., 2023). Las biopelículas pueden aumentar su complejidad a medida que se agregan otros microorganismos, lo que contribuye a la formación de comunidades microbianas más densas, organizadas y funcionalmente integradas que ejercen mayor presión sobre su sustrato (Scheerer et al., 2009). Las EPS son esenciales dentro de la matriz extracelular, estos actúan como una estructura protectora, permite a los microorganismos resistir condiciones adversas de radiación UV, desecación y la escasez de nutrientes. Además, favorece la adhesión a las superficies o sustratos líticos y crea microambientes que facilitan procesos de disolución mineral o formación de compuestos secundarios como oxalatos, los cuales modifican la superficie del sustrato (Miller et al., 2012). Las biopelículas influyen en su entorno provocando degradación y transformación del sustrato rocoso (Raghavan et al., 2023; Gorbushina, 2007). Los filamentos de estos microorganismos penetran las microfisuras del sustrato, estos producen variaciones de volumen por absorción de agua, lo que produce movilización de partículas minerales por tracción mecánica lo que contribuye al deterioro lítico (McNamara et al., 2006). Los procesos redox de oxido-reducción están asociados a la producción de ácidos por estos microorganismos lo que actúan sobre el carbonato de calcio de las rocas calcáreas sensible a la calcita de las calizas, produciéndose corrosión (Wakefield & Jones, 1998). Es de resaltar que las superficies líticas están expuestas a condiciones elevadas de radiación, reducida humedad y mínima presencia de nutrientes, lo que ejerce la adopción de mecanismos de supervivencia de los microorganismos, como son estas estructuras de biopelículas (Pinna, 2021). La capacidad de supervivencia de estos microorganismos está en función a la habilidad para producir EPS, que funcionan como protección frente a la desecación, un tipo de estrés común en hábitat rocosos. (Kala & Pandey, 2021). Las microalgas y las cianobacterias son eficientes productores de biopelícula en los ecosistemas, siendo versátiles para colonizar diferentes estructuras (Nayak et al., 2023). Las características de las biopelículas en superficies líticas varían, durante la temporada de lluvias, suelen presentarse tonalidades verde intenso o brillante, mientras que en época seca adquieren colores anaranjado oscuro, e incluso negro cuando hay presencia de hongos (Pinna, 2017). Estas variaciones cromáticas influyen en la percepción estética de estas estructuras. La biorreceptividad que es la propiedad de una superficie rocosa de ser colonizado por microorganismos, junto a la capacidad de retención o absorción de agua en las rocas, actúan como factores limitantes del crecimiento biológico (Miller et al., 2012). En cambio, el clima local, ubicación geográfica, la contaminación, el diseño arquitectónico en referencia a su ubicación de las estructuras líticas son factores que influyen directamente en la colonización (Gaylarde, 2020; Pinna, 2017). Los microorganismos que colonizan las superficies más hostiles y extremas producen en mayor cantidad EPS para protegerse de las condiciones adversas (Pinna, 2017).

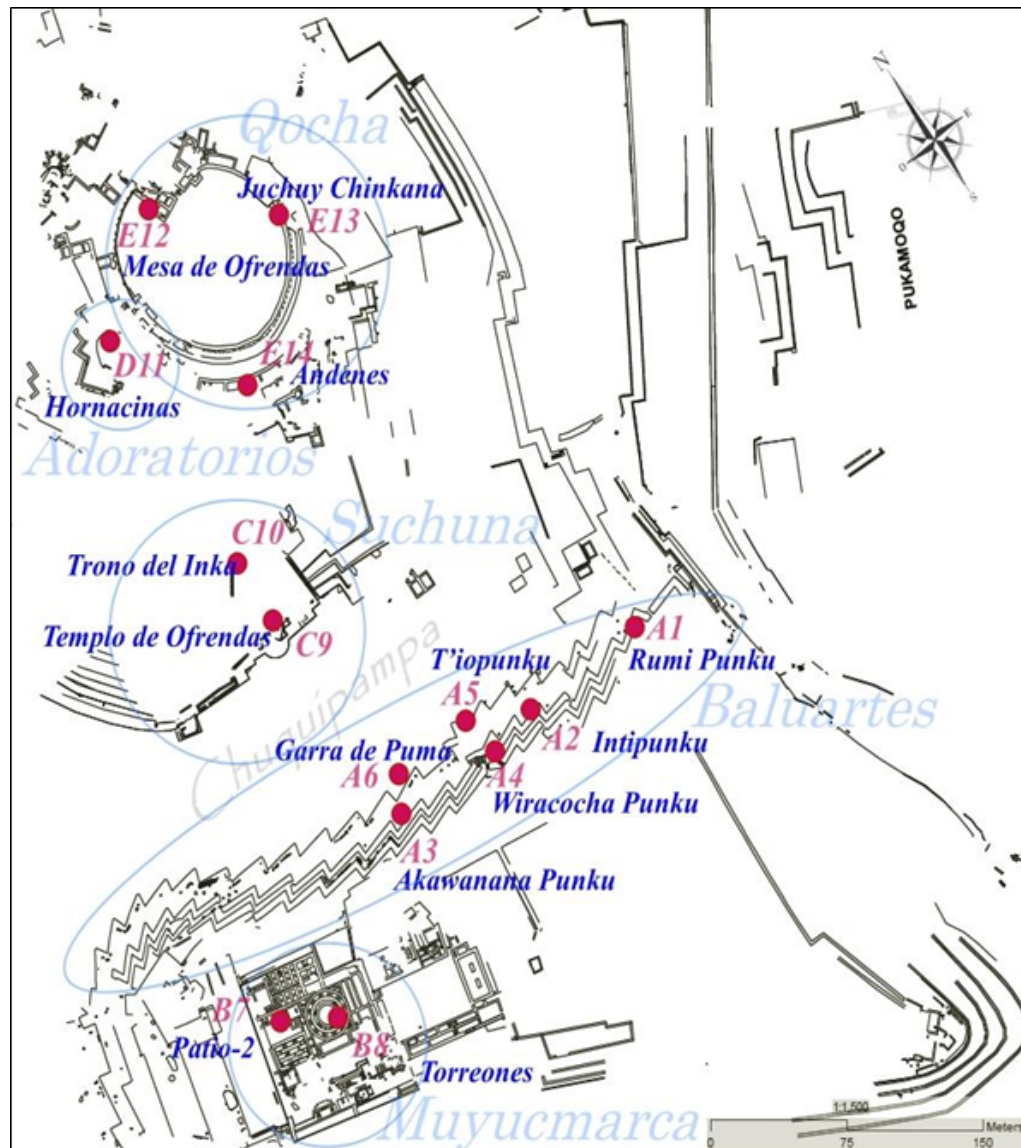
Las microalgas y cianobacterias en la ZM de Saqsaywaman podrían haber desarrollado mecanismos de adaptación para afrontar las condiciones extremas de esta región. Dada la importancia del procesos de deterioro que afecta a las estructuras líticas, resulta fundamental la identificación de microalgas y cianobacterias presentes en las biopelículas que colonizan los materiales líticos de la Zona Monumental del Parque Arqueológico Nacional de Saqsaywaman. Estos microorganismos desempeñan un papel clave en la alteración biogeoquímica de los materiales líticos, comprometiendo su integridad física y estética. En este contexto, el objetivo principal del presente estudio fue identificar y caracterizar morfológicamente los géneros de microalgas y cianobacterias presentes en dichas biopelículas, con el fin de contribuir al conocimiento científico que sirva de base para el diseño de estrategias de conservación preventiva y restauración del patrimonio cultural.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

La Zona Monumental (ZM) del Parque Arqueológico Nacional (PAN) de Saqsaywaman, está ubicado en la ciudad de Cusco, Perú a una altitud de 3579 m, este monumento está construido en su mayoría en material pétreo del tipo caliza, aunque también incluye en menor proporción andesita y diorita (García Calderón, 2018; Mar & Beltrán-Caballero, 2015; Monteverde, 2011).

La ZM de Saqsawaman comprende diferentes sitios arqueológicos que varían en dimensión, ubicación (Monteverde, 2011) y tipo de roca (Tabla 1). Para este estudio se seleccionaron los sitios arqueológicos más representativos: Baluartes, Muyucmarca, Suchuna, Adoratorios y Qocha. Cada uno de estos sitios se constituye de lugares o puntos con denominaciones específicas (Figura 1), el número de puntos varía según la extensión de cada sitio arqueológico.

Figura 1*Puntos de muestreo en sitios arqueológicos de la ZM del PAN de Saqsaywaman**Fuente:* DDC-Cusco, 2022***Obtención de Muestras***

Los sitios arqueológicos: Baluartes, Muyucmarca, Suchuna, Adoratorios y Qocha, fueron codificados con las letras A, B, C, D y E respectivamente. Dentro de cada sitio se designó puntos específicos para obtención de muestras codificados con números 1,2,3...14 (Tabla 1). Estos últimos corresponden a estructuras líticas seleccionadas. Como criterio de selección para este estudio se consideró estructuras líticas deterioradas con presencia de biopelículas (ElBaghdady et al., 2019). Se delimitó 25 cm² de la superficie lítica seleccionada utilizando plantillas graduadas (Abdulla, 2009), se recogieron biopelículas junto a pequeños fragmentos de roca deteriorada por métodos no invasivos, empleando pinzas y bisturíes estériles similar a

Ibarra-Gallardo & Novelo (2018), las muestras se guardaron cuidadosamente en placas Petri estériles rotuladas, y se conservaron en cadena de frío, para su transporte al laboratorio de biología celular de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco para su procesamiento. En cada punto de muestreo se realizó una descripción de las biopelículas in situ previa a su colecta y se tomó nota de las coordenadas de geolocalización. Se colectó mayor número de muestras en sitios arqueológicos de mayor dimensión (Tabla 1).

Tabla 1

Codificación de muestra por sitio arqueológico en la ZM de Saqsaywaman

(Código) Sitio	Área (m²)	(Código) punto de muestreo	Muestra
(A) Baluartes	15 672	(1) Rumi Punku,	A1, A2, A3, A4, A5, A6
		(2) Intipunku, (3) Akawanana Punku,	
		(4) Wiracocha Punku,	
		(5) T'iopunku, (6) Garra de Puma	
(B) Muyucmarca	4 292	(7) Patio-2,	B7, B8
(C) Suchuna	4 317	(8) Torreones	C9, C10
		(9) Templo de Ofrendas,	
(D) Adoratorios	500	(10) Trono del Inka	D11
		(11) Hornacinas	
		(12) Mesa de Ofrendas,	
(E) Qocha	8 432	(13) Juchuy Chinkana,	E12, E13, E14
		(14) Andenes	
Total de muestras			14

Nota. Las nominaciones arqueológicos se tomaron de García Calderón (2018), García Calderón (2000) y Mar & Beltrán-Caballero (2015), las dimensiones de áreas se obtuvieron de Google Earth (2023).

Aislamiento e Identificación de Microalgas y Cianobacterias

Las muestras colectadas fueron trituradas en un mortero y maja estéril hasta alcanzar la consistencia pulverizada, se pesó 1 g de muestra y se disolvió en 10 mL de solución fisiológica (0.89% NaCl) para su hidratación por 48 horas (Abdulla, 2009; Galindo-Alcázar et al., 2018). Posteriormente, se transfirió 1 mL de la solución hidratada a matraces conteniendo 50 mL de medio de cultivo mineral BG-11 (Rippka et al., 1979) para cianobacterias y BBM (Bischoff & Bold, 1963) para microalgas, los matraces se colocaron en una incubadora de agitación orbital (Lab. Companion SI 300R) a 110 rpm, 22°C, fotoperiodo de 16:8 horas (luz: oscuridad)

e intensidad de luz fotosintéticamente activa (PAR) de $9,33 \pm 0,35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, por 30 días (Prieto et al., 2020). Observado el crecimiento de biomasa en los matraces se realizaron cultivos repetitivos en placas y tubos con medios de cultivo BG-11 y BBM con agar y sin agar respectivamente (Galindo-Alcázar et al., 2018). Para la Identificación se realizó montajes húmedos de los cultivos para su observación al microscopio, los especímenes identificados se contrastaron con los de la base de datos AlgaeBase (<https://www.algaebase.org>).

Resultados

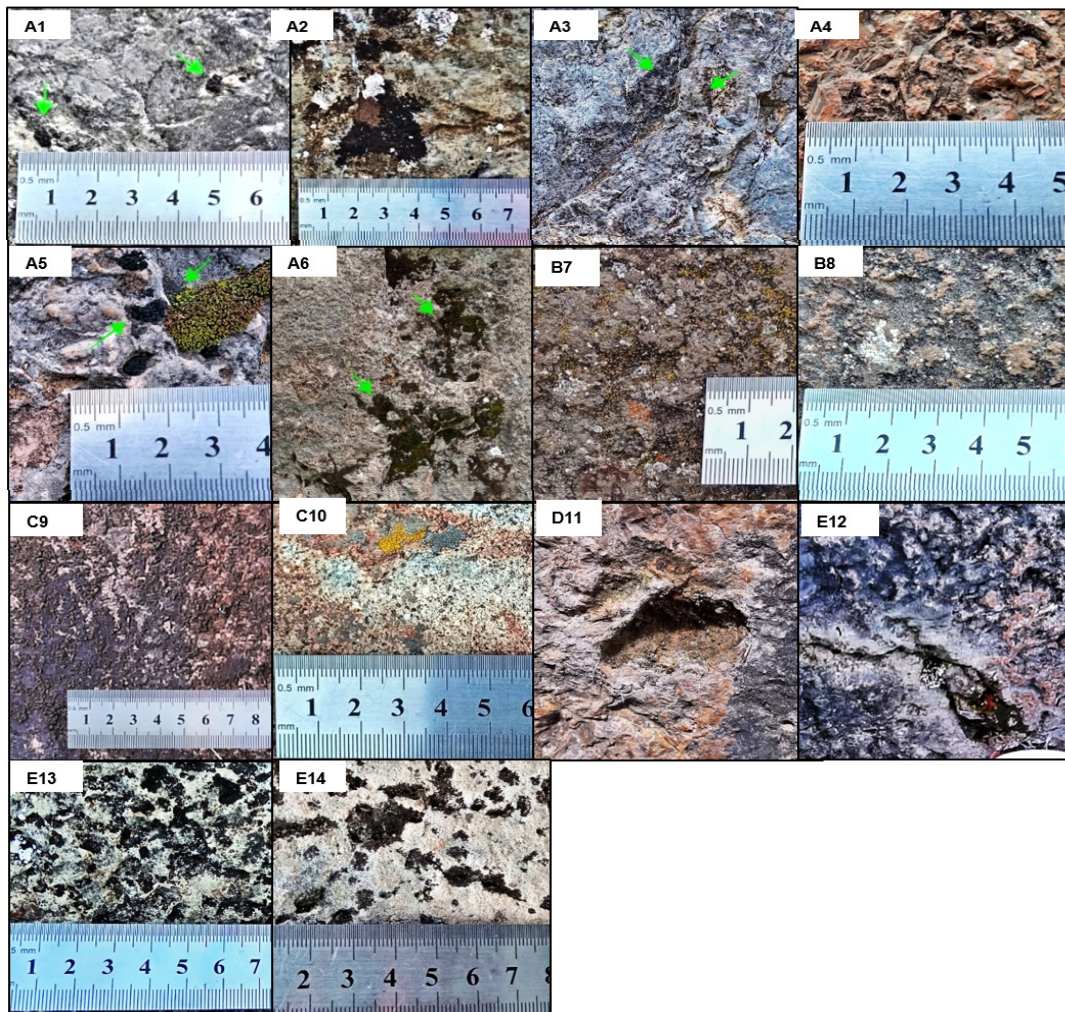
Materiales Líticos de la ZM de Saqsaywaman

Los sitios arqueológicos, Baluartes, Suchuna, Adoratorios y Qocha contienen 11 puntos de muestreo en materiales líticos (ML) de tipo caliza. En el sitio Muyucmarca, se registraron 2 puntos de muestreo en andesita. Únicamente el punto Trono del Inca, ubicado en el sitio Suchuna, corresponde a roca diorita. Los ML de la ZM de Saqsaywaman dependiendo del tipo de roca y ubicación a una altura con referencia al nivel del suelo (HNS) presentan diferentes formas y grado de colonización por acción de la colonización de biopelículas (Figura 2). Las biopelículas ubicadas a una altura mayor a 1.10 m son color negro moteado, esta característica es más notorio en las calizas, y están adheridas resistentemente en la caliza y andesita. En algunos casos las biopelículas presentan puntuaciones blanquecinas-anaranjadas que corresponden a musgos y líquenes. También se aprecia biopelículas coriáceas que se desprenden con facilidad a modo de capas. Las biopelículas ubicadas a menos de 0,60 m (próximas al suelo) están compuestos por restos de tierra, son negruzcos y presentan musgos (Tabla 2) algunos se desprenden con facilidad.

Tabla 2*Ubicación de los puntos de muestreo y descripción de muestra in situ*

CM	Punto de muestreo	Lat. (S)	Long. (W)	HNS (m)	HR (%)	ML	Biopelículas
A1	Rumi Punku	13°30'30,802"	71°58'49,973"	1,50	46	C	Negro-coriáceo
A2	Intipunku	13°30'30,906"	71°58'52,478"	2,00	46	C	Negro-esponjoso
A3	Akawanana Punku	13°30'31,115"	71°58'54,574"	0,60	51	C	Negro-moteado
A4	Wiracocha Punku	13°30'31,025"	71°58'53,213"	0,30	54	C	Negro-moteado
A5	T'ioipunku	13°30'30,211"	71°58'53,407"	1,70	62	C	Negro-coriáceo
A6	Garra de Puma	13°30'31,025"	71°58'53,213"	1,90	55	C	Negro-coriáceo
B7	Patio-2	13°30'31,702"	71°58'59,351"	0,30	54	A	anaranjado negro-coriáceo
B8	Torreones	13°30'32,447"	71°58'58,339"	1,20	54	A	Negro-Moteado
C9	Templo de Ofrendas	13°30'26,878"	71°58'55,07"	1,50	55	C	Negro-coriáceo
C10	Trono del Inka	13° 30'26,01"	71°58'55,445"	*	45	D	Anaranjado, coriáceo
D11	Hornacinas	13°30'21,47"	71°58'55,085"	0,40	54	C	anaranjado, coriáceo
E12	Mesa de Ofrendas	13°30'19,901"	71°58'52,957"	*	40	C	Negro, esponjoso
E13	Juchuy Chinkana	13°30'21,582"	71°58'51,128"	1,70	40	C	Negro-moteado
E14	Andenes	13°30'23,432"	71°58'53,364"	1,10	42	C	Negro-moteado

Nota. CM: Código de muestra, HNS: Altura a nivel del Suelo, HR: Humedad relativa, ML: material lítico, C: Caliza, A: Andesita, D: Diorita (*) Afloración rocosa.

Figura 2*Grados de colonización de biopelículas en tipos rocosos in situ*

Nota. A1, A2, A3, A4, A5, A6, C9, D11, E12, E13 y E14 corresponden a líticos del tipo caliza. B7, B8 a andesita y C10 a diorita..

Identificación de Microalgas y Cianobacterias

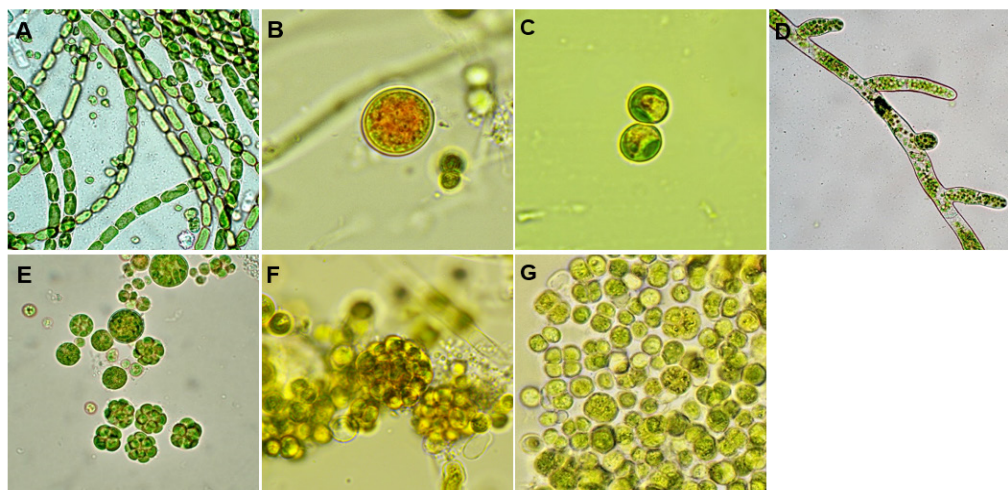
Se identificó, 16 géneros entre microalgas y cianobacterias en biopelículas de material lítico de la ZM de Saqsaywaman, los géneros identificados fueron: Klebsormidium, Botrydiopsis, Chlorella, Cladophora, Chlorococcum, Coelastrum, Chlorosarcinopsis, Aphanocapsa, Calothrix, Cylindrospermum, Leptolyngbya, Nostoc, Phormidium, Synechocystis, Anabaena y Scytonema (Tabla 3).

Tabla 3

Taxonomía de microalgas y cianobacterias identificadas

Filo	%	Nº	Clase	Orden	Familia	Género
Charophyta	6.25	1	Klebsormidiophyceae	Klebsormidiales	Klebsormidiaceae	Klebsormidium
Ochrophyta	6.25	2	Xanthophyceae	Mischococcales	Botrydiopsidaceae	Botrydiopsis
		3	Trebouxiophyceae	Chlorellales	Chlorellaceae	Chlorella
		4	Ulvophyceae	Cladophorales	Cladophoraceae	Cladophora
Chlorophyta	31.25	5	Trebouxiophyceae	Chlorellales	Chlorococcaceae	Chlorococcum
		6	Chlorophyceae	Sphaeropleales	Scenedesmaceae	Coelastrum
		7	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Chlorosarcinaceae	Chlorosarcinopsis
		8	Cyanophyceae	Synechococcales	Merismopediaceae	Aphanocapsa
		9	Cyanophyceae	Nostocales	Rivulariaceae	Calothrix
		10	Cyanophyceae	Nostocales	Nostocaceae	Cylindrospermum
Cyanobacteria	56.25	11	Cyanophyceae	Synechococcales	Leptolyngbyaceae	Leptolyngbya
		12	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	Lyngbya
		13	Cyanophyceae	Nostocales	Nostocaceae	Nostoc
		14	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Microcoleaceae	Phormidium
		15	Cyanophyceae	Synechococcales	Merismopediaceae	Synechocystis
		16	Cyanophyceae	Nostocales	Nostocaceae	Anabaena

Figura 3

Microalgas identificadas

Nota. A: *Klebsormidium*, B: *Botrydiopsis*, C: *Chlorella*, E: *Chlorococcum*, F: *Coelastrum*, a 1000x, D: *Cladophora* y G: *Chlorosarcinopsis* a 400x.

Tabla 4

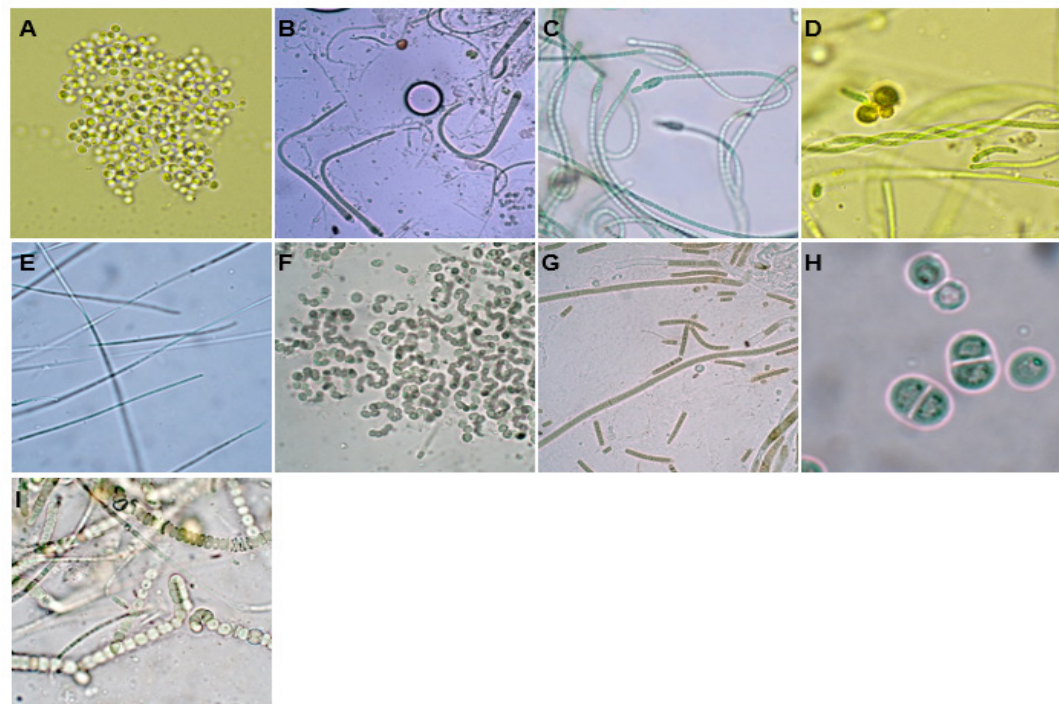
Características morfológicas de microalgas

Género	Morfología /célula	No ramificado / ramificado	Cloroplasto	Pirenoide
Klebsormidium	Filamentosa / Cilíndrica	p. / n.p.	Parietal	p.
Botrydiopsis	Unicelular / Esférica	n.p. / n.p.	Parietal	n.d.
Chlorella	Unicelular Esférica	n.p. / n.p.	Parietal	p.
Cladophora	Filamentosa / Cilíndrica	n.p. / p.	Reticular	p.
Chlorococcum	Unicelular /Esférica	n.p. / n.p.	Copa	p.
Coelastrum	Unicelular / Esféricas	n.p. / n.p.	n.d.	n.d.
Chlorosarcinopsis	Tétradas / Esféricas	n.p. / n.p.	Parietal	p.

Nota: n.p.: no presente; n.d.: no diferenciado; p. : presente

Figura 4

Cianobacterias identificadas



Nota. A: *Aphanocapsa*, B: *Calothrix*, C: *Cylindrospermum*, D: *Leptolyngbya*, E: *Lyngbya*, F: *Nostoc*, H: *Synechocystis*, I: *Anabaena*. (A, C, D, E, G, I a 1000x; B, F, H a 400x)

Tabla 5*Características morfológicas de cianobacterias*

Género	Morfología /célular	Vaina	Heterocisto
<i>Aphanocapsa</i>	Cenobiales /Esférica	n.p.	n.d.
<i>Calothrix</i>	Filamentosa/Ovoides	p.	Hemisféricos, basales
<i>Cylindrospermum</i>	Filamentosa/Cilíndricas	n.p.	Hemisféricos, basales
<i>Leptolyngbya</i>	Filamentosa/Cilíndricas	p.	n.d.
<i>Lyngbya</i>	Filamentosa/n.d.	p.	n.d.
<i>Nostoc</i>	Filamentosa/Ovoides	p.	Intercalares
<i>Phormidium</i>	Filamentosa/Cilíndrica	p.	n.d.
<i>Synechocystis</i>	unicelular/Esféricos	n.p.	n.d.
<i>Anabaena</i>	Filamentosa/Esféricos	n.p.	Intercalares

Tabla 6

Microalgas y cianobacterias en diferentes puntos y tipos de roca de la ZM
Saqsaywaman

Sitios arqueológicos	Baluartes						Muyuqmarka	Suchuna		Adoratorios	Qocha	
Puntos de muestreo	Rumi Punku	Intipunku	Akawanana Punku	Wiracocha Punku	T'iopunku	Garra de Puma	Patio-2 Torreones	Templo de Ofrendas	Trono del Inka	Hornacinas	Mesa de Ofrendas Juchuy Chinkana	Andenes Frecuencia (%)
Klebsormidium			•		•	•	•	•	•	•		57.14
Botrydiopsis										•	•	14.29
Chlorella	•	•	•	•	•		•	•	•		•	85.71
Cladophora										•	•	14.29
Chlorococcum	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	92.86
Coelastrum			•	•			•			•	•	35.71
Chlorosarcinopsis											•	14.29
Aphanocapsa	•			•	•	•		•	•	•	•	57.14
Calothrix			•								•	14.29
Cylindrospermum								•				14.29
Leptolyngbya		•					•	•		•	•	35.71
Lyngbya			•				•				•	21.43
Nostoc			•	•			•	•	•		•	57.14
Phormidium		•					•		•	•	•	42.86
Synechocystis		•			•				•		•	28.57
Anabaena						•		•				14.29
ML	C						A	C	D	C		

Nota. La frecuencia corresponde al número de hallazgos de un espécimen en el total de muestras, C: caliza, A: andesita, D: Diorita.

Discusión

De los 16 géneros identificados, los pertenecientes a los filo Charophyta y Ochrophyta representan cada uno el 6.25%, mientras que Chlorophyta constituye el 31.25% y las cianobacterias el 56.25%. Estos hallazgos indican que las cianobacterias conforman la mayor proporción de los géneros identificados, similarmente a Galindo-Alcázar et al. (2018) en estudios de biopelículas de monumentos en Malinalco (México) que reporta esta similitud, este autor estudia biopelículas en rocas andesitas (ígneas) coincidiendo con los géneros Klebsormidium, Leptolyngbya, Chlorella y Lyngbya los que se identificó en el sitio Muyuqmarka de la ZM de Sacsayhuama. Por otro lado, Bolívar-Galiano et al. (2020) en estudios de microalgas en las fuentes de la Alhambra y el Generalife en Granada (España) también halla similares resultados. La preferencia de estos microorganismos por un tipo de roca estaría relacionada con la petrología de la superficie rocosa y características fisicoquímicas (Miller et al., 2009). Los materiales líticos calcáreos en la ZM de Sacsaywaman representan el mayor componente de este monumento, estos materiales tienen superficies deterioradas con presencia de agujeros, fracturas donde se almacenan humedad y materia orgánica que favorecería la presencia de estos organismos (Miller et al., 2009). En la Tabla 3 se observa que la caliza es principal reservorio de algas verdes y cianobacterias, estos microorganismos podrían obtener las cuotas mínimas necesarias de salinidad de la caliza, el CaCO_3 es sensible a ácidos producidos por bacterias, hongos y algas, liberándose iones fundamentales en procesos bioquímicos (Jones & Bennett, 2017). Investigaciones realizadas por Mehta & Shah (2021) en Champaner-Pavagadh (India) y Pinheiro et al. (2019) en monumentos de Coímbra (Portugal) hallaron diversidad de microorganismos en estructuras de caliza, estos autores coinciden con los géneros de Chlorella, Klebsormidium, Leptolyngbya, Nostoc y Phormidium, del presente estudio. Estos hallazgos respaldan la afinidad de estos microorganismos fototróficos por las rocas calcáreas. Un punto importante en la proliferación de estos microorganismos se debería a la producción de mucilagos y la característica endolítica de algunos microorganismos que les permitiría resistir periodos de prolongada sequedad y protección de acción ambiental. Además, los factores como el pH de la caliza favorecerían el proceso fotosintético (Wakefield & Jones, 1998). En cambio, los sustratos líticos de rocas ígneas como la diorita y andesita componentes también de este monumento, albergan mínimamente estos microorganismos, estas rocas son duras, menos porosas, lisas y con menos nutrientes lo que podría ser la causa de esta preferencia por las rocas calcares (Jones & Bennett, 2017). Los microorganismos *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Klebsormidium*, *Aphanocapsa*, tienen la mayor frecuencia en el total y sobrepasan el 50% en el total de muestras estos serían cosmopolitas y pioneros en la colonización del monumento de Sacsaywaman, sus biopelículas tienen formas coriáceas oscuras, carotenizadas y verduzcas (Figura 2). Para Ortega-Calvo et al. (1991) las algas verdes y principalmente las cianobacterias son colonizadores iniciales de rocas y monumentos pétreos. Además, estos estarían implicados en procesos de deterioro de monumentos históricos (Crispim et al., 2004; Galindo-Alcázar et al., 2018; Jurado et al., 2022). Otro género de presencia importante es *Klebsormidium* esta alga tiene capacidad de supervivencia produce mucilagos que le permite resistir periodos secos y soportar altos niveles

de UV (Mikhailyuk et al., 2015; Uher et al., 2005). Según Varma & Buscot (2005) las algas filamentosas proporcionarían una acción cohesiva contra las partículas del lito por acción de sus vainas sobre el material lítico. Un aspecto importante en procesos de deterioro es la condición endolítica como *Phormidium* y *Synechocystis* que según Miller et al. (2009) y McNamara et al. (2006) ocupan las fisuras y poros del material lítico, estos por acción del agua se hinchan produciendo tracción sobre las partículas minerales, estos microorganismos serían los mayores deterioradores de monumentos pétreos.

Limitaciones del Estudio y Aportes para la Conservación del Patrimonio Cultural

Una de las limitaciones del presente estudio reside en la identificación taxonómica, la que se basa en análisis fenotípicos o claves taxonómicas. Este enfoque, aunque tiene una alta aproximación, podría inducir a errores en la identificación de microorganismos, dada las limitaciones para la obtención de microcultivos axénicos además de la variabilidad morfológica, inducida por las condiciones aplicadas en laboratorio (Watts, 2001). En este estudio gran parte de los microorganismos identificados requirieron acondicionamiento para obtener especímenes diferenciales taxonómicamente, este proceso puede llegar 12 meses o más para su adaptación y estabilidad (Watts, 2001; Vázquez-Nion et al., 2018). Por otro lado, la investigación se ajusta a un periodo de muestreo limitado, (temporada de lluvias) sin considerar la variabilidad estacional, aspecto que puede influir significativamente en la diversidad como tal en los procesos de deterioro (Caneva et al., 2008). Aunque no se ha evaluado la significancia de las potencialidades del metabolismo microorganismos en la acción degradativa de los materiales líticos, se puede inferir que esta acción nociva es comparable al desarrollado en otros trabajos de investigación (Cirone et al., 2023). Socialmente, esta investigación fortalece la importancia de la acción biológica que compromete la integridad del patrimonio cultural, lo cual es relevante para involucrar a la sociedad en acciones de protección para valorar nuestro legado histórico. Desde el punto de vista práctico, la identificación de estos microorganismos fototróficos que formar biopelículas en litos de la ZM del Parque Arqueológico Nacional de Saqsaywaman contribuye a la necesidad de implementar programas de monitoreo microbiológico periódico como parte del diseño de estrategias de conservación que integren el control biológico no invasivo de microorganismos litobiontes. El uso de compuestos antimicrobianos o técnicas de bioconservación, un enfoque que puede llevar a diseñar ensayos en condiciones controladas de laboratorio, para evaluar la efectividad de métodos (Ortega-Morales & Gaylarde, 2021) es otra alternativa. Estas estrategias se deben incorporar dentro de un enfoque multidisciplinario que articule conocimientos arqueológicos, biológicos y de gestión del patrimonio cultural para obtener resultados fehacientes. Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la caracterización molecular de estas comunidades microbianas, así como en el análisis funcional del metabolismo de las biopelículas sobre sustratos líticos de composición calcárea. Del mismo modo, resulta pertinente evaluar el impacto potencial de estas comunidades bajo condiciones de cambio climático y contaminación ambiental, con el objetivo de comprender la dinámica y los efectos en contextos de vulnerabilidad del patrimonio histórico.

Conclusiones

Las microalgas y cianobacterias halladas en las biopelículas que colonizan los materiales líticos en la Zona Monumental del Parque Arqueológico Nacional de Saqsaywaman están constituidos mayormente por cianobacterias, se observa notable diversidad de este grupo. Aunque su abundancia es menor en comparación con las microalgas, morfológicamente predominan las formas filamentosas, con excepción del género *Synechocystis* que es cocoide. El género más frecuente registrado en los sitios arqueológicos entre las cianobacterias fue *Nostoc*. Por el contrario, las microalgas, si bien presentan baja diversidad taxonómica, presentan mayor abundancia. Entre los géneros más frecuentes se identificaron a *Klebsormidium*, *Chlorella*, *Chlorococcum* y *Chlorosarcinopsis*. Asimismo, los materiales líticos junto a las condiciones ambientales juegan un papel fundamental en la colonización y proliferación de estas comunidades. Los materiales líticos presentan características propias de su deterioro natural, la caliza componente importante de este monumento histórico, posee condiciones apropiadas para la colonización de microorganismos, a diferencia de la andesita y diorita, que mostraron menor presencia de estos microorganismos.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Programa de Fortalecimiento “Yachayninchis Wiñarinanpaq” del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Resolución Nro. R-0130-2021 Contrato N°007-2021-UNSAAC-Pregrado. Asimismo, se agradece a la Dirección Desconcentrada de Cultura del Cusco (DDC-Cusco) por las facilidades brindadas en el acceso a la Zona Monumental de Saqsaywaman, lo que ha sido fundamental para el desarrollo de este estudio.

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores declaran con respecto al documento, no tener conflicto de intereses financieros ni personales que puedan influir inapropiadamente en el desarrollo de este artículo.

Referencias

- Abdulla, H. (2009). Bioweathering and biotransformation of granitic rock minerals by actinomycetes. *Microbial Ecology*, 58(4), 753–761. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9549-1>
- Alibrandi, M. (2011). Pre-Incan Archeology of Peru: Paleo-Indians in the Paleo-Climate. *The Geography Teacher*, 8(2), 53–71. <https://doi.org/10.1080/19338341.2011.571137>
- Bischoff, H. W., & Bold, H. C. (1963). *Phycological studies IV. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species* (University of Texas Publication No. 6318, p. 95). University of Texas.
- Bolívar-Galiano, F., Abad-Ruiz, C., Sánchez-Castillo, P., Toscano, M., & Romero-Noguera, J. (2020). Frequent Microalgae in the Fountains of the Alhambra and Generalife: Identification and Creation of a Culture Collection. *Applied Sciences*, 10(18), 6603. <https://doi.org/10.3390/app10186603>
- Caneva, G., Nugari, M. P., & Salvadori, O. (2008). Control of biodeterioration and bioremediation techniques. En G. Caneva, M. P. Nugari, & O. Salvadori (Eds.), *Plant biology for cultural heritage: Biodeterioration and conservation* (pp. 309–345). Getty Conservation Institute.
- Cartwright, M. (2016, July 20). Saqsaywaman. World History Encyclopedia. Retrieved from <https://www.worldhistory.org/Saqsaywaman/>
- Cirone, M., Figoli, A., Galiano, F., La Russa, M. F., Macchia, A., Mancuso, R., Ricca, M., Rovella, N., Taverniti, M., & Ruffolo, S. A. (2023). Innovative Methodologies for the Conservation of Cultural Heritage against Biodeterioration: A Review. *Coatings*, 13(12), 1986 <https://doi.org/10.3390/coatings13121986>
- Crispim, C. A., Gaylarde, C. C., & Gaylarde, P. M. (2004). Biofilms on church walls in Porto Alegre, RS, Brazil, with special attention to cyanobacteria. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54(2–3), 121–124. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2004.03.001>
- Decho, A. W. (2000). Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial biofilms. In R. E. Riding & S. M. Awramik (Eds.), *Microbial sediments* (pp. 9–15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04036-2_2
- Domozych, D. S., & LoRizzo, J. G. (2023). The extracellular matrix of green algae. *Plant Physiology*, 194(1), 15–32. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad384>
- ElBaghdady, K. Z., Tolba, S. T., & Houssien, S. S. (2019). Biogenic deterioration of Egyptian limestone monuments: Treatment and conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 38, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.005>
- Galindo-Alcázar, O., Medina-Jaritz, N. B., Garduño-Solórzano, G., & Olvera-Ramírez, R. (2018). Cianobacterias y microalgas de biopelículas superficiales de la zona arqueológica de Malinalco, México. *Polibotánica*, (45), 131–146. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.10>
- García Calderón, E. (2018). *Saqsaywamán: Revalorización del sitio prehispánico, a través de las investigaciones arqueológicas y etnohistóricas en el sector de “Muyuqmarka”* [Tesis de licenciatura, Universidad Complutense de Madrid]. Universidad Complutense de Madrid. <https://produccioncientifica.ucm.es/documentos/5d3664cd299952263c4d318b?lang=fr>

- García Calderón, E. (2000). *Informe anual de investigación arqueológica Saqsaywaman-2000: Suchuna Qocha, Suchuna Andenes*. Cusco INC.
- Gaylarde, C. C. (2020). Influence of environment on microbial colonization of historic stone buildings with emphasis on cyanobacteria. *Heritage*, 3(4), 1469–1482. <https://doi.org/10.3390/heritage3040081>
- González, F. J. A., Muro, A. L., & Barrera, D. A. L. G. (2012). *Biopelículas multiespecie: Asociarse para vivir: Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (54), 49–56. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4032052>
- Gorbushina, A. A. (2007). Life on the rocks. *Environmental Microbiology*, 9(7), 1613–1631. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01301.x>
- Ibarra-Gallardo, Carlos Eduardo, & Novelo, Eberto. (2018). Algas y cianoprocariontes epilíticos de la Zona Arqueológica de Yaxchilán, Chiapas, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 89(3), 590-603. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.2290>
- Jones, A. A., & Bennett, P. C. (2017). Mineral Ecology: Surface Specific Colonization and Geochemical Drivers of Biofilm Accumulation, Composition, and Phylogeny. *Frontiers in microbiology*, 8, 491. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00491>
- Jurado, V., Hernandez-Marine, M., Rogerio-Candelera, M. A., Ruano, F., Aguilar, C., Aguilar, J., & Saiz-Jimenez, C. (2022). Cleaning of phototrophic biofilms in a show cave: The case of Tesoro Cave, Spain. *Applied Sciences*, 12(15), 7357. <https://doi.org/10.3390/app12157357>
- Kala, R., & Pandey, V. D. (2021). Biocolonization and biodeterioration of monuments by cyanobacteria. *Plant Archives*, 21(1), 1531–1536. <https://doi.org/10.51470/plantarchives.2021.v21.no1.208>
- Liu, X., Koestler, R. J., Warscheid, T., Brimblecombe, P., Sato, K., McNamara, C. J., & Mitchell, R. (2020). Microbial deterioration and sustainable conservation of stone monuments and buildings. *Nature Sustainability*, 3(12), 991–1004. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00602-5>
- Mar R. y Beltrán-Caballero J. A. (2015). El conjunto arqueológico de Saqsaywaman (Cusco): una aproximación a su arquitectura. *Revista Española de Antropología Americana*, 44(1), 9-38. https://doi.org/10.5209/rev_REAA.2014.v44.n1.47633
- McNamara, C. J., Perry, T. D., 4th, Bearce, K. A., Hernandez-Duque, G., & Mitchell, R. (2006). Epilithic and endolithic bacterial communities in limestone from a Maya archaeological site. *Microbial ecology*, 51(1), 51–64. <https://doi.org/10.1007/s00248-005-0200-5>
- Mehta, D., & Shah, D. (2021). Cyanobacteria and microalgae growing on monuments of UNESCO World Heritage site Champaner Pavagadh, India: Biofilms and their exopolysaccharide composition. *Archives of Microbiology*, 203(6), 3425–3433. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02334-2>
- Mikhailyuk, T., Glaser, K., Holzinger, A., & Karsten, U. (2015). Biodiversity of Klebsormidium (streptophyta) from alpine biological soil crusts (alps, tyrol, Austria, and Italy). *Journal of phycology*, 51(4), 750–767. <https://doi.org/10.1111/jpy.12316>

- Miller, A. Z., Dionísio, A., Laiz, L., Macedo, M. F., & Saiz-Jimenez, C. (2009). The influence of inherent properties of building limestones on their bioreceptivity to phototrophic microorganisms. *Annals of Microbiology*. Springer Science and Business Media LLC. <http://doi.org/10.1007/bf03179212>
- Miller, A. Z., Sanmartín, P., Pereira-Pardo, L., Dionísio, A., Saiz-Jimenez, C., Macedo, M. F., & Prieto, B. (2012). Bioreceptivity of building stones: a review. *The Science of the total environment*, 426, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.026>
- Monteverde Sotil, R. (2011). Esculturas zoomorfas talladas en afloramientos rocosos dentro del Parque Arqueológico de Sacsayhuamán-Cuzco. *Revista Haucaypata: Investigaciones Arqueológicas del Tahuantinsuyo*, (5), 6–31.
- Nayak, R., Pradhan, B., Patra, S., Bhuyan, P. P., Behera, C., Parida, S., Behera, A. K., Mandal, A. K., & Jena, M. (2023). Microalgal biofilm and their prospective application for wastewater treatment and biofuel production. En S. Das & N. A. Kungwani (Eds.), *Understanding microbial biofilms* (pp. 147–164). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99977-9.00021-1>
- Ortega-Calvo, J. J., Hernandez-Marine, M., & Saiz-Jimenez, C. (1991). Biodeterioration of building materials by cyanobacteria and algae. *International Biodeterioration*, 28(1–4), 165–185. [https://doi.org/10.1016/0265-3036\(91\)90041-O](https://doi.org/10.1016/0265-3036(91)90041-O)
- Ortega-Morales, B. O., & Gaylarde, C. C. (2021). Bioconservation of historic stone buildings An updated review. *Applied Sciences*, 11(12), 5695. <https://doi.org/10.3390/app11125695>
- Pinheiro, A. C., Mesquita, N., Trovão, J., Soares, F., Tiago, I., Coelho, C., Paiva de Carvalho, H., Gil, F., Catarino, L., Piñar, G., & Portugal, A. (2019). Limestone biodeterioration: A review on the Portuguese cultural heritage scenario. *Journal of Cultural Heritage*, 36, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.008>
- Pinna, D. (2017). *Coping with biological growth on stone heritage objects: Methods, products, applications, and perspectives*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315365510>
- Pinna, D. (2021). Microbial growth and its effects on inorganic heritage materials. En E. Joseph (Ed.), *Microorganisms in the deterioration and preservation of cultural heritage* (pp. 3–35). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69411-1_1
- Prieto, B., Vázquez-Nion, D., Fuentes, E., & Durán-Román, A. G. (2020). Response of subaerial biofilms growing on stone-built cultural heritage to changing water regime and CO₂ conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 148, 104882. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104882>
- Raghavan, P. S., Potnis, A. A., & Rajaram, H. (2023). Cyanobacterial biofilms: Perspectives from origin to applications. En S. Das & N. A. Kungwani (Eds.), *Understanding microbial biofilms* (pp. 23–39). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99977-9.00041-7>
- Rippka, R., Deruelles, J., Waterbury, J. B., Herdman, M., & Stanier, R. Y. (1979). Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *Microbiology*, 111(1), 1–61. <https://doi.org/10.1099/00221287-111-1-1>

- Römling, U. (2023). Is biofilm formation intrinsic to the origin of life? *Environmental Microbiology*, 25(1), 26–39. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16179>
- Rouse, I. (1975). Peruvian prehistory: *The peoples and cultures of ancient Peru* by Luis Lumbreras (B. J. Meggers, Trans.). Smithsonian Institution Press. [Review of the book Peruvian prehistory: The peoples and cultures of ancient Peru, by L. Lumbreras]. *Science*, 188(4183), 44. <https://doi.org/10.1126/science.188.4183.44.a>
- Saiz-Jimenez, C. (2023). Special Issue on Interdisciplinary Researches for Cultural Heritage Conservation. *Applied Sciences*, 13(3), 1824. <https://doi.org/10.3390/app13031824>
- Scheerer, S., Ortega-Morales, O., & Gaylarde, C. (2009). Microbial deterioration of stone monuments--an updated overview. *Advances in applied microbiology*, 66, 97–139. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)00805-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)00805-8)
- Stone, M. (2015). Small talk: The evolution of bacterial languages. *BioScience*, 65(3), 336. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu231>
- Tai, J. B., Mukherjee, S., Nero, T., Olson, R., Tithof, J., Nadell, C. D., & Yan, J. (2022). Social evolution of shared biofilm matrix components. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(27), e2123469119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2123469119>
- Trovão, J., Tiago, I., Catarino, L., Gil, F., & Portugal, A. (2020). In vitro analyses of fungi and dolomitic limestone interactions: Bioreceptivity and biodeterioration assessment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 155, 105107. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105107>
- Uher, B., Aboal, M., & Kovacik, L. (2005). Epilithic and chasmoendolithic phycoflora of monuments and buildings in South-Eastern Spain. *Cryptogamie, Algologie*, 26, 275–358.
- Unesco. (1983). City of Cuzco. World Heritage List. UNESCO World Heritage Centre. Retrieved from <https://whc.unesco.org/en/list/273>
- Varma, A., & Buscot, F. (Eds.). (2005). Microorganisms in soils: Roles in genesis and functions (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/b137872>
- Vázquez-Nion, D., Silva, B., & Prieto, B. (2018). Influence of the properties of granitic rocks on their bioreceptivity to subaerial phototrophic biofilms. *Science of the Total Environment*, 610–611, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.015>
- Wakefield, R. D., & Jones, M. S. (1998). An introduction to stone colonizing micro-organisms and biodeterioration of building stone. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 31(4), 301–313. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1998.031.P4.03>
- Watts, T. B. (2001). The ecology of cyanobacteria: *Their diversity in time and space* [Review of the book *The ecology of cyanobacteria: Their diversity in time and space*]. *Diversity and Distributions*, 7(3), 203–204. <https://doi.org/10.1046/j.1366-9516.2001.00118.x>