



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**EL POLVO ATMOSFÉRICO COMO FUENTE DE  
NUTRIENTES PARA CIANOBACTERIAS DE: BIOCOSTRAS  
DEL DESIERTO DE SONORA Y MICROBIALITAS DEL  
LAGO-CRÁTER RINCÓN DE PARANGUEO**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

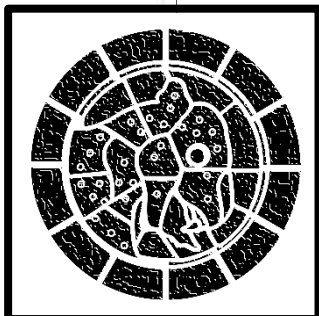
**BIÓLOGO**

**P R E S E N T A:**

**ANTONIO OSWALDO MUÑOZ LOMELÍ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. HUGO BRUNO BERARDI CAMPESI**



**CIUDAD DE MÉXICO, 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**“Pulvis es et in pulverum revertis”**

**(Gn 3:19)**

**“Uno debe ser tan humilde como el polvo, para poder descubrir la verdad”**

**Mahatma Gandhi, (1869-1948)**

**“Lo bello del Desierto es que en algún lugar esconde un pozo de agua”**

**Antoine de Saint-Exupéry, (1900-1944)**

**“Somos polvo de estrellas”**

**Carl Edward Sagan, (1934-1996)**

---

## INSTITUCIONES

Agradezco a mi *alma mater* y siempre majestuosa UNAM, por el espíritu de conocimiento cultivado en nuestra quinta raza cósmica y a las siguientes reconocidas instituciones:

**Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.**

**Instituto de Ecología, UNAM.**

**Instituto de Geología, UNAM.**

**Instituto de Física, UNAM.**

**Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.**

**Museo Universum, UNAM.**

**Universidad de Arizona, Tucson, E.U.A.**

## ACADÉMICOS

Extiendo un merecido reconocimiento, agradeciendo profundamente a las personas que han cooperado, colaborado y motivado esta tesis, por lo que sin ellos estaría truncado este trabajo.

Dr. Hugo Beraldi Campesi, mi mentor, por compartir su conocimiento, gran apoyo, y accesibilidad al equipo e instalaciones, facilidades de financiamiento, trámites, desarrollo de investigación, e invitaciones a congresos, cursos, y artículos, así también por dirigir esta tesis. Dedicando su tiempo y espacio, en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM.

Dr. Arcadio Monroy Ata, por su cooperación al asesorarme en la redacción y organización, además de las ideas y consejos para la realización de mi tesis, en el Invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la UNAM.

---

**Dra. María Patricia Velasco de León, Dra. Rosalva García Sánchez y M. en C. Germán Calva Vásquez, por las correcciones necesarias en esta tesis, así por su participación como sinodales para mi examen profesional.**

**Dr. David D. Breshears, Dr. Darin J. Law y Dr. Jason P. Field. Por su colaboración: en financiamientos, muestras y datos de la zona de estudio, en la Universidad de Arizona en Tucson. E.U.A.**

**Dr. Jorge Alfonso García Macedo, por abrirnos las puertas para realizar fluorometría espectral, en el Laboratorio de Estado Sólido, en el Instituto de Física de la UNAM.**

**Dr. Martín Merino Ibarra e Hidrobiól. Sergio Castillo Sandoval por la asistencia otorgada al realizar experimentos de espectrofotometría en el Laboratorio de Biogeoquímica Acuática de la Unidad Académica de Ecología y Biodiversidad Acuática del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.**

**Dra. María del Pilar Ortega Larrocea y Mtra. Iris Suárez Quijada por las facilidades otorgadas al realizar técnicas en el Laboratorio de microcosmos bioedáfico, así como permitirme realizar cultivos de cianobacterias de biocostras en el Invernadero del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM.**

**Dra. Luisa Falcón Álvarez, por las facilidades prestadas al realizar experimentos de cultivo de cianobacterias del Lago Cráter de Parangueo, en el Laboratorio de ecología molecular y epigenética del Departamento de Ecología Evolutiva del Instituto de Ecología de la UNAM.**

**Dra. Lucy Natividad Mora Palomino, por su colaboración en la determinación de Carbono, Nitrógeno y Fosforo, en el Laboratorio de Edafología Experimental del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM.**

**Dr. Ernesto Hernández Mendiola, por su colaboración en la determinación de elementos, en el Laboratorio ICP-MS y Laboratorio de Química Ultra pura LABQUP del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM.**

---

**Dra. Teresa Pi Puig, por su colaboración en la determinación de cristales por difracción de rayos X, en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM.**

**Dr. Roy Priyadarsi Debajyoti, por su colaboración en la determinación de elementos por TIC-TOC y XRF, en el Laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM.**

**Dr. Antonio Muñoz Martínez, por las facilidades económicas para el desarrollo de este experimento, así como sus opiniones vertidas al respecto.**

**Q.F.B. Ana Victoria Torres Camarillo, por su cooperación en la obtención de productos químicos del CERFYS y pesaje de muestras para el estándar de biomasa, en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.**

**Dr. Rodolfo Neri Vela, por entusiasarme desde pequeño por su misión, con viajar al espacio. Al M. en Ing. Rafael Sánchez Dirzo, por sus enseñanzas emotivas de Físicoquímica y sus lecturas sugeridas en relación a la geobiología, de autores como Margullis y Lovelock. Al Biól. Cristóbal Galindo Galindo, por desarrollar mis destrezas científicas en campo, para desarrollar investigación en pro de la naturaleza. Al Biol. Carlos Martínez Montoya por la autorización de reactivos del CERFYS, y a la Dra. Isabel Soto Cruz, por cimentar mis conocimientos, relacionados a la célula, el cáncer y transducción de señales.**

**Dr. Héctor Javier Durand Manterola, por enseñarme a los exoplanetas, como mi primera misión hacia la astrobiología. En mi servicio social en el Departamento de Ciencias Espaciales, del Instituto de Geofísica de la UNAM.**

**Dra. Segura Peralta Antígona, del Departamento de Física de Plasmas e Interacción de Radiación con la Materia en el Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, por recomendarme a mí como Biólogo, al Director de Tesis; Dr. Beraldi Campesi Hugo, quien citando sus palabras "es una persona cooperativa con sus alumnos de criterio abierto, tolerante, y con amplia experiencia en astrobiología y temas afines"**

---

## FINANCIAMIENTOS

**Esta tesis se realizó gracias a:**

- **Financiamientos otorgados al Dr. Beraldi y Dr. Breshears por el Consorcio binacional: Universidad de Arizona-Universidad Nacional Autónoma de México on drylands research.**
- **Fondos particulares del Dr. Beraldi y Dr. Muñoz.**

---

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis primeramente a ese creador del universo, sin institución, doctrina o religión, de donde toda ciencia y forma de vida e inerte fue creada a partir de energía y materia.

Por consiguiente a esos *Homo sapiens sapiens* que estuvieron cerca de mí, ayudando a superarme en todos los aspectos.

A mi Hija Valeria por ser mi orgullo, motivándome, con aprendizaje, vida y alegría.

A mi Madre Gregoria por exigirme y preocuparse por mi día con día.

A mi Padre Antonio por encaminarme y mantenerme en pie.

A mis Hermanas Laní y Berenice: por escucharme.

A mi pareja Victoria, por sus consejos y la ayuda brindada.

A mi Director de tesis Hugo, por todo el apoyo y confianza, a quien considero un gran amigo.



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	II
- INSTITUCIONES	II
- ACADÉMICOS	II
- FINANCIAMIENTOS	V
DEDICATORIA	VI
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Polvo atmosférico	11
2.1.1. Aerobiología y polvo atmosférico	11
2.1.2. Origen y composición	12
2.2. Biocostras	17
2.2.1. Composición de biocostras	17
2.2.2. Evolución	19
2.2.3. Sustancias poliméricas extracelulares	19
2.3. Microbialitas	20
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
4. JUSTIFICACIÓN	24
5. HIPÓTESIS	25
6. OBJETIVOS	26
7. MÉTODO	27
7.1 Zona de Estudio (A). Desierto de Sonora	27
7.2. Zona (B). Lago-Cráter Rincón de Parangueo	28
7.3. Descripción del estudio	29
7.4 Módulos experimentales	33
7.4.1 Análisis elemental	33
7.4.2. Aislamiento y cultivo de cianobacterias.	34
7.4.3 Tratamientos de cianobacterias con polvo atmosférico	35
7.4.4. Estimación de biomasa.	38
7.4.4.1 Fluorescencia de clorofila	38
7.4.4.2 Extracción y espectrofotometría de clorofila	40
7.4.5 Microscopía de cianobacterias de microbialitas, biocostras y polvo atmosférico	42
7.4.6 Análisis y diseño estadístico	42
8. RESULTADOS	43
8.1. Relación de carbono, fósforo y nitrógeno del polvo atmosférico	43

8.2. Diferencias en el carbono de polvo atmosférico y suelo de biocostras. -----	44 -
8.3. Contraste de 42 elementos traza entre el polvo atmosférico, suelos de biocostras y cianobacterias de biocostras por ICPMS-----	45 -
8.4. Análisis de 40 elementos en polvo atmosférico y suelo de biocostras por ICPMS -----	48 -
8.5. Elementos del polvo atmosférico y suelo de biocostras por XRF -----	49 -
8.6. Cristalografía de polvo atmosférico-----	51 -
8.7. Pigmentos de cianobacterias -----	53 -
8.8. Fluorescencia de biomasa en los tratamientos -----	54 -
8.9. Absorbancia de la clorofila (C) de cianobacterias de microbialitas -----	56 -
8.10. Biomasa estimada en cianobacterias de microbialitas -----	57 -
8.11. Modelo de concentración de clorofila (C) en el tiempo-----	58 -
8.12. Biomasa estimada en cianobacterias de biocostras -----	59 -
8.13. Microscopía y determinación de cianobacterias de biocostras y microbialitas -----	60 -
9. DISCUSIÓN-----	63 -
9.1 Interacción entre el polvo atmosférico y las cianobacterias -----	63 -
9.2 Las cianobacterias como eje central en las biocostras-----	66 -
9.3 Análisis estadístico de la concentración de clorofila (C) en cianobacterias de microbialitas -----	67 -
9.4 Análisis estadístico de la concentración de clorofila (C) en cianobacterias de biocostras -----	68 -
9.5 Relación entre polvo atmosférico terrestre y polvo atmosférico de Marte -----	68 -
10. CONCLUSIÓN-----	70 -
11. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS-----	71 -
12. REFERENCIAS -----	72 -
Apéndices -----	84 -

### Abreviaturas de palabras clave

<b>A:</b> Agar.	<b>CO<sub>3</sub>:</b> Carbonato	<b>N:</b> Nitrógeno
<b>ATP:</b> Adenosina trifosfato	<b>EGO:</b> Evento de la gran oxidación	<b>Na:</b> Sodio
<b>BC:</b> Biocostra.	<b>EPS:</b> Sustancias poliméricas	<b>NH<sub>4</sub>:</b> Nitrato
<b>BG11:</b> Medio de cultivo para cianobacterias	<b>Extracelulares</b>	<b>O:</b> Oxígeno
<b>°C:</b> Celsius, Centígrado	<b>Fe:</b> Hierro	<b>P:</b> Fósforo
<b>C:</b> Carbono	<b>H<sub>2</sub>O:</b> Agua	<b>Pa:</b> Pascal
<b>Ca:</b> Calcio	<b>K:</b> Potasio	<b>PA:</b> Polvo atmosférico/eólico Terrestre
<b>CBC:</b> Cianobacterias de biocostras.	<b>Km:</b> Kilómetro	<b>PAM:</b> polvo atmosférico de Marte
<b>CMB:</b> Cianobacterias de microbialitas	<b>MB:</b> Microbialita	<b>pH:</b> Potencial hidrógeno
	<b>Mg:</b> Magnesio	<b>PO<sub>4</sub>:</b> Fosfato
	<b>Mm:</b> Milímetro	<b>S:</b> Azufre
	<b>Mo:</b> Molidbeno	

---

## ABSTRACT

The atmospheric Dust is produced in emerged areas, transporting organic and inorganic matter, influences the climate and biogeochemical cycles. Cyanobacteria as precursors of the photosynthetic life, are the first primary producers of oxygen in the Earth since more than 2.5 Ga, some are extremophiles in diverse consortia between biocrusts, microbialites and dust. The biocrusts are microbial consortia, commonly sedimentary layers built in arid top soils, dominated by cyanobacteria that produce adhesive extracellular polymeric substances, trapping particles of atmospheric dust, agglutinating soil, and forming a cohesive surface crust that reduces soil erosion. The microbialites are structures that precipitate elements as carbonates in the (EPS) of cyanobacteria. To test whether atmospheric dust deposition is beneficial for cyanobacteria, we cultivate cyanobacteria from biocrusts of Sonoran Desert, microbialites of Crater Lake Rincón de Parangueo and atmospheric dust. Only nutritionally supported with treatments of distilled water and atmospheric dust. The biomass accumulation over time (using Chlorophyll a as proxy) seemed to be larger dust aliquots. The findings suggest important geobiological implications, where the dust is a medium that provides essential nutrients in particles that enriched the biomass of cyanobacteria. These processes could have existed in the past, since the early Earth, and have helped cyanobacteria to colonizing new environments over time, regardless of their natural habitat.

## RESUMEN

El polvo Atmosférico es producido en áreas emergidas, transporta materia orgánica e inorgánica, influye en el clima y en los ciclos biogeoquímicos. Las cianobacterias son los precursores de la vida fotosintética y los primeros productores primarios de oxígeno en la Tierra desde hace más de 2.5 G.a, algunas son extremófilas en diversos consorcios, entre biocostras, microbialitas y polvo. Las biocostras son consorcios microbianos comúnmente de suelos áridos, dominados por cianobacterias, que producen sustancias poliméricas extracelulares adhesivas (EPS), atrapando las partículas del polvo atmosférico, aglutinando el suelo y formando una costra superficial cohesiva que reduce la erosión del suelo. Las microbialitas son estructuras que precipitan elementos como carbonatos en el (EPS) de cianobacterias. Se desconoce si la deposición de polvo atmosférico es benéfica para las cianobacterias, por lo tanto para comprobarlo se cultivaron cianobacterias de biocostras del Desierto de Sonora, microbialitas de Lago-Cráter Rincón de Parangueo, y del polvo atmosférico, tratadas con diferentes alícuotas de polvo atmosférico y agua destilada. Usando a la Clorofila (a), se determinó que la biomasa fue significativamente mayor en los tratamientos con mayores cargas de polvo. Los resultados, sugieren importantes implicaciones geobiológicas, donde el polvo atmosférico es un medio que proporciona partículas con nutrientes esenciales que enriquece la biomasa de cianobacterias. Estos procesos posiblemente existieron en el pasado, desde la Tierra temprana, ayudando a las cianobacterias, colonizar nuevos ambientes a través del tiempo, independientemente de su hábitat natural.

## 1. INTRODUCCIÓN

El polvo atmosférico se produce en áreas emergidas, principalmente en zonas áridas, donde la erosión y desertificación son más intensas por la escasa protección vegetal. Puede presentarse como un contaminante y contribuye a la génesis del suelo.

Su composición, transporte (migración masiva) y deposición, dependen del origen de las corrientes de energía eólicas. Comprender los procesos de interacción del polvo atmosférico como flujo de nutrientes y microorganismos, crea un enorme potencial para la geomicrobiología, ecología, agricultura, salud pública, energía, ciclos biogeoquímicos, clima, evolución y aspectos astrobiológicos.

Los procesos geobiológicos han conformado la evolución de la Tierra, a través de alteraciones fisicoquímicas por organismos (Harrison *et al.*, 2001; Jickells *et al.*, 2005; Lau *et al.*, 2006; Reitner y Thiel, 2011; Abed *et al.*, 2011; Al-Bader *et al.*, 2012). Las cianobacterias fueron los principales productores primarios de oxígeno en la Tierra, convirtiendo a la atmósfera reductora primitiva en oxidante, en el gran evento de oxidación desde hace aproximadamente 2,500 M.a. Las biocostras se desarrollan como ubicuas estructuras biosedimentarias, formadas principalmente por cianobacterias, que unen y fijan partículas del suelo con sustancias poliméricas extracelulares en su intrincada red de filamentos (Belnap y Lange, 2001).

Todo ello se traduce en la formación de una corteza cohesiva, en la superficie de zonas áridas y semiáridas, donde existe naturalmente la deposición de polvo. Pero también se ha visto que las biocostras alteran la química del sustrato, lixiviando metales (Beraldi-Campesi *et al.*, 2009). Si los procesos de lixiviación continúan, tarde o temprano los suelos se quedarían sin elementos esenciales para la nutrición y metabolismo celular.

Por otra parte las microbialitas son órgano-estructuras sedimentarias, que precipitan carbonatos, por adhesión en el (EPS) de cianobacterias. Dado que puede existir una íntima interacción entre el polvo, biocostras y microbialitas, el polvo resulta en este sentido, un mecanismo viable para la nutrición celular de sus cianobacterias y para la recuperación de elementos perdidos por lixiviación en suelos (Reynolds *et al.*, 2001).

Las potenciales biofirmas, en este caso de cianobacterias que se encuentran en biopelículas, como biocostras y microbialitas, se desarrollan en superficies expuestas a la atmósfera que en conjunto con otros microorganismos, funcionan como bioindicadores de nuevas formaciones abióticas (Gorbushina, 2007). Tales biopelículas, actúan biogeoquímicamente sobre el sustrato para suspender las células creciendo *in situ* (Morrill *et al.*, 2013). Estos bioindicadores son fundamentales para las investigaciones en astrobiología y geobiología.

Las biocostras y microbialitas, no se formarían sin sus productoras primarias (cianobacterias). Por lo que cualquier limitación nutricional que afecte a las cianobacterias, eventualmente también afectara al resto de la comunidad microbiana. Sin embargo, este fenómeno no ha sido cuantificado. Por ello en este proyecto se propone utilizar al polvo atmosférico como una fuente de nutrientes que beneficien al desarrollo de cianobacterias.

---

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Polvo atmosférico

#### 2.1.1. Aerobiología y polvo Atmosférico

La atmósfera ha sido descrita como una de las últimas fronteras de exploración biológica sobre la tierra. La aerobiología estudia al polvo atmosférico y ha cautivado a los científicos durante siglos. Anton Van Leeuwenhoek, comúnmente conocido como el padre de la microbiología fue uno de los primeros en preguntar si el aire podría ser un hábitat para los microorganismos.

El naturalista Charles Darwin recogió polvo en suspensión en el HMS Beagle, encontrando que este polvo puede contener 17 diferentes formas orgánicas de microorganismos. Lo que demuestra la capacidad de algunos microorganismos para aerotransportarse y seguir siendo viables después de largos periodos de tiempo. Contemporáneo de Darwin, Louis Pasteur fue uno de los primeros en estudiar sistemáticamente microorganismos del aire y mostro que hay bacterias y mohos viables en el aire, en el que las densidades de estos organismos varían de un lugar a otro. Cuando los primeros aviones empezaron a existir en 1900, el fitopatólogo Fred C. Meier fue un defensor entusiasta de estudiar los microbios en las altitudes.

El aire ha proporcionado un hábitat adecuado para las cianobacterias pigmentadas fotótrofas, que tienen una gran variedad de métodos de protección: mecanismos de reparación del ADN, pigmentos y atenuación al ser incorporados dentro de partículas más grandes que absorben parte de la radiación solar como el polvo, polen o gotas de agua (Fig. 1 y 2). Gracias a la microbiota atmosférica residente; los ciclos biogeoquímicos se producen, dejando huellas químicas de su metabolismo (Womack *et al.*, 2010).

### 2.1.2. Origen y composición

El polvo atmosférico originado de materiales terrestres es diferente del polvo cósmico proveniente del espacio (Plane, 2012). El polvo atmosférico o eólico (viento con partículas de arena, limo y arcilla) es un componente importante en los ecosistemas áridos, que contribuye a la génesis del suelo y proporciona nutrientes esenciales. Es bien sabido, que polvo recién caído puede ser el resultado de la alteración humana en superficies lejanas (Reynolds, 2001).

La información de textura que se utiliza en suelo como los de FAO no se ajusta bien con los tamaños de las partículas del polvo. Ya que el viento es altamente selectivo en el tamaño y tiende a llevar por lo general partículas < 2000  $\mu\text{m}$  de diámetro por suspensión, esta incorpora sedimentos que se describen como de arcilla (<2 mm), limo (2-50mm) y arena (50 a 2000  $\mu\text{m}$ ) en las clasificaciones de grano tradicionales (Bullard *et al.*, 2011), (Fig. 3).

Un tercio de la superficie del planeta la ocupan los desiertos; estos generan principalmente el polvo atmosférico. El desierto más grande del Mundo, el Desierto del Sahara en África contribuye con el 50-70% de las emisiones anuales de polvo a nivel mundial y se ha documentado que se puede depositar en la Selva del Amazonas, la selva más grande del planeta. También estudios han indicado que las partículas de polvo de Asia llegan a ser transportadas en todo el Mundo en 13 días (Yamaguchi *et al.*, 2014).

Los huracanes, tormentas, tornados y lluvias son una fuente significativa eficaz del transporte de partículas de polvo atmosférico y sus microbios que son fertilizados en las nubes (Guida y Colin, 2016). Las sequías contribuyen significativamente al aumento de las emisiones de polvo. Hasta 50% del polvo se origina a partir de estos suelos perturbados, modificando el balance de energía en la Tierra (Duce, *et al.*, 1980; Savoie y Prospero, 1980; Talbot *et al.*, 1988; Swap *et al.*, 1992; Prospero, 1999; Jickells *et al.*, 2005; Stuut *et al.*, 2005; Weinzierl *et al.*, 2009; Evan *et al.*, 2014; Katra *et al.*, 2014).

Las emisiones de polvo son un peligro para la salud humana, la asociación entre los microorganismos y los contaminantes del aire podrían hacer aparecer nuevas enfermedades infecciosas y el resurgimiento de antiguas en muchas partes del mundo. Con enfermedades respiratorias, reacciones alérgicas, asma, infecciones pulmonares, enfermedades cardiovasculares, infecciones dérmicas, altas concentraciones de metales carcinógenos, elementos teratógenos, entre otros efectos.

Un ejemplo es el polvo radioactivo contaminado por ensayos nucleares en el Desierto de Utah, que se supone afectó a los icónicos John Wayne y Pedro Armendáriz, en la cinta "The Conqueror, 1954", donde en dicho rodaje, otras 89 personas murieron de cáncer a través del tiempo, como consecuencia de la exposición (Francescutti, 2004).

También se ha evidenciado que el plomo fue un contaminante dominante en la década de 1980, disminuyendo debido a la eliminación de la gasolina con plomo, lo que condujo a la "extinción muscle car", pero la resuspensión del suelo, ocasionada por la erosión, convirtió de nuevo al plomo en un contaminante, ahora en el polvo doméstico.

Gran parte de la contaminación biológica se ocasiona por el transporte rápido de microorganismos a través de grandes distancias, en relación a otros medios como el agua y el suelo. Esto dirige a importantes consecuencias en términos de bioseguridad. También la arena que se suspende, interrumpe las operaciones de aeropuertos y resulta en condiciones de conducción peligrosas para los automovilistas.

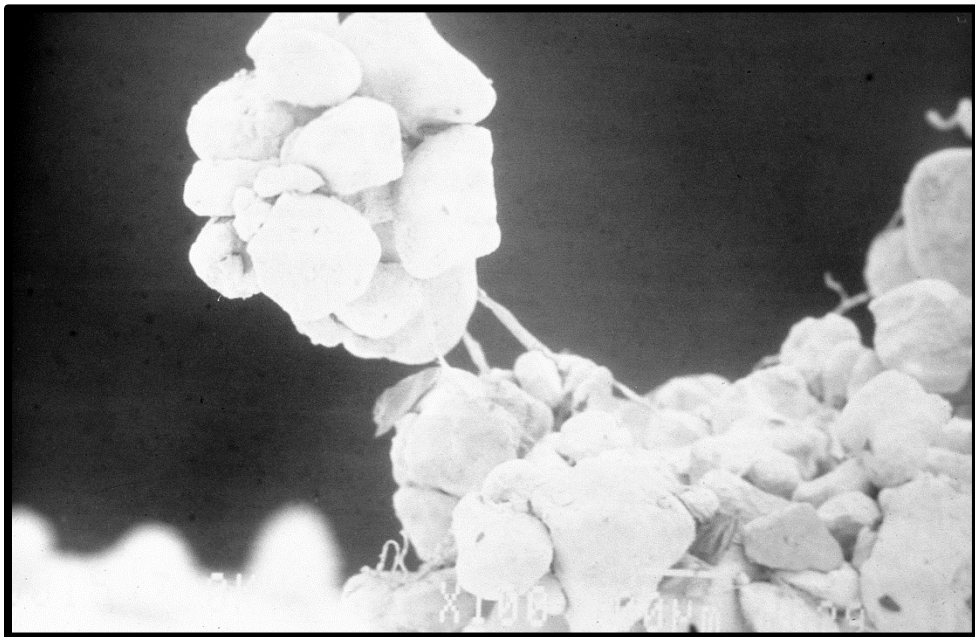
Para el ambiente existe gran preocupación: los arrecifes de coral han sufrido blanqueamientos por el arribo de polvo, y su deposición tiene implicaciones para la productividad marina (Fig. 4 y 5), es claro que los nutrientes y cargas contaminantes procedentes de fuentes difusas son un tema prioritario para ser atendido (Shinn *et al.*, 2000; Layton y Beamer, 2010; Abella, 2010; Csavina *et al.*, 2012; De León *et al.*, 2013; Watkins *et al.*, 2014; Roselli *et al.*, 2015; Kocak *et al.*, 2016; Kameda *et al.*, 2016).

Utilizando la información del suelo, cobertura, humedad relativa y la velocidad del viento como motores para la generación y transporte de polvo, se modelarían predicciones para regiones propensas a tormentas de polvo. Siendo de gran ayuda para reducir y prevenir sus efectos nocivos (Boloorani *et al.*, 2014; Csavina *et al.*, 2014).

Los eventos de mayor disponibilidad de polvo ocurren con el aumento de episodios cálidos, evaporaciones regionales, intensificación del viento y reducidas precipitaciones. Menos cobertura vegetal conduce a una mayor erosión del suelo, reduciendo el viento y la captura de partículas de polvo (He *et al.*, 2015). Una cuestión importante, es que la abundancia bacteriana en las partículas de polvo se ve reducida en cuanto los eventos que originan al polvo disminuyen. Pero por otro lado también dichas bacterias son adheridas a las partículas de polvo y contribuyen a la gran diversidad de ecosistemas, dispersándose en el viento (Yamaguchi *et al.*, 2012).



**Fig. 1. Vainas de cianobacterias adheridas a los granos de arena (García, 2005).**



**Fig. 2. Vaina de cianobacterias que sostiene a los granos de arena juntos (García, 2005).**



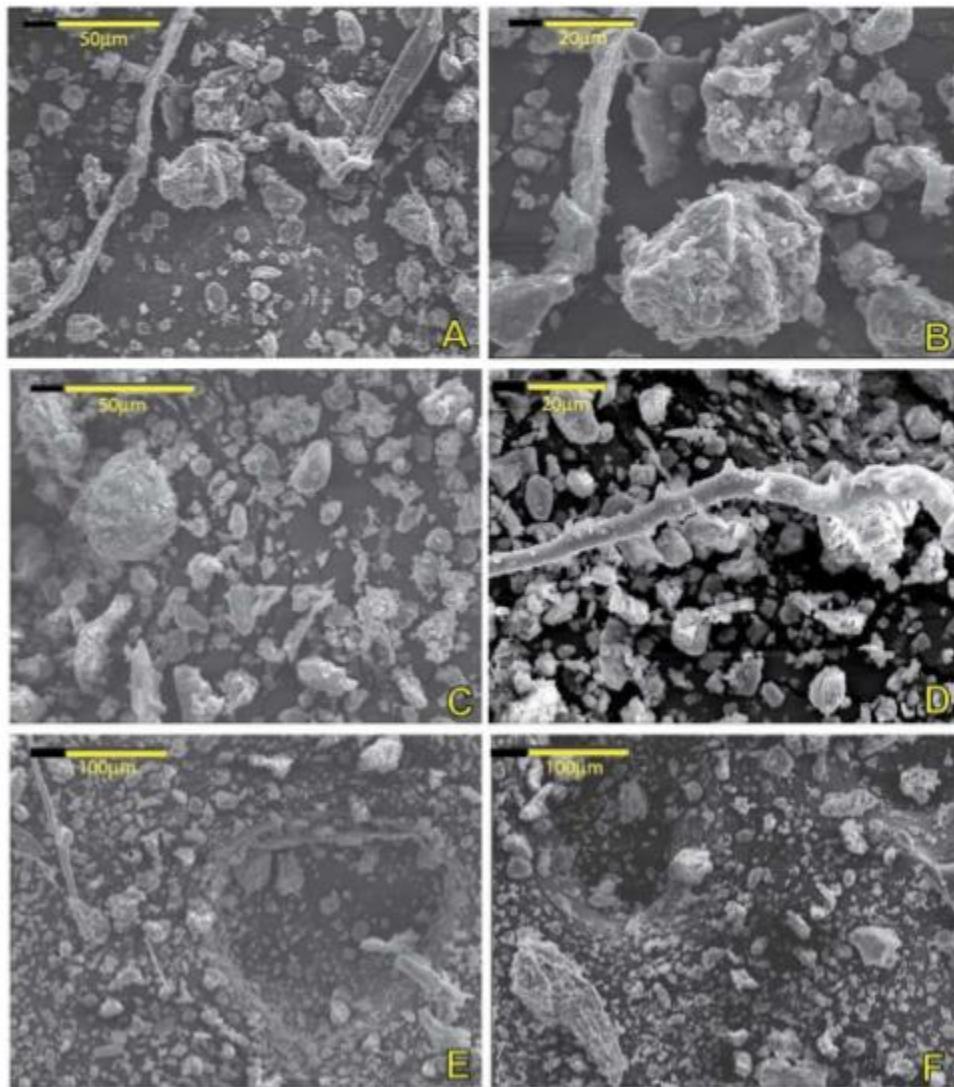


Fig. 3. Partículas de polvo atmosférico (De Deckker *et al*, 2008).

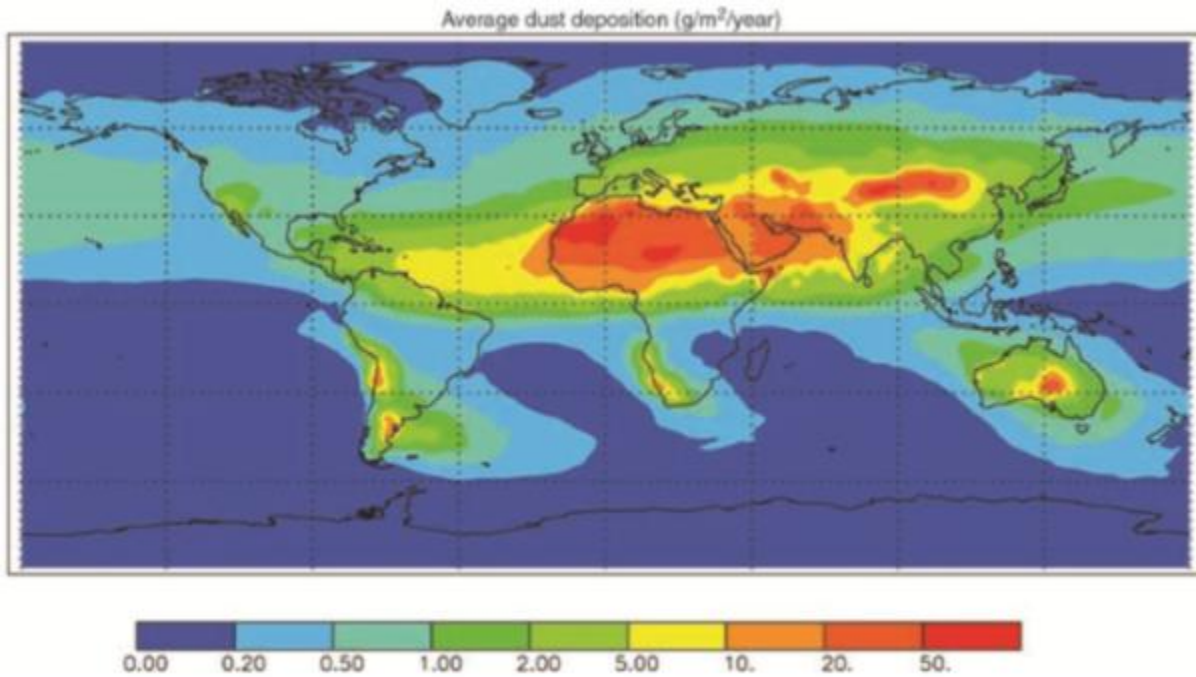


Fig. 4. Flujos del polvo atmosférico (Jickells *et al*, 2005).

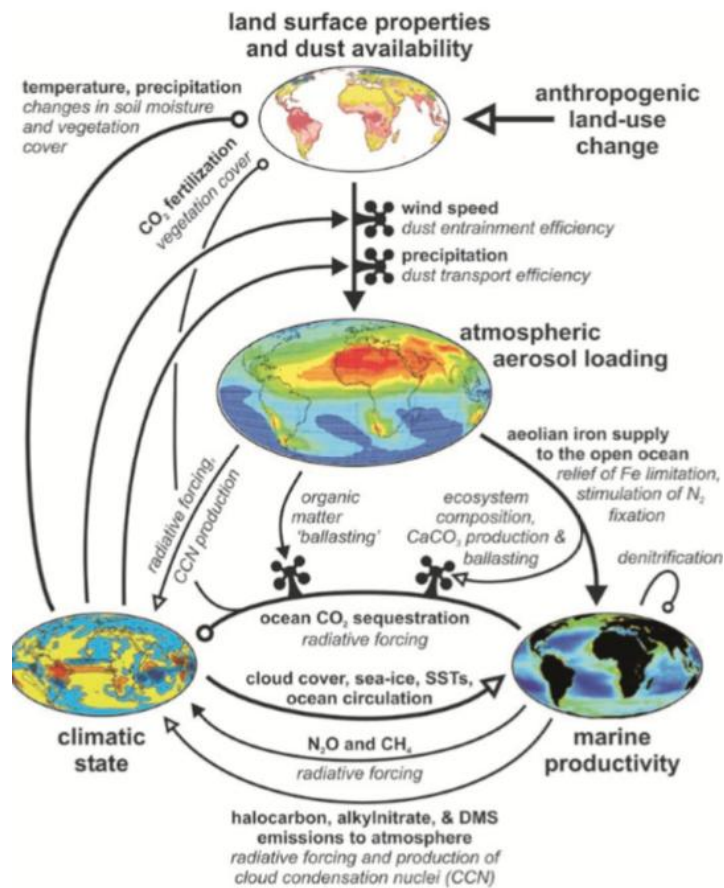


Fig. 5 Conexiones entre el polvo, el hierro y la productividad (Jickells *et al*, 2005).

## 2.2. Biocostras

### 2.2.1. Composición de biocostras

Las cortezas biológicas del suelo o biocostras (BC) son un componente esencial, cubren más del 40% de la superficie terrestre y hasta un 70% de los espacios de suelo sin vegetación en zonas áridas, semiáridas y zonas subhúmedas secas. Representan el bioma terrestre más grande de nuestro planeta y sirven para mantener grandes reservas de carbono. Investigaciones recientes sugieren que las zonas áridas juegan un papel más importante en la conducción global del carbono. La extensión de zonas áridas es esperada a expandirse más del 10% durante el próximo siglo (Raanan *et al.*, 2015).

Las biocostras son consorcios de varios tipos de organismos, de manera secuencial, las cianobacterias son las primeras en aparecer formando una costra de color oscuro, los siguientes son los líquenes y finalmente los musgos, hepáticas, algas, hongos, heterótrofos, entre otros (Fig. 6). Dando diferentes formas y colores, que son una fuente de alimento para algunos artrópodos y establecen una cubierta biótica que mejora las condiciones del suelo (Belnap, 2006).

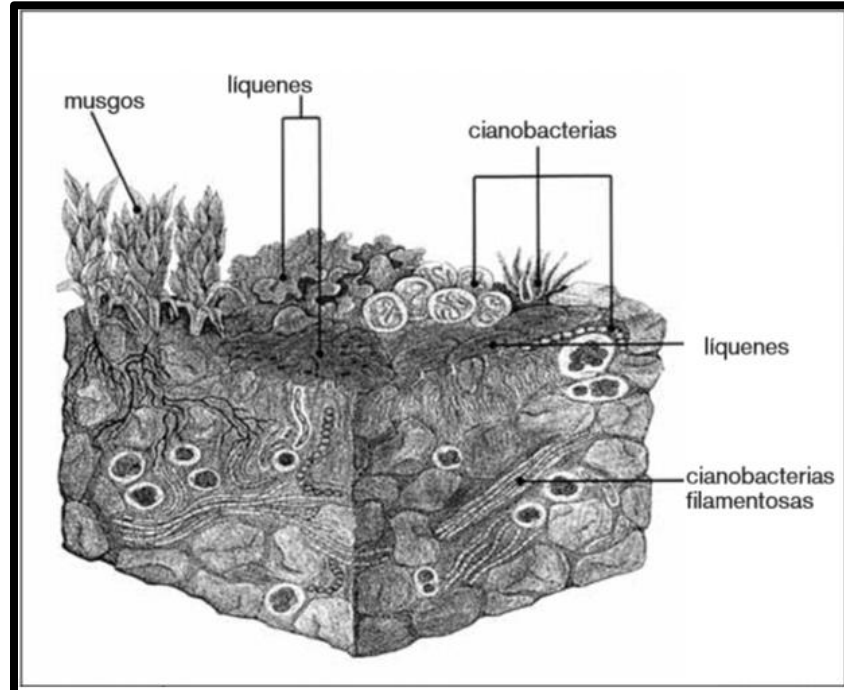


Fig. 6. Biocostra (Belnap y Lange, 2001).

Las biocostras cubren muchas superficies de roca, suelo y sedimentos, son una clave para entender la dinámica de paisajes en zonas áridas futuras por favorecen la estabilidad del suelo, reteniendo agua; al aumentar la infiltración benefician la humedad, reduciendo la incidencia solar y disminuyendo la erosión hídrica y eólica; debido a que incrementan la agregación de partículas minerales (Belnap y Guillette, 1998; Belnap y Lange, 2001; Belnap, 2003; Viles, 2008; Darby *et al.*, 2007).

Las condiciones y recursos que ofrecen las biocostras en los ecosistemas áridos, sugieren que estas cubiertas microbióticas podrían ser un refugio para la fauna edáfica (Eldridge *et al.*, 2000; Belnap, 2006; Quiroñez-Vera *et al.*, 2009; Maestre *et al.*, 2011). Además regulan la composición de especies de plantas, trabajando tanto como una barrera a la germinación de plantas en determinadas especies y como facilitador en otros. Los polisacáridos producidos por biocostras pueden dar soporte a la germinación y crecimiento de plantas vasculares.

Por lo que una nueva excitante frontera en la biología de biocostras es la habilidad para su cultivo, aislamiento y masificación rápida *ex situ* en cultivos líquidos con especies dominantes de cianobacterias provenientes de biocostras de desiertos fríos y calientes. Su cultivo exitoso, representa el potencial a gran escala de hacerlas crecer y sobrevivir en un esfuerzo hacia la restauración de zonas áridas (Kuske *et al.*, 2012; Steven *et al.*, 2013; Ferrenberg *et al.*, 2015; Read *et al.*, 2016; Young *et al.*, 2016).

Las cianobacterias de biocostras del desierto en específico, *M. vaginatus* es una especie cosmopolita y dominante que se expone a condiciones extremas, incluyendo entre otras: temperatura, luz y ciclos de desecación/rehidratación diurna (Harel *et al.*, 2004; Baran *et al.*, 2013; Patzelt *et al.*, 2014).

El suelo de la superficie con biocostras, es una trampa de polvo eficaz. Cuando no está alterada la capa superior del suelo está cubierta por biocostras. Estas áreas con biocostras dominantes son la principal fuente de nitrógeno, aumentan la infiltración del agua y reducen la erosión del suelo, estos organismos excretan adhesivos de polisacárido que atrapan las partículas del suelo, formando una costra superficial cohesiva. Los tipos y densidad de los componentes de las costras biológicas del suelo dan una indicación de la historia de perturbaciones y estabilidad de la superficie (Reynolds, 2001).

### 2.2.2. Evolución

Antes de la evolución de los organismos basados en ADN, el ARN podría haber sido la molécula genética primaria, pero antes de que surgieran los organismos basados en ARN, los ácidos nucleicos peptídicos pudieron ser utilizados para transmitir información genética en las primeras formas de vida. Las cianobacterias producen N-glicina (2-aminoetil), una columna vertebral para los ácidos nucleicos peptídicos. Sugiriendo que fueron una característica primitiva que surgió a principios de la evolución de la vida en la Tierra (Banack *et al.*, 2012). Las cianobacterias son, una innovación biológica, impactando fuertemente a la atmósfera en el gran evento de oxidación, tal manifestación, según los análisis moleculares, pudo haber producido la pluricelularidad (Schirrmeister *et al.*, 2015).

### 2.2.3. Sustancias poliméricas extracelulares

Los exopolisacáridos como sustancias poliméricas extracelulares (EPS) son una clase importante de biopolímeros, con una gran importancia ecológica. Son una característica común de las biopelículas microbianas, en los que juegan un papel protector contra factores de estrés biótico y abiótico, hidratando un microambiente estable, como clave estructural en suelos desérticos y sustratos líticos expuestos, las cianobacterias son los primeros contribuyentes en la síntesis de (EPS) que constituyen la matriz polimérica extracelular, representando el primer paso para la formación de biopelículas, la cual favorece la formación de asociaciones microbianas con diferentes niveles de complejidad llamadas biopelículas (Rossi y Philippis, 2015). Las biocostras se forman por adhesión de las partículas del suelo a los EPS excretados por las cianobacterias filamentosas, pioneros y principales productores de este hábitat (Raanan *et al.*, 2015).

## 2.3. Microbialitas

Los tapetes microbianos, están conformados de biopelículas, algunas biopelículas como las microbialitas son depósitos sedimentarios órgano-acrecionados por la retención, unión, precipitación y litificación de sedimentos *in situ* (Fig. 7), un ejemplo son los estromatolitos, que crecen debido a las actividades metabólicas de cianobacterias (Havemann y Foster, 2008). En la actualidad, la formación de estromatolitos es activa y se encuentran en condiciones ambientales diversas, que van desde moderadas a extremas (Farías *et al.*, 2013; Chacon *et al.*, 2015).

Los registros geológicos indican que las microbialitas aparecieron hace 3.5 Ga y fueron la principal prueba de vida en la Tierra durante los próximos 2 Ga. Las proteobacterias fueron los taxones dominantes en las microbialitas, poseen gremios funcionales asociados con el metabolismo de los metales pesados, resistencia a los antibióticos, biosíntesis de alcohol primario y el metabolismo de urea; este último puede ayudar a la biomineralización. Las comunidades microbialitas son significativamente enriquecidas por cianobacterias y ácidobacterias. Nuevos hallazgos sugieren que los genes de microbialitas están asociados con infecciones virales (White III *et al.*, 2016).

Se ha convenido en considerar como microbialitas, pero no en su formación, compuestos por numerosos fósiles formados por cianobacterias planctónicas como *Mycrocystis*, un género cocoide que actualmente se forma en lagos con floraciones modernas, ríos y embalses. La floración de *Mycrocystis* antigua podría producir la toxina para matar a otros metazoos y ser responsable de la anoxia oceánica que ha desconcertado a muchos investigadores durante tantos años (Sheng *et al.*, 2014).

La presencia de fotosíntesis oxigénica en microbialitas, específicamente por cianobacterias, está bien documentada y el 50% de la acumulación de carbonato se debe a la dominancia de estos organismos dando lugar a la incorporación de una firma biogénica por la descomposición y remineralización de la materia orgánica (Fig. 8). La fotosíntesis anoxigénica aumenta la precipitación de carbonato. Además se cree que el filo bacteroidetes degrada EPS, contribuyendo de forma significativa a la comunidad superficial (Nitti *et al.*, 2012).

Analizando la diversidad genética de microbialitas, que viven en diferentes tipos de entornos en todo México, incluyendo las de estanques del Desierto, lagunas costeras y cráter-lago, tienen filios similares de bacterias y arqueas (Falcón *et al.*, 2012). La geomicrobiología de lagos-cráter sigue siendo en gran parte desconocida a pesar de su interés por la evolución, debido a su parecido con algunos análogos arqueanos en el predominio de la precipitación de carbonato *in situ* sobre la acreción (Couradeau *et al.*, 2011).

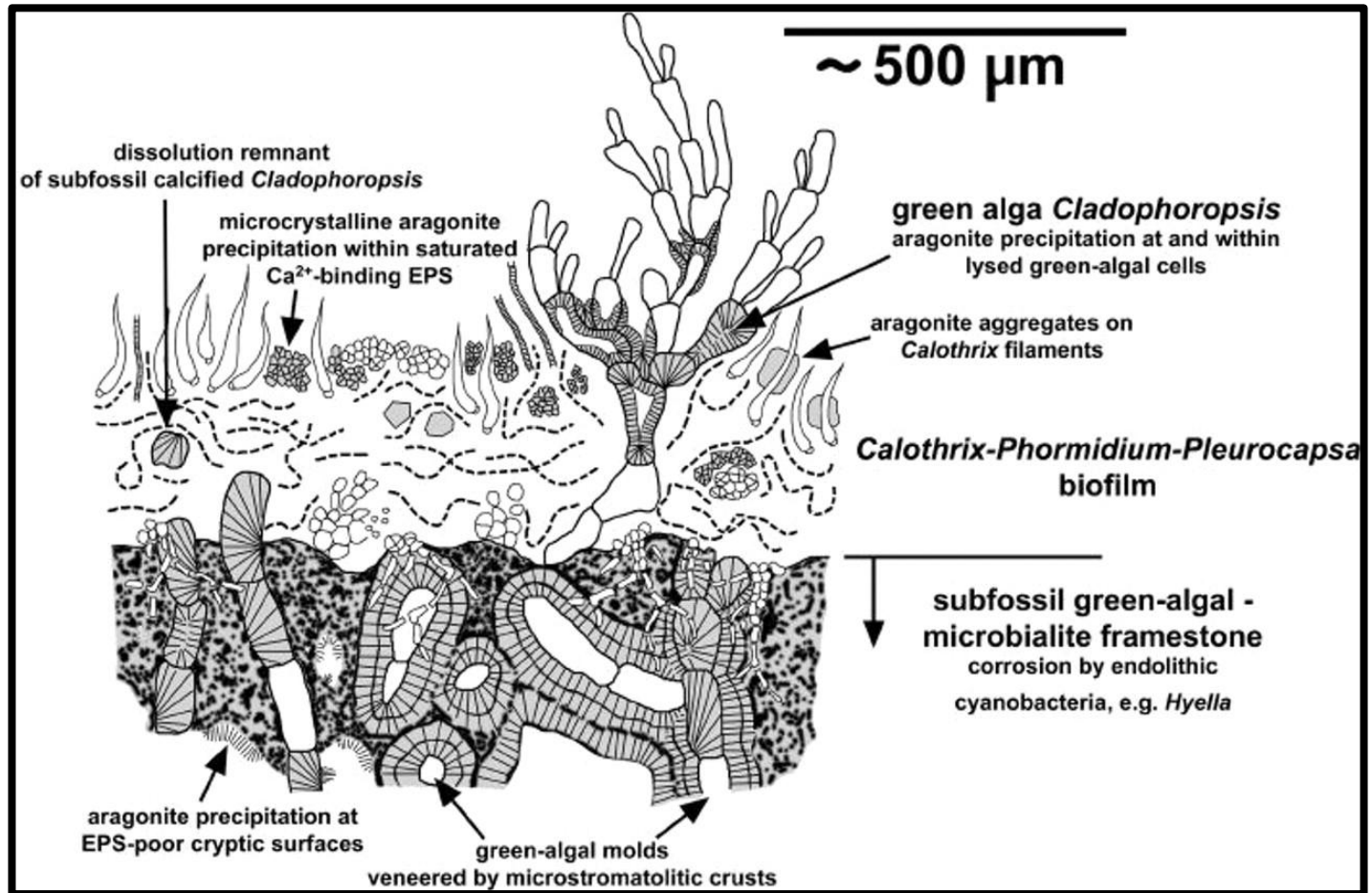


Fig. 7. Microbialita (Journal Sedimentary Research, 2015).

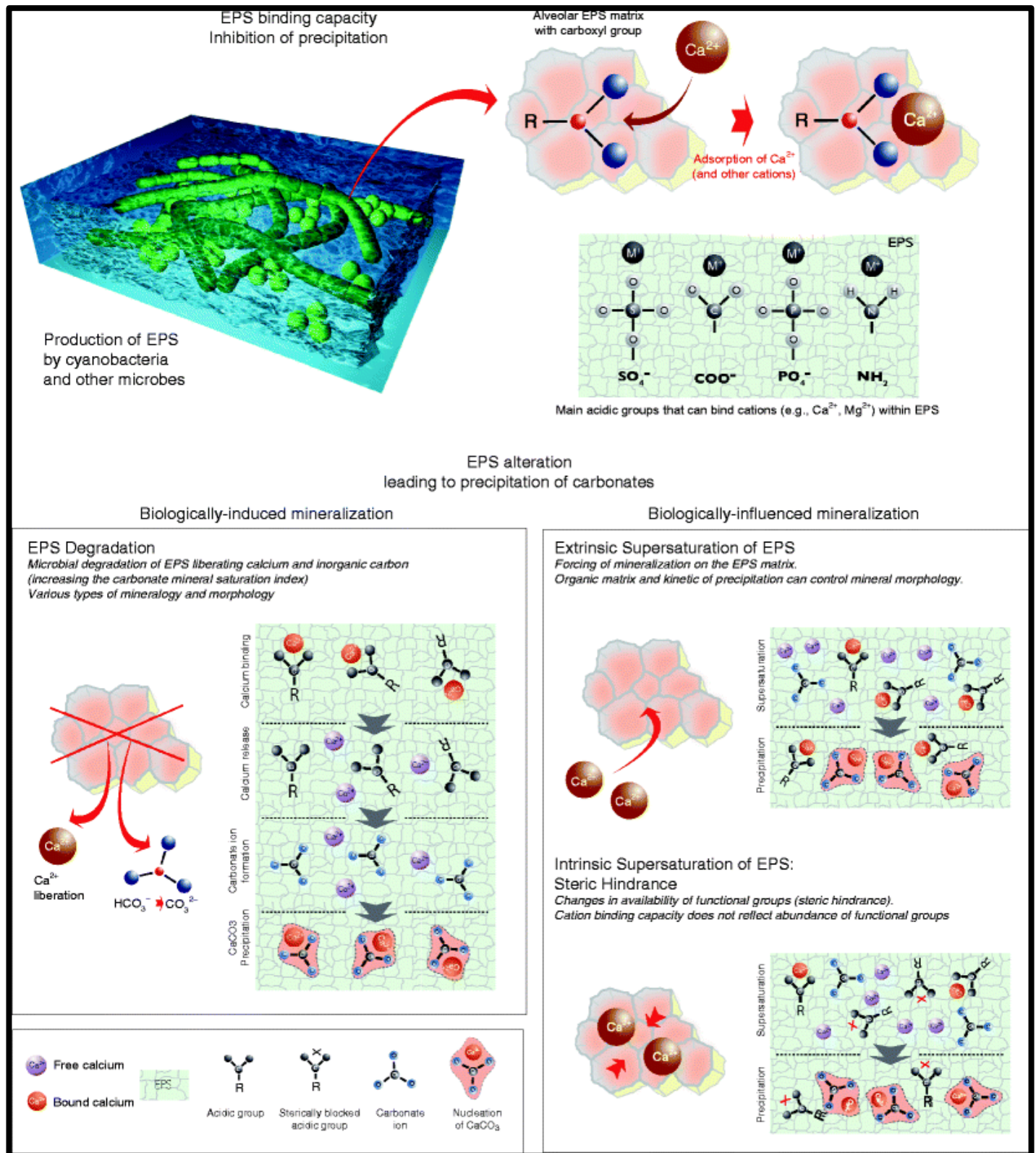


Fig. 8. EPS y precipitación de carbonatos (Dupraz y Visscher, 2005).



---

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel global, las zonas áridas cubren aproximadamente 54 millones de km<sup>2</sup>, lo que equivale al 40% de la superficie terrestre del planeta y representan el 58.5% de las tierras del mundo (Feng *et al.*, 2015). En México, los ecosistemas áridos o semiáridos son heterogéneos y cubren ~60% de la superficie total del país (Rzedowski, 1978; INEGI, 2016). Existen perturbaciones en el Desierto de Sonora por modificación del paisaje, construcción de carreteras (en ciudades como Las Vegas, Nevada, y Phoenix, Arizona), uso de vehículos todo terreno (turísticos y militares), incendios y tormentas de arena, que han dejado alteraciones serias en el desierto que eliminan la mayor parte de la cubierta vegetal como biocostras, causando erosión y desertificación, con afectaciones negativas a la vida silvestre, costando millones de dólares para sanar los efectos. Muchas áreas como las del Desierto de Sonora se dejan simplemente a procesos de recuperación natural. Cuando podrían ser recuperados artificialmente mediante la gestión de sus activos (Abella, 2010).

A pesar del conocimiento que se tiene de biocostras y microbialitas, no se sabe cómo interaccionan con el polvo atmosférico, al cual ecológicamente se le conoce como un contaminante, pero también es un potencial aeroecosistema. El polvo atmosférico es rico en recursos e influye notablemente en comunidades microbianas marinas, pero no existen experimentos que demuestren, que el polvo es también benéfico para las comunidades que se desarrollan lejos de los cuerpos marinos, como los desiertos, lo cual sería de vital importancia para la fertilidad de zonas áridas del mundo, para entender, prevenir y detener la desertificación y la erosión del suelo. Por ello este trabajo sugiere que el polvo atmosférico del Desierto de Sonora es una fuente positiva de nutrientes y sustratos esenciales para el funcionamiento y desarrollo celular de cianobacterias (productores primarios más dominantes) de biocostras y microbialitas, incrementando su biomasa. Debido a que las cianobacterias usan clorofila para ser fotótrofos oxigénicos, ésta puede usarse como indicador de la cantidad de biomasa producida a través del tiempo.

---

## 4. JUSTIFICACIÓN

Los estudios sobre el polvo atmosférico terrestre relacionados con biocostras y microbialitas son prácticamente inexistentes y las investigaciones sobre biocostras en México son escasas, y ahondan principalmente en su composición taxonómica, germinación y dinámica de nutrientes en el suelo (Maya y López-Cortés, 2002; Rivera-Aguilar *et al.*, 2005; 2006; 2009; Quiñones-Vera *et al.*, 2009; Jiménez *et al.*, 2009, López-Cortés *et al.*, 2010, Sandoval-Pérez, 2011; Godínez-Álvarez *et al.*, 2012). Estos resultados son cruciales para comprobar un efecto benéfico nutricional del polvo sobre las cianobacterias de biocostras y microbialitas, así como para comprender cómo podrían haber funcionado los ecosistemas terrestres a través del tiempo, especialmente antes de la existencia de las plantas, cuando estos ambientes estaban prácticamente dominados por biocostras (Beraldi-Campesi, 2013).

## 5. HIPÓTESIS

El polvo atmosférico transporta partículas con elementos y minerales, entonces de resultar benéfico: el polvo atmosférico podrá proveer sustrato y nutrientes esenciales a las cianobacterias de: biocostras del Desierto de Sonora, microbialitas del Lago-cráter Rincón de Parangueo y a la biota residente del polvo atmosférico. Y se desarrollará de manera proporcional; es decir a mayor cantidad de polvo atmosférico, mayor productividad en la biomasa de las cianobacterias. Si el efecto existe con cianobacterias de ambientes disímiles a los desiertos, entonces se refuerza que el efecto nutrimental del polvo atmosférico no es exclusivo para cianobacterias del desierto, sino que es una relación independiente del origen del polvo atmosférico y las cianobacterias.

Por lo tanto al 95% de confianza se espera, dado que (la clorofila es un indicador de la biomasa), que la biomasa sea mayor en los tratamientos de cianobacterias con polvo atmosférico vs cianobacterias sin polvo atmosférico.

Hipótesis general

Ha:  $X_1 < X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$

He:  $X_1 > X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$

$X_1$  = Concentración de la clorofila ( $\alpha$ ) de cianobacterias sin polvo atmosférico

$X_2$ - $X_6$  = Concentración de la clorofila ( $\alpha$ ) de cianobacterias con polvo atmosférico

Hipótesis estadística para cianobacterias de microbialitas:

Ha: Las concentraciones de clorofila ( $\alpha$ ) a 665 nm en los cultivos con tratamientos, serán mayores, que los de cultivos sin tratamiento, con diferencias significativas.

He: Las concentraciones de clorofila ( $\alpha$ ) a 665 nm en los cultivos con tratamientos, serán menores, que los de cultivos sin tratamiento, al no ser estadísticamente significativas y por consiguiente son efecto del azar.

Hipótesis estadística para cianobacterias de biocostras:

Ha: Los tratamientos con polvo atmosférico interfieren con la clorofila ( $\alpha$ ), ya que hay diferencias entre la concentración y los días de cultivo, por lo que habrá interacción entre las condiciones de nutrición y el tiempo del tratamiento.

He: Las diferencias que se observan en las concentraciones se deben al azar y no hay diferencias por acción de los factores.

---

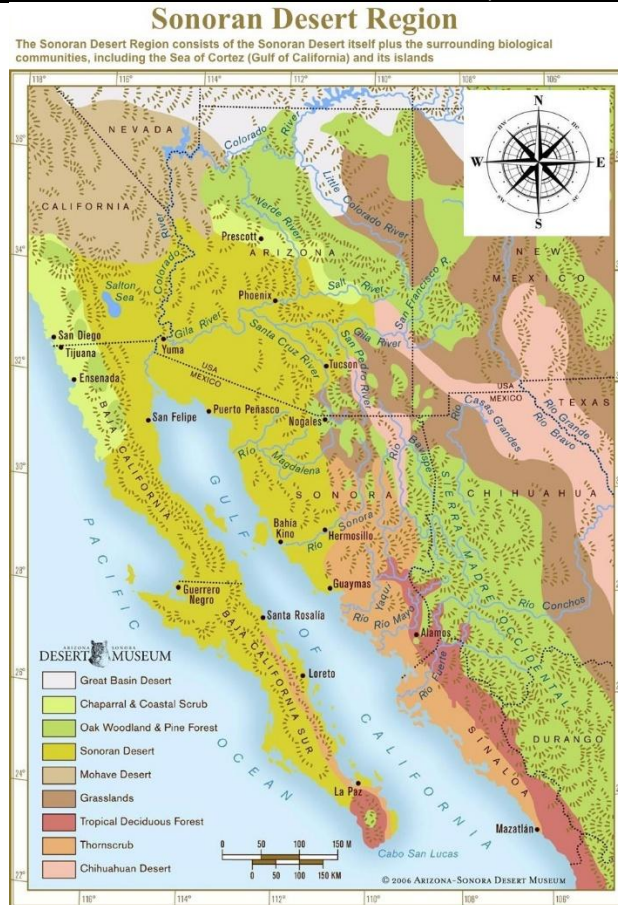
## 6. OBJETIVOS

- ✓ Comprobar el efecto nutrimental del polvo atmosférico en el desarrollo de las cianobacterias de: biocostras del Desierto de Sonora, microbialitas del Lago-Cráter Rincón de Parangueo y de la biota residente del polvo atmosférico.
- ✓ Conocer e identificar la estructura celular y los elementos de las cianobacterias de: biocostras, microbialitas y polvo atmosférico.
- ✓ Estimar la biomasa a través de la clorofila ( $\alpha$ ) de cianobacterias, representando cuantitativamente y cualitativamente su crecimiento y por lo tanto su viabilidad.
- ✓ Determinar por mineralogía el origen del polvo atmosférico.
- ✓ Relacionar diferencias elementales, entre el polvo atmosférico terrestre y un análogo.

## 7. MÉTODO

### 7.1 Zona de Estudio (A). Desierto de Sonora

**Cuadro 1. Características del Desierto de Sonora, (Arizona-Sonora Desert Museum, 2006; Abella, 2010; Andrew *et al.*, 2012)**



**Mapa 1. Desierto de Sonora (Arizona-Sonora Desert Museum, 2006).**

<b>UBICACIÓN</b>	América del Norte Suroeste del estado de Arizona. Sudeste del estado de California, Noroeste de México en el estado de Sonora, Baja California Norte, y Baja California Sur
<b>PROVINCIA</b>	Provincia Florística Sonorense Región Madreña holártica del Norte Hemisferio Occidental
<b>COORDENADAS</b>	Latitud 23°-33° Norte. Longitud 105°-118° Oeste.
<b>SUPERFICIE</b>	280, 000 Km <sup>2</sup>
<b>TEMPERATURA</b>	El desierto más caliente de América del Norte: > 35 °C
<b>VEGETACIÓN</b>	Endémica: Cactus: Saguaro columnar, <i>Carnegiea gigantea</i> , Cacto Cardón, <i>Pachycereus pringlei</i> , <i>Cactus de tubo de órganos</i> , <i>Stenocereus thurberi</i> , Matorrales: <i>Yucca brevifolia</i> , Islas de recursos y Consorcios: BC.
<b>BACTERIAS</b>	Pastizales-gramíneas no nativas: <i>Bromus rubens</i> y <i>Pennisetum ciliare</i> . <i>Thermoprotei</i> y Cianobacterias: <i>Microcoleus vaginatus</i> , <i>Calothrix</i> , <i>Nostoc</i> .

## 7.2. Zona (B). Lago-Cráter Rincón de Parangueo

El Lago Cráter Rincón de Parangueo es un maar Cuaternario, ahora este lago volcánico funciona *sensu stricto* como lago-playa, tenía un lago perenne en su cráter (Cuadro 2). Hoy solo existen cuerpos de agua reducidos y someros (< 30 cm) que se rellenan en época de lluvias. En ese lago existen abundancia de evaporitas (trona, termonatrita, eitelita, halita y silvita), organismos extremófilos y formación de microbialitas: oncolitos y biohermas (Riding, 2011), que hoy están completamente expuestas a la atmósfera. Este lago tiene potencial de geoparque y laboratorio para fines geobiológicos y astrobiológicos (Aranda *et al.*, 2013; Aranda y Levresse, 2015).

Cerca de la costa del lago perenne existe una plataforma carbonatada compuesta por microbialitas. La plataforma está cubierta por una capa de oncolitos que semejan un empedrado y en muchos sitios de la plataforma sobresalen montículos de estromatolitos. Los oncolitos aún conservan cianobacterias endolíticas que viven a unos milímetros por debajo de la superficie.

**Cuadro 2. Características del Lago-Cráter Hoya Rincón de Parangueo, (CONABIO, 2016).**

<b>LOCALIDAD</b>	Valle de Santiago, Guanajuato
<b>SUPERFICIE</b>	25 Km <sup>2</sup>
<b>COORDENADAS</b>	Latitud N: 20° 25' 21", 20° 27' 57" Longitud O: 101° 12' 32", 101° 16' 30"
<b>CLIMA</b>	(A), C (Wo), Semicálido, templado subhúmedo
<b>TEMPERATURA</b>	Media anual > 18 °C, Mes más frío: < 18 °C, Mes más cálido: > 22 °C, Lluvias de verano: 5%-10.2% anual
<b>PRECIPITACIÓN</b>	500 y 2,500 mm anual, Mes más seco: 0-60 mm
<b>VEGETACIÓN</b>	Matorral subtropical y Bosque tropical caducifolio: <i>Bursera excelsa</i> , <i>Conzattia multiflora</i> . Flora: cardos y cactáceas <i>Opuntia spp</i> , Pastos halófilos: <i>Distichlis spicata</i> , romero: <i>Saueda sp</i> . Otros: <i>Ehretia viscosa</i> , <i>Prosopis laevigata</i> , <i>Euphorbia colletioides</i> , <i>Acacia farnesiana</i> y <i>Zanthoxylum sp</i> .
<b>ESTADO DE CONSERVACIÓN</b>	ANP: Monumento Natural en 1997
<b>CIANOBACTERIAS</b>	<i>Actinastrum sp.</i> , <i>Anabaena sp.</i> , <i>Arthospira platensis</i> y <i>Oscillatoria sp</i> .

### 7.3. Descripción del estudio

En la Zona (A) se colectó:

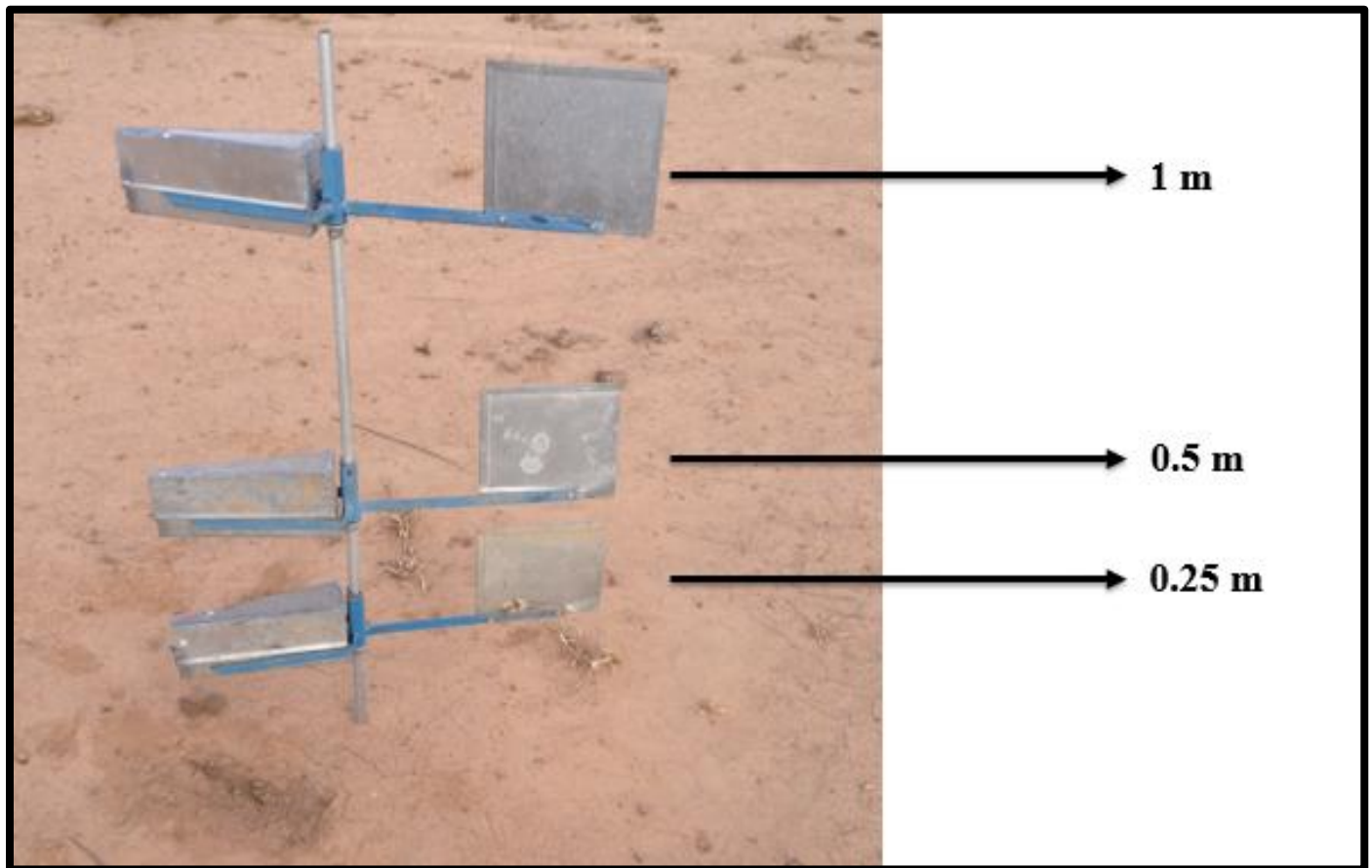
- Biocostras con cianobacterias como organismos dominantes, entre otros como algas y hongos endoedáficos (Cuadro 3), depositadas en cajas Petri y posteriormente secadas a temperatura ambiente para su transporte, por el método de (Beraldi et al., 2009).
- Polvo Atmosférico con muestreadores (BSNE) (Fig. 9), colocados en postes a tres alturas sobre el suelo (0.25 m, 0.5 m y 1 m), al centro de áreas abiertas (Cuadro 3), con una eficiencia de captura del 90%, calculando que la masa del sedimento recogido en gramos es dividida entre el área de abertura de la toma de muestras (10 cm<sup>2</sup>) y el tiempo de colecta en horas. El polvo se recogió después de tormentas o eventos de polvo, enjuagando los BSNE con agua desionizada antes y después de cada evento, recuperando el agua en viales de vidrio de 20 ml, para luego ser secados en estufa a 60 °C por 48 h hasta alcanzar una masa y peso constante.

En la Zona (B) se colectó:

- Microbialitas, con dominancia de cianobacterias al centro del Lago-Cráter (Cuadro 3).

Las colectas para la Zona (A) fueron realizadas por personal de la Universidad de Arizona en Tucson y donadas al Dr. Beraldi, quien las dejó a disposición de este estudio (Mapa 2). El muestreo en la Zona se realizó durante la primavera, en un ecosistema árido, 50 km al sur de Tucson, Arizona. En el sitio dominan suelos franco-arenosos, sobre superficies aluviales del Holoceno, con 8% de pendiente, 15 cm de profundidad, y de 5%-25% de grava superficial. El área se encuentra con humedad baja durante todo el estudio < 20%, a 1,100 m sobre el nivel del mar. Esta área está cubierta al 60% por dosel herbáceo de gramíneas, prado del desierto; *Eragrostis lehmanniana*, dicha vegetación se introdujo en 1900, (para ayudar a combatir la erosión del suelo), 10% está cubierta por plantas leñosas del arbusto, mezquite terciopelo del desierto *Prosopis velutina*. La temperatura media anual del aire es de 16 °C, con temperaturas diarias superiores a 35 °C en verano. La precipitación media anual calculada con el sensor (MetOne Instruments, Grant Pass, Oregón, E.U.A) es de 350 mm y se distribuye de manera bimodal, con más de la mitad de la precipitación anual durante el monzón de verano (julio-septiembre), siendo los más húmedos junto con los meses de invierno (enero-marzo), los meses más secos son en otoño (octubre-diciembre) y la primavera tiene los vientos más intensos (marzo-mayo), con una dirección

típica del sotavento de oeste a este, estimada con el sensor (CS500-L, Campbell Scientific, Logan, Utah), (Field *et al.*, 2011; Field *et al.*, 2012).

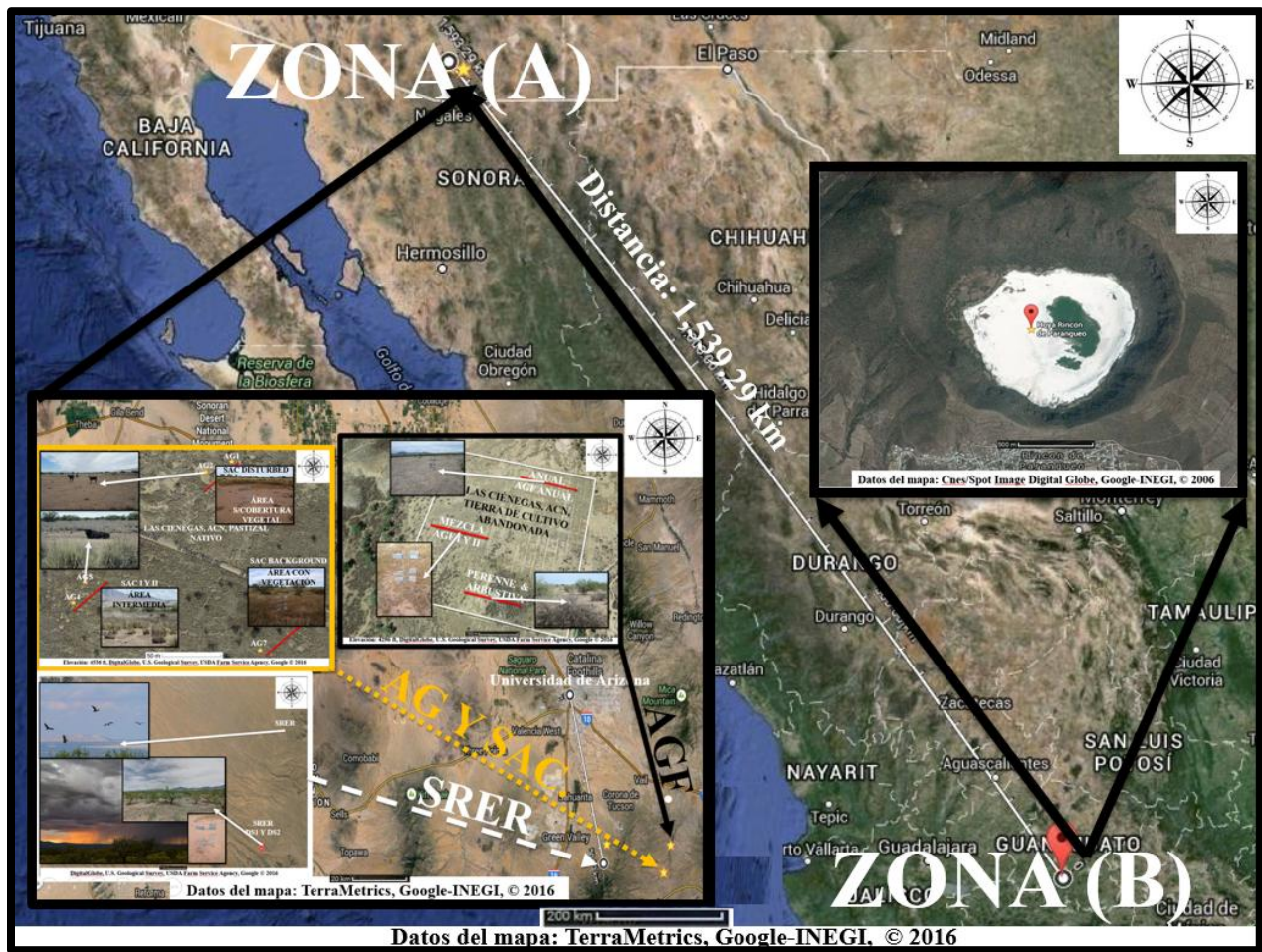


**Fig. 9. Muestreador BSNE**



**Cuadro 3. Muestras colectadas (PA, BC y MB)**

<b>TIPO</b>	<b>MUESTRA</b>	<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>COORDENADAS</b>
<b>POLVO ATMOSFÉRICO (PA)</b>	(SAC)	LAS CIENEGAS NATIONAL CONSERVATION AREA	31°45.589'N 110°36.827'W
	(Z-DIS)	LNCA	31°45.683'N 110°36.714'W
	(Z-BCKG)	LNCA	31°45.536'N 110°36.692'W
	(AGF)	SANTA RITA EXPERIMENT RANGE	31°49'56.82''N 110°34'59.42''W
	(DS1)(DS2)	SRER	31°47'9.68''N 110°50'57.76''W
<b>BIOCOSTRAS (BC)</b>	(AG1)	LNCA	31°45.683'N 110°36.714'W
	(AGC1)	LNCA	31°45.683'N 110°36.714'W
	(AG2)	LNCA	31°45.675'N 110°36.734'W
	(AG4)	LNCA	31°45.573'N 110°36.836'W
	(AG5)	LNCA	31°45.589'N 110°36.827'W
	(AG7)	LNCA	31°45.536'N 110°36.692'W
<b>MICROBIALITAS (MB)</b>	(MB)	LAGO CRÁTER RINCÓN DE PARANGUEO	20°43.14'N 101°24.81'W



Mapa 2. Zonas de estudio: (A) Desierto de Sonora; y (B) Lago-Cráter Rincón de Parangueo

---

## 7.4 Módulos experimentales

### 7.4.1 Análisis elemental

Con diferentes técnicas, de acuerdo a la normatividad EPA (Environmental Pollution Agency), se analizaron, las muestras, para conocer los elementos químicos que en interacción con las cianobacterias, pudieran ser potenciales nutrientes:

- Combustión y digestión, para conocer la concentración de carbono y nitrógeno, en un analizador elemental (Perkin Elmer modelo 2400 II; IGL-UNAM) y la concentración de fósforo por espectrometría de emisión atómica (ICPOES Perkin Elmer 8700 a 214.91 nm). Así como la concentración total de carbono orgánico e inorgánico en un analizador de carbono (TIC-TOC; Thermo scientific HiperTOC; IGL-UNAM).
- Espectrometría de masas por inducción de plasma para conocer la concentración de elementos menores y traza, como lantánidos y actínidos (Li, Be, P, Sc, Ti, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Th y U) con (QICPMS modelo Agilent Technologies, 7500CE; IGL-UNAM).
- Difracción de Rayos-X, para conocer la composición y estructura de la mineralogía, con difractómetro (Empyrean-Panalytical Technologies, Tubo de Cobre de foco fino, y detector PIXCEL3D; IGL-UNAM).
- Fluorescencia de Rayos-X, para conocer la concentración de elementos mayores y menores (Si, Al, Fe, Ti, Ca, K, Cd, Th, Zr, Y, Sr, Rb, Zn, Cu, Ba, P, Cr y S). (Rigaku Primus II; IGL-UNAM).

**7.4.2. Aislamiento y cultivo de cianobacterias.**

Una vez en el laboratorio y bajo condiciones estériles, fragmentos de biocostras y microbialitas, fueron hidratados con agua destilada para promover su crecimiento. A partir de estos, se realizaron dos cultivos, en 1 litro de Medio (BG11 + Cicloheximida) (Cuadro 4), se mantuvieron los cultivos en una plataforma (Shaker SK-7, Lab. Companion), durante aproximadamente cuatro meses, en un matraz Erlenmeyer, con agitación y velocidad constante de 120 ciclos por minuto (Fig. 10). Esto para producir bioma suficiente para los experimentos siguientes.

<b>Cuadro 4. Medio BG11</b>		
<b>NaNO<sub>3</sub></b>		1.5 g
<b>K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub></b>		0.04 g
<b>MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O</b>		0.075 g
<b>CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O</b>		0.036 g
<b>Ácido cítrico</b>		0.006 g
<b>Citrato de Amonio Férrico</b>		0.006 g
<b>EDTA (Sal disodio)</b>		0.001 g
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>		0.02 g
<b>Mezcla de Metales Traza A5</b>		
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	<b>2.86 g</b>	1.0 ml
<b>MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O</b>	<b>1.81 g</b>	
<b>ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O</b>	<b>0.222 g</b>	
<b>NaMoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O</b>	<b>0.39 g</b>	
<b>CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O</b>	<b>0.079 g</b>	
<b>Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</b>	<b>49.4 mg</b>	
<b>Agua Destilada</b>	<b>1.0 L</b>	
<b>Agua Destilada</b>		1.0 L
<b>pH</b>		7.1
<b>Esterilización en autoclave</b>		15 min, a 120 °C y 20 lb de presión



**Fig. 10. Aislamiento de cianobacterias.**

### 7.4.3 Tratamientos de cianobacterias con polvo atmosférico

Una vez alcanzado un desarrollo suficiente, se lavaron los cultivos de biomasa con agua destilada, para que el BG11 no alterará los posteriores tratamientos nutrimentales. Después se agregaron 1 mL de cianobacterias de (biocostras y microbialitas), a cajas Petri con agar estéril y sin nutrientes, como sustrato que promueva el deslizamiento de cianobacterias. A continuación fueron administradas con 5 alícuotas de polvo (0.015 g, 0.03 g, 0.06 g, 0.12 g y 0.24 g), como tratamientos de reacción (para verificar si efectivamente el polvo beneficia el desarrollo de cianobacterias) y fueron hidratadas con 2 mL de agua destilada (Fig. 11). Cada tratamiento se realizó con sus respectivos controles: ambientales, microbiológicos y nutrimentales, por triplicado para eliminar interpretaciones erróneas, derivadas de los efectos desconocidos en organismos que sean inmunes a los tratamientos o de inconsistencias provenientes tanto de la manipulación como de reacciones adversas e inesperadas entre los reactivos y las partículas reactantes (Fig. 13). Los tratamientos se manipularon en campana de flujo laminar y las cianobacterias de microbialitas fueron cultivadas por 33 días en cámara de cultivo, mientras que las cianobacterias de biocostras por 50 días en mesas de cultivo del invernadero (Fig. 12).

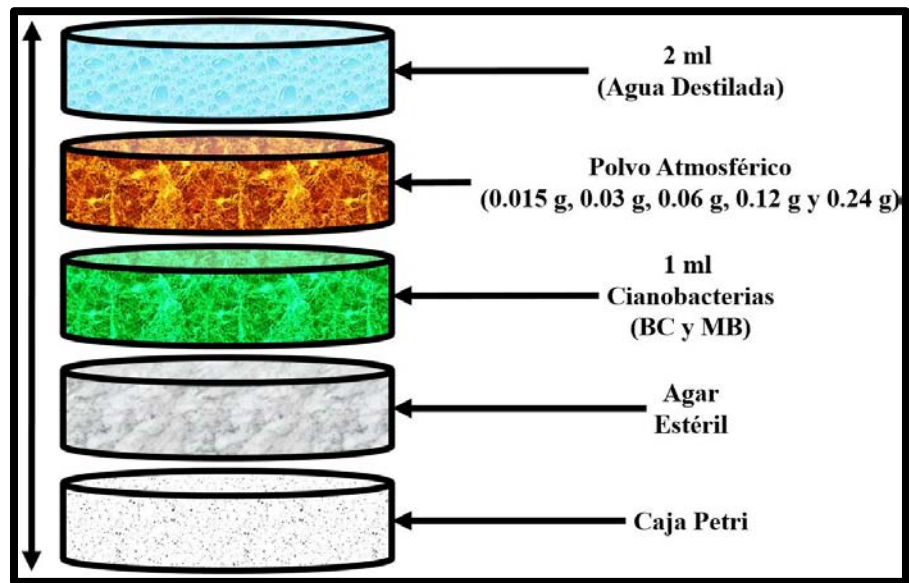


Fig. 11. Tratamiento en capas



Fig. 12. Cultivos en el Invernadero, Instituto de Geología.

















	(CMB+PAE)		(CBC+AGF)	
	(1x)		(7x)	
Controles (3x)	Agar		Agar	
	1 g PA-E		1 g AGF	
	1 ml CMB		1 ml CBC	
Tratamientos (3x)	2 ml (CMB) + 0.015 g		2 ml (CBC) + 0.015 g	
	2 ml (CMB) + 0.03 g		2 ml (CBC) + 0.03 g	
	2 ml (CMB) + 0.06 g		2 ml (CBC) + 0.06 g	
	2 ml (CMB) + 0.12 g		2 ml (CBC) + 0.12 g	
	2 ml (CMB) + 0.24 g		2 ml (CBC) + 0.24 g	

Fig. 13. Tratamientos.

#### 7.4.4. Estimación de biomasa.

Para analizar el desarrollo de las cianobacterias, se utilizó a la clorofila ( $\alpha$ ), como indicador para estimar la biomasa producida, esto según el principio donde (La biomasa es proporcional a la concentración de clorofila), (Formula 1). Por lo tanto si la clorofila se incrementa, la biomasa también se incrementa según teoría e investigaciones de (Beraldi & Garcia Pichel, 2011).

$$B = \left( \frac{\sqrt{CA^2}}{CB} \right) (P)$$

**Fórmula 1. Para estimar biomasa a partir de clorofila. B: biomasa, CA: clorofila con peso desconocido, CB: clorofila con peso conocido y P: peso de CB**

Por lo que se procedió a estimar la biomasa, por dos métodos, indirecto cualitativo (fluorescencia de clorofila) y directo cuantitativo (extracción de clorofila)

##### 7.4.4.1. Fluorescencia de clorofila

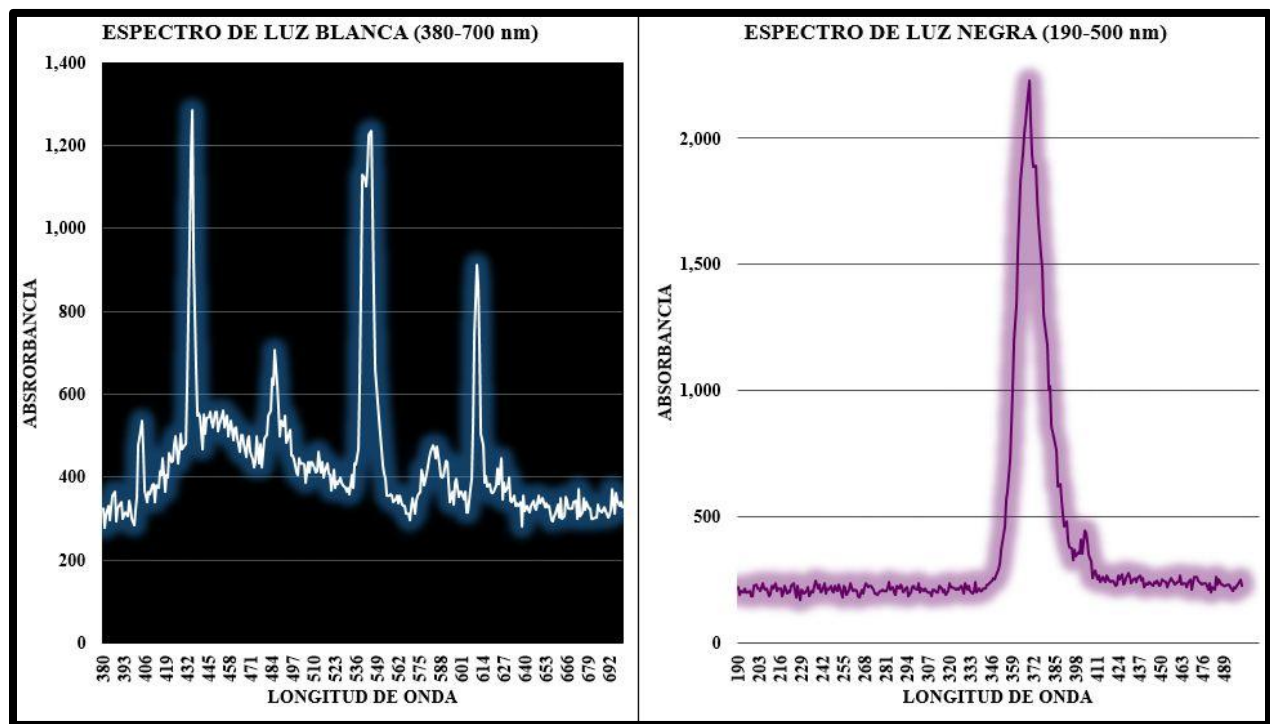
Este análisis condujo a la innovación de nuevas aplicaciones experimentales, donde se registró la intensidad de la clorofila por su fluorescencia (Fig. 14). Para ello se realizó fluorimetría de dos espectros (Luz blanca y Luz "negra" UV) con un fluorómetro (Fluorolog II, Spex, monocromador de 0.34 m y detector fotomultiplicador Hamamatsu R928, donde la luz es transmitida al monocromador de detección mediante fibra óptica).

La incidencia de energía lumínica blanca (400-700 nm) en cianobacterias, produce la captura de energía de 400 a 500 nm (azul), 600 a 700 nm (roja) y reflejan 500-600 nm (verde). La incidencia UV (300-400 nm) sobre cianobacterias, refleja 600-700 nm (Rojo cercano). Con estos espectros se eligió a la (luz blanca con 298 lúmenes) como la fuente de luz más adecuada en registrar la expresión de clorofila ( $\alpha$ ), para montarla en un sistema fotográfico.



El sistema fotográfico (una caja de vinil negro (para producir oscuridad), iluminada con luz blanca y usando una cámara digital Fujifilm de 14 megapíxeles, modelo FinePix XP30, con las siguientes especificaciones: color estándar, ISO-100: automático, macro: activado, tamaño de imagen 14M, 4:3 (4320 x 3240), calidad fina, con punto  $f/4.5$ , exposición de  $1/90$ s, distancia focal: 9 mm, apertura máxima de 3.9 y flash desactivado. Con ese sistema, se registró el desarrollo de cianobacterias con polvo vs sin polvo.

Los registros fueron procesados con un computador Hewlett Packard (de doble procesador a 3.3 GHz, 1 Tb de disco duro y 64 Gb de RAM), por software Adobe Photoshop CS6, para intensificar áreas con gamas (verdes-azules) expresados en luz blanca y (rojos-morados) en luz negra, correspondientes a la fluorescencia de clorofila (Fig. 15). Las áreas fueron seleccionadas con software, Image J de FIJI-National of Institutes of Health. Para proceder con la realización de un gráfico de biomasa de las diferentes biotas con tratamiento vs tiempo.



**Fig. 14.** Evaluación por fluorometría de los espectros que activan la fluorescencia de clorofila.

#### 7.4.4.2. Extracción y espectrofotometría de clorofila

Los pigmentos de las cianobacterias son diversos, sin embargo se enfocó extraer la clorofila ( $\alpha$ ), un pigmento útil y estable. Concluidos los tratamientos experimentales, el contenido de cada caja Petri se vació en tubos cónicos falcón de 50 mL. Aforando con 15 mL de metanol (disolvente altamente polar), para macerar la muestra con agitador de vidrio y espátula de disección (beale) de acero inoxidable. Después el contenido se transfirió a tubos cónicos falcón de 15 ml. Cada tubo se resguardo con aluminio en gradilla de poliestireno, en un contenedor frío, para proteger a la clorofila de la degradación fotónica y térmica, mientras se realizaba su extracción a - 4 °C, durante 48 horas.

Tras la extracción los tubos se transportaron en un contenedor frio al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Donde se centrifugaron a 4500 rpm, durante 30 min, en una centrífuga (Eppendorf 5804), para precipitar los sedimentos (polvo y agar) y obtener un sobrenadante con clorofila.

Los sobrenadantes de microbialitas, se colocaron en cubetas de cuarzo para su lectura de 330 nm a 900 nm en barridos a intervalos de 1 nm de longitud de onda, en un espectrómetro, (Elyptica 2000), mientras que los de biocostras fueron leídos de 450 nm a 850 nm en el espectrofotómetro (Genesys 10S UV-VIS UV, Thermo scientific), (Fig 16).

Se construyó un estándar a partir de absorbancias con biomasa conocida, esto para calcular la ecuación para convertir clorofila ( $\alpha$ ) en biomasa en gramos (Cuadro 5). Para ello en una balanza analítica se pesaron (0.25 g, 0.5 g y 1 g de cianobacterias de biocostras y microbialitas), procediendo a extraer y leer la absorbancia de su clorofila, de 190 nm (UV) a 1100 nm (infrarrojo) de longitud de onda.

<b>Cuadro 5. Estándar</b>	
<b>Peso</b>	<b>Absorbancia a 665 nm</b>
<b>2 g</b>	<b>3.436</b>
<b>1 g</b>	<b>1.718</b>
<b>0.5 g</b>	<b>0.859</b>
<b>0.25 g</b>	<b>0.4295</b>
<b>0.125 g</b>	<b>0.21475</b>

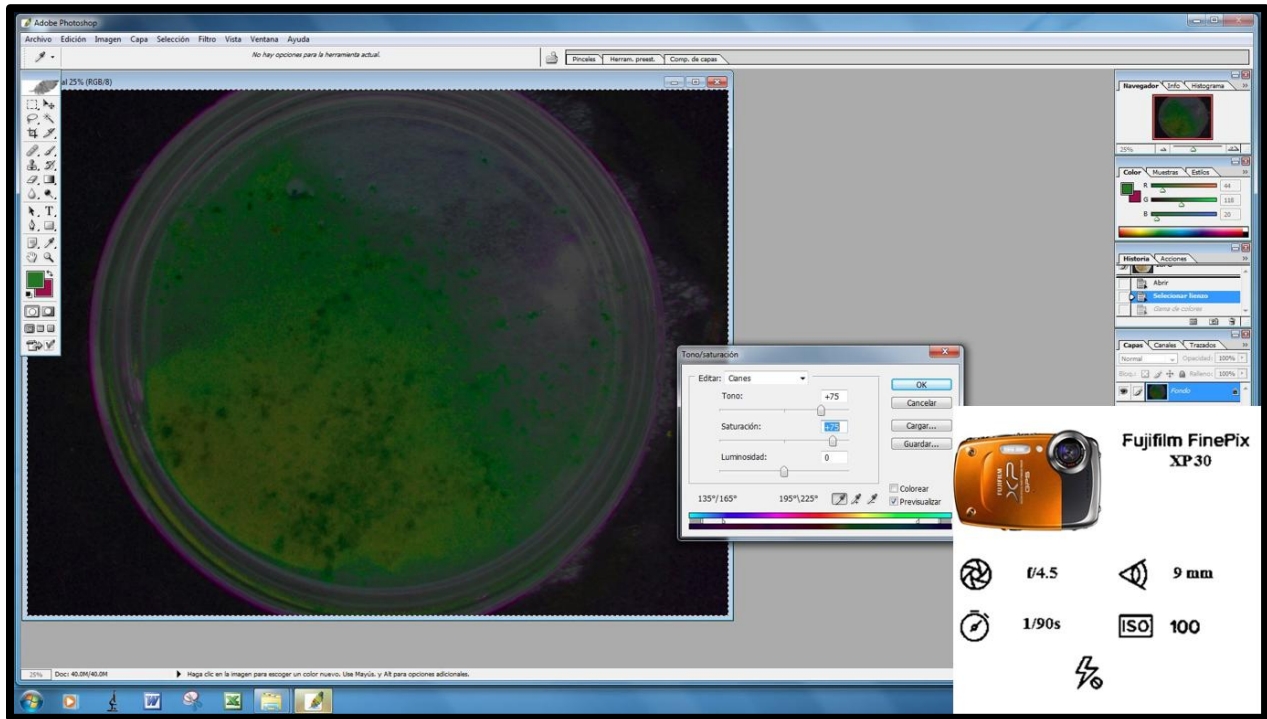


Fig. 15. Selección de gamas en PSCS6 (izquierda) y cámara fotográfica (derecha).

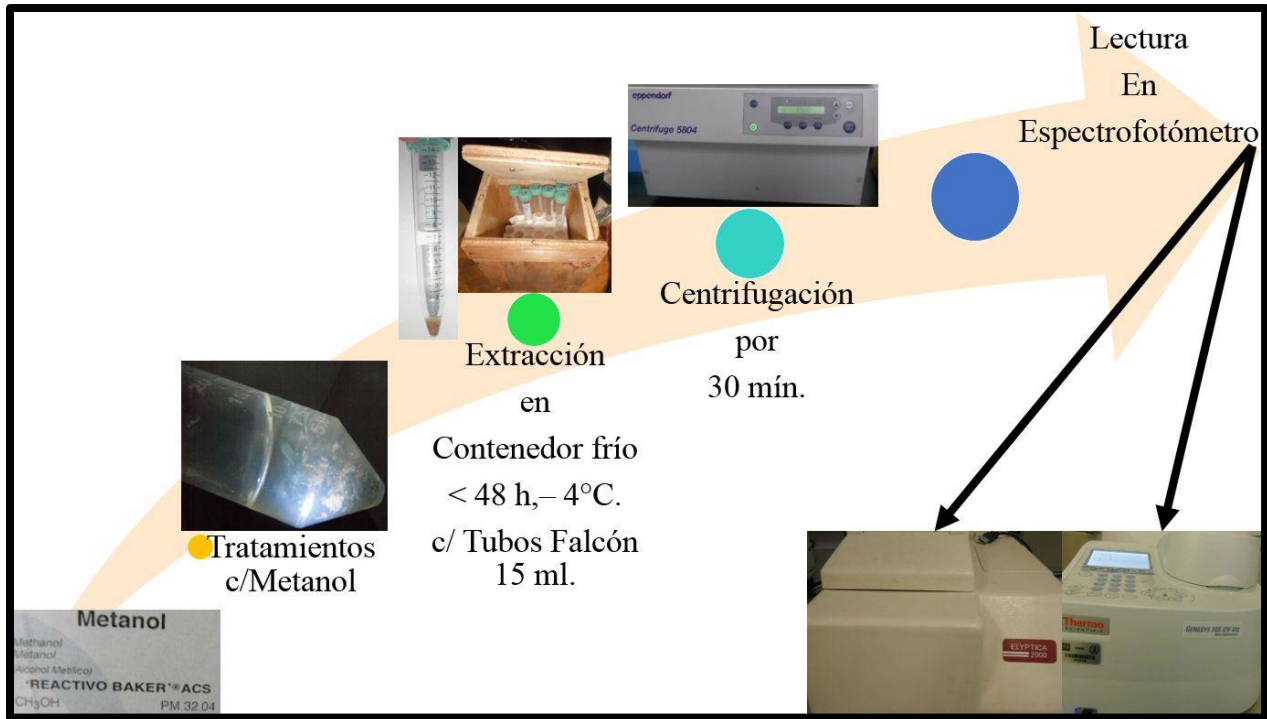


Fig. 16. Procesos desde la extracción hasta la espectrofotometría.

#### 7.4.5. Microscopía de cianobacterias de microbialitas, biocostras y polvo atmosférico

Se utilizó un microscopio de epifluorescencia (Axio Imager M2, Zeiss, con escáner laser LSM 700 y Apotome), así como un microscopio estereoscópico (Axio Zoom V.16, Zeiss), para observar la diversidad y determinar las cianobacterias de microbialitas y biocostras a nivel género, en interacción con los tratamientos de polvo atmosférico. Además se realizó tinción con naranja de acridina, en algunas muestras, para observar la fluorescencia de las estructuras nucleicas de las cianobacterias, esta se desarrolló según Técnicas Microbiológicas de la UPIBI, IPN (Fig. 17). Dichas observaciones, se fotografiaron con la cámara AxioCam ICc 5, de alta resolución, y se procesaron con el software, ZEN blue edition.

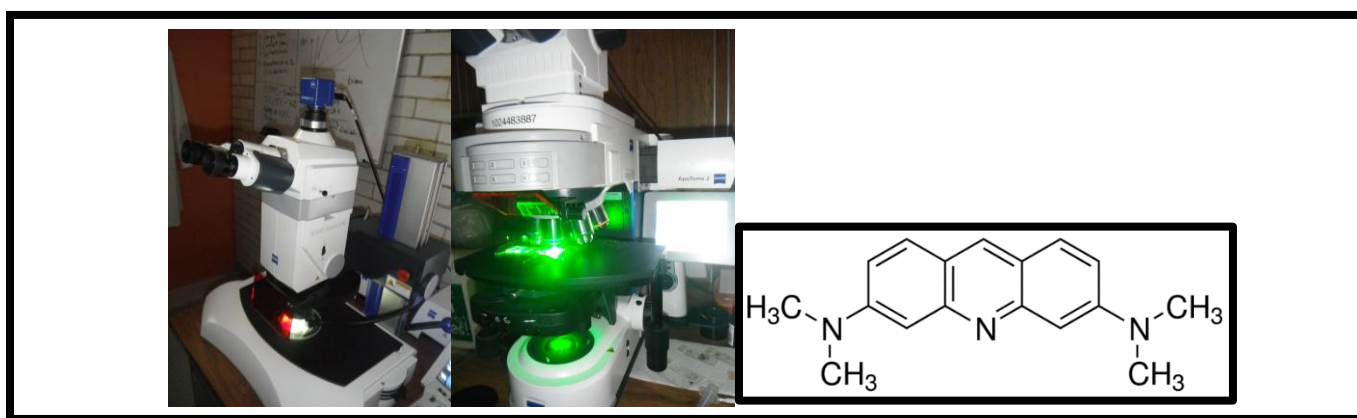


Fig. 17. Microscopio estereoscópico (izquierda), epifluorescencia (centro), naranja de acridina, Sigma-2016, (derecha).

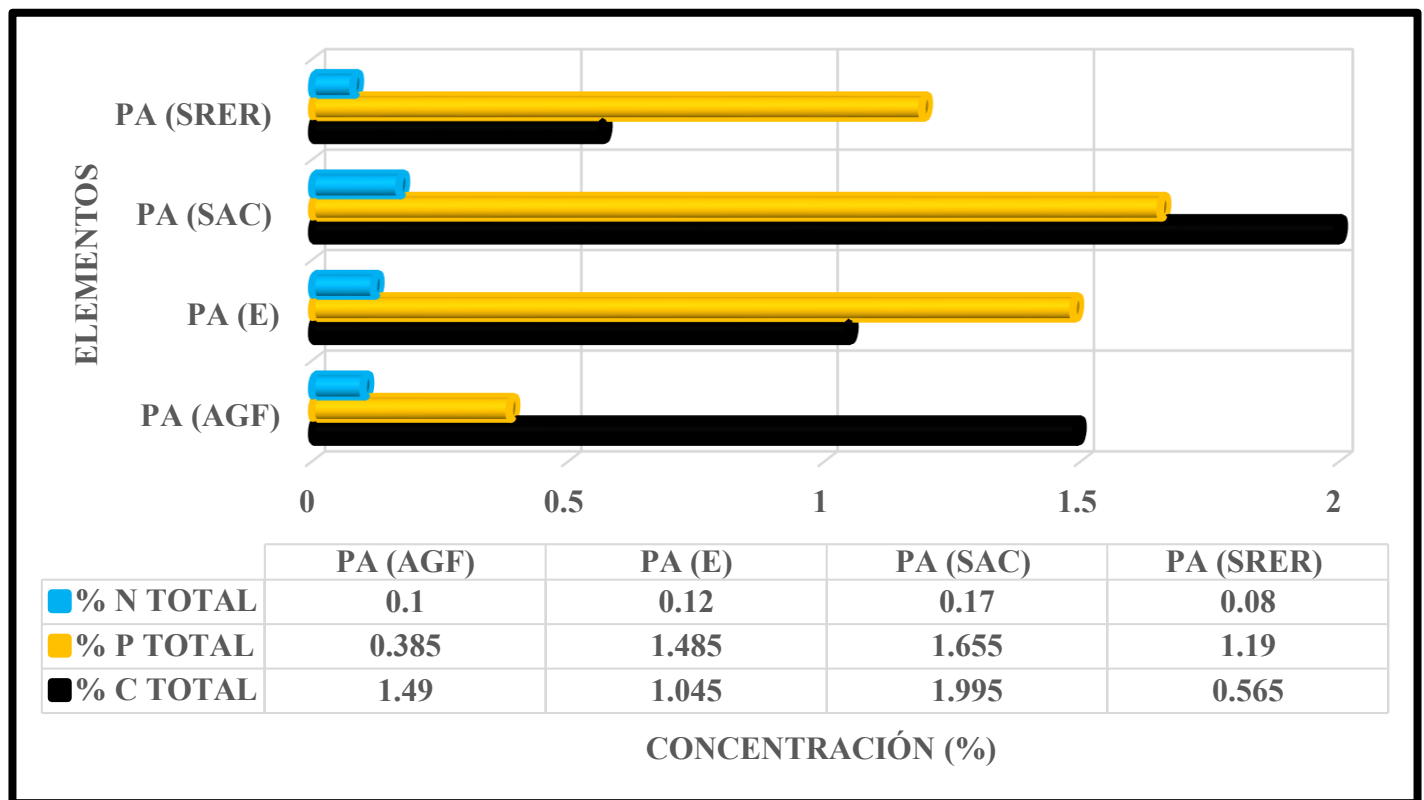
#### 7.4.6. Análisis y diseño estadístico

La estadística usó un nivel de significancia del 5%. Los resultados de cianobacterias de microbialitas, fueron sometidos a tratamiento estadístico (ANOVA) de 2 factores, de una entrada (Tratamiento de cianobacterias con polvo vs sin polvo), con comprobación de los contrastes por coeficientes. Los resultados de cianobacterias de biocostras se sometieron a (ANOVA) de doble entrada (Tratamiento de cianobacterias con polvo vs sin polvo en el tiempo), con interacción y efecto entre factores. Estos análisis se realizaron para determinar si existe, una correlación significativa entre la dosis de polvo administrado y el crecimiento de las colonias microbianas. Así también se hizo una correlación entre el Polvo Atmosférico Terrestre vs el Polvo Atmosférico de Marte, para analizar diferencias elementales. Estos análisis estadísticos de acuerdo a Guerra (2009), Marques *et al.* (2009) y Castilla (2011).

## 8. RESULTADOS

### 8.1. Relación de carbono, fósforo y nitrógeno del polvo atmosférico

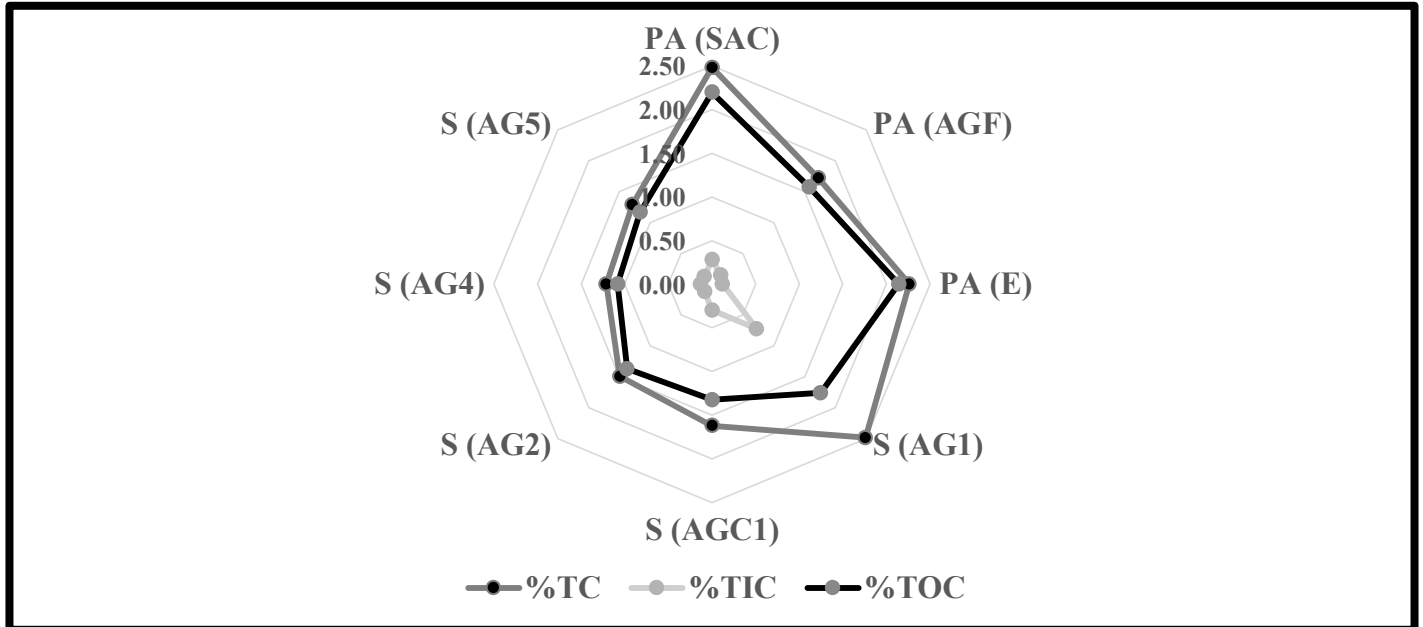
El carbono se presentó como el elemento con las mayores concentraciones, en dos de las cuatro muestras SAC y AGF, El fósforo se presentó con las mayores concentraciones en E y SRER, El nitrógeno se encontró con la menor concentración respecto los otros dos elementos, en todas las muestras analizadas. Así que de acuerdo a las muestras relacionadas con sus concentraciones tenemos que la muestra AGF contiene mayores concentraciones de carbono que E, pero la muestra E presenta mayores concentraciones de fósforo que AGF, y por último E está más enriquecido de nitrógeno que AGF (Gráfica 1 y tabla 1).



**Gráfica 1 y Tabla 1. Determinación (%) de carbono (C), fósforo (P) y nitrógeno (N) en polvo atmosférico.**

### 8.2. Diferencias en el carbono de polvo atmosférico y suelo de biocostras.

Las muestras y sus concentraciones fueron para carbono orgánico total: SAC1 > INC > AG1 > AGF > AG2 > AGC1 > AG5 > AG4. Para carbono inorgánico total: AG1 > AGC1 > SAC1 > AGF > AG4 > INC > AG2 > AG5 (Gráfica 2 y tabla 2).



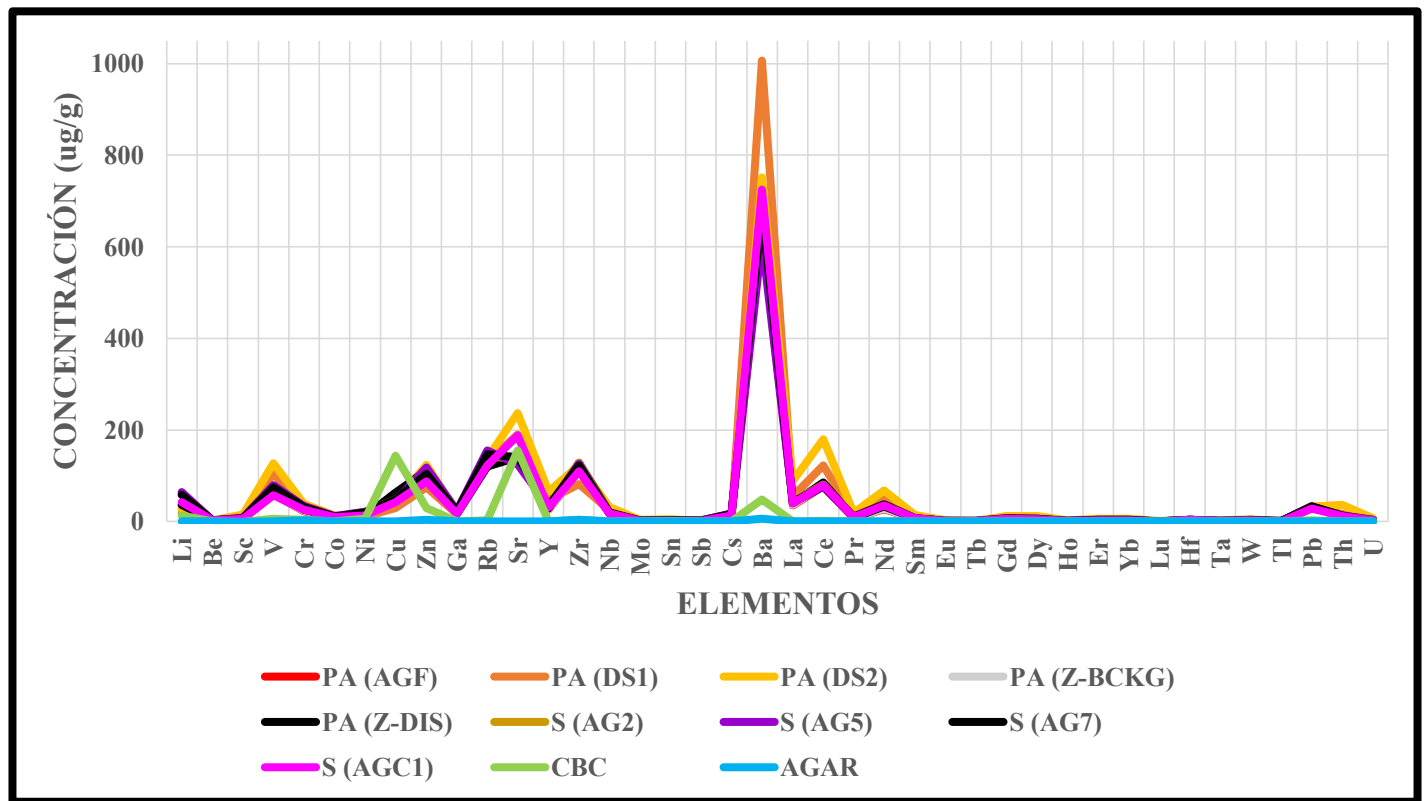
Gráfica 2. Determinación (%) del carbono orgánico e inorgánico por TIC-TOC, en polvo atmosférico (PA) y suelo de biocostras (S).

Tabla 2. Determinación (%) por TIC-TOC			
	%TC	%TIC	%TOC
PA (SAC)	2.48	0.28	2.20
PA (AGF)	1.72	0.15	1.58
PA (E)	2.26	0.12	2.14
S (AG1)	2.49	0.72	1.76
S (AGC1)	1.62	0.30	1.32
S (AG2)	1.49	0.12	1.37
S (AG4)	1.21	0.13	1.08
S (AG5)	1.29	0.12	1.16

### 8.3. Contraste de 42 elementos traza entre el polvo atmosférico, suelos de biocostras y cianobacterias de biocostras por ICPMS

De los 40 elementos analizados, tuvieron considerablemente las mayores concentraciones: (Ba, Sr, La, Zr, Ce, Cu, V, Zn, Nd). El control ambiental con solamente agar, se mantuvo en el eje de las x, con niveles de 0 (ug/g), por lo que no aporta cantidades considerables de nutrientes que afecten más que el mismo polvo atmosférico, en las cianobacterias. El polvo atmosférico presenta composiciones similares con el suelo de biocostras. El Ba, fue dominante, en el polvo y suelo, mientras que en cianobacterias de biocostras fue el Sr. El plomo y uranio están presentes en todas las muestras (Gráficas 3, 4 y 5).

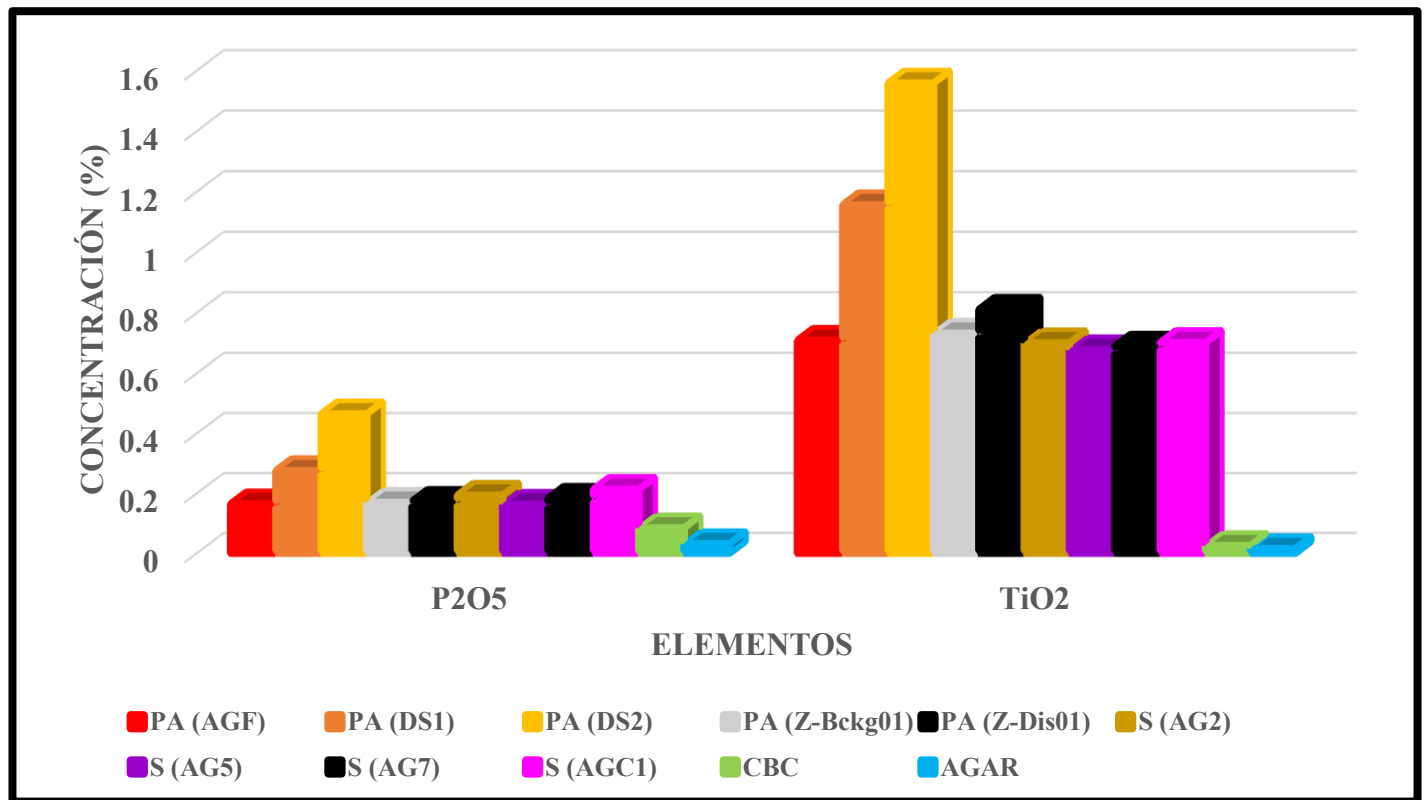
Las muestras en orden DS2, DS1 y AGF, presentaron las mayores concentraciones de Fósforo y Titanio, mientras que las muestras de suelo fueron las que presentaron las menores concentraciones de estos elementos y las cianobacterias contienen más fósforo que titanio.



Gráfica 3. Concentración (ug/g) de los elementos analizados por ICPMS, en el polvo atmosférico (PA), suelo de biocostras (S), cianobacterias de biocostras (CBC) y agar.

<b>Tabla. 3. Concentración (ug/g) de los elementos analizados por ICMPS</b>										
<b>ELEMENTO</b>	<b>Li</b>	<b>Be</b>	<b>Sc</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>
<b>PA (AGF)</b>	35.5219	2.22314	6.07884	59.3206	22.8979	8.37847	10.5363	59.8688	106.520	16.3863
<b>PA (DS1)</b>	19.2064	2.50606	10.8880	105.262	27.8480	10.9480	10.7763	29.3999	74.8061	16.7801
<b>PA (DS2)</b>	26.639	3.12335	15.8673	126.679	38.1739	12.5625	13.2480	44.8007	123.456	20.0149
<b>PA (Z-B)</b>	36.5156	2.32389	6.54176	59.7526	23.7983	7.95510	10.3959	46.9080	90.8295	16.2687
<b>PA (Z-DIS)</b>	36.3118	2.38459	6.52459	64.5285	26.3437	7.95213	11.4830	63.4891	110.771	16.8216
<b>S (AG2)</b>	60.2312	2.91215	7.71393	76.8295	33.5753	11.0065	20.7862	47.8452	103.929	22.8650
<b>S (AG5)</b>	64.2303	3.07670	7.96257	79.5145	34.4320	11.5393	21.8175	44.3882	118.131	24.0864
<b>S (AG7)</b>	58.8032	2.85119	7.46845	74.4380	31.6132	10.6565	20.0888	47.6837	103.762	22.4598
<b>S (AGC1)</b>	42.0090	2.18453	6.29277	57.5881	25.3836	9.11426	12.8472	42.2897	88.1034	16.7676
<b>CBC</b>	12.5458	0.09634	-0.8111	5.71360	3.41390	0.34495	6.09145	143.862	29.2201	0.14505
<b>AGAR</b>	0.30235	0.07680	-0.8959	0.53111	2.38761	0.06378	0.13931	0.36154	3.38569	-0.0244
<b>ELEMENTO</b>	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>
<b>PA (AGF)</b>	120.489	143.583	25.5165	112.463	17.4760	1.78875	2.13088	2.20362	16.5662	686.161
<b>PA (DS1)</b>	129.925	190.043	46.6041	81.5822	24.3379	1.79455	4.18961	1.54448	5.77866	1006.36
<b>PA (DS2)</b>	137.225	236.581	64.9632	123.101	31.8212	3.28898	5.49480	1.94206	7.02688	751.6
<b>PA (Z-B)</b>	135.521	146.780	25.6760	115.016	18.5573	1.04812	2.03320	2.28625	17.2046	698.652
<b>PA (Z-DIS)</b>	120.569	140.005	28.6595	128.883	19.8558	2.25075	2.34495	2.43315	16.6215	655.548
<b>S (AG2)</b>	143.941	135.285	34.4910	127.920	17.9205	1.71219	2.56431	1.94862	16.4654	631.452
<b>S (AG5)</b>	154.945	124.998	32.7847	125.713	17.2693	1.71561	2.51869	1.98874	18.0555	616.790
<b>S (AG7)</b>	147.002	140.335	34.3488	122.378	17.9932	1.77284	2.44549	1.93528	16.2004	682.070
<b>S (AGC1)</b>	122.682	187.689	30.5625	109.922	17.2589	1.54373	1.98705	1.56673	13.4456	724.327
<b>CBC</b>	2.57314	154.875	0.45487	3.78683	0.32491	0.20868	1.17989	0.13362	0.87898	47.8590
<b>AGAR</b>	0.30478	-0.2189	-0.0467	4.26328	0.06489	-0.0405	0.52733	0.05075	-0.0881	5.59781
<b>ELEMENTO</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Tb</b>	<b>Gd</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>
<b>PA (AGF)</b>	34.9396	76.6173	7.6176	27.6415	6.14689	1.21404	0.79468	5.27019	4.53912	0.94428
<b>PA (DS1)</b>	55.4146	122.440	12.8723	47.9987	10.4088	2.07423	1.41038	8.83035	8.28548	1.66288
<b>PA (DS2)</b>	89.3350	180.166	18.5181	67.8857	14.6606	2.71571	1.95948	12.1878	11.7567	2.17941
<b>PA (Z-B)</b>	35.9601	79.2160	7.78915	27.8959	6.19536	1.20909	0.79374	4.98156	4.70016	0.91999
<b>PA (Z-DIS)</b>	40.0461	85.6756	8.65329	32.4118	6.98030	1.34815	0.88554	5.91988	5.25656	1.04705
<b>S (AG2)</b>	43.6798	81.2286	10.3275	38.3010	7.63775	1.53584	1.05054	6.75756	6.18160	1.17971
<b>S (AG5)</b>	41.3325	76.3882	9.91030	36.4142	7.29210	1.46066	1.0037	6.30656	5.93489	1.17370
<b>S (AG7)</b>	42.7037	78.3137	10.3160	38.0919	7.69218	1.55250	1.02739	6.84015	6.16965	1.21526
<b>S (AGC1)</b>	39.5417	79.4882	9.41125	34.8766	6.88976	1.38447	0.92867	6.07485	5.40500	1.07418
<b>CBC</b>	0.45371	1.27380	0.10176	0.81811	0.09285	0.04261	0.02051	0.14404	0.01901	0.01862
<b>AGAR</b>	-0.0053	0.51249	0.00263	0.42300	0.00625	0.01972	0.00782	0.06251	-0.0550	0.00341
<b>ELEMENTO</b>	<b>Er</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Th</b>	<b>U</b>
<b>PA (AGF)</b>	2.7122	2.68559	0.41309	3.64798	1.27448	2.88415	0.77042	33.8368	11.7839	3.44459
<b>PA (DS1)</b>	4.7599	4.64591	0.72931	2.98354	1.53437	2.90931	0.68618	30.5167	16.2861	4.89749
<b>PA (DS2)</b>	6.4070	6.25220	0.95801	4.03478	2.26274	4.73368	0.67288	32.7235	36.2900	6.82669
<b>PA (Z-B)</b>	2.7374	2.82810	0.42429	3.62520	1.33886	2.89074	0.76761	29.2057	13.1636	3.40923
<b>PA (Z-DIS)</b>	2.9536	3.08111	0.46303	4.17544	1.43047	3.45484	0.77661	33.2266	12.5575	3.77334
<b>S (AG2)</b>	3.3983	3.31615	0.49591	3.89295	1.31710	2.86355	0.91826	33.4339	13.7310	2.99363
<b>S (AG5)</b>	3.3242	3.24879	0.48843	3.85152	1.26785	2.46539	0.96813	33.3723	13.6754	2.78725
<b>S (AG7)</b>	3.3533	3.36203	0.49448	3.82259	1.31932	2.43803	0.92482	32.6438	13.4639	2.99924
<b>S (AGC1)</b>	3.0405	3.02374	0.44414	3.39568	1.22910	2.42467	0.72956	28.5100	12.2662	2.98393
<b>CBC</b>	-0.0057	0.00083	0.00569	0.03815	0.01560	0.060655	0.01937	2.30194	0.06480	0.13894
<b>AGAR</b>	-0.0502	-0.04397	-0.00158	0.06076	-0.00041	0.0308	0.00705	0.819643	-0.00896	0.012629



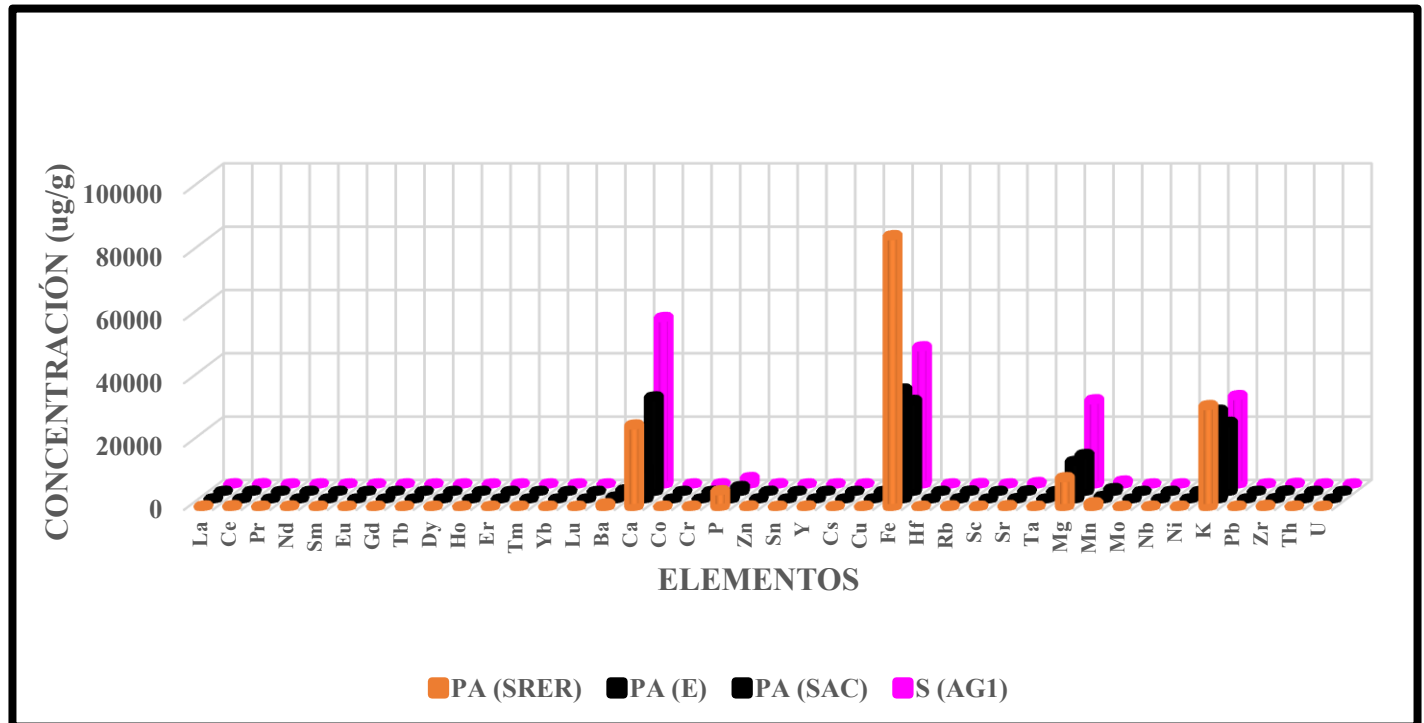


Gráfica 4. Concentración (%) de los elementos analizados por ICPMS, para el polvo atmosférico (PA), suelo de biocostras (S), cianobacterias de biocostras (CBC) y agar.

Tabla. 4. Concentración (%) de los elementos analizados por ICPMS		
	%P2O5	%TiO2
PA (AGF)	0.165092	0.709067
PA (DS1)	0.275896	1.156781
PA (DS2)	0.46564	1.559094
PA (Z-Bckg01)	0.17037	0.732654
PA (Z-Dis01)	0.17361	0.811331
S (AG2)	0.193878	0.700878
S (AG5)	0.163976	0.677978
S (AG7)	0.184078	0.689882
S (AGC1)	0.21364	0.701735
CBC	0.084902	0.025863
AGAR	0.032002	0.015805

### 8.4. Análisis de 40 elementos en polvo atmosférico y suelo de biocostras por ICPMS

Los elementos con concentraciones más notables fueron: Fe, Ca, K, Mg y P. Donde SRER, manifestó más hierro, potasio y fósforo, AG1 más calcio y magnesio.

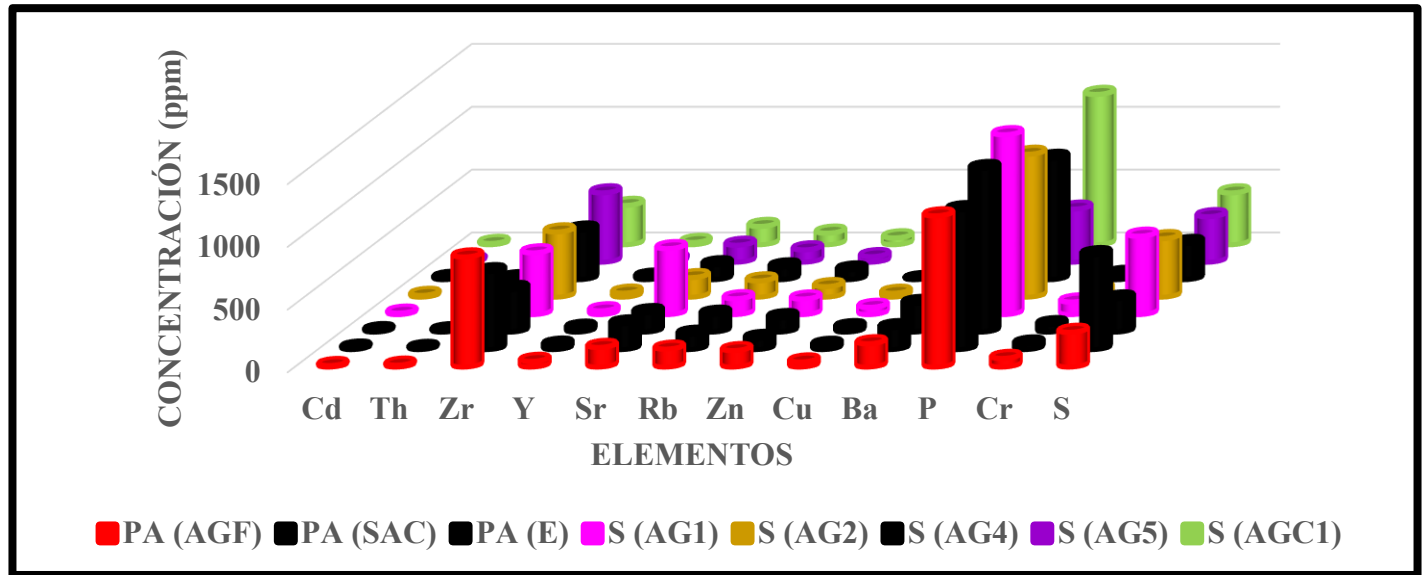


Gráfica 5. Elementos analizados por ICPMS en polvo atmosférico (PA) y suelo de biocostras (S).

ELEMENTOS	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
PA (SRER)	100.49	193.12	23.11	84.6	16.31	2.98	16.37	2.4	13.87	2.97
PA (E)	42.33	78.51	9.42	34.61	6.78	1.37	6.68	0.96	5.35	1.11
PA (SAC1)	33.68	70.68	7.52	27.94	5.57	1.06	5.36	0.78	5.29	0.91
S (AG1)	38.5	73.82	8.72	32.43	6.4	1.19	6.35	0.86	4.75	0.96
ELEMENTOS	Er	Tm	Yb	Lu	Ba	Ca	Co	Cr	P	Zn
PA (SRER)	8.55	1.23	8.26	1.31	782.43	25,694.67	11.23	45.85	4,908.81	74.94
PA (E)	3.2	0.46	3.13	0.48	599.43	9,579.54	6.46	24.86	1,624.09	54.74
PA (SAC1)	3.17	0.38	3.16	0.49	548.58	29,839.05	6.11	21.05	1,515.75	32.04
S (AG1)	2.78	0.4	2.75	0.43	521.31	52,593.30	10.42	45.4	2,012.86	52.03
ELEMENTOS	Sn	Y	Cs	Cu	Fe	Hf	Rb	Sc	Sr	Ta
PA (SRER)	5.95	78.21	6.42	32.69	85,510.93	9.27	137	21.03	221.27	1.76
PA (E)	2.1	31.04	14.73	37.67	34,699.23	4.09	121.61	8.99	131.63	1.5
PA (SAC1)	1.23	29.69	7.63	26.8	28,738.31	4.86	111.12	7.07	159.7	1.27
S (AG1)	2.12	24.63	9.63	51.42	43,330.87	5.6	102.5	9.36	417.37	1.53
ELEMENTOS	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	K	Pb	Zr	Th	U
PA (SRER)	9,039.49	1,101.79	2.35	30.98	13.85	31,820.33	39.12	271.6	44.02	7.67
PA (E)	11,876.86	815.41	1.82	18.36	9.71	27,984.68	32.82	119.83	12.51	3.11
PA (SAC1)	11,652.01	889.37	0.89	13.57	9.45	21,821.48	21.18	147.47	10.71	2.23
S (AG1)	26,594.77	912.78	0.98	16.84	22.41	27,910.63	28.6	169.83	14.71	2.64

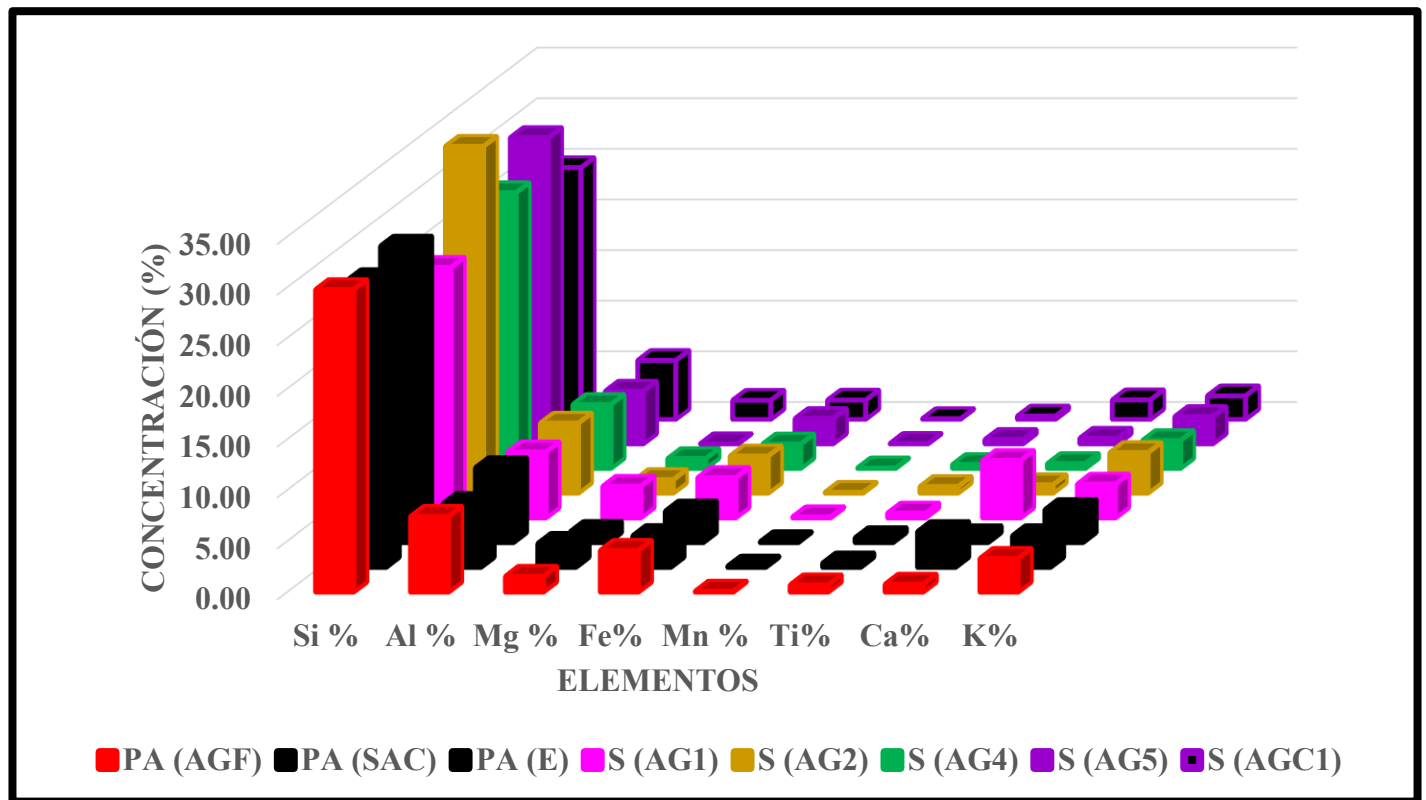
### 8.5. Elementos del polvo atmosférico y suelo de biocostras por XRF

AGF obtuvo la mayor concentración de (Zr), AG1 de (Sr y P) y SAC de (S). Se pueden encontrar diferencias, en cuanto a que elementos analizados por ICP-MS, no tienen la misma concentración por XRF, pero existe una buena aportación elemental por parte del polvo atmosférico. Las muestra AG2 presento la mayor cantidad de (Si y K), la muestra AGF obtuvo la mayor concentración de (Al, Fe y Ti), AG1 tiene la mayor concentración de (Mg y Ca), y SAC presenta mayor cantidad de (Mn). (Gráficas 6 y 7).



Gráfica 6. Concentración (ppm) de los elementos analizados por XRF, para polvo atmosférico (PA) y suelo de biocostras (S)

Tabla 6. Concentración (ppm) de los elementos analizados por XRF						
ELEMENTOS	Cd	Th	Zr	Y	Sr	Rb
PA (AGF)	12	15	878	45	156	143
PA (SAC)	12	9	621	35	204	122
PA (E)	11	10	340	31	155	142
S (AG1)	12	13	492	30	526	126
S (AG2)	14	10	520	31	155	129
S (AG4)	10	8	395	20	119	101
S (AG5)	12	6	552	23	135	98
S (AGC1)	10	5	313	18	145	92
ELEMENTOS	Zn	Cu	Ba	P	Cr	S
PA (AGF)	131	40	186	1205	69	277
PA (SAC)	89	34	174	1115	44	757
PA (E)	115	35	228	1303	59	264
S (AG1)	124	58	111	1433	100	625
S (AG2)	83	31	106	1138	63	466
S (AG4)	77	<LOD	214	966	42	289
S (AG5)	44	<LOD	182	423	50	363
S (AGC1)	54	<LOD	350	1195	20	412



Gráfica 7. Concentración (%) de los elementos analizados por XRF, para polvo atmosférico (PA) y suelo de biocostras (S).

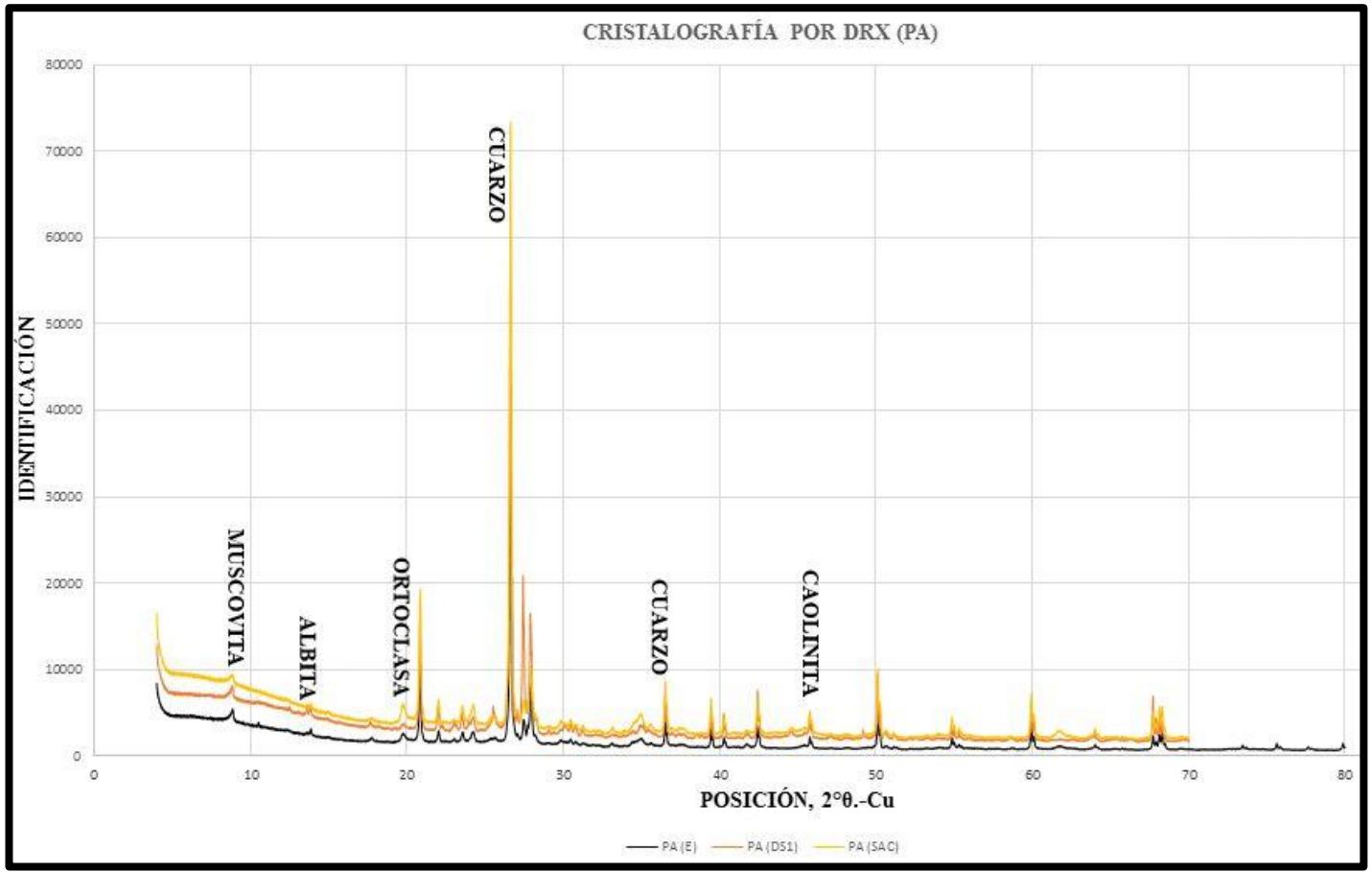
Tabla 7. Concentración de los elementos analizados por XRF.								
ELEMENTOS	Si %	Al %	Mg %	Fe%	Mn %	Ti%	Ca%	K%
PA (AGF)	29.77	7.41	1.55	4.09	0.09	0.70	0.77	3.30
PA (SAC)	28.33	6.23	2.35	3.10	0.12	0.42	3.50	3.10
PA (E)	29.22	7.34	1.08	3.09	0.08	0.48	0.66	3.23
S (AG1)	24.69	6.46	3.09	3.94	0.10	0.46	5.62	3.30
S (AG2)	34.22	6.88	1.32	3.64	0.07	0.64	0.81	3.98
S (AG4)	27.21	6.30	0.96	2.40	0.04	0.37	0.46	2.73
S (AG5)	30.23	5.19	<LOD	2.49	0.04	0.42	0.55	2.69
S (AGC1)	24.84	5.81	1.87	1.89	0.05	0.31	1.92	2.31

### 8.6. Cristalografía de polvo atmosférico

Todas las muestras de polvo tienen mineralogía similar, independientemente de su contenido de materia orgánica. Además existe predominancia de silicatos tipo cuarzo, esto indica que el polvo atmosférico se originó de fracciones arenosas, posiblemente de zonas áridas del desierto de Sonora. El feldespato de plagioclasa obtuvo composición intermedia ya que donde se identificaba albita, estaba contenida también anortita (Gráfica 8). La caolinita solo se identificó en la muestra E, otro mineral que solo fue encontrado en la muestra SRER, fue la flogopita, este mineral, también está presente en algunas condritas. Los tectosilicatos predominaron sobre los filosilicatos (Gráfica 8 y Tabla 8).

**Tabla 8. Minerales identificados por XRD**

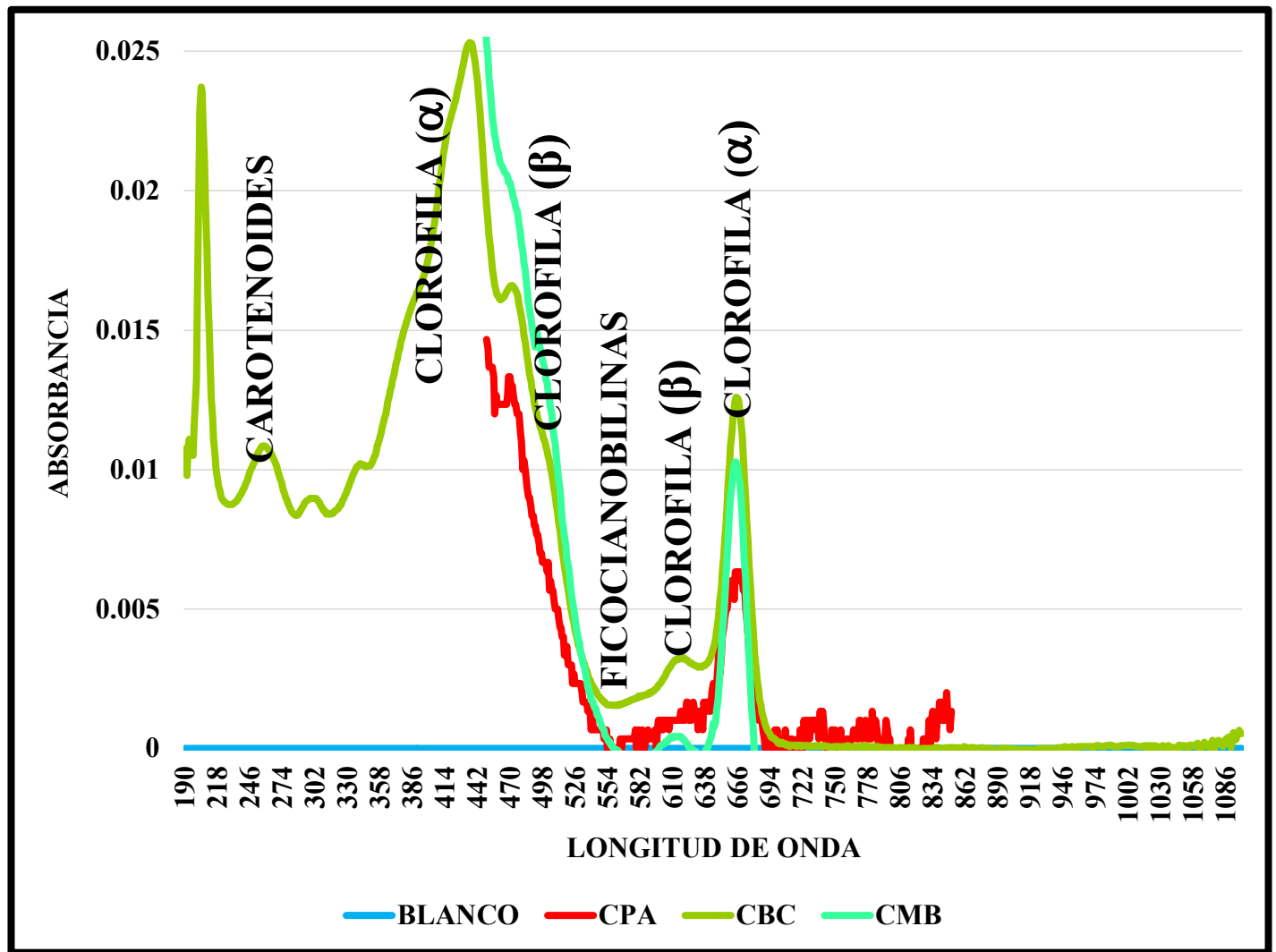
Minerales identificados		Semicuantificación (%)			
		AGF	E	SRER	
<b>Silicatos</b>					
<b>Filosilicatos</b>	<b>Caolinita: <math>Al_2Si_2O_5(OH)_4</math></b>		5%	5%	
	<b>Mica-Ilita</b>	<b>Flogopita: <math>K(Mg, Fe, Mn)_3Si_3AlO_{10}(F, OH)_2</math></b>			
		<b>Moscovita: <math>KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2</math></b>	11%	9%	
	<b>Tectosilicatos</b>	<b>Feldespato Plagioclasa Composición intermedia</b>	<b>Albita: <math>NaAlSi_3O_8</math></b>	29%	29%
<b>Anortita: <math>CaAl_2Si_2O_8</math></b>					
<b>Feldespatos potásicos</b>		<b>Ortoclasa: <math>KAlSi_3O_8</math></b>		13%	22%
<b>Cuarzo: <math>SiO_2</math></b>		60%	44%	45%	



Gráfica 8. Minerales identificados por XRD, en el polvo atmosférico

### 8.7. Pigmentos de cianobacterias

Esta espectrofotometría indica los pigmentos encontrados (clorofila ( $\alpha$ ), clorofila ( $\beta$ ), carotenoides y ficocianobilinas), para los tres diferentes grupos de cianobacterias. Es visible que la clorofila ( $\alpha$ ), es un pigmento de alta concentración, alta estabilidad y presente en la mayoría de cianobacterias de los diversos ecosistemas. Por lo que es un pigmento de confianza en luz blanca a los 665 nm, para su cuantificación experimental, mientras que en el UV no existe suficiente lectura para las tres muestras (Gráfica 9).



Gráfica 9. Espectrofotometría de los pigmentos de cianobacterias del polvo atmosférico (CPA-AGF), cianobacterias de biocostras (CBC) y cianobacterias de microbialitas (CMB).

## 8.8. Fluorescencia de biomasa en los tratamientos

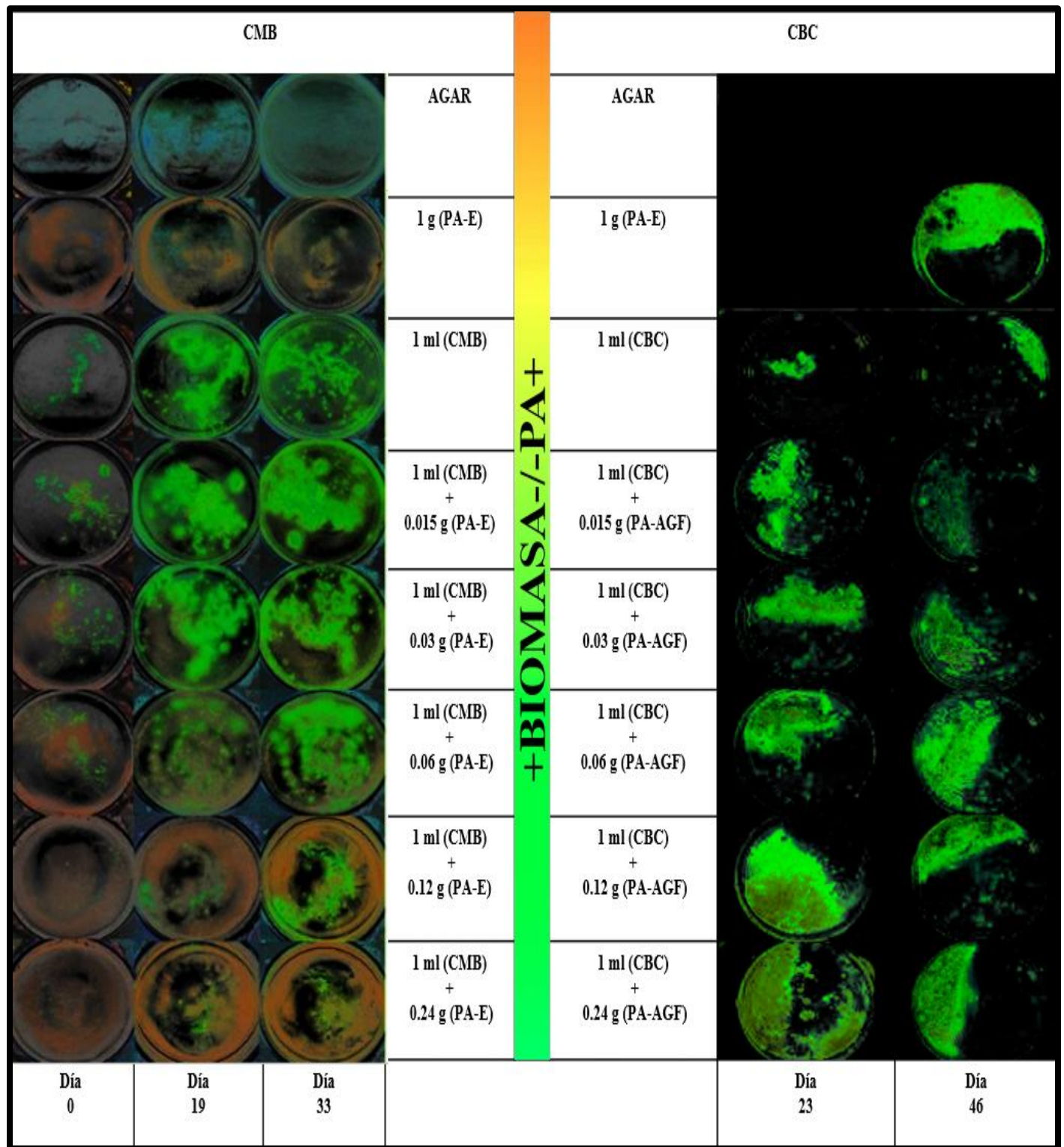
Los colores verde-azul: indican los pigmentos de las cianobacterias. Los colores amarillo y rojo: indican la presencia de polvo atmosférico. Los colores negro: indican nula actividad fotosintética. Podemos analizar cualitativamente que si existe un crecimiento de las cianobacterias a mayor cantidad de polvo atmosférico administrado, aunque por este método algunas observaciones son indistinguibles, por la exposición del polvo atmosférico sobre las cianobacterias (Gráfica 10).

Se puede notar que el polvo en cianobacterias de biocostras, también ha desarrollado su biota cianobacteriana, y el polvo atmosférico en cianobacterias de microbialitas no se ha desarrollado ni aún en la parte final del experimento, porque fue incinerado y esto es tomado como un buen control de nuestro experimento.

Las imágenes archivadas para Parangueo, de 33 días y para el Desierto de Sonora de 50 días, pueden ser usadas, para su posible cuantificación de las áreas positivas a expresión de pigmentos., por software (Image J de Fiji). Aunque esto no predispone a una cuantificación exacta de las áreas. Ya que la captura de estas imágenes muestran los siguientes sesgos:

- 1.- Las cianobacterias que se desarrollan por debajo del agar no son sido visibles.
- 2.- La hidratación de los medios altera las imágenes; produciendo un efecto de reflexión/refracción.
- 3.- Cuanto más cantidad de polvo existe, menos cianobacterias se hacen visibles.
- 4.- Las cianobacterias provenientes de las biocostras del Desierto de Sonora, son más lentas en su desarrollo. Puede ser una manifestación a tomar en cuenta para las varianzas encontradas en los resultados de extracción de clorofila ( $\alpha$ ).



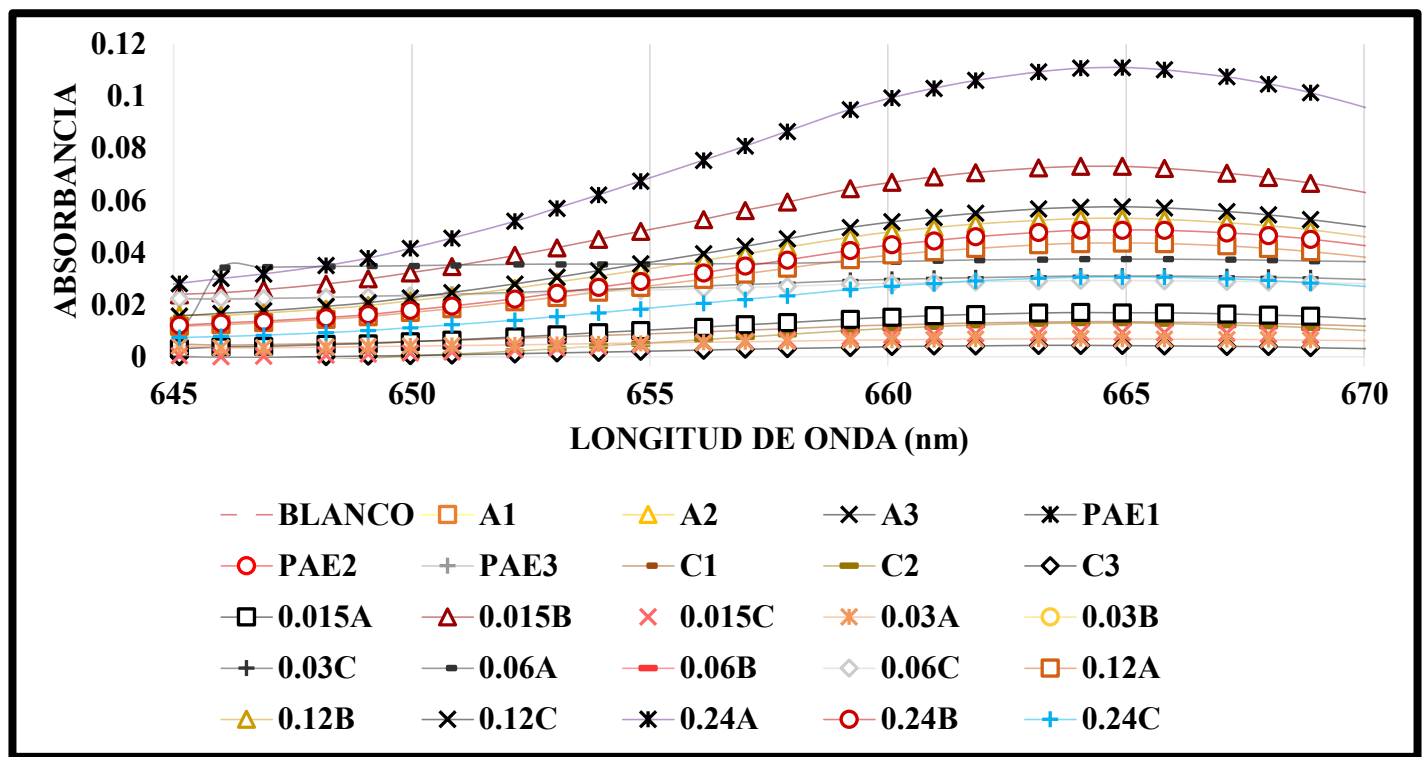


Gráfica 10. Fluorescencia de cianobacterias de microbialitas (CMB) y cianobacterias de biocostras (CBC).

### 8.9. Absorbancia de la clorofila ( $\alpha$ ) de cianobacterias de microbialitas

Los resultados de la espectrofotometría fueron realizados por un barrido rápido desde los 330 nm hasta los 900nm de longitud de onda. Estos análisis en el espectrofotómetro proyectan que las muestras con 0.2 g de polvo tienen la mayor concentración de clorofila (a), siguiendo las muestras de 0.1 g, a continuación 0.015 g, después 0.03 g, y por ultimo las cianobacterias lacustres del lago-cráter del Paranguero sin polvo (Gráfica 11).

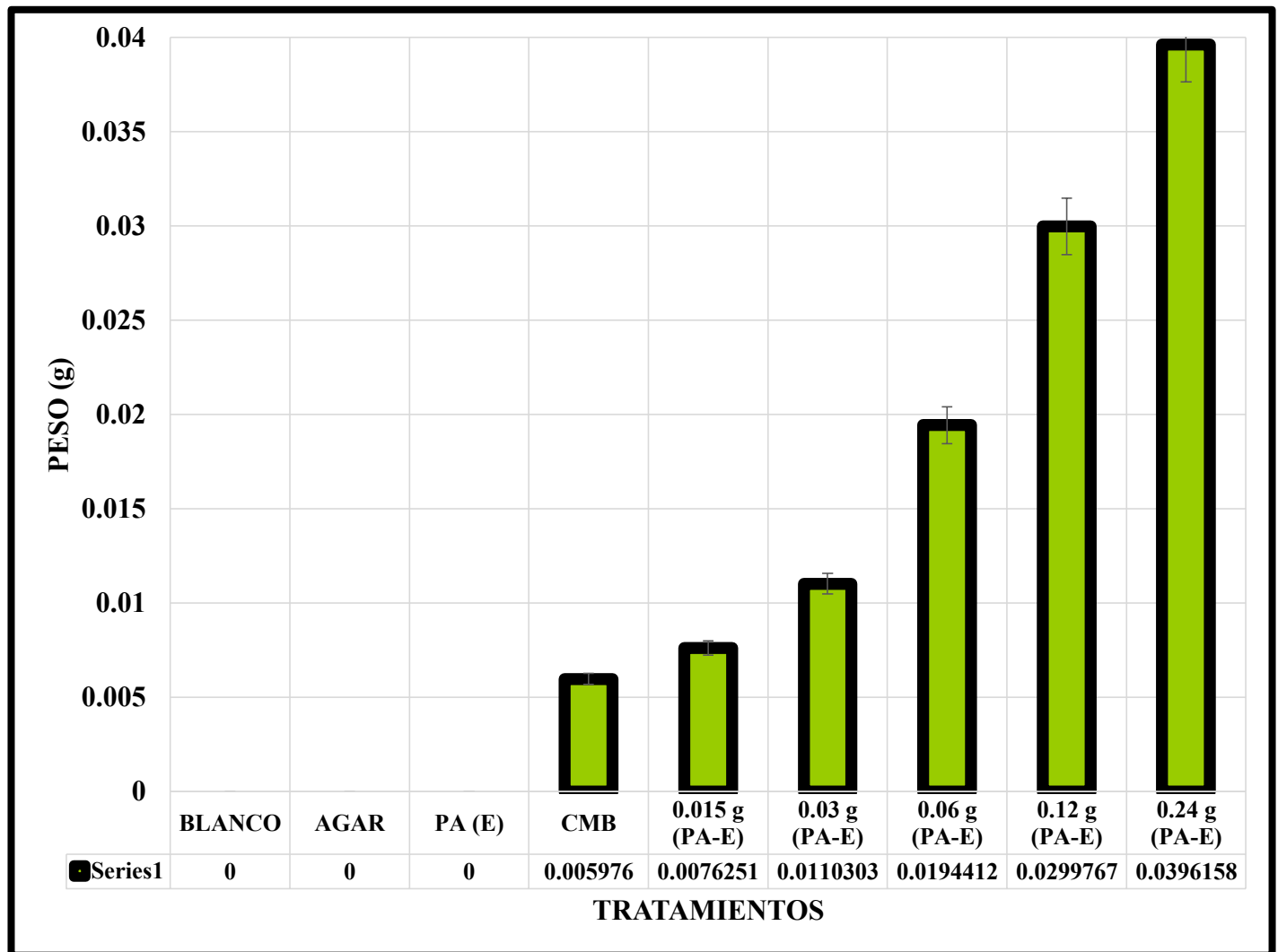
En cuanto a los resultados de los controles estos se mantienen cercanas al cero del eje X, esto era algo que se esperaba puesto que estos no deberían de tener microbios dados las condiciones en las que se cultivaron (Gráfica 11). Control de polvo: al ser incinerado es posible que se eliminaran a la mayoría de agentes microbianos que pudieran expresar pigmentos. Control Ambiental: al ser Cajas con solo agar noble estéril, sin muestras de cianobacterias y ni de algún otro contenido como polvo, en condiciones controladas; no existieron agentes microbianos que expresaran pigmento. Metanol: Al ser un blanco no altero, ni expreso algún pigmento.



Gráfica 11. Concentración (absorbancia) de clorofila en cianobacterias de microbialitas

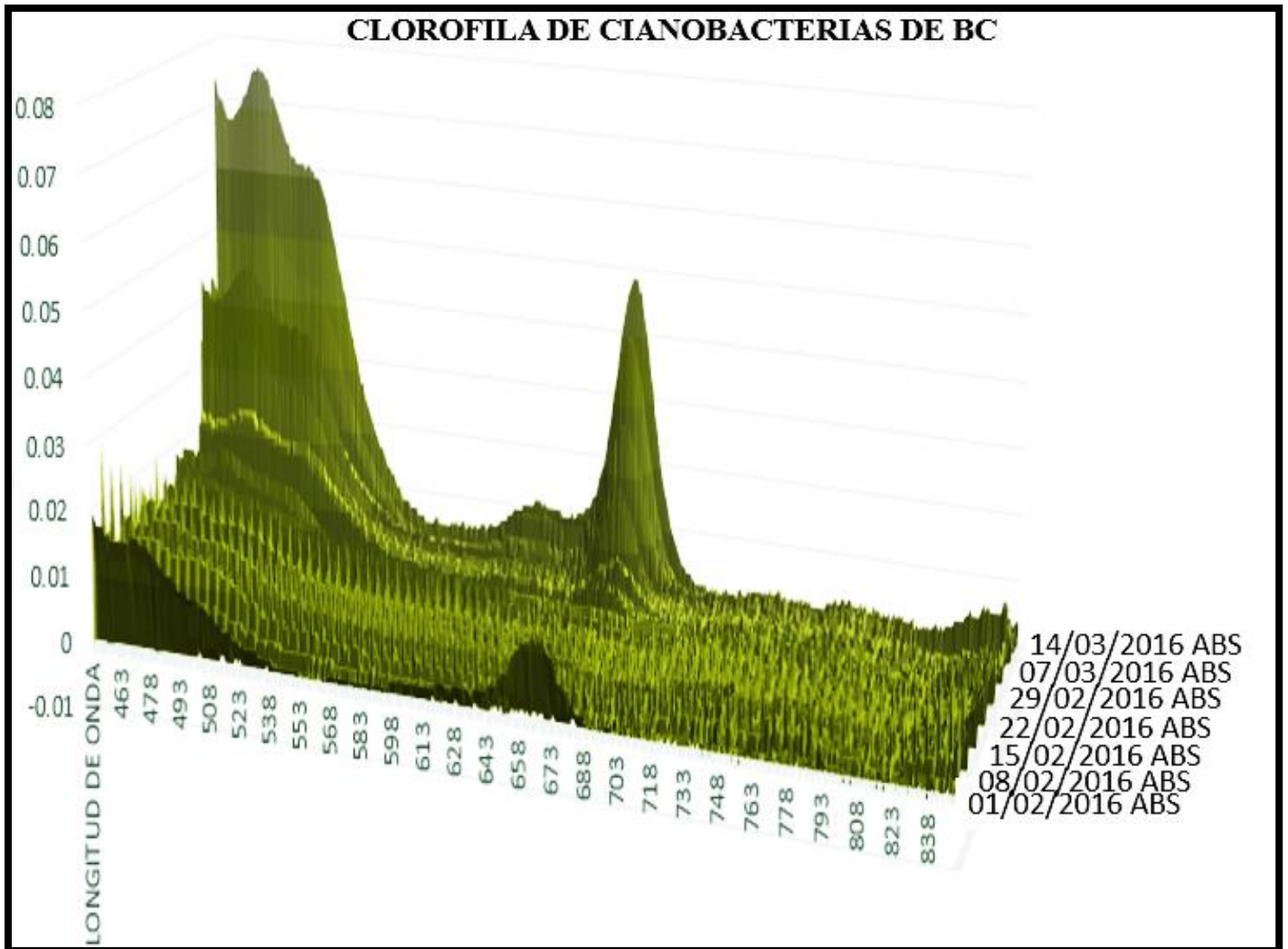
### 8.10. Biomasa estimada en cianobacterias de microbialitas

A partir de las medias de concentración de clorofila ( $\alpha$ ), en cianobacterias de microbialitas, se estimó la biomasa según la ecuación lineal descrita en el método (Gráfica 13). Donde al cotejar todas las cianobacterias cultivadas por 33 días, existe un crecimiento adecuado, con el polvo atmosférico (Gráfica 12).



Gráfica 12. Biomasa estimada de cianobacterias de microbialitas (CMB) y sus tratamientos con polvo atmosférico (PA).

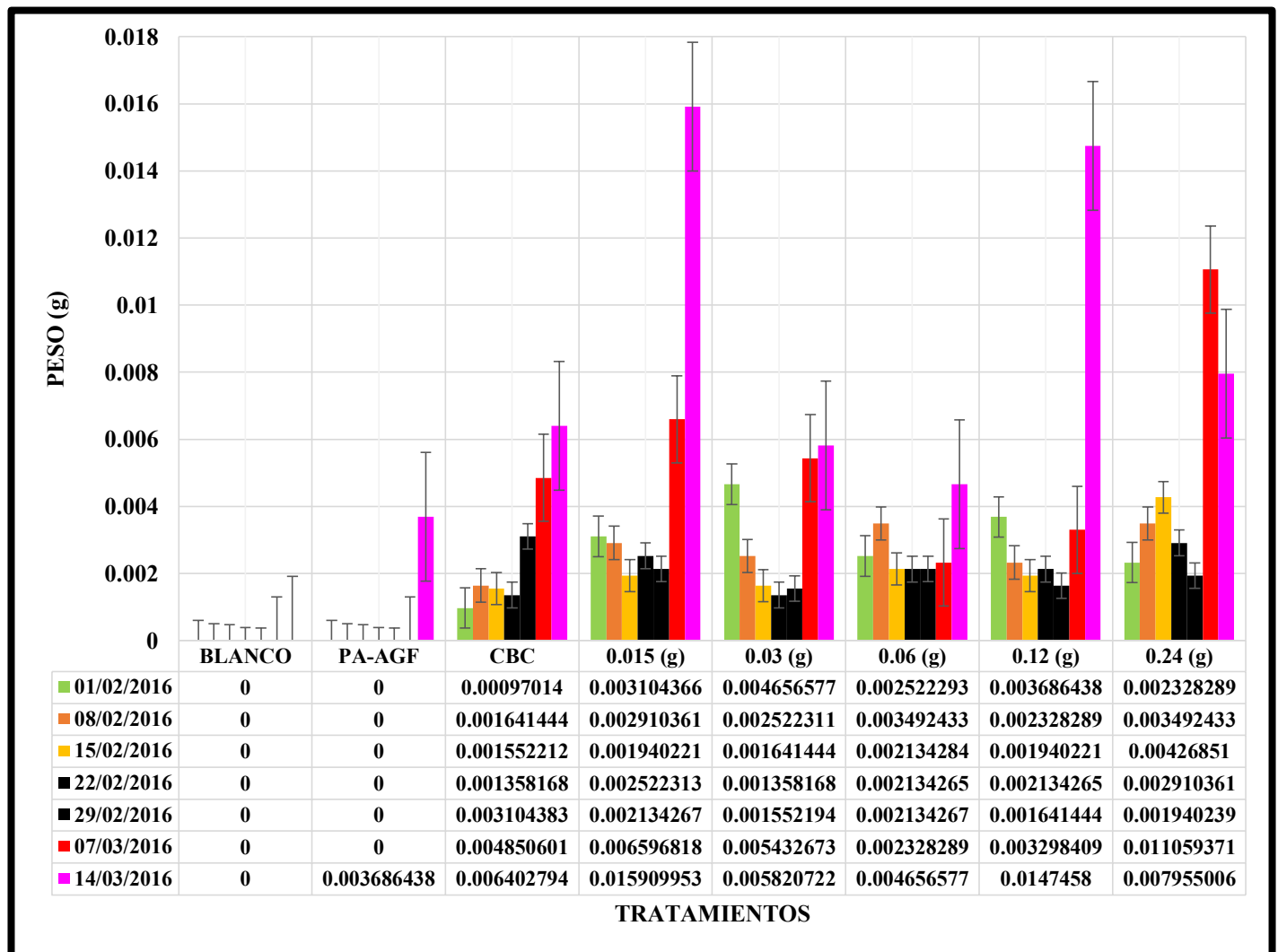
**8.11. Modelo de concentración de clorofila ( $\alpha$ ) en el tiempo**



**Gráfica 13. Concentración (absorbancia) de clorofila en cianobacterias de biocostras (CBC).**

### 8.12. Biomasa estimada en cianobacterias de biocostras

De las medias de concentración de clorofila en cianobacterias de biocostras, se estimó la biomasa, con el estándar, por lo que se puede apreciar, tenemos mejor crecimiento, conforme se incrementa el tiempo de incubación, aunque cabe resaltar tiene altas concentraciones en 0.015 g, generalmente y otras (Gráficas 13 y 14). Es por eso que se piensa que este comportamiento, puede ser debido a la sombra, producida por el mismo polvo o algún otro factor extrínseco desconocido tal vez.

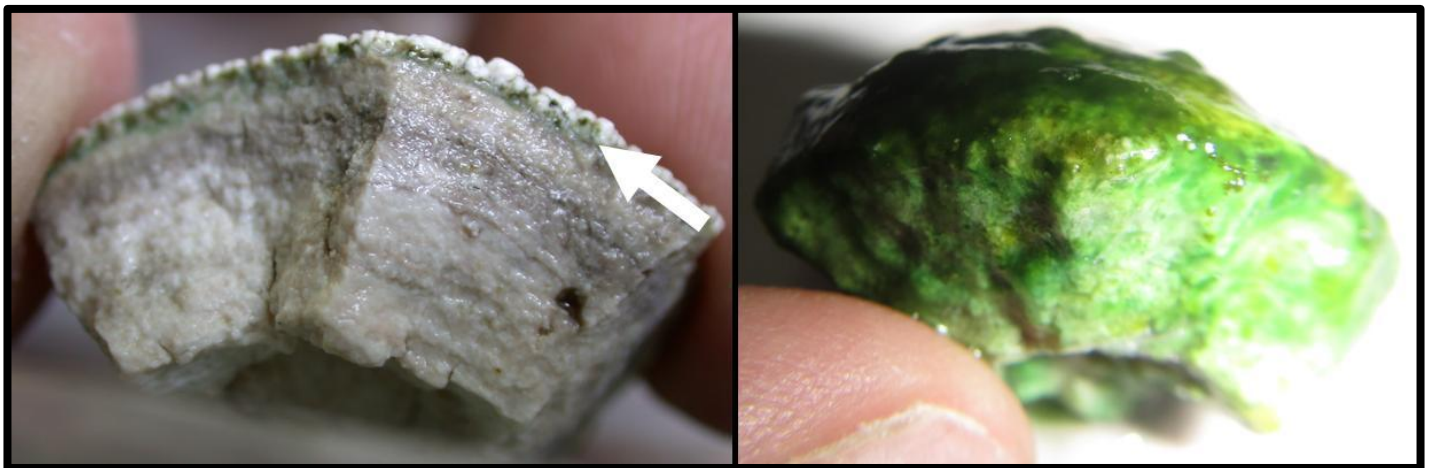


Gráfica 14 y Tabla 9. Biomasa estimada de cianobacterias de biocostras.

### 8.13. Microscopía y determinación de cianobacterias de biocostras y microbialitas

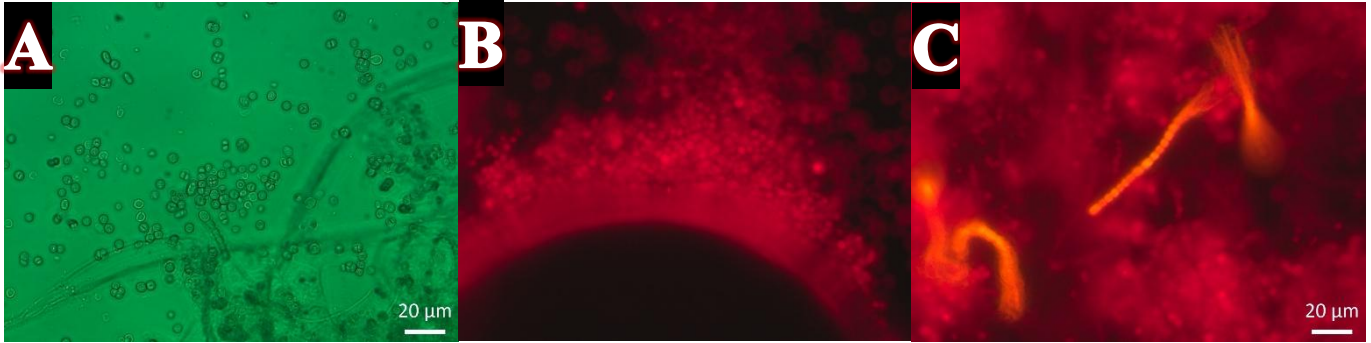
Se tiene imágenes con cianobacterias de biocostras y microbialitas, con los diferentes tratamientos y para cianobacterias sin tratamiento de microbialitas, así como del PA. Se pueden apreciar por ejemplo filamentos, estructuras producidas por EPS, epifluorescencia, heterocistos y acinetos con diferencias morfológicas para los tres tipos de biota. (Fig. 19).

A: Cianobacterias cocoidales, B: Flujo de cianobacterias, C: Algunas cianobacterias filamentosas, D: *Nostoc*, E: Relieve de *Nostoc* en 3D, F: Filamentos de *Nostoc*, G: *Calothrix*, H: sideróforos en *Microcoleus*, I: Filamentos de *Calothrix*, J: *Schizothrix* y *Microcoleus*, K: acineto de *Microcoleus*, L: epifluorescencia al rojo de *Microcoleus*, M: sideróforos de *Microcoleus*, N: segmentación de *Microcoleus*, O: *Microcoleus*, P: *Microcoleus* y partículas del polvo, Q: partículas fluorescentes del polvo, R: *Nostoc* y partículas del polvo, S: Microbiocostra, T: *Gloeocapsa*, U: Minibiocostra, V: *Nostoc* y *Microcoleus* en epifluorescencia verde, W: *Nostoc* y *Microcoleus* en epifluorescencia azul+DAPI, Z: *Nostoc* y *Microcoleus* en epifluorescencia roja.



**Fig. 18. Microbialita determinada como Oncolito, contiene cianobacterias endolíticas (izquierda). Oncolito 3 semanas después de haber sido hidratado (derecha).**

Cianobacterias de microbialitas



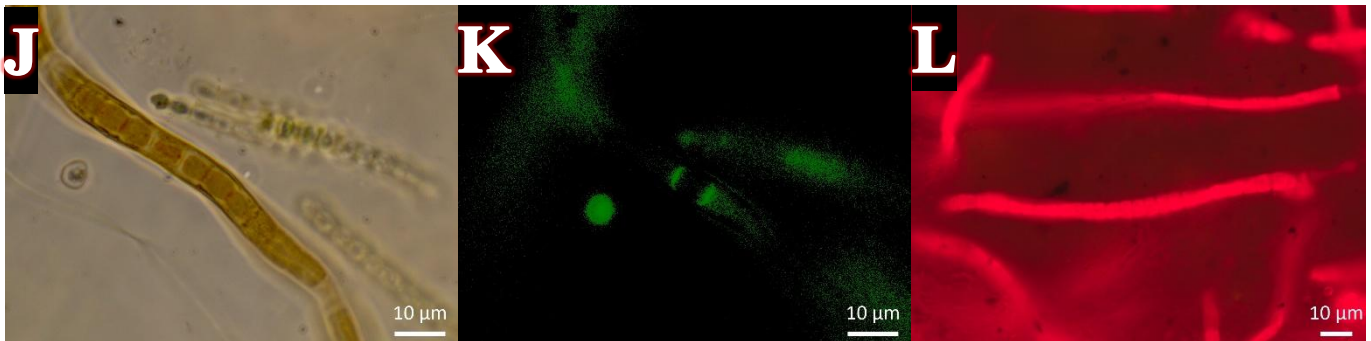
Cianobacterias de biocostras + 0.015 g (PA-AGF)



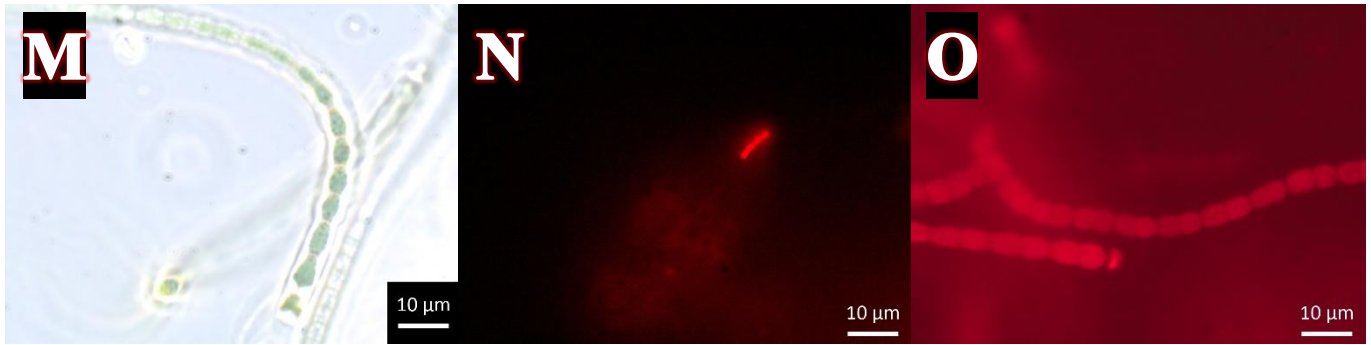
Cianobacterias de biocostras + 0.03 g (PA-AGF)



Cianobacterias de biocostras + 0.06 g (PA-AGF)



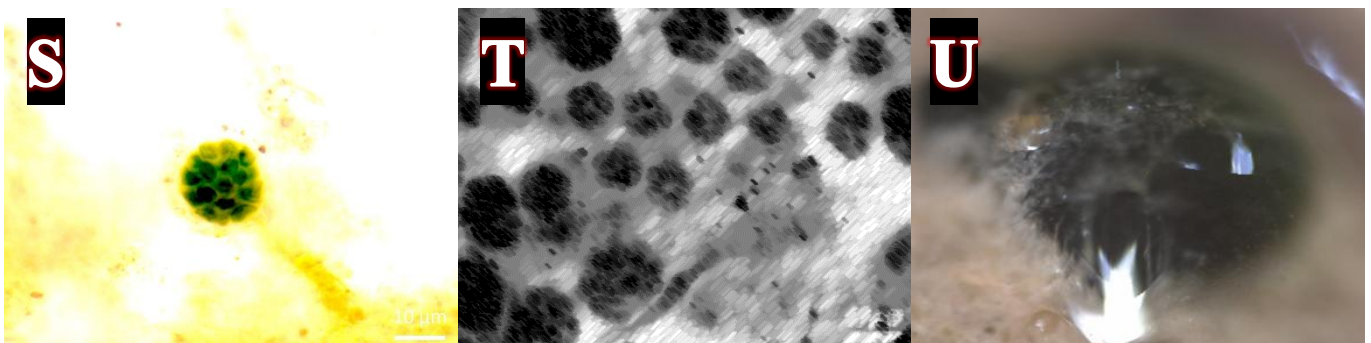
Cianobacterias de biocostras + 0.012 g (PA-AGF)



Cianobacterias de biocostras + 0.024 g (PA-AGF)



Cianobacterias de polvo atmosférico (PA-AGF)



Cianobacterias de biocostras + 100 ul (naranja de acridina)

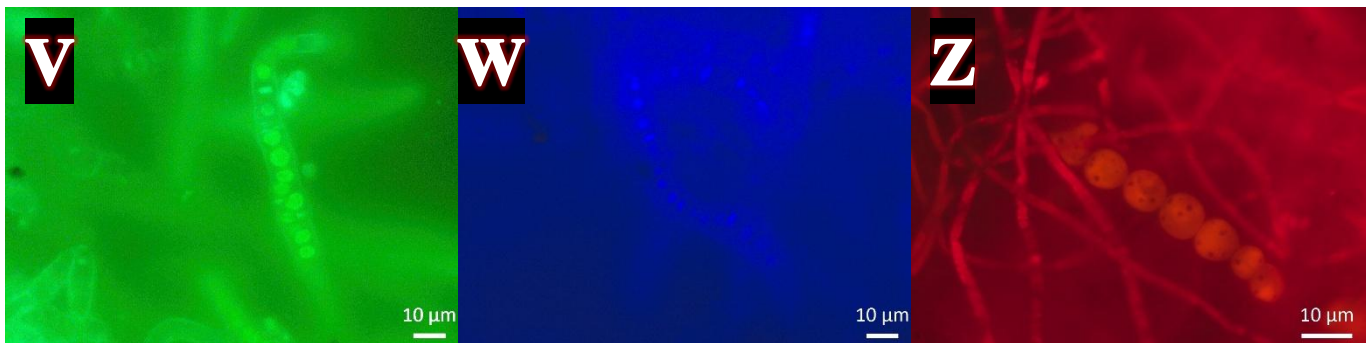


Fig. 19. Microscopía y estereoscopia de cianobacterias de biocostras, microbialitas y polvo atmosférico.



## 9. DISCUSIÓN

### 9.1. Interacción entre el polvo atmosférico y las cianobacterias

El polvo atmosférico del Desierto de Sonora, se encuentra enriquecido de distintos elementos y minerales, algunos de estos elementos son carbono, fósforo y en menor cantidad nitrógeno (Gráfica 1), la muestra SAC, evidentemente predomina sobre las otras muestras en los tres elementos: C, P y N, debido a su origen de suelos maduros, con alta humedad y con mayor materia orgánica (Gráfica 2). Las muestras con menores concentraciones, pierden materia orgánica en las fluctuaciones de la atmósfera. (Por ejemplo lluvias y vientos).

El carbono de tipo orgánico se encuentra abundante en todas las muestras analizadas, normalmente el suelo tendría las mayores cantidades de carbono orgánico, pero sorprende analizar, que el polvo es mejor fuente de carbono orgánico, el cual es el más asimilable por los seres vivos, esta diferencia radica, en que el suelo contiene gran cantidad de organismos que aprovechan este recurso, empobreciéndolo. Mientras que en el polvo no existe una biota predominante que pueda disminuir significativamente el carbono orgánico contenido. Aunque el carbono inorgánico está en menor porcentaje, comparándolo con el carbono orgánico (Gráfica 2), estas cantidades en el polvo y suelo son muy importantes, ya las cianobacterias pueden asimilarlo y los suelos de biocostras fijan altas tasas de este tipo de carbono.

Entre otros elementos analizados por ICPMS, XRF y XRD se pueden observar principalmente bario, cesio, cobre, vanadio, calcio, potasio, zinc, titanio, fósforo, azufre, circonio, sílice, hierro, aluminio, magnesio y manganeso (Gráficas 3, 4, 5, 6 y 7), los cuales se encuentran en la estructura mineral formando silicatos en el polvo, donde los tectosilicatos tipo cuarzo forman la mayor composición (Tabla 8).

Estos elementos juegan un papel crucial en el metabolismo del carbono y nitrógeno de cianobacterias. (Gráficas 3, 4, 5, 6 y 7). (Rueter y Petersen, 1987; Reynolds *et al.*, 2001; Jickells *et al.*, 2005; Tan *et al.*, 2013) analizan que las partículas del polvo reaccionan con los contaminantes antropogénicos al cruzar ciudades industriales, alterando la biodisponibilidad y añadiendo más nutrientes. Entre los nutrientes analizados el hierro presenta concentraciones altas, este nutriente es importante para la fotosíntesis y la distribución de energía en la célula (respiración) y en conjunto con el molibdeno son bioquímicamente involucrados en la reducción de nitrato y la fijación de nitrógeno.

Aunque la fijación de nitrógeno también es relativamente sensible a la toxicidad del cobre. Así como en sus observaciones, en este trabajo se encontraron vínculos positivos entre el polvo y la concentración de clorofila (a), beneficiando el desarrollo de biomasa y por lo tanto mejorando las actividades biológicas de las cianobacterias (Gráficas 12 y 14).

Los elementos se hacen más disponibles en presencia del agua, por lo que los tratamientos tuvieron que ser hidratados, además (Cardona *et al.*, 2015) menciona que en el fotosistema II de las cianobacterias, el agua actúa como enzima oxidante por la molécula ( $Mn_4CaO_5$ ), en esta reacción cuatro electrones se extraen a partir de dos moléculas de agua, con la liberación de cuatro protones en el lumen de los tilacoides y  $O_2$  como subproducto. Esta química reactiva modificó el curso de la evolución, llenando la atmósfera con oxígeno en la antigüedad. Es así que las cianobacterias tienen un aparato altamente especializado para la fotosíntesis oxigénica.

En el polvo incinerado-estéril la microbiota autóctona (clave en la administración y reciclaje de nutrientes) fue eliminada por las altas temperaturas de la técnica, pero no se alteró la mineralogía del polvo (Gráficas 8 y tabla 8), además si no se hubiese incinerado el polvo, se hubiera desarrollado biota no deseable para este estudio. Los análisis de (Gráfica 8 y tabla 8), muestran mineralogía del polvo atmosférico (cuarzo, feldspatos, ilita, caolinita, mica), la cual afecta a los ciclos biogeoquímicos y a su química atmosférica (Journet *et al.*, 2014). Tal mineralogía encontrada en suelos, indica que los suelos del Desierto de Sonora son formados y enriquecidos por polvo atmosférico. Además las concentraciones altas de arena indican que todos estos procesos están ocurriendo dentro de los ecosistemas desérticos.

Los elementos analizados nutren a las cianobacterias de microbialitas y biocostras, desarrollando considerablemente su biomasa, produciendo puntos máximos de clorofila (a) a los 665 nm (Gráficas 10, 11, 12, 13 y 14). En las cianobacterias de microbialitas se presenta tendencia donde la de biomasa se incrementa, cuando la cantidad de polvo también aumenta, pero la biomasa estimada durante el tiempo de cultivo para cianobacterias de biocostras, tiene diferencias en cada alícuota de polvo, por lo que no necesariamente a mayor cantidad de polvo atmosférico, habrá mejor crecimiento, sino que existen cantidades "óptimas", por ejemplo 0.015 g y 0.1 g, en la última semana de estudio, que hacen desarrollar mejor a las cianobacterias (Gráfica 14).

La sobredosis por polvo en los tratamientos resulta tóxica (por ejemplo plomo y cobre) los cuales podrían producir segmentación en las cianobacterias, así como también el exceso en las cargas de polvo, obstaculizaría la energía luminosa; primordial para las funciones fotosintéticas y disminuiría por lo tanto la producción oxigénica. En gran medida se consideran también otros factores para tales diferencias, como variables ambientales: donde las cianobacterias aunque son extremófilas en sus ecosistemas (halófilas y termófilas moderadas), llegan a ser organismos altamente sensibles a los cambios bruscos, pero que a modo de resiliencia enfrentan una buena respuesta hacia estos cambios, además la disponibilidad de nutrientes en estas diferencias está afectada en gran parte por la hidratación, tiempo de exposición e intensidad luminosa, donde en la estimación cuantitativa y cualitativa se observan estas diferencias (Gráfica 10).

La investigación realizada explica un modo de supervivencia, que es aplicada por cianobacterias "extremófilas", en ambientes hostiles con sustratos pobres en nutrientes, pero con predominancia de polvo atmosférico el cual es rico en nutrientes. Las cianobacterias presentan filamentos con EPS (Figura 16), con los que alcanzan y adhieren partículas de polvo, para aglutinarlas como reservas nutritivas. Las cianobacterias se desarrollan en promedio con CO<sub>2</sub>, luz y agua, pero (Hamilton *et al.*, 2007) asevera que también es fundamental la biodisponibilidad del conjunto de nutrientes disueltos, como hierro, nitrógeno y fósforo los cuales están presentes en los análisis del estudio (Gráficas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8). Sin embargo los nutrientes pueden encontrarse con bajas concentraciones debido a su disolución, por lo que los nutrientes son más disponibles como el óxido de hierro y el fósforo para llevar a cabo el metabolismo adecuado. Pero si existen elevadas concentraciones disponibles de nitrógeno y fósforo en cuerpos de agua, pueden llevar a la eutrofización, hipoxia y disminución de la diversidad biológica por los florecimientos de cianobacterias, produciendo toxinas peligrosas (Luszcz *et al.*, 2015).

De las ficobiliproteínas en especial la ficobilina: ficocianobilina (Gráfica 9), es un pigmento producido por la fotosíntesis oxigénica que no se une a la clorofila (McConnell *et al.*, 2002; Bailey *et al.*, 2005; Bailey y Grossman, 2008; Rae *et al.*, 2013) lo que produce características espectrales distintas.

Algunas de las cianobacterias observadas sin heterocistos (Fig. 16) pueden fijar N<sub>2</sub>. Sin embargo, como lo indica (Bergman *et al.*, 1997) los heterocistos con nitrogenasa son fotosintéticamente inactivos, no fijan CO<sub>2</sub> y no producen O<sub>2</sub>.

Las cianobacterias de biocostras pueden con el tiempo formar fósiles. (Bahl *et al.*, 2011) menciona que las cianobacterias de biocostras del desierto no son resultado de la dispersión contemporánea generalizada, sino que pueden ser un legado evolutivo antiguo como de los microfósiles *Chroococciopsis*, una cianobacteria desértica.

## 9.2. Las cianobacterias como eje central en biocostras

Las cianobacterias enriquecen a las biocostras, a través de la fijación de carbono atmosférico, que después es incorporado al suelo. El fósforo y nitrógeno fijado por estas cianobacterias son transformados en compuestos disponibles como  $\text{PO}_4^-$  y  $\text{NH}_4^+$  (Tabla 1), para otros organismos. Por ejemplos los exudados (metabolitos secundarios) de la cianobacteria filamentosa, dominante en biocostras, *M. vaginatus*, son consumidos por especies microbianas especializadas en compuestos particulares. Y a su vez estos microorganismos edáficos exudan compuestos que son consumidos por *M. vaginatus*, una especie fundamental en la estructura y funcionamiento de las comunidades de suelos áridos. Esta es una manera por el que a las biocostras se les considera ingenieros dinámicos, que estabilizan la superficie del suelo, regulando funciones esenciales, de manera desproporcional a su tamaño.

Es preocupante como el incremento de los sistemas monzónicos, el pisoteo y las elevadas temperaturas superficiales ocasionadas por la colonización de cianobacterias con pigmentación oscura (grandes cantidades de escitonemina), sustituyen especies termosensibles por formas termotolerantes, dando lugar a una reducción de las concentraciones de elementos, cianobacterias. Que de continuar dará una rápida mortalidad a las cianobacterias de biocostras, aumentando la erosión del suelo. (Maestre *et al.*, 2015; Couradeau *et al.*, 2016).

Las biocostras emiten óxido nítrico y ácido nitroso, grandes flujos de estos son obtenidos por cianobacterias dominantes oscuras y corresponden al ~20% de emisiones de óxido de nitrógeno globales. Las zonas áridas con emisiones de nitrógeno reactivo son impulsadas en gran medida por biocostras. De tal forma que las biocostras aceleran el ciclo del nitrógeno (Weber *et al.*, 2015). De hecho aquí se cumple una hipótesis hasta ahora estudiada donde el polvo atmosférico que transporta nutrientes (Jickells *et al.*, 2005), es una fuente benéfica para los organismos de zonas áridas y otros ecosistemas no áridos. (Yu *et al.*, 2015).

Desde el enfoque geobiológico-paleontológico, con las adaptaciones evolutivas "organismo-mineral", se comprenden las habilidades que han puesto en práctica las cianobacterias, desde la vida primitiva, donde comenzaron a existir en bioestructuras sedimentarias, que en interacción con diferentes compuestos orgánicos y procesos biogeoquímicos, originaron a la diversidad biológica existente.

### **9.3. Análisis estadístico de la concentración de clorofila ( $\alpha$ ) en cianobacterias de microbialitas**

El valor de  $F_c=5 > F(0.95,5,12)=3.106$ , por consiguiente tiene un valor de p (probabilidad), menor que 0.05, se acepta  $H_a$  y se rechaza  $H_o$ . El contraste con un valor de  $F_c=9.37$  y 4 grados de libertad, tiene una probabilidad menor que 0.05, por consiguiente, se acepta  $H_a$  y se rechaza  $H_o$ .

La prueba estadística revela que entre los dos grupos analizados existe diferencia significativa a un nivel de confianza de p de 0.05. Los valores de concentración de clorofila (a) en los tratamientos son superiores respecto a los cultivos sin tratamiento. La diferencia entre los tratamientos al parecer es muy pequeña. Por lo cual para saber qué tan diferentes son los tratamientos entre sí y estos respecto a los cultivos sin tratamiento, se realizó contrastes independientes, para analizar las comparaciones entre los cultivos, sin que exista dependencia respecto de alguno de ellos.

Tomando a los tratamientos como si se tratara de un solo grupo, con el coeficiente +1, contrastando con el cultivo sin tratamiento que competirá vs los cinco tratamientos, con el coeficiente -5. Al efectuar el análisis de varianza con los contrastes independientes, se observa que el grupo de los cultivos sin tratamiento, difieren significativamente del grupo de cultivos con tratamiento. Esta discrepancia fue evaluada con un nivel de confianza de p menor que 0.01. Las diferencias entre tratamientos no son significativas; en consecuencia, se consideran iguales. Por lo anterior, se acepta que los tratamientos utilizados pueden producir respuestas positivas en la concentración de clorofila.

#### **9.4. Análisis estadístico de la concentración de clorofila ( $\alpha$ ) en cianobacterias de biocostras.**

El valor de  $F_{c=4.5} > F(0.95, 41,84) = 1.55$ , por consiguiente tiene una  $p$  menor que 0.05, se acepta  $H_a$  y se rechaza  $H_o$ . El efecto de los factores (nutrición y tiempo de tratamiento), muestran valores de  $p$  menores que 0.05 y 0.01; por consiguiente se acepta  $H_a$  y se rechaza  $H_o$ . Mientras que los valores de las interacciones son mayores que 0.05, por lo tanto se acepta  $H_o$  y se rechaza  $H_a$  (Tabla 10).

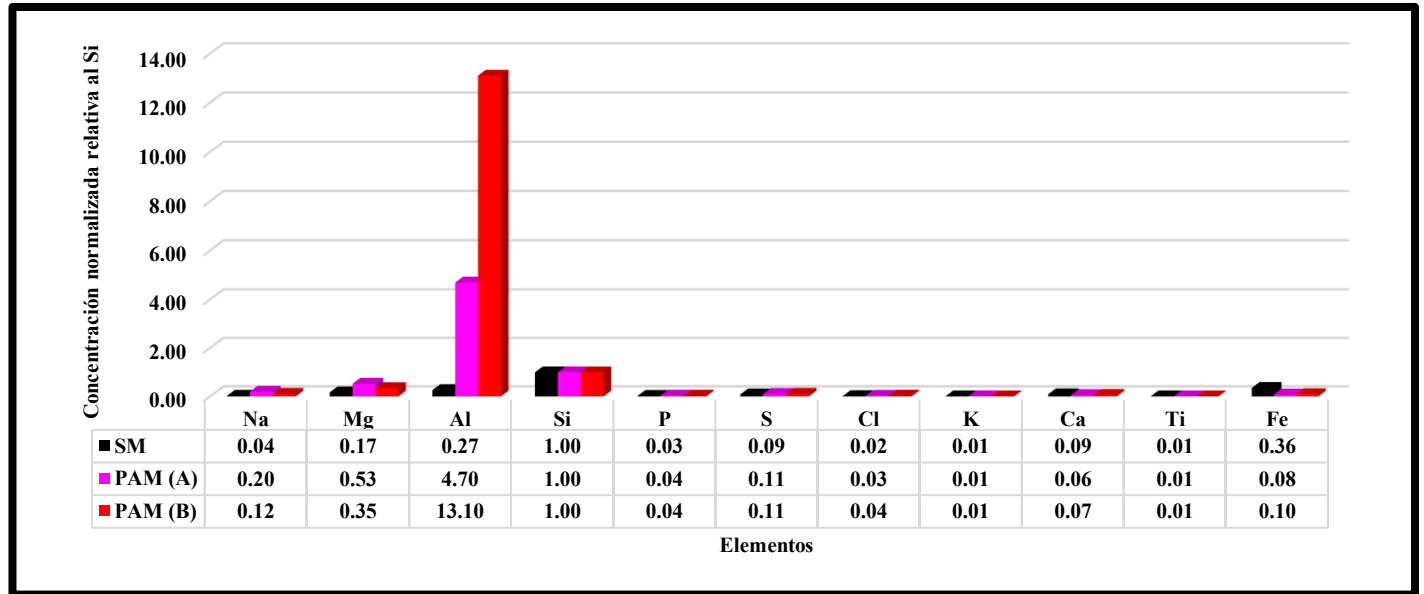
Entre los grupos se observa una diferencia estadísticamente significativa. En el experimento, se mostró que el factor nutrición tiene una influencia directa en las concentraciones de clorofila (a), con los mayores valores en los cultivos con tratamiento. Estas diferencias son estadísticamente significativas ( $p < 0.015$ ). Por otro lado en las interacciones no muestran algún nivel de significación, esto da a entender que las influencias entre los factores son independientes.

#### **9.5. Relación entre polvo atmosférico terrestre y polvo atmosférico de Marte.**

Las cianobacterias extremófilas de microbialitas y biocostras se desarrollan mejor con polvo atmosférico terrestre, para recuperar humedad y nutrientes, sobreviviendo bajo condiciones de alta salinidad, altas temperaturas y desecación constante. El polvo atmosférico de Marte analizado en los rovers (opportunity y spirit) por XRF (Goetz *et al.*, 2005) tiene elementos de concentración similar, que se correlacionan con los elementos analizados en este estudio por XRF en el polvo terrestre (Gráficas 6, 7 y 16), existe alto potencial y alta probabilidad según la correlación de que el polvo atmosférico de Marte podría ser una fuente de nutrientes para cianobacterias de biocostras y microbialitas. El sílice es un elemento que presenta la mayor concentración en el polvo atmosférico de Marte y de la Tierra, otros elementos presentes son hierro, magnesio, potasio, calcio, fósforo y azufre.

Esta interesante interacción astrobiológica entre microorganismo-mineral da como resultado, que en planetas con polvo, como Marte, las cianobacterias serían las primeras formas de vida que se esperaría encontrar o que en su caso se esperarían cultivar para distintas aplicaciones: biocombustibles, alimentos, oxígeno, medicamentos y restauración de zonas áridas marcianas, que pueden ser usados por las próximas

colonizaciones en dicho planeta, donde se esperan comiencen aproximadamente en el año 2028. Una nueva hipótesis es saber si las cianobacterias además de nutrirse con polvo pueden desarrollarse bajo condiciones análogas de Marte, donde experimenten; gravedad, temperatura, humedad y radiación.



Gráfica. 15. Elementos del polvo atmosférico de Marte analizados por XRF (Goetz *et al.*, 2005).

Element	Soil	Dust A	Dust B
Na	0.035(2)	0.20(1)	0.116(5)
Mg	0.172(4)	0.53(2)	0.348(9)
Al*	0.266(5)	4.7(4)	13.1(9)
Si	1.00	1.00	1.00
P	0.027(2)	0.040(6)	0.037(3)
S	0.088(3)	0.109(7)	0.114(5)
Cl	0.021(1)	0.032(5)	0.037(3)
K	0.012(1)	0.013(4)	0.012(2)
Ca	0.094(3)	0.062(6)	0.071(4)
Ti	0.009(1)	0.009(4)	0.009(2)
Fe	0.355(5)	0.083(7)	0.100(5)

Areas of element peaks in APX spectra of soil (Spirit sol 14), and of dust on the capture magnet on the two rovers: A (Spirit sol 150) and B (Opportunity sol 168). The error on the last digit is given in parentheses. In each spectrum, the areas are normalized relative to Si.  
 \* The aluminium signal is mainly due to the high-purity aluminium plate on the magnet (below the dust).

Tabla 10. Composiciones analizadas por XRF del suelo y polvo atmosférico de Marte (Goetz *et al.*, 2005).

Las microbialitas y biocostras son consideradas análogos de antiguas comunidades de suelo, algunas adaptaciones que comparten estas estructuras son salinidad y desecación, por lo que el experimento de (Baque *et al.*, 2014) podría ser reproducible, donde se podría utilizar análogos minerales de Marte, dicho autor encontró que el análogo mineral lunar proporciona protección. Esto se podría encontrar también en los análogos minerales de Marte, proporcionando protección al preservar el ADN y pigmentos fotosintéticos. Esto implica como antecedente para el cómo detectar firmas biológicas en condiciones extraterrestres y para futuras misiones putativas. El Lago-Cráter Rincón de Parangueo, tiene similitudes con las Cuencas de Cuatro Ciénegas, que proporciona huellas biológicas, que se pueden utilizar como candidatos de vida astrobiológica (Souza *et al.*, 2012).

## 10. CONCLUSIÓN

Es evidente que el polvo atmosférico, aporta nutrientes, elementos y minerales, así como cianobacterias que se pueden establecer en la superficie de zonas desérticas, creando nuevas comunidades bióticas: biocostras y microbialitas, dicha interacción es un paso para entender los procesos geobiológicos que estabilizan la biosfera, esto a pesar de que el polvo trae consigo diversos contaminantes. Esto se identifica con la relación de los elementos entre los materiales suspendidos en la atmósfera y los que son depositados en las zonas áridas del Desierto de Sonora. Por lo que se verifico que el polvo de este estudio efectivamente se origina en los desiertos y que este forma suelos, cuando una vez se ha depositado.

La estructura celular se vio beneficiada en algunas cianobacterias, desarrollando más células y estructuras reproductivas.

Se ha demostrado cualitativamente y cuantitativamente que la biomasa de cianobacterias si se desarrollan mejor con polvo, mejorando no solo su desarrollo en general, si no que morfológicamente sus estructuras se notan beneficiadas por la adición del polvo en los cultivos.

Se ha comparado el polvo atmosférico terrestre estudiado contra el polvo atmosférico de Marte, encontrando varias similitudes en los elementos.



---

## 11. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

Se recomienda aplicar el potencial de esta investigación en otros microorganismos, siempre cuidando las diferentes variables, humedad, medio, luz, microorganismos oportunistas, entre otros.

Realizando otras técnicas:

Para indagar en el desarrollo: (recuento de células por cámara de Neubauer, mediciones poblacionales celulares con citometría de flujo, cuantificación/concentración de ADN).

Para identificar a los organismos: (secuenciación molecular).

Para conocer la interacción entre los tratamientos: pruebas tipo (ELISA).

También investigar la transducción de señales de las células que provengan de ecosistemas en convivencia con el polvo.

Así como isotopía para estimar la edad del polvo y analizar si este se encuentra más enriquecido de nutrientes con el tiempo, así como para discutir diferentes intereses paleontológicos que como por ejemplo pueden dar información de cómo eran los paleoambientes que interaccionaban con el polvo atmosférico.

Realizar estudios satelitales para verificar los flujos de deposición atmosférica.

## 12. REFERENCIAS

- Abed, R., Ramette, A., Hubner, V., De Deckker, P. y De Beer, D. (2012). Microbial diversity of eolian dust sources from saline lake sediments and biological soil crusts in arid Southern Australia. *Microbiology Ecology*, 294-304. doi:10.1111/j.1574-6941.2011.01289.x.
- Abella, S. (2010). Disturbance and plant succession in the Mojave and Sonoran Deserts of the American Southwest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 1248-1284. doi:10.3390/ijerph7041248.
- Adhikari, A., Kettleon, e., Vesper, S., Kumar, S., Popham, D., Schaffer, C., Indugula, R., Chatterjee, K., Allam, K., Grinshpun, S y Reponen T. (2015). Dustborne and airborne Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria in high versus low ERMI homes. *Science Total Environment*, 1-22. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.110.
- Aguilar RM y Salas EO (1999) Patch structure dynamics and implication for the functioning of arid ecosystems. *TREE* 14(7): 273-277.
- Al-Bader D, Eliyas M, Rayan R y Radwan S (2012) Air-dust-borne associations of phototrophic and hydrocarbon-utilizing microorganisms: promising consortia in volatile hydrocarbon bioremediation. *Environ Sci Pollut R* 19(9):3997-4005.
- Allwood, A., Grotzinger, J., Knoll, A., Burch, I., Anderson, M., Coleman, M. y Kanik, I. (2009). Controls on development and diversity of Early Archean stromatolites. *PNAS*, 106(24), 9548-9555. doi:10.1073/pnas.0903323106.
- Andrew, D., Fitak, R., Munguia, A., Racolta, A., Martinson, V. y Dontsova, K. (2012). Abiotic factors shape microbial diversity in Sonoran Desert. *Applied and Environmental Microbiology*, 7527-7537. doi:10.1128/AEM.01459-12
- Aranda, J. y Carrasco, G. (2014). The Valle de Santiago maars, México: the record of magma-water fluctuations during the formation of a basaltic maar (La Alberca) and active post-desiccation subsidence at the bottom of a maar lake (Rincón de Parangueo). 5th INTERNATIONAL MAAR CONFERENCE, (págs. 1-30). Querétaro, México.
- Aranda, J. y Levresse, G. (2015). Geología, hidrogeología, geofísica, microbialitas y su registro paleoambiental. *RAUGM*, 1-2.
- Aranda, J., Levresse, G., Pacheco, J., Ramos, J., Carrasco, G., Chacón, E., González, G., Chávez, G., Vega, M., Origel, G. y Noyola, C. (2013). Active sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 169-188.
- Arizmendi M.C, Dávila P, Estrada A, Figueroa E, Márquez-Valdelamar L, Lira R, Oliveros Galindo O y Valiente-Banuet A (2008) Riparian mesquite bushes are important for bird conservation in tropical arid México. *Journal Arid Environment* 72: 1146-1163.
- Arizona-Sonora Desert Museum, (2015), 2021 N. Kinney Rd., Tucson AZ 85743 U.S.A.
- Aubriot, L. y Bonilla, S. (2013). Protocolo para la extracción y el análisis de clorofila-a por espectrofotometría. UdelaR: Facultad de Ciencias, UdelaR.
- Bahl, J., Lau, M., Smith, G., Dhanasekaran, V., Cary, C., Lacap, D., Lee, C., Papke, T., Warren, K., Wong, F., McKay, C. y Pointing, S. (2011). Ancient origins determine global biogeography of hot and cold desert cyanobacteria. *Nature*, 1-6. doi:10.1038/ncomms1167
- Bailey, S. y Grossman, A. (2008). Photoprotection in Cyanobacteria: Regulation of Light Harvesting. *Photochemistry and Photobiology*, 84, 1410-1420.
- Bailey, S., Mann, N., Robinson, C. y Scanlan, D. (2005). The occurrence of rapidly reversible non-photochemical quenching of chlorophyll a fluorescence in cyanobacteria. *FEBS Letters*, Elsevier, 275-280. doi:10.1016/j.febslet.2004.11.091.
- Banack, A., Metcalf, J., Jiang, L., Craighead, D., Ilag, L., Cox, P. (2012). Cyanobacteria produce N-(2-Aminoethyl) Glycine, a Backbone for peptide nucleic acids which may have been the first genetic molecules for life on earth. *PLoS one*, 7(11), 1-4.
- Baqué, M-. Verseux, C., Rabbow, E., De Vera, J., y Billi D. (2014). Detection of macromolecules in desert cyanobacteria mixed with a lunar mineral analogue after space simulations. *Astrobiology*, 209-221. doi:10.1007/s11084-014-9367-4.

- Barajas-Guzmán G y Álvarez-Sánchez J (2003) La comunidad de desintegradores en una selva húmeda tropical. Págs. 162-183, en: Álvarez-Sánchez J y Naranjo García (eds) *Ecología del suelo en selva Tropical Húmeda de México*, Instituto de Ecología A.C, Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Baran, R., Ivanova, N., Jose, N., Garcia, F., Kyrpides, N., Gugger, M. y Northen, R. (2013). Functional genomics of novel secondary metabolites from diverse cyanobacteria using untargeted metabolomics. *Marine Drugs*, 3617-3631. doi:10.3390/md11103617.
- Bardgett RD y Griffiths B (1997) Ecology and biology of soil protozoa, nematodes and microarthropods. Págs. 129-163, en: Van Elsas JD, Wellington E y Trevors JT (eds) *Modern Soil Microbiology* Marcell Dekker.
- Bell, J., McSween, H., Crisp, J., Morris, R., Murchie, S., Bridges, N., Johnson, J., Britt, D., Golombek, M., Moore, H., Ghosh, A., Bishop, J., Anderson, R., Bruckner, J., Economou, T., Greenwood, J., Gunnlaugsson, H., Hargraves, R., Hviid, S., Knudsen, J. (2000). Mineralogic and compositional properties of Martian soil and dust: Results from Mars Pathfinder. *Journal of Geophysical Research*, 105(E1), 1721-1755.
- Belnap J (2001) Microbes and microfauna associated with biological soil crust. Págs. 167-174, en: Belnap J y Lange OL (eds) *Biological soil crust: structure, function, and management*. Springer, New York.
- Belnap J (2002) Nitrogen fixation in biological soil crust from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils* 35: 128-135.
- Belnap J (2003) The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology Environment* 1(5): 181-189.
- Belnap J (2006) The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes* 20: 3159-3178.
- Belnap J, Gillette DA (1998) Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments* 39: 133-142.
- Belnap J, Hilty KJ, Rosentreter R, Williams J, Leonard S y Eldridge D (2001) *Biological soil crusts: ecology and management*. United States Department of the Interior, Bureau of Land Management, Printed Materials Distribution Center, Denver, Colorado.
- Belnap J, Lange OL (2001) *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Ecological Studies Series, vol. 150. Berlin: Springer.
- Belnap J, Phillips SL, Flints S, Money J y Caldwell M (2008) Global change and biological soil crusts: Effects of ultraviolet augmentation under altered precipitation regimes and nitrogen additions. *Global Change Biology* 14: 670-686.
- Belnap J, Prasse R, y Harper KT (2001) Influence of biological soil crust on soil environments and vascular plants. Págs. 281-300, en: Belnap J y Lange OL (eds) *Biological soil crust: structure, function, and management*. Springer, New York.
- Belnap y Lange, 2001 Belnap J y Lange OL (eds) (2001) *Biological soil crust: structure, function, and management*. Springer. New York, 503 pp.
- Belnap, J. (2003). *Biological soil crusts in deserts: a short review of their role in soil fertility, stabilization, and water relations*. *Cyanobacterial Research*, 113-126.
- Belnap, J., Reynolds, R., Reheis, Marith, Philillips, S. (2001). What makes the desert bloom? Contribution of dust and crusts to soil fertility on the Colorado Plateau. *USDA*, 7.
- Belnap, J., Rosentret, R., Leonard, S., Kaltenecker, J., Williams, J., Eldridge, D. (2001). *Biological Soil Crusts: Ecology and Management*, U.S Department of the interior, 1-118.
- Beraldi-Campesi H (2013) Early life on land and the first terrestrial ecosystems. *Ecological Processes*, 2(1). Doi: 10.1186/2192-1709-2-1.
- Beraldi-Campesi H, Hartnett HE, Anbar A, Gordon GW, Garcia-Pichel F (2009) Effect of biological soil crusts on soil elemental concentrations: implications for biogeochemistry and as traceable biosignatures of ancient life on land. *Geobiology* 7:348-359.
- Berera, R., Ivon, H. M., Van Stokkum, S., Kennis, J., Van Grondelle, R. y Dekker, J. (2009). A Mechanism of Energy Dissipation in Cyanobacteria. *Biophysical Journal*, 96, 2261-2267. doi:10.1016/j.bpj.2008.12.3905.
- Bergman, B., Gallon, J., Rai, A., Stal, L. (1997). N<sub>2</sub> fixation by non-heterocystous cyanobacteria. *Microbiology Reviews*, 19, 139-185.
- Bernhard, J., Edgcomb, V., Vissher, P., McIntire, A., Summons, R., Boussein, M., Louis, L. y Jeglinski, M. (2013). Insights into foraminiferal influences on microfibrils of microbialites at Highborne Cay, Bahamas. *PNAS*, 110(24), 9830-9834. doi:10.1073/pnas.1221721110.

- Bishop, J., Murchie, S., Pieters, C. y Zent, Aaron. (2002). A model for formation of dust, soil, and rock coatings on Mars: Physical and chemical processes on the Martian surface. *Journal of Geophysical Research*, 107(E11), 1-17. doi:10.1029/2001JE001581.
- Bolloorani, A., Nabavi, S., Bahrami, H., Mirzapour, F., Kavosi, M., Abasi, E. y Azizi, R. (2014). Investigation of dust storms entering Western Iran using remotely sensed data and synoptic analysis. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 1-12.
- Bosak, T., Greene, S. E. y Newman, D. K. (2007). A likely role for anoxygenic photosynthetic microbes in the formation of ancient stromatolites. *PMC-Blackwell Publishing*, 5(2), 119-126.
- Brevik, E., Cerda, A., Mataix, J., Pereg, L., Quinton, J. y Van Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of SOIL. *Soil Journal*, 117-129. doi:10.5194/soil-1-117-2015.
- Bu, C., Wu, S., Han, F., Yang, Y. y Meng, J. (2015). The combined effects of moss-dominated biocrusts and vegetation on erosion and soil moisture and implications for disturbance on the Loess Plateau, China. *PLOS one*, 10(5), 15. doi:10.1371/journal.pone.0127394.
- Bu, C., Wu, S., Yang, Y. y Zheng, M. (2014). Identification of factors influencing the restoration of cyanobacteria-dominated biological soil crusts. *PLOS one*, 9(3), 1-8. doi:10.1371/journal.pone.0090049.
- Budel, B., Vivas, M. y Lange O. (2013). Lichen species dominance and the resulting photosynthetic behavior of Sonoran Desert soil crust types (Baja California, México). *Ecological processes*, 2(6), 1-9.
- Bullard, J., Harrison, S., Baddock, M., Drake, N., Gill, T., McTainsh, G. y Sun, Youbin. (2011). Preferential dust sources: A geomorphological classification designed for use in global dust-cycle models. *Journal of Geophysical Research*, 116(F04034), 1-20. doi:10.1029/2011JF002061.
- Cai, P., Xiao, X., He, Y., Li, W., Zang, G., Sheng, G., Lam, M., Yu, L. y Yu, H. (2013). Reactive oxygen species (ROS) generated by cyanobacteria act as an electron acceptor in the biocathode of a bio-electrochemical system. *Biosensors and Bioelectronics*, 39, 306-310. doi:10.1016/j.bios.2012.06.058.
- Campbell, D., Hurry, V., Clarke, A., Gustafsson, P. y Oquist, G. (1998). Chlorophyll fluorescence analysis of cyanobacterial photosynthesis and acclimation. *Microbiology and Molecular Biology*, 62(3), 667-683.
- Campbell, S. E. (1979). Soil stabilization by a prokaryotic desert crust: implications for precambrian land biota. *Origins of life*(9), 335-348. doi:0302-1688/79/0094-0335
- Canfield, D., Ngombi, L., Hammarlund, E., Bengtson, S., Chaussidon, M., Gauthier, F., Meunier, A., Riboulleau, A., Rollion, C., Rouxel, O., Asael, D., Pierson, A. y Albani, A. (2013). Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of Earth's atmosphere. *PNAS*, 110(42), 16736-16741. doi:10.1073/pnas.1315570110.
- Cardona, T., Murray, J. y Rutherford, A. (2015). Origin and evolution of water oxidation before the last common ancestor of the cyanobacteria. *Molecular Biology and Evolution*, 32(5), 1310-1328. doi:10.1093/molbev/msv024.
- Carrasco, D. (2007). Tesis de Doctorado: Cianobacterias planctónicas y cianotoxinas en embalses españoles. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Castilla Serna Luis. (2011). Manual práctico de estadística para las ciencias de la salud, Trillas, México.
- Castillo-Monroy AP, Maestre FT, Delgado-Baquerizo M y Gallardo A (2010) Biological soil crusts modulate nitrogen availability in semi-arid ecosystems: Insights from a Mediterranean grassland. *Plant and Soil* 333: 21-34.
- Castillo-Monroy y Maestre FT (2011) La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural* 84: 1-21.
- Falcon, L., Centeno, C., Legendre, P., Beltrán, Y., Alcántara, R., Lidstrom, U., y Ashby, M. (2012). Microbialite genetic diversity and composition relate to environmental variables. *Microbiology Ecology*, 724-735. doi:10.1111/j.1574-6941.201201447.x.
- Chacon, E., Alba, L., Angeles, S. y Cantú, C. (2015). Tapetes microbianos recientes en el Manantial hidrotermal de baño San Ignacio, Linares, Nuevo León. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 67(3), 387-400.
- Challenger A y Soberón J (2008) Los ecosistemas terrestres. Págs 87-108 en: *Capital Natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México.
- Chan, Y., Lacap, D., Lau, M., Ha, K., Warren, K., Cockell, C., Cowan, D., McKay, C. y Pointing, S. (2012). Hypolithic microbial communities: between a rock and a hard place. *Environmental Microbiology*, 2272-2282. doi:10.1111/j.1462-2920.2012.02821.x.
- Chapin SF, Matson AP y Monney HA (2002) *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer-Verlag New York, 416 pp.
- Chernov IJ, Striganova BR y Ananjeva SI (1977) Soil fauna of polar desert at Cape, Cheluskin, Taimyr Peninsula, USSR. *Oikos* 29: 175-179.

- CONABIO, 2016. Regiones terrestres prioritarias de México, [www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp\\_112.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_112.pdf).
- Concostrina, L., Huber, E., Martinez, I., Flores, J., Reyes, J., Escudero, A. y Belnap, J. (2014). Biological soil crusts across disturbance-recovery scenarios: effect of grazing regime on community dynamics. *Ecological Applications*, 24(7), 1863-1877.
- Couradeau, E., Benzerara, K., Moreira, D., Gerard, E., Kazmierczak, J., Tavera, R. y López, P. (2011). Prokaryotic and eucaryotic community structure in field and cultured microbialites from the alkaline lake Alchichica (México). *PLOS one*, 6(12), 1-16. doi:10.1371/journal.pone.0028767.
- Couradeau, E., Karaoz, U., Chiem, H., Da Rocha, U., Northern, T., Brodie, E. y García, F. (2016). Bacteria increase arid-land soil surface temperature through the production of sunscreens. *Nature*, 1-7. doi:10.1038/ncomms10373.
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M., Gao, S., Landazuri, A., Betterton, E. y Saez, E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science Total Environment*, 1-43. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.013.
- Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral, A., Sáez, E. y Betterton, E. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science Total Environment*, PMC, 1-21. doi:10.1016/scitotenv.2014.03.138.
- Darby BJ y Neher D (2012). Stable isotope composition of microfauna supports the occurrence of biologically fixed nitrogen from cyanobacteria in desert soil food webs, *Journal of Arid Environment* 85: 76-78.
- Darby BJ, Neher D y Belnap J (2007) Soil nematode communities are ecologically more mature beneath late- than early-successional stage biological soil crusts. *Applied Soil Ecology* 35: 203-212.
- De Deckker, P., Abed, R., De Beer, R., Hinrichs, K., O'Loingsigh, T., Stuut, E., Tapper, N. y Van der Kaars, S. (2008). Geochemical and microbiological fingerprinting of airborne dust that fell in Canberra, Australia, in October 2002. *Geochemistry, Geophysics Geosystems*, 9(12), 1-22. doi:10.1029/2008GC002091.
- De Deckker, P., R. M. M. Abed, D. de Beer, K.-U. Hinrichs, T. O'Loingsigh, E. Schefuß, J.-B. W. Stuut, N. J. Tapper, and S. van der Kaars (2008), Geochemical and microbiological fingerprinting of airborne dust that fell in Canberra, Australia, in October 2002, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q12Q10, doi:10.1029/2008GC002091.
- De Leon, N., Lathem, T., Rodríguez, L., Barazesh, J., Anderson, B., Beyersdorf, A., Ziemba, L., Bergin, M., Nenes, A. y Konstantinidis, T. (2013). Microbiome of the upper troposphere: Species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications. *PNAS*, 110(7), 2575-2580. doi:10.1073/pnas.1212089110.
- Della Corte, V., Rietmeijer, F., Rotundi, A. y Ferrari, M. (2014). Introducing a new stratospheric dust-collecting system with potential use for upper atmospheric microbiology investigations. *Astrobiology*, 14(8), 694-705. doi:10.1089/ast.2014.1167.
- Duce, R. A., C. K. Unni, B. J. Ray, J. M. Prospero, and J. T. Merrill (1980), Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to North Pacific –Temporal variability, *Science*, 209, 1522–1524, doi:10.1126/science.209.4464.1522.
- Duda, J. P., Van Kranendonk, M., Thiel, V., Ionescu, D., Strauss, H., Schafer, N. y Reitner, J. (2016). A rare glimpse of Paleoproterozoic life: Geobiology of an exceptionally preserved microbial mat facies from the 3.4 Ga Strelley Pool Formation, Western Australia. *PLoS one*, 11(1), 1-18. doi:10.1371/journal.pone.0147629
- Dupraz, C., and Visscher, P. T., 2005. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*, 13, 429–438. Dupraz, C., and Visscher, P. T., (2005). Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*, 13, 429–438.
- Dvorak, P., Hasler, P. y Poulickova, A. (2012). Phylogeography of the *Microcoleus vaginatus* (cyanobacteria) from three Continents - A spatial and temporal characterization. *PLOS one*, 7(6), 1-10. doi:10.1371/journal.pone.0040153.
- Eldridge DJ, Zaady E y Schachak M (2000) Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel. *Catena* 40: 323-336.
- Ellwood, M., Law, C., Hall, J., Woodward, M., Strzpepek, R., Kuparinen, J., Thompson, K., Pickmere, S., Sutton, P. y Boyd, P. (2013). Relationship between nutrient stocks and inventories and phytoplankton physiological status along an oligotrophic meridional transect in the Tasman Sea. *Deep-Sea Research*, 72, 102-120. doi:10.1016/j.dsr.2012.11.001.
- Elosegi, A., Sabater, S., Gómez N., Donato, J. C., Giorgi, A., Guash, H. y Mateo, P. (2009). La biota de los ríos: los microorganismos autótrofos. En *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (págs. 219-240). España: Los autores ediciones. doi:ISBN: 978-84-96515-87-1.
- EPA (2016). <https://www3.epa.gov/>.

- Evan, A., Flamant, C., Fiedler, S. y Doherty, O. (2014). An analysis of aeolian dust in climate models. *Geophysical Research Letters*, 41, 1-6. doi:10.1002/2014GL060545.
- Fan, B., Guo, L., Li, N., Chen, J., Lin, H., Zhang, X., Shen, M., Shen, M., Rao, Y., Wang, C. y Ma, L. (2014). Earlier vegetation green-up has reduced spring dust storms. *Nature*, 4(6749), 1-6. doi:10.1038/srep06749.
- Fariás, M., Rascovan, N., Toneati, D., Albarracín, V., Flores, M., Poiré, D., Collavino, M., Aguilar, M., Vazquez, M. y Polerecky, L. (2013). The discovery of stromatolites developing at 3570 m above Sea level in a high-altitude volcanic lake Socompa, Argentinean Andes. *PLOS one*, 8(1), 1-15. doi:10.1371/journal.pone.0053497.
- Feng, Q., Ma, H., Jiang, X., Wang, X. y Cao, S. (2015). What has caused desertification in China? *Nature*, 5(15998), 1-8. doi:10.1038/srep15998.
- Feng, W., Zhang, Y., Wu, B., Zha, T., Jia, X., Qin, S., Shao, C., Liu, J., Lai, Z. y Fa, K. (2013). Influence of disturbance on soil respiration in biologically crusted soil during the dry season. *The Scientific World Journal*, 1-6. doi:10.1155/2013/408560.
- Ferrenberg, S., Reed, S. y Belnap J. (2015). Climate change and physical disturbance cause similar community shifts in biological soil crusts. *PNAS*, 112(39), 12116-12121. doi:10.1073/pnas.1509150112.
- Ferris, M. y Hirsch, F. (1991). Method for isolation and purification of cyanobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(5), 1448-1452.
- Field, J., Breshears, D., Whicker, J. y Zou, C. (2011). Interactive effects of grazing and burning on wind and water driven sediment fluxes: rangeland management implications, *Ecological Applications*, 2: 189-199.
- Field, J., Breshears, D., Whicker, J y Zou, C. (2012). Sediment capture by vegetation patches: Implications for desertification and increased resource redistribution, *Geophysical Research*, 117: 1-9, doi: 10.1029/2011JG001663.
- Field, J., Belnap, J., Breshears, D., Neff, J., Okin, G., Whicker, J., Painter, T., Ravi, S., Reheis, M. y Reynolds, R. (2009). The ecology of dust. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9. doi:10.1890/090050.
- Fragoso C, Reyes-Castillo O y Rojas P (2001) Importancia de la biota edáfica en México, *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.) 1: 1-10.
- Francescutti P. (2004). La construcción social del futuro: escenarios nucleares del cine de ciencia ficción, Tesis Doctoral, biblioteca.ucm.es/tesis/19972000/S/1/S1029402.pdf, Universidad Complutense de Madrid.
- Gao S, Ye X, Chu Y y Dong M (2010) Effect of biological soil crusts on profile distribution of soil water, organic carbon and total nitrogen in Mu Us Sandland, China. *Journal of Plant Ecology* 3: 279-284.
- García, P., López, A. y Nubel, U. (2001). Phylogenetic and morphological diversity of cyanobacteria in soil desert crusts from the Colorado Plateau. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(4), 1902-1910. doi:10.1128/AEM.67.4.
- García-Pichel F, Johnson SL, Youngkin D y Belnap J (2003) Small-scale vertical distribution of bacterial biomass and diversity in biological soil crust from arid land in the Colorado Plateau. *Microbial Ecology* 46: 312-321.
- García Alicia (2005) Soil crust, Marine corps, Geodermatophilia-Blog.
- Gérard, E., Ménez, B., Couradeau, E., Moreira, D., Benzerara, K., Tavera, R. y López, P. (2013). Specific carbonate-microbe interactions in the modern microbialites of Lake Alchichica (México). *ISME*, 13.
- Ghida, I. y Colin, S. (2016). Dust rains deliver diverse assemblages of microorganisms to the Eastern Mediterranean. *Nature*, 1-11. doi:10.1038/srep22657.
- Goetz, W., Bertelsen, P., Binau, C., Gunnlaugsson, H., Hviid, S., Kinch, K., Madsen, D., Madsen, M., Olsen M., Gellert R., Klingelhofer, G., Ming, D., Morris, R., Rieder, R., Rodionov, D., Souza, P., Schroder, C., Wdowiak, S. y Yen, A. (2005). Indication of drier periods on Mars from the chemistry and mineralogy of atmospheric dust. *Nature* 436, 62-65, doi: 10.1038/nature03807.
- Godínez-Alvarez H, Morin C, Rivera-Aguilar V (2012) Germination, survival and growth of three vascular plant on biological soil crust from a Mexican tropical desert. *Plant Biology* 14: 157-162.
- Gorbushina, A. (2007). Life on the rocks. *Environmental Microbiology*, 9(7), 1613-1631. doi:10.1111/j.1462-2920.2007.01301.x.
- Gregory, P. (1961). *The microbiology of the atmosphere*. London: Leonard Hill (Books) Limited.
- Griffin, D. W. (2007). Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health, *Clin. Microbiol. Rev.*, 20(3), 459-477, doi: 10.1128/CMR.00039-06.
- Guerra D. T. (2009). *Biometría*, UNAM, México, 132 pp.
- Gupta, R. y Mathews, D. (2010). Signature proteins for the major clades of cyanobacteria. *BMC, Evolutionary Biology*, 10(24), 1-20.

- Hamilton, G., Fielding, F., Chifings, A., Hart., B., Johnstone, R. y Mengersen, K. (2007). Investigating the use of a bayesian network to model the risk of *lyngbya majuscula* bloom initiation in Deception Bay, Queensland. *Human and Ecological Risk Assessment*, 13(6), 1271-1287.
- Harel, Y., Ohad, I. y Kaplan, A. (2004). Activation of photosynthesis and resistance to photoinhibition in cyanobacteria within Biological Desert Crust. *Plant Physiology*, 136, 3070-3079. doi:10.1104/pp.104.047712
- Harrison SP, Kohfeld KE, Roelandt C, Claquin T (2001) The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future. *Earth Sci Rev* 54:43-80.
- Havemann, S. y Foster, J. (2008). Comparative characterization of the microbial diversities of an artificial microbialite model and a natural stromatolite. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(23), 7410-7421. doi:10.1128/AEM.01710-08
- Hawkes CV (2004) Effects of biological soil crusts on seed germination of four endangered herbs in a xeric Florida shrubland during drought. *Plant Ecology* 170: 121-134.
- He, Y., Zhao, C., Song, M., Liu, W., Chen, F., Zhang, D. y Liu, Z. (2015). Onset of frequent dust storms in northern China at AD 1100. *Nature*, 5(17111), 1-7. doi:10.1038/srep17111.
- Hernández M (2006) La vida en los desiertos mexicanos. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 188 pp.
- Hernández, E. (2004). Procedimientos de preparación de muestra de acuerdo con el tipo de material. *Reportes Internos*, Instituto de Geología, 5-6.
- Hernández, E., Aguirre, N. y Palacio, J. (2011). Relación entre la determinación del pigmento clorofila a y el biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdova-Colombia). *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 159-169.
- Holland, H. (2006). The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philosophical Transactions*, 903-915. doi:10.1098/rstb.2006.1838.
- Holmes, C. W., and R. Miller (2004), Atmospherically transported metals and deposition in the southeastern United States: Local or transoceanic? *Appl. Geochem.*, 19, 1189– 1200, doi:10.1016/j.apgeochem.2004.01.015.
- Hoppert, M., Reimer, R., Kemmling, A., et al. (2004) Structure and Reactivity of a Biological Soil Crust from a Xeric Sandy Soil in Central Europe. *Geomicrobiol. J.* 21: 183-191.
- Hu, C., Liu, Y., Song, L. y Zhang, D. (2002). Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands. *Journal of Applied Phycology*, 281-292.
- INEGI, (2016). <http://www.inegi.org.mx/>.
- Jickells TD, An ZS, Andersen KK, Baker AR, Bergametti G, Brooks N, Cao JJ, Boyd PW, Duce RA, Hunter KA, Kawahata H, Kubilay N, laRoche J, Liss PS, Mahowald N, Prospero JM, Ridgwell AJ, Tegen I, Torres R (2005) Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science* 308:67-71.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J. J., Boyd, P. W., Duce, R. A., Hunter, K. A., Kawahata, H., Kubilay, N., LaRoche, J., Liss, P. S., Mahowald, N., Prospero, J. M., Ridgwell, A. J., Tegen I. y T. (2005). Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science*, 308(67), 67-71. doi:10. 1126/science. 1105959
- Jickells, T. y Moore, M. (2015). The importance of atmospheric deposition for Ocean productivity. *Annual Review Ecology Evolution*, 46, 481-501. doi:10.1146/annurev-ecolsys-112414-054118.
- Jiménez-Aguilar A (2005) Caracterización funcional de las costras biológicas de suelo en un pastizal de San Luis Potosí. Tesis de Maestría en Ciencias Aplicadas. Instituto Potosino de investigación científica y tecnológica A.C. San Luis Potosí, 60 pp.
- Jiménez-Aguilar, Huber-Sannwald E, Belnap J, Smart DR y Arredondo JT (2009) Biological soil crusts exhibit a dynamic response to seasonal rain and release from grazing with implications for soil stability. *Journal of Arid Environments* 73: 1158–1169.
- Journet, E., Balkanski, Y. y Harrison, P. (2014). A new data set of soil mineralogy for dust-cycle modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3801-3816. doi:10.5194/acp-14-3801-2014
- Journal of sedimentary research* (2015). Microbialite formation in seawater of increased alkalinity, Satonda Crater Lake, Indonesia.
- Kameda, T., Azumi, E., Fukushima, A., Tang, N., Matsuki, A., Kamiya, Y., Toriba, A. y Hayakawa, K. (2016). Mineral dust aerosols promote the formation of toxic nitropolycyclic aromatic compounds. *Nature*, 6(24427), 1-10. doi:10.1038/srep24427.
- Katran, I., Aratsker, L, Krasnov, H., Zaritsky, A., Kushmaro, A. y Ben-Dov, E. (2014). Richness and diversity in dust stormborne biomes at the Southeast Mediterranean. *Nature*, 4(5265), 1-7. doi:10.1038/srep05265.

- Kim, J., Ivanov, V. y Fatichi, S. (2016). Environmental stochasticity controls soil erosion variability. *Nature*, 6(22065), 1-7. doi:10.1038/srep22065.
- Kocak, M., Mihalopoulos, N., Tutsak, E., Violaki, K., Theodosi, C., Zampas, P. y Kalegeri, P. (2016). Atmospheric deposition of macronutrients (Dissolved Inorganic Nitrogen and Phosphorous) onto the Black Sea and Implications on Marine Productivity. *Journal of the atmospheric sciences*, 73, 1727-1739. doi:10.1175/JAS-D-15-0039.1.
- Kump, L. (2008). Geobiology-Quo vadis? *Geobiology*, 6, 423-424. doi:10.1111/j.1472-4669.2008.00175.x.
- Kuske, C., Yeager, C., Johnson, S., Ticknor, L. y Belnap, J. (2012). Response and resilience of soil biocrust bacterial communities to chronic physical disturbance in arid shrublands. *ISME*, 6, 886-897.
- La Madrid, H. (2009). Tesis de Maestría: Petrología y diagénesis de las dolomías con alta porosidad de la sonda de Campeche. Juriquilla, Querétaro: UNAM-Posgrado.
- Lalley JS, Viles HA, Henschel JR y Lalley V (2006) Lichen-dominated soil crusts as arthropod habitat in warm deserts. *Journal of Arid Environments* 67: 579–593.
- Lampitt, R., Achterberg, E., Anderson, T., Hughes, J., Iglesias, M., Kelly, B., Lucas, M., Popova, E., Sanders, R., Sheperd, J., Smythe, D. y Yool, A. (2008). Ocean fertilization: a potential means of geoengineering. *Philosophical Transactions*, 3919-3945. doi:10.1098/rsta.2008.0139.
- Landing, W. M., J. J. Perry, J. L. Guentzel, G. A. Gill, and C. D. Pollman (1995), Relationships between the atmospheric deposition of trace-elements, major ions, and mercury in Florida, *Water Air Soil Pollut.*, 80, 343–352, doi:10.1007/BF01189684.
- Larsson, J., Nylander, J. y Bergman, B. (2011). Genome fluctuations in cyanobacteria reflect evolutionary, developmental and adaptative traits. *BMC Evolutionary Biology*, 11(187), 1-21.
- Lau KM, Kim MK, Kim KM (2006) Asian monsoon anomalies induced by aerosol direct effects. *Clim Dyn* 26:855-864.
- Lawrence, C., Neff, J. y Farmer, G. (2011). The accretion of aeolian dust in soils of the San Juan Mountains, Colorado, USA. *Journal of Geophysical Research*, 116, 20. doi:10.1029/2010JF001899.
- Lawton, L., Marsalek, B., Padisak, J., Chorus, I. (1999). Determination of cyanobacteria in laboratory. *WHO*, 1-28.
- Layton. D. y Beamer. P. (2010). Migration of contaminated soil and airborne particulates to indoor dust. *Environmental Science Technology*, PMC, 43(21), 1-15. doi:10.1021/es9003735.
- Leach, S., Smith, I. y Cockell, C. (2006). Introduction: conditions for the emergence of life on the early Earth. *Philosophical Transactions*, 1675-1679. doi:10.1098/rstb.2006.1895.
- Li XR, Chen YW, Su YG, Tan HJ (2006) Effects of biological soil crust on desert insect diversity: evidence from the Tengger Desert of Northern China. *Arid Land Res. Manage.* 20: 263–280.
- Liu, Y., Cockell, C., Wang, G., Hu, C., Chen, L. y De Philippis, R. (2008). Control of lunar and Martian dust-experimental insights from artificial and natural cyanobacterial and algal crusts in the Desert of Inner Mongolia, China. *Astrobiology*, 8(1), 75-86. doi:10.1089/ast.2007.0122
- López-Cortez A, Maya Y García-Maldonado JQ (2010) Diversidad filogenética de especies de *Microcoleus* de costras biológicas de suelo de la península de Baja California, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 1- 7.
- Luszcz, E., Kendall, A. y Hyndman, D. (2015). High resolution spatially explicit nutrient source models for the Lower Peninsula of Michigan. *Journal of Great Lakes Research*, 618-629. doi:10.1016/j.jglr.2015.02.004.
- Maestre FT, Bowker MA, Cantón Y, Castillo-Monroy AP, Cortina J, Escolar C, Escudero A, Lázaro R y Martínez (2011) Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *Journal of Arid Environments* 75:1282-1291.
- Maestre, F., Escolar, C., Bardget, R., Dungait, J., Gonzalo, B. y Ochoa V. (2015). Warming reduces the cover and diversity of biocrust-forming mosses and lichens, and increases the physiological stress of soil microbial communities in a semiarid *Pinus halepensis* plantation. *Frontiers in Microbiology*, 1-12. doi:10.3389/fmicb.2015.00865.
- Marqués, M. J. López J. M. y Guerra D. T. (2009). Cuaderno de problemas resueltos y propuestos de probabilidad y estadística, UNAM, México, 268 pp.
- Marx, S. K., B. S. Kamber, and H. A. McGowan (2005), Provenance of long-travelled dust determined with ultratrace element composition: A pilot study with samples from New Zealand glaciers, *Earth Surf. Process. Landf.*, 30, 699–716, doi:10.1002/esp.1169.
- Maya Y López-Cortés A (2002) Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal* 19: 505-518.



- McConell, M., Koop, R., Vasil'ev, S. y Doug, B. (2002). Regulation of the distribution of chlorophyll and phycobilin - Absorbed excitation energy in cyanobacteria. A structure - Based model for the light state transition. *Plant Physiology*, 130, 1201-1212. doi:10.1104/pp.009845.
- Miao, Y., Jin, H. y Cui, J. (2016). Human activity accelerating the rapid desertification of the Mu Us Sandy Lands, North China. *Nature*, 1-6. doi:10.1038/srep23003.
- Miguel J. 2013. Fauna de costras biológicas y suelo de islas de recursos formadas por Mimosa luisana, en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. Tesis de Licenciatura en Biología, FES-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal (76 pp).
- Miller, R., Tegen, I. y Perlwitz, J. (2004). Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, 109(D04203), 24. doi:10.1029/2003JD004085.
- Miyagishima, S., Wolk, P. y Osteryoung, K. (2005). Identification of cyanobacterial cell division genes by comparative and mutational analyses. *Molecular Microbiology*, 126-143. doi:10.1111/j.1365-2958.2005.04548.x.
- Moreira, C., Vasconcelos, V. y Antunes A. (2013). Phylogeny and biogeography of cyanobacteria and their produced toxins. *Marine Drugs*, 11, 4350-4369. doi:10.3390/md11114350.
- Morrill, P., Kuenen, G., Johnson, O., Suzuki, S., Rietze, A., Sessions, A., Fogel, M. y Nealon, K. (2013). Geochemistry and geobiology of a present-day serpentinization site in California: The Cedars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 109, 222-240. doi:10.1016/j.gca.2013.01.043.
- Muhs, D., Budahn, J., Prospero, J., Skipp, G. y Herwitz, S. (2012). Soil genesis on the island of Bermuda in the Quaternary: The importance of African dust transport and deposition. *Journal of Geophysical Research*, 117, 26. doi:10.1029/2012JF002366.
- NASA. <http://mars.nasa.gov/news/whatnew/index.cfm?Fuseaction=ShowNews&NewsID=1854>
- Neher DA, Lewins SA, Weicht TR y Darby BJ (2009) Microarthropod communities associated with biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan deserts. *Journal of Arid Environments* 73: 672-677.
- Newman, C., Lewis, S. y Read, P. (2002). Modeling the Martian dust cycle, 1. Representations of dust transport processes. *Journal of Geophysical Research*, 107(E12), 1-18. doi:10.1029/2002JE001910, 2002
- Nitti, A., Daniels, C., Siefert, J., Souza, V., Hollander, D. y Breitbart, M. (2012). Spatially resolved genomic, stable isotopic, and lipid analyses of a Moderns freshwater microbialite from Cuatro Ciénegas, México. *Astrobiology*, 12(7), 685-698. doi:10.1089/ast.2011.0812.
- Papineau, D., Purohit, R., Fogel, M. y Shields, G. (2013). High phosphate availability as a possible cause for massive cyanobacterial production of oxygen in the Paleoproterozoic atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 362, 225-236. doi:10.1016/j.epsl.2012.11.050.
- Patzelt, D., Hodak, L., Friedl, T., Pietrasiak, N. y Johansen, J. (2014). Biodiversity of soil cyanobacteria in the hyper-arid Atacama desert, Chile. *Journal of phycology*, 1-13. doi:10.1111/jpy.12196.
- Perroni-Ventura Y, Montaña C y García-Oliva F (2006) Relationship between soil nutrient availability and plant species richness in a tropical semi-arid environment. *Journal of Vegetation Science* 17: 719-728.
- Perroni-Ventura Y, Montaña C, García-Oliva F (2010) Carbon-nitrogen interactions in fertility island soil from a tropical semi-arid ecosystem. *Functional Ecology* 24: 233-242.
- Petroff, A., Sim, M., Maslov, A., Krupenin, M., Rothman, D. y Bosak T. (2010). Biophysical basis for the geometry of conical stromatolites. *PNAS*, 107(22), 9956-9961. doi:10.1073/pnas.1001973107.
- Pietrasiak, N. (s.f.). Field guide to classify biological soil crusts for ecological site evaluation. John Carroll University. Plane JMC. (2012). Cosmic dust in the earth's atmosphere. *Chem. Soc. Rev.*, 41, 6507-6518.
- Porada, P., Weber, B., Elbert, W., Poschl, U. y Kleidom, A. (2014). Estimating impacts of lichens and bryophytes on global biogeochemical cycles. *Global Biogeochemical Cycles*, 28, 71-85. doi:10.1002/2013GB004705.
- Powell, J., Chatziefthimiou, A., Banack, S., Cox, A. y Metcalf, J. (2013). Desert crust microorganisms, their environment, and human health. *Journal of Arid Environments*, 1-7. doi:10.1016/j.jaridenv.2013.11.004.
- Prospero, J. M. (1999), Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States US: Implications for air quality, *J. Geophys. Res.*, 104, 15,917-15,927, doi: 10.1029/1999JD900072.
- Quiñones-Vera et al., 2009 Quiñones-Vera JJ, Castellanos-Pérez E, Valencia-Castro CM, Martínez-Ríos JJ, Sánchez Olvera T y Montes-González CA (2009) Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal. *Terra Latinoamericana* 27: 287-293.
- Quintana, N., Van der Kooy, F., Van de Rhee, M., Voshol, G. y Verpoorte, R. (2011). Renewable energy from cyanobacteria: energy production optimization by metabolic pathway engineering. *Applies Microbiology Technology*, 91, 471-490. doi:10.1007/s00253-011-3394-0.

- Raanan, H., Felde, V., Peth, S., Drahorad, S., Ionescu, D., Eshkol, G., Treves, H., Henningsen, P., Berkowicz, S., Keren, N., Horn, R., Hagemann, M. y Kaplan, H. (2015). Three-dimensional structure and cyanobacterial activity within a desert biological soil crust. *Environmental Microbiology*, 1-12. doi:10.1111/1462-2920.12859.
- Rae, B., Long, B., Badger, M. y Dean, G. (2013). Functions, compositions, and evolution of the two types of carboxisomes: polyhedral microcompartments that facilitate CO<sub>2</sub> fixation in cyanobacteria and some proteobacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 77(3), 357-379. doi:10.1128/MMBR00061-12.
- Rao, S., Chan, Y., Bugler, D., Bhatnagar, A., Bhatnagar, M. y Ponting, S. (2015). Microbial diversity in soil, sand, dune and rock substrates of the thar Monsoon Desert, India. *Indian Journal Microbiology*, 1-11. doi:10.1007/s12088-015-0549-1
- Ravi, S., D'Odorico, P., Breshears, D., Field, J., Goudie, A., Huxman, T., Li, J., Okin, G., Swap, R., Thomas, A., Van Pelt, S., Whicker, J. y Zobeck, T. (2011). Aeolian processes and the biosphere. *Reviews of Geophysics*, 49(RG3001), 1-45. doi:10.1029/2010RG000328.
- Read, C., Duncan, D., Vesk, P. y Elith, J. (2014). Biocrust morphogroups provide an effective and rapid assesment tool for drylands. *Journal of Applied Ecology*, 51, 1740-1749. doi:10.1111/1365-2664.12336.
- Read, C., Elith, J. y Vesk, P. (2016). Testing a model of biological soil crust succession. *Journal of Vegetation Science*, 27, 176-186. doi:10.1111/jsv.12332.
- Reitner J. y Thiel V. (2010). *Encyclopedia of Geobiology*. Ed. Springer.
- Reynolds R, Belnap J, Reheis M, Lamothe P, Luiszer F (2001) Aeolian dust in Colorado Plateau soils: nutrient inputs and recent change in source. *Proc Natl Acad Sci USA* 98:7123-7127.
- Reynolds, R., Belnap, J., Reheis, M., Lamothe, P. y Luiszer, F. (19 de Junio de 2001). Aeolian dust in Colorado Plateau soils: Nutrient inputs and recent change in source. *PNAS*, 98(13), 7123-7127. doi:10.1073/pnas.121094298.
- Reynolds, R., Reheis, M., Yount, J. y Lamothe, P. (2006). Composition of aeolian dust in natural traps on isolated surfaces of the central Mojave Desert insights to mixing, sourcesn and nutrient inputs. *Journal of Arid Environments*, 66, 42-61. doi:10.1016/j.jaridenv.2005.06.031.
- Rivera-Aguilar V, Godínez-Alvarez H, Manuell-Cacheux I y Rodríguez-Zaragoza S (2005) Physical effects of biological soil crusts on seed germination of two desert plants under laboratory conditions. *Journal of Arid Environments* 63: 344-352.
- Rivera-Aguilar V, Godínez-Álvarez H, Moreno-Torres R, Rodríguez-Zaragoza S (2009) Soil physico-chemical properties affecting the distribution of biological soil crusts along an environmental transect al Zapotitlán Drylands, México. *Journal of Arid Environments* 73: 1023-1028.
- Rivera-Aguilar V, Montejano S, Rodríguez-Zaragoza A, Durán-Díaz (2006) Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crusts of the Tehuacán Valley, Puebla, Mexico. *Journal of Arid Environments* 67: 208-225.
- Rolz, C., Castellanos, E. y Dix, M. (s.f.). Empleo de modelos empíricos para estimar la cantidad de cianobacterias presentes en el fitoplancton del lago de atitlán. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*(22), 66-71.
- Rosentreter R, Bowker M y Belnap JA (2008) *Field Guide to Biological Soil Crusts of Western U.S. Drylands*. Government Printing Office, Denver, Colorado, 104 pp.
- Rosseli, R., Fiamma, M., Deligios, M., Pintus, G., Pellizzaro, G., Canu, A., Duce, P., Squartini, A., Muresu, R. y Cappuccinelli, Pietro. (2015). Microbial immigration across the mediterranean via airborne dust. *Nature*, 5(16306), 1-10. doi:10.1038/srep16306.
- Rossi, F. y De Philippis, R. (2015). Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats. *Life*, 5, 1218-1238. doi:10.3390/life5021218.
- Rozenstein, O., Zaady, E., Katra, I., Karnieli, A., Adamowki, J. y Yizhaq, H. (2014). The effect of sand grain size on the development of cyanobacterial biocrusts. *Aeolian Research*, 1-10. doi:10.1016/j.aeolian.2014.08.003.
- Rueter, J. y Petersen, R. (1987, Online, 2010). Micronutrient effects on cyanobacterial growth and physiology. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 21(3), 435-445. doi:10.1080/00288330.1987.9516239.
- Rzedowski, 1978 Rzedowsky J (1978) *Vegetación de México*. Limusa, México, 432 pp.
- Sanchez, C., Mercedes, S. y Benintende, M. (2011). Cianobacterias en diferentes estadios fenológicos del cultivo de arroz en entre ríos (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 181-189.
- Sandoval-Pérez AL (2011) Efecto de Mimosa luisana (Leguminosae) y de las costras biológicas sobre la dinámica del carbono y del nitrógeno en el suelo de un ecosistema semiárido en México. Tesis de Maestría en Biología, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, D.F., 92 pp.

- Savoie, D. L., and J. M. Prospero (1980), Water-soluble Potassium, Calcium and Magnesium & Mg in the aerosols over the tropical North-Atlantic, N. Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 85, 385–392, doi: 10.1029/JC085iC01p00385.
- Schneider, D., Arp, G., Reimer, A., Reitner, J. y Daniel R. (2013). Phylogenetic analysis of a microbialite-forming microbial mat from a hypersaline lake of the Kiritimati Atoll, Central Pacific. *PLOS one*, 8(6), 1-14. doi:10.1371/journal.pone.0066662.
- Schobben, M., Stebbins, A., Ghaden, A., Strauss, H., Korn, D. y Korte, C. (2015). Eutrophication, microbial-sulfate reduction and mass extinctions. *Communicative & Integrative Biology*, 9(1), 1-9. doi:10.1080/19420889.2015.1115162.
- Schwieterman, E., Cockell, C. y Meadows, V. (2015). Nonphotosynthetic pigments as potential biosignatures. *Astrobiology*, 15(5), 341-361. doi:10.1089/ast.2014.1178.
- Segura, A. (2010). La tierra vista como un exoplaneta. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 374-385.
- Seidl, M. y Dietrich, W. (1992). The problem of channel erosion into bedrock. *CATENA, Functional Morphology*, 101-124.
- Setta, B., Barbarino, E., Passos, Fabio. y Lourenco, S. (2014). An assesment of the usefulness of the cyanobacterium *Synechococcus subalsus* as a source of biomass for biofuel production. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(2), 364-375. doi:10.3856/vol42-issue2-fulltext-7
- Shinn, E. A., G. W. Smith, J. W. Prospero, P. Betzer, M. L. Hayes, V. H. Garrison, and R. T. Barber (2000), African dust and the demise of the Caribbean coral reefs, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3029–3032, doi: 10.1029/2000GL011599.
- Shirmeister, B., Antonelli, A. y Bagheri, H. (2011). The origin of multicellularity in cyanobacteria. *BMC Evolutionary Biology*, 11(45), 1-21.
- Shirmeister, B., De Vos, J., Antonelli, A. y Bagheri, H. (2013). Evolution of multicellularity coincided with increased diversification of cyanobacteria and the Great Oxidation Event. *PNAS*, 110(5), 1791-1796. doi:10.1073/pnas.1209927110.
- Shirmeister, B., Gugger, M. y Donoghue, P. (2015). Cyanobacteria and the great oxidation event: evidence from genes and fossils. *Paleontology*, 58(5), 769-785. doi:10.1111/pala.12178.
- Sing, D. y Sing, C. (2010). Impact of direct soil exposures from airborne dust and geophagy on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1205-1223. doi:10.3390/ijerph7031205.
- Sinsabaugh, R., Rudgers, J., Kuske, C., Martínez, N. y Sandquist, D. (2015). Soil microbial responses to nitrogen addition in arid ecosystems. *Frontiers in Microbiology*, 6(819), 12. doi:10.3389/fmicb.2015.00819.
- Smith, H., Baqué, M., Duncan, A., Lloyd, C., McKay, C. y Billi, D. (2014). Comparative analysis of cyanobacteria inhabiting rocks with diferent light transmittance on the Mojave Desert; A Mars terrestrial analogue. *International Journal of Astrobiology*, 1-7. doi:10.1017/S1473550414000056.
- Smith, SM, Abed, RMM y Garcia-Pichel, F (2004) Biological Soil Crusts of Sand Dunes in Cape Cod National Seashore, Massachusetts, USA. *Microbiana Ecol*, 48 (2): 200-208.
- Souza, V., Siefert, J., Escalante, A., Elser, J. y Eguarte, L. (2012). The Cuatro Ciénegas Basin in Coahuila, México: An Astrobiological Precambrian Park. *Astrobiology*, 12(7), 641-647. doi:10.1089/ast.2011.0675.
- Steven, B., Gallegos, L., Belnap, J. y Kuske, C. (2013). Dryland soil microbial communities display spatial biogeographic patterns associated with soil depth and soil parent material. *Microbiology Ecology*, 101-113. doi:10.1111/1574-6941.12143.
- Steven, B., Lionard, M., Kuske, C. y Vincent, W. (2013). High bacterial diversity of biological soil crusts in water tracks over permafrost on the high Arctic Polar Desert. *PLoS one*, 8(8), 1-9. doi:10.1371/journal.pone.0071489.
- Stres, B., Sul, Woo, J., Murovec, B. y Tiedje, J. (2013). Recently deglaciated high-altitude soils of the Himalaya: diverse environments, heterogenous bacterial communities and long-range dust inputs from the upper troposphere. *PLOS one*, 8(9), 1-10. doi:10.1371/journal.pone.0076440.
- Stuut, J.-B. W., M. Zabel, V. Ratmeyer, P. Helmke, E. Schefuß, G. Lavik, and R. R. Schneider (2005), Provenance of present-day eolian dust collected off NW Africa, *J. Geophys. Res.*, 110, D04202, doi: 10.1029/2004JD005161.
- Swanner, E., Mloszewska, A., Cirpka, O., Schoenberg, R., Konhauser, K. y Kappler, A. (2015). Modulation of oxygen production in Archaean oceans by episodes of Fe (II) toxicity. *Nature, Geoscience*, 8, 126-130. doi:10.1038/NCEO2327.
- Swap, R., M. Garstang, S. Greco, R. Talbot, and P. Kallberg (1992), Saharan dust in the Amazon basin, *Tellus, Ser. B*, 44, 133–149.
- Swart, P., Oehlert, A., Mackenzie, G., Eberli, G. y Reijmer, J. (2014). The fertilization of the Bahamas by Saharan dust: A trigger for carbonate precipitation. *Geology*, 4. doi:10.1130/G35744.1.

- Talbot, R. W., M. O. Andreae, T. W. Andreae, and R. C. Harriss (1988), Regional aerosol chemistry of the Amazon during the dry season, *J. Geophys. Res.*, 93, 1499–1508, doi: 10.1029/JD093iD02p01499.
- Tan, C., Cao, X., Yuan, S., Wang, W., Feng, Y. y Qiao, B. (2015). Effects of long-term conservation tillage on soil nutrients in sloping fields in regions characterized by water and wind erosion. *Nature*, 5(17592), 1-8. doi:10.1038/srep17592.
- Tan, S., Yao, X., Gao, H., Shi, G., Yue, X. (2013). Variability in the correlation between Asian dust storms and chlorophyll a concentration from the north to Equatorial Pacific. *PLOS one*, 8(2), 1-7. doi:10.1371/journal.pone.0057656.
- Tegen, I., Harrison, S., Kohfeld, K. y Prentice, C. (2002). Impact of vegetation and preferential source areas on global dust aerosol: Results from a model study. *Journal of Geophysical Research*, 107(d21), 1-36. doi:10.1029/2001JD000963
- Toledo, M. V. & Ordóñez, M. J. 1998. El panorama de la biodiversidad de México: una revisión de los hábitats terrestres. Págs. 739-757, en: Ramamoorthy TP, Bye R, Lot A y Fa J (eds). *La diversidad biológica de México. Orígenes y distribución*. Instituto de Biología. UNAM. México.
- Torres, F. (2014). *Microbialitas de la formación cupido en el noreste de México*. Linares, Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Trainer, M. (2013). Atmospheric Prebiotic Chemistry and Organic Hazes. *Current Organic Chemistry*, 17(16), 1710-1723.
- UPIBI:<http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/Microbiolog%C3%ADa%20ambiental/II.TecMic-Preparaciones.pdf>.
- Valiente-Banuet A (1996) La conservación de los desiertos un desafío. *Revista Ocelot* 4: 34-37.
- Velasco-Molina HA (1991) Zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo. Limusa, México, 725 pp.
- Verseux, C., Baqué, M., Lehto, K., Pierre, De Vera, J., Rothschild, L. y Billi, D. (2015). Sustainable life support on Mars—the potential roles of cyanobacteria. *International Journal of Astrobiology*, 28. doi:10.1017/S147355041500021X.
- Viles, H. (2008). Understanding dryland landscape dynamics: Do Biological Crusts Hold the Key? *Geography Compass*, 899-919. doi:10.1111/j.1749-8198.2008.00099.x.
- Watkins, D., McClean, M., Fraser, A., Weinberg, J., Stapleton, H. y Webster, T. (2013). Associations between PBDE in Office Air, Dust, and Surface Wipes. *Environmental Int*, Elsevier, PMC, 1-24. doi:10.1016/j.envint.2013.06.001
- Weber, B., Wu, D., Tamm, A., Ruckteschler, N., Rodriguez, E., Steinkamp, J., Meusel, H., Elbert, W., Behrendt, T., Sorgel, M., Cheng, Y., Crutzen, P., Su, H. y Poshl, U. (2015). Biological soil crusts accelerate the nitrogen cycle through large NO<sub>x</sub> and HONO emissions in drylands. *PNAS*, 112(50), 15384-15389. doi:10.1073/pnas.1515818112
- Weinzierl, B., Petzold, A., Esselborn, M., Wirth, M., Rasp, K., Kandler, K., Shutz, L., Koepke, P. y Fiebig, M. (2009). Airborne measurements of dust layer properties, particle size distribution and mixing state of Saharan dust during SAMUM 2006. *TELLUS*, 96-117.
- White III, R., Chan, A., Gavelis, G., Leander, B., Brady, A., Slater, G., Lim, D. y Suttle, C. (2016). Metagenomic analysis suggests modern freshwater microbialites harbor a distinct core microbial community. *Frontiers in Microbiology*, 1-14. doi:10.3389/fmicb.2015.01531.
- Womack, A., Bohannon, B. y Green, J. (2010). Biodiversity and biogeography of the atmosphere. Review. *Biogeography of the atmosphere*, 365, 3645-3653. doi:10.1098/rstb.2010.0283.
- Wu, Y., Yu, G., Li, R., Song, L., Jiang, H., Riding, R., Liu, L., Liu, D. y Zhao R. (2014). Cyanobacterial fossils from 252 Ma old microbialites and their environmental significance. *Nature*, 1-5. doi:10.1038/srep03820.
- Yamaguchi, N., Ichijo, T., Sakotani, A., Baba, T. y Nasu, M. (2012). Global dispersion of bacterial cells on Asian dust. *Nature*, 2(525), 1-6. doi:10.1038/srep00525.
- Yamaguchi, N., Park, J., Kodama, M., Ichijo, T., Baba, T. y Nasu, M. (2014). Changes in the airborne bacterial community in outdoor environments following Asian dust events. *Microbes and environments*, 29(1), 82-88. doi:10.1264/jsme2.ME13080.
- Young, K., Grover, H. y Bowker, M. (2016). Altering biocrusts for an altered climate. *New Phytologist*, 18-22.
- Yu, H., M. Chin, T. Yuan, H. Bian, L. A. Remer, J. M. Prospero, A. Omar, D. Winker, Y. Yang, Y. Zhang, Z. Zhang, and C. Zhao (2015), The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1984–1991.
- Zahnle, K., Schaefer, L. y Fegley, B. (2010). Earth's Earliest Atmospheres. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 1-17. doi: 10.1101/cshperspect.a004895.

Zhao, G., Wen, Z., Wang, F. y Gao, P. (2013). Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land degradation & development*, 499-510. doi:10.1002/ldr.2246.

**Apéndice 1. Características para el análisis de C, P y N**

**Análisis por duplicado: 4 muestras de polvo atmosférico utilizando un analizador elemental CNHS/O Perkin Elmer 2400 series II, en el modo CHN bajo las siguientes condiciones analíticas:**

Gas acarreador:	Helio
Temperatura de combustión:	980° C
Temperatura de reducción:	640° C
Detector:	Conductividad térmica
Compuesto de calibración:	Acetanilida
material de referencia:	LECO soil calibration sample for CNS part 502-309

**Extracciones parciales: Muestras preparadas mediante digestión asistida por microondas empleando 3mL de HCl y 9 ml de HNO3 de acuerdo al método EPA 3051A**

**Análisis siguiendo el método EPA 6010C**


**Se utilizó un ICP-OES PerKin Elmer 8700 para hacer el análisis y el P se analizó en 214.91 nm**

**Se usaron los siguiente estándares certificados que reportan los siguientes valores de P**


**GBW 8302 P**

**860+/- 73 ppm**

Apéndice 2. Informe de resultados ICPMS




### INFORME INTERNO DE RESULTADOS



IGL/INF-LABQUP-21-2015

<b>Área</b>	<b>Identificación del Informe</b>	<b>Fecha de Emisión del informe</b>																								
LABQUP	IGL/INF-LABQUP-21-2015	11 abril 2016																								
<b>Solicitante</b>		<b>Procedimiento de Muestreo Utilizado</b>																								
Dr. Hugo Beraldi Campesi		No reportado																								
<b>Fecha de Recepción de Muestras</b>	<b>Periodo de Preparación de Muestras</b>	<b>Número de Orden de trabajo/ año</b>																								
16 octubre 2015	20 de octubre al 07 de noviembre de 2015	21/15																								
<b>Periodo de análisis</b>		<b>Equipo Utilizado</b>																								
25 DE NOVIEMBRE 2016		Q-ICP-MS Agilent 7500ce																								
<b>Métodos o Normas de Análisis Empleados</b>																										
PROTOCOLO INTERNO DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA.																										
<b>Referencias</b>																										
BITPER/LABQUP-02/136-137; BITEQ/LABQUP-02/129; BITEQ/LABQUP-03/06-07																										
<b>Observaciones</b>																										
<p>Nota: Los resultados corresponden a las muestras solicitadas con el formato "SOLICITUD-LABQUP ICPMS-OT-15 2015"</p> <p>CONTROLES DE CALIDAD:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>Especificación</th> <th>Criterio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R-131015-1</td> <td>Blanco de reactivos (2% ácido nítrico tridestilado)</td> <td>&lt;LDM</td> </tr> <tr> <td>BM-131015-1</td> <td>Blanco de método (2% ácido nítrico tridestilado)</td> <td>Depende del proceso</td> </tr> <tr> <td>S-131015-1</td> <td>Estándar de verificación (concentración 25 ppb para todos los elementos)</td> <td>± 10%</td> </tr> <tr> <td>MD-RV-3</td> <td>Muestra duplicada</td> <td>DPR &lt; 20%</td> </tr> <tr> <td>MD-SC-2-83</td> <td>Muestra duplicada</td> <td>DPR &lt; 20%</td> </tr> <tr> <td>DPR</td> <td>Diferencia porcentual relativa</td> <td>&lt; 20% para M y MD</td> </tr> <tr> <td>MRC-030915-1</td> <td>SBC-1 SHALE</td> <td>± 10%</td> </tr> </tbody> </table> <p>Nota: * &lt;LDM = Menor al límite de detección del método (LDM).</p>			Tipo	Especificación	Criterio	R-131015-1	Blanco de reactivos (2% ácido nítrico tridestilado)	<LDM	BM-131015-1	Blanco de método (2% ácido nítrico tridestilado)	Depende del proceso	S-131015-1	Estándar de verificación (concentración 25 ppb para todos los elementos)	± 10%	MD-RV-3	Muestra duplicada	DPR < 20%	MD-SC-2-83	Muestra duplicada	DPR < 20%	DPR	Diferencia porcentual relativa	< 20% para M y MD	MRC-030915-1	SBC-1 SHALE	± 10%
Tipo	Especificación	Criterio																								
R-131015-1	Blanco de reactivos (2% ácido nítrico tridestilado)	<LDM																								
BM-131015-1	Blanco de método (2% ácido nítrico tridestilado)	Depende del proceso																								
S-131015-1	Estándar de verificación (concentración 25 ppb para todos los elementos)	± 10%																								
MD-RV-3	Muestra duplicada	DPR < 20%																								
MD-SC-2-83	Muestra duplicada	DPR < 20%																								
DPR	Diferencia porcentual relativa	< 20% para M y MD																								
MRC-030915-1	SBC-1 SHALE	± 10%																								

*Nota: El usuario se compromete a dar los agradecimientos correspondientes, en cualquier artículo, tesis o trabajo que se derive de los resultados presentados, tanto al Laboratorio de Química Ultrapura e ICP-MS como al M en C Ernesto Hernández Mendiola por su trabajo realizado en la preparación y análisis de las muestras. Así mismo, el usuario se compromete a mandar una copia simple de dicho agradecimiento via correo.*



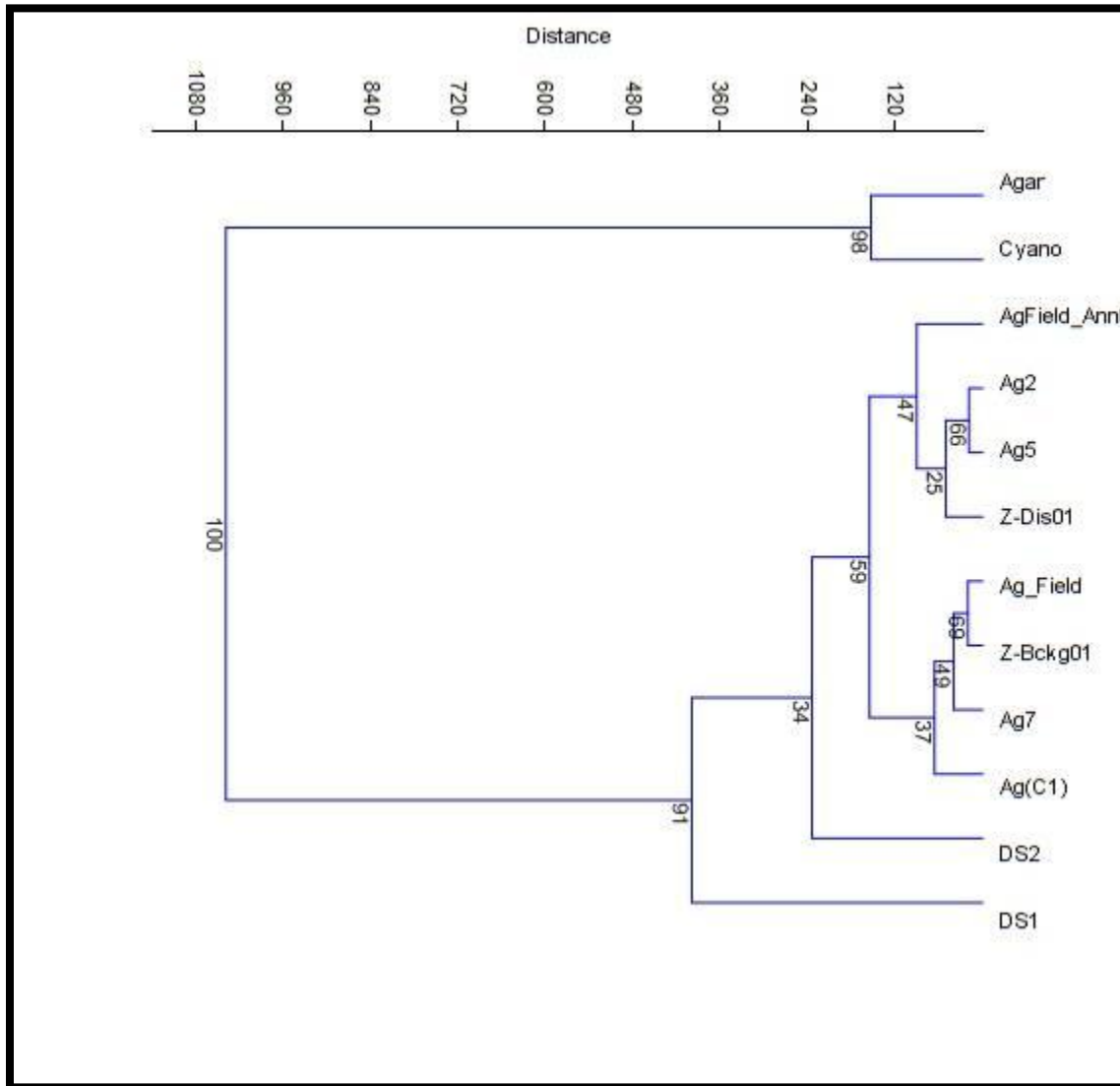
M. en C. Ernesto Hernández Mendiola  
Académico Titular "B".

Responsable del Laboratorio de Química Ultrapura (LABQUP) y de Q-ICP-MS.  
DEPTO. DE GEOQUÍMICA, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM  
56224310 EXT 161, 230, 210; email: [ernestohm@geologia.unam.mx](mailto:ernestohm@geologia.unam.mx); [ernestohmen@gmail.com](mailto:ernestohmen@gmail.com)

ESTOS RESULTADOS AMPARAN ÚNICAMENTE LAS MUESTRAS PROBADAS, SIN QUE ESTAS SEAN REPRESENTATIVAS DE UN UNIVERSO O LOTE. EL PRESENTE INFORME DE PRUEBA NO DEBE REPRODUCIRSE, EXCEPTO EN SU TOTALIDAD, SIN LA APROBACION POR ESCRITO DEL LABORATORIO DE QUÍMICA ULTRAPURA DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA DE LA UNAM

F/PTA-S/N

**Apéndice 3. Dendograma de relaciones elementales entre las muestras por ICPMS**





#### Apéndice 4. Procedimiento técnico para XRD

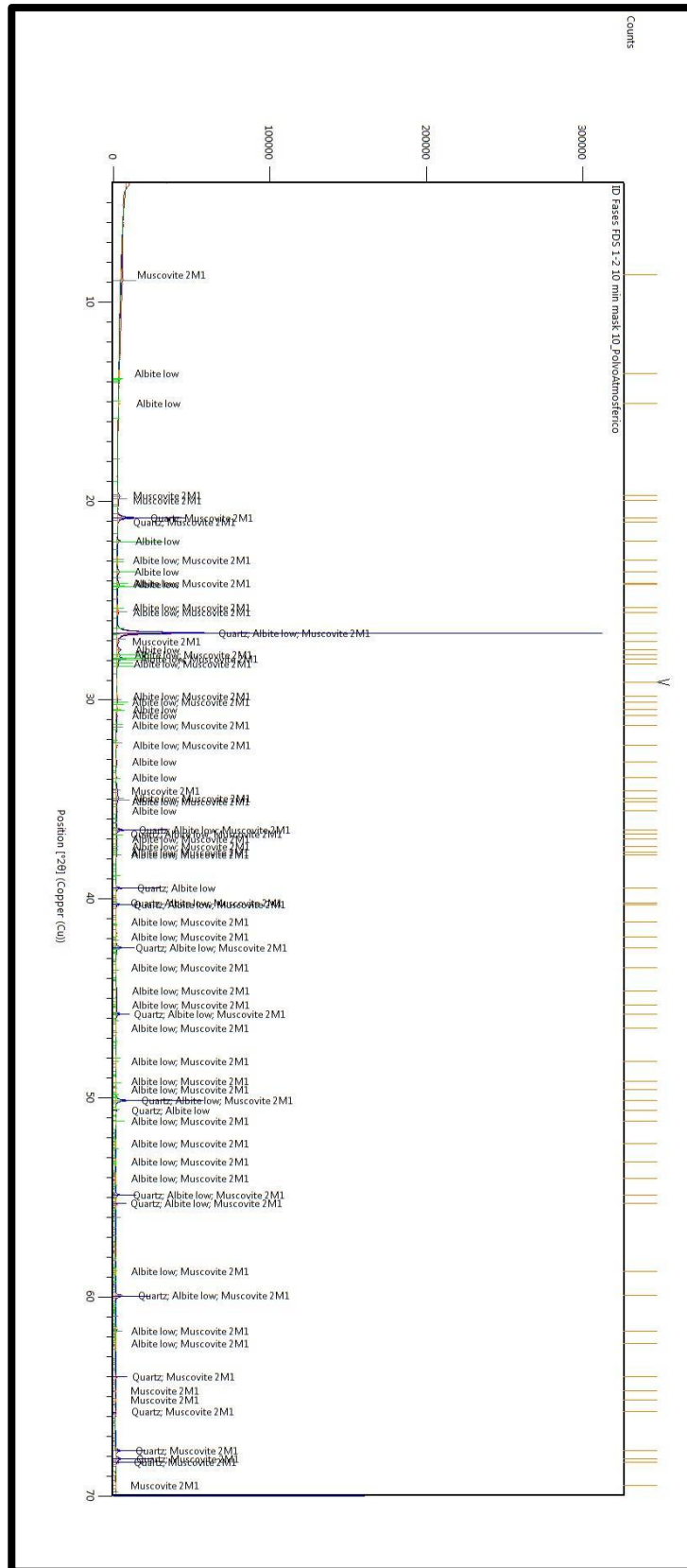
a) El difractograma se obtuvo en un difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D. Las muestras se molturaron y homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se midieron utilizando un portamuestras de aluminio (fracciones no orientadas). La medición se realizó en el intervalo angular  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $70^\circ$  en escaneo por pasos con un “step scan” de  $0.003^\circ$  (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso.

b) El difractograma se obtuvo en un difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D. La muestra se midió utilizando un portamuestras sin fondo (zero Background holder) La medición se realizó en el intervalo angular  $2\theta$  de  $4^\circ$  a  $70^\circ$  en escaneo por pasos con un “step scan” de  $0.003^\circ$  (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso.

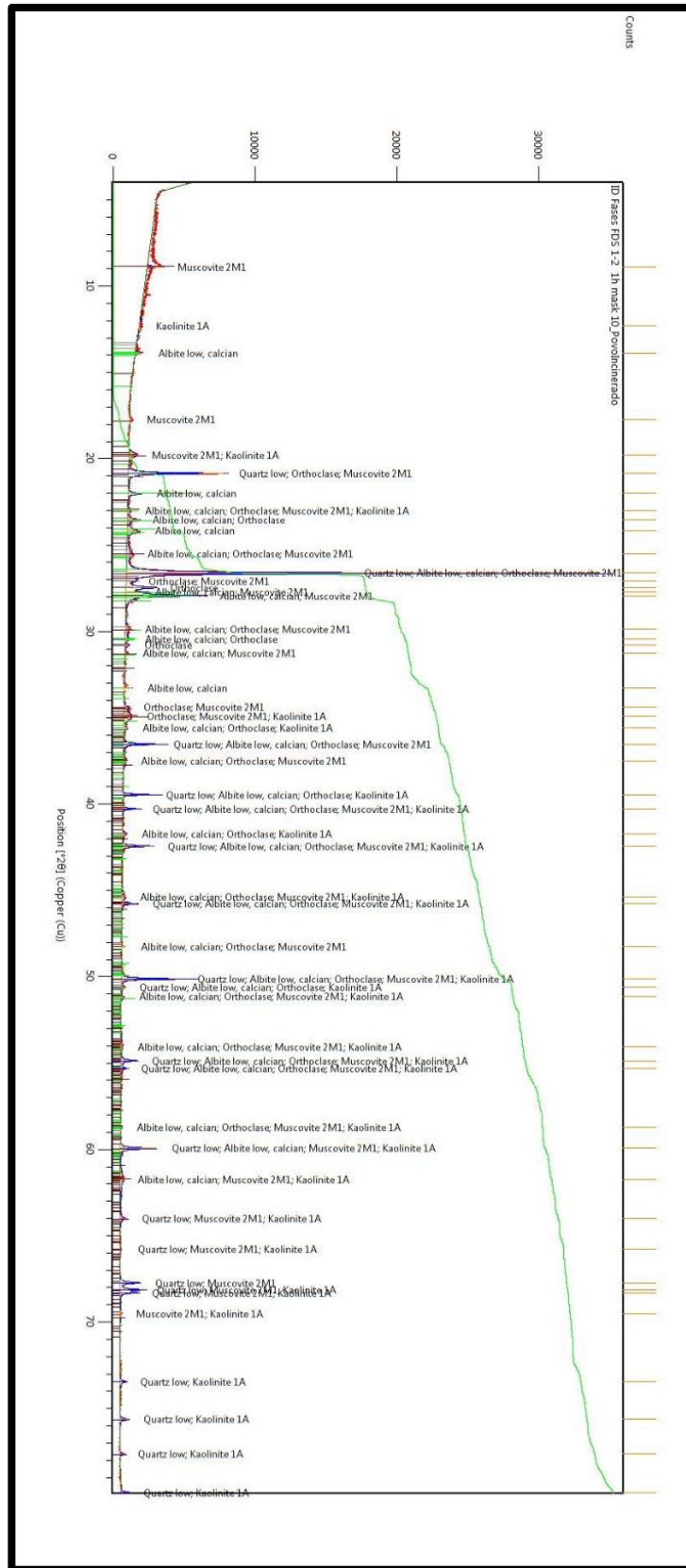
#### Apéndice 5. Tratamientos en Caja Petri luz azul (izquierda), luz negra (centro) y luz roja (derecha).



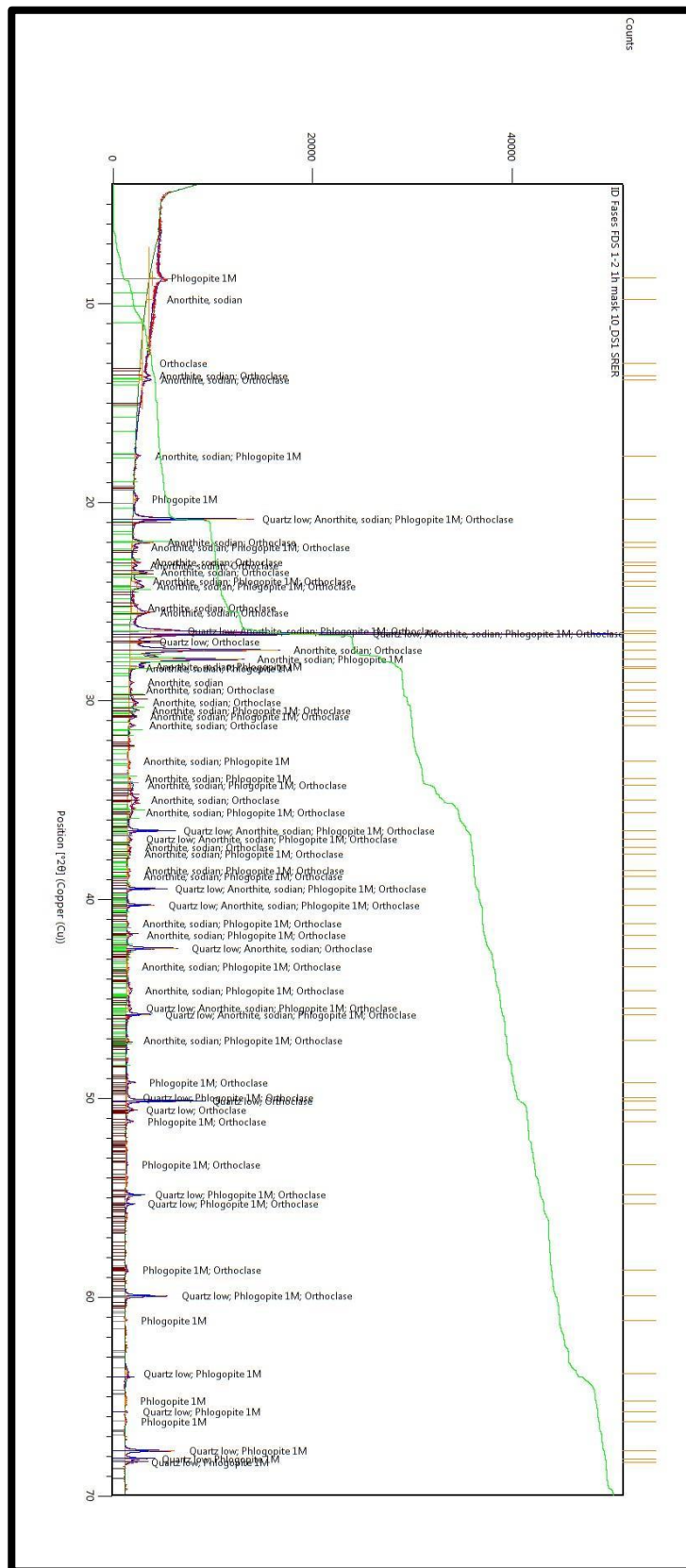
Apéndice 6. Minerales identificados por XRD, en el polvo atmosférico (AGF)



Apéndice 7. Minerales identificados por XRD, en el polvo atmosférico (E)



Apéndice 8. Minerales identificados por XRD, en el polvo atmosférico SRER



**Apéndice 9. Estadística de la clorofila de los tratamientos (CMB)**

	CMB	X1 <sup>2</sup>	0.015 (g)	X2 <sup>2</sup>	0.03 (g)	X3 <sup>2</sup>	0.06 (g)	X4 <sup>2</sup>	0.12 (g)	X5 <sup>2</sup>	0.24 (g)	X6 <sup>2</sup>
A	0.0135	0.0001 823	0.0169	0.0002 856	0.0069	4.761E -05	0.0375	0.0014 063	0.0437	0.0019 097	0.1111	0.0123 432
B	0.013	0.0001 69							0.0532	0.0028 302	0.0487	0.0023 717
C	0.0043	1.849E -05	0.0093	8.649E -05	0.031	0.0009 61	0.0293	0.0008 585	0.0576	0.0033 178	0.0307	0.0009 425
Σ	0.0308	0.0003 697	0.0262	0.0003 721	0.0379	0.0010 086	0.0668	0.0022 647	0.1545	0.0080 577	0.1905	0.0156 574
Σ <sup>2</sup>	0.0009 486		0.0006 864		0.0014 364		0.0044 622		0.0238 703		0.0362 903	
$\bar{X}$	0.0102 667		0.0131		0.0189 5		0.0334		0.0515		0.0635	
S	0.0051 733		0.0053 74		0.0170 413		0.0057 983		0.0071 042		0.0421 938	

**Apéndice 10. Anova de una entrada para cianobacterias de microbialitas**

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS LIBRES	CUADRADOS MEDIOS	F de Tab.	ESTADÍSTICO DE CONTRASTE
ENTRE TRATAMIENTOS	B-C: 0.017-0.015=0.002	k-1=6-1=5	B-C/k-1= 4x10 <sup>-4</sup>	F(1-a,K,N-K)	Fc=(B-C/k-1)/(A-B/N-k)=5
DENTRO DE TRATAMIENTOS	A-B: 0.027-0.017=0.001	N-k=18-6=12	A-B/N-k=8x10 <sup>-5</sup>	F(0.95,5,12)=3.106	Fc>F(0.95,5,12)
TOTAL	A-C: 0.027-0.015=0.012	N-1=18-1=17			

**Contraste por Coeficientes**

(CMB+PA) vs (CMB)	B-C= 0.017-0.014=0.002	5-1= 4	5x10 <sup>-4</sup>	F(0.95,4,12)=3.25	Fc=9.37
				F(0.99,4,12)=5.41	Fc>F(0.95,4,12)
					Fc>F(0.99,4,12)

**Coefficientes entre tratamientos**

Contrastes	0.015 (g)	0.03 (g)	0.06 (g)	0.12 (g)	0.24 (g)
C/PA vs S/PA	1	1	1	1	1
				CMB	Total
				-5	0

**Promedios de Concentración de Clorofila (α) en Cianobacterias de Microbialitas**

	( $\bar{X}$ ) Clorofila
1 mL (CMB)	0.0102667
1 mL (CMB) + 0.015 g (PA-E)	0.0131
1 mL (CMB) + 0.03 g (PA-E)	0.01895
1 mL (CMB) + 0.06 g (PA-E)	0.0334
1 mL (CMB) + 0.12 g (PA-E)	0.0515
1 mL (CMB) + 0.24 g (PA-E)	0.0635

<b>Apéndice 11. Anova de doble entrada para cianobacterias de biocostras</b>						
<b>FUENTE DE VARIACIÓN</b>	<b>SUMA DE CUADRADOS</b>	<b>GRADOS LIBRES</b>	<b>CUADRADOS MEDIOS</b>	<b>F de Tab.</b>	<b>ESTADÍSTICO DE CONTRASTE</b>	
<b>ENTRE TRATAMIENTOS</b>	B-C: 0.009-0.005=0.004	k-1=42-1=41	B-C/k-1= 9x10 <sup>-5</sup>	F(1-a,K,N-K)	Fc=(B-C/k-1)/(A-B/N-k)=4.5	
<b>DENTRO DE TRATAMIENTOS</b>	A-B: 0.011-0.009=0.002	N-k=126-42=84	A-B/N-k= 2x10 <sup>-5</sup>	F(0.95,41,84)=1.55128	Fc>F(0.95,41,84)	
<b>TOTAL</b>	A-C: 0.011-0.005=0.006	N-1=126-1=125				
<b>Efecto De Factores</b>						
<b>NUTRICIÓN</b>	0.0006	5	1.2x10 <sup>-4</sup>		6	
<b>TIEMPO DE TRATAMIENTO</b>	0.003	6	5x10 <sup>-4</sup>		25	
<b>Interacción entre Factores</b>						
<b>N-T</b>	0.0004	30	1.3x10 <sup>-4</sup>		0.6	
<b>TOTAL</b>	0.004	41				
<b>Promedios de concentración de clorofila (α) en cianobacterias de biocostras</b>						
	<b>CBC</b>	<b>0.015 (g)</b>	<b>0.03 (g)</b>	<b>0.06 (g)</b>	<b>0.12 (g)</b>	<b>0.24 (g)</b>
<b>7</b>	0.0016667	0.0053333	0.008	0.0043333	0.0063333	0.004
<b>14</b>	0.002	0.005	0.0043333	0.006	0.004	0.006
<b>21</b>	0.0026667	0.0033333	0.002	0.0036667	0.0033333	0.0073333
<b>28</b>	0.0023333	0.0043333	0.0023333	0.0036667	0.0036667	0.005
<b>35</b>	0.0053333	0.0036667	0.0026667	0.0036667	0.002	0.0033333
<b>42</b>	0.0083333	0.0113333	0.0093333	0.004	0.0056667	0.019
<b>50</b>	0.011	0.0273333	0.01	0.008	0.0253333	0.0136667

Apéndice 12. Zona A. Desierto de Sonora



Apéndice 13. Biocostra del Desierto de Sonora





## Apéndice 14. Estancia en el Instituto de Geología



INSTITUTO DE GEOLOGIA  
APARTADO POSTAL 70-296 CIUDAD UNIVERSITARIA  
04510 MEXICO, D. F.  
Secretaría Académica

**Dr. Hugo Bruno Beraldi Campesi**  
**Investigador Asociado "C" de Tiempo Completo**  
**Departamento de Paleontología**  
**Presente**


Por medio de la presente y en respuesta a su escrito, hago de su conocimiento que quedo enterado a través de la misma, que el estudiante **Antonio Oswaldo Muñoz Lomelí**, de la carrera de Biología de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, estará realizando su **trabajo de tesis de licenciatura** en el Departamento de Paleontología, bajo su supervisión con el proyecto titulado "El polvo atmosférico como fuente de nutrientes para microbios formadores de biocostras", **por un año a partir del 22 de junio de 2015.**

Dicho proyecto ya fue registrado en su institución, donde el Dr. Arcadio Monroy fungió como asesor interno de su Comité.

Asimismo, le informo que su solicitud se leyó en el Consejo Interno del 2 de julio de 2015.

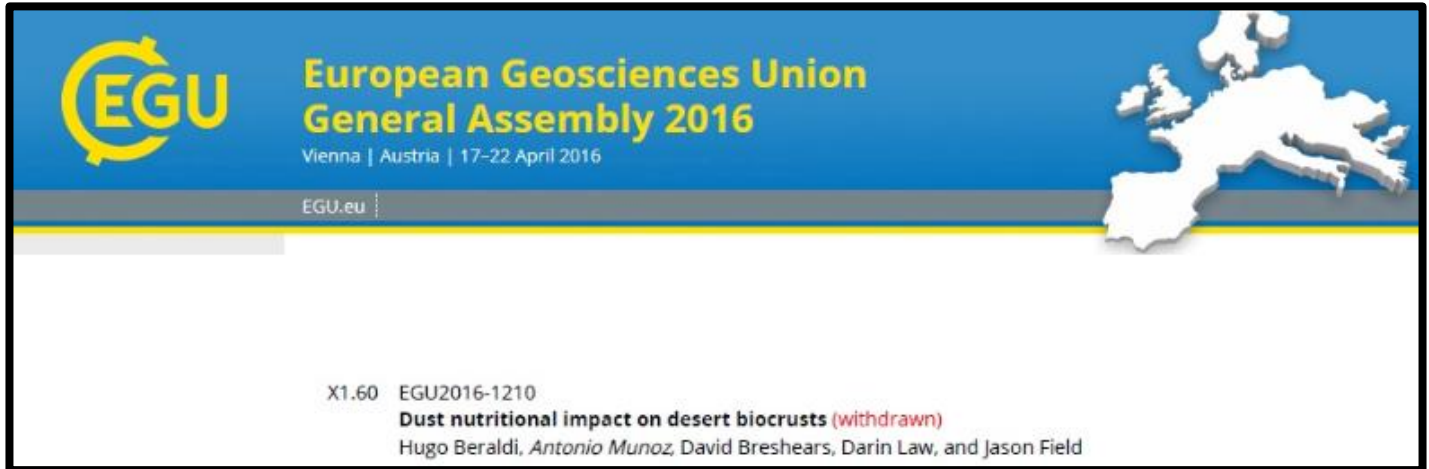
Sin más de momento, aprovecho la ocasión para saludarlo.

**Atentamente**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"**  
Ciudad Universitaria, D. F., a 27 de julio de 2015.

  
**Dr. Ricardo Barragán Manzo**  
**Secretario Académico**

c.c.p. Dra. Ana Bertha Villaseñor Martínez, Jefa del Departamento de Paleontología.  
El alumno

Apéndice 15. Resumen aceptado en EGU, Viena, Austria, 2016.



Apéndice 16. Constancia III Simposio de paleontología del sureste de México



**VII CONGRESO NACIONAL DE ESTUDIANTES  
DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



Otorga la presente



**CONSTANCIA**  
**a: Muñoz Lomelí Antonio Oswaldo**

Por su participación como Ponente con la conferencia titulada:

**“EL POLVO ATMOSFÉRICO COMO FUENTE DE NUTRIENTES PARA  
CIANOBACTERIAS DE BIOCOSTRAS”**

Durante el Congreso desarrollado del 11 al 13 de mayo de 2016 en Juriquilla, Querétaro.




---

**Dr. Gerardo Carrasco**  
Director Centro de Geociencias










Apéndice 18. Constancia 67<sup>th</sup> International Astronautical Congress

INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL FEDERATION

September 2016

To whom it may concern

## CERTIFICATE OF PRESENTATION

I hereby certify, that Antonio Oswaldo Muñoz Lomelí attended the 67<sup>th</sup> International Astronautical Congress from 26 to 30 September 2016 in Guadalajara, Mexico and presented the following Interactive presentation:

**IAC-16.A1.IP.36: Terrestrial Atmospheric Dust vs Martian Atmospheric Dust; as nutrient source for cyanobacteria "The 1<sup>st</sup> oxygen factory on Mars" A.O. Muñoz Lomelí & H.B. Beraldi Campesi UNAM, Institute of Geology.**

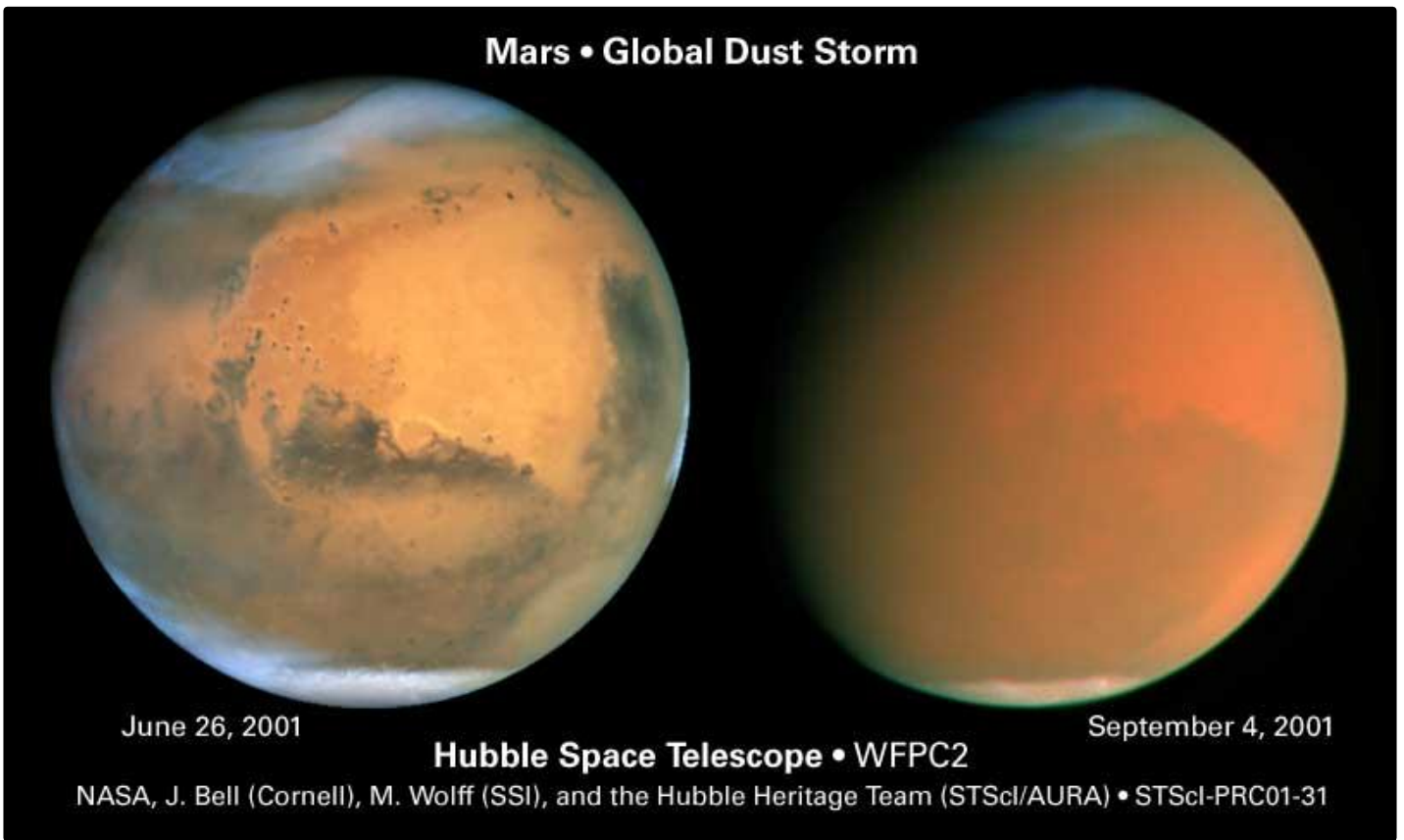
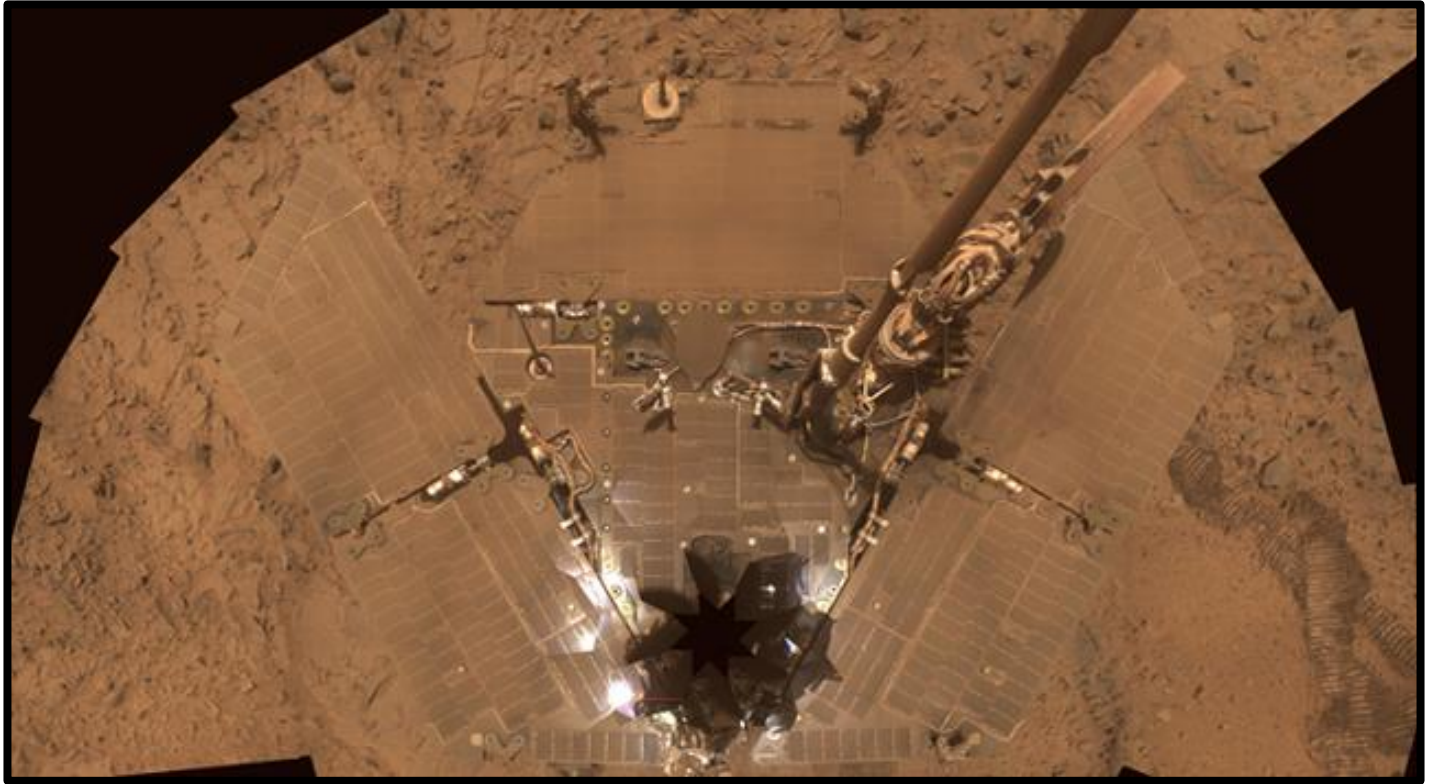
Christian Feichtinger  
IAF Executive Director

INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL  
FEDERATION (IAF)

3, rue Mario Nikis  
75015 Paris - France  
Tél : +33 (0)1 45 67 42 60  
Fax : +33 (0)1 42 73 21 20  
[www.iafastro.org](http://www.iafastro.org)

IAF Secretariat - 3 rue Mario Nikis - 75015 Paris, France  
T: +33 (0)1 45 67 42 60 - F: +33 (0)1 42 73 21 20 - E: [info@iafastro.org](mailto:info@iafastro.org) - W: [www.iafastro.org](http://www.iafastro.org)  
Non-profit organisation established under the French Law of 1 July 1901

Apéndice 19. Rover Spirit cubierto de polvo y tormenta de polvo global en Marte, NASA



**Apéndice 20. Polvo y tornado de polvo (dust devil) en Marte, NASA**

