

Extremófilos y origen de la vida en Atacama

Extremophiles and the origin of life in Atacama

María Eugenia Farías

Manuel Contreras

Fernando Novoa

ISBN y demás....

Índice

El altiplano: un desierto en altura.....	5	Estratos de colores: ¿quién es quien?.....	35
<i>The altiplano: a high-altitude desert</i>	<i>5</i>	<i>Colour layers: who is who?.....</i>	<i>35</i>
¿Qué es una cuenca cerrada?	6	El aire se hace piedra: carbonato de calcio y CO ₂	36
<i>What is a closed basin?.....</i>	<i>6</i>	<i>Air turns into rock: calcium carbonate and CO₂.....</i>	<i>36</i>
Salares y lagunas: un oasis en el desierto.....	7	Estromatolitos modernos en el mundo	37
<i>Lagoons and salt flats: an oasis in the desert.....</i>	<i>7</i>	<i>Modern stromatolites in the world.....</i>	<i>37</i>
La vida en el altiplano: el arte de sobrevivir a lo extremo.....	10	Estromatolitos en otros ambientes de Chile	38
<i>Life in the altiplano: the art of surviving the extremes</i>	<i>10</i>	<i>Stromatolites in other environments in Chile</i>	<i>38</i>
Volcanes, mucho más que gigantes dormidos.....	12	Salar de atacama: desde el origen de la vida	
<i>Volcanoes, much more than sleeping giants.....</i>	<i>12</i>	hasta los confines del universo.....	39
Extremófilos: amantes de lo extremo.....	18	<i>The Atacama salt flat: from the origin of life</i>	
<i>Extremophiles: love for the extreme</i>	<i>18</i>	<i>to the confines of the universe</i>	<i>39</i>
Origen de la vida, polvo de estrellas y la tabla periódica	20	Otros ecosistemas en los Andes (Argentina y Bolivia)	47
<i>The origin of life, stardust and the periodic table</i>	<i>20</i>	<i>Other ecosystems in the Andes (Argentina y Bolivia)</i>	<i>47</i>
El planeta primitivo y el altiplano	23	Habitantes humanos en los humedales:	
<i>The primitive planet and the altiplano</i>	<i>23</i>	resistiendo lo extremo.....	49
Agua de Atacama vs. Agua de la tierra primitiva	27	<i>Human inhabitants in the wetlands:</i>	
<i>Water in Atacama vs. Water in primitive earth</i>	<i>27</i>	<i>enduring the extreme</i>	<i>49</i>
¿Estromato... qué?	29	Fósiles vivos en los Andes.....	50
<i>Stromato... what?</i>	<i>29</i>	<i>Living fossils in the Andes.....</i>	<i>50</i>
Algunas definiciones	32	¿Cómo los protegemos?	52
<i>Some definitions.....</i>	<i>32</i>	<i>How do we protect them?.....</i>	<i>52</i>
¿Cómo los reconocemos?	33	Bibliografía en la que se basa este libro	53
<i>How do we recognize them?</i>	<i>33</i>		

El altiplano: un desierto en altura

A partir del lago Titicaca, la cordillera de Los Andes se va ensanchando progresivamente hacia el sur, dando origen a una extensa planicie ubicada a más de 3.600 msnm y denominada altiplano, que ocupa parte de Chile, Perú, Bolivia y Argentina (Fig.1). A lo largo de su extensión se forman cuencas cerradas donde se desarrollan numerosos humedales y salares, habitados por seres vivos que se adaptan a las condiciones más extremas de frío, sequedad, salinidad, baja presión de O₂, abundante presencia de arsénico y alta radiación UV: son los organismos extremófilos.

The altiplano: a high-altitude desert

The Altiplano is a desert formed between two mountain ranges containing a high-altitude plateau at 3,600 masl. It comprises the northwest of Argentina, north of Chile, west of Bolivia and south of Peru. Along the Altiplano, there are a series of closed basins with numerous lagoons and salt flats. These are inhabited by living beings adapted to the most extreme conditions of coldness, dryness, salinity, lack of O₂ pressure, content of arsenic and high UV radiation: they are extremophiles microorganisms.

Volcán Láscar, Antofagasta, Chile.
Foto de Diego Contreras.





Ojos de mar, Tolar Grande, Salta, Argentina
Foto de Diego Contreras.

¿Qué es una cuenca cerrada?

Imaginemos una cacerola con agua que hierve hasta que se evapora; al cabo de un tiempo quedará solo una costra de sales. Lo mismo ocurre en el altiplano: montañas y volcanes rodean extensas áreas formando "cacerolas" naturales que durante millones de años recibieron precipitaciones y se transformaron en extensos lagos. De estas cacerolas no salen ríos; por lo tanto, la única pérdida de agua se produce por evaporación. Como resultado de la disminución de precipitaciones los lagos se secaron: una parte del agua se evaporó y la otra se acumuló en reservorios subterráneos. En la superficie sólo quedaron sales.

A lo que en casa queda en el fondo de una cacerola lo llamamos costra, o sarro, y podríamos eliminarlo con vinagre; en el altiplano, en cambio, esa *cacerola* se llama cuenca cerrada (cuenca endorreica) y la costra que se va formando se transforma en un salar. En Atacama también pueden existir cuencas cerradas a menor altitud, como el salar de Atacama.

What is a closed basin?

Let us picture a pan filled with boiling water until evaporation; after some time, there will remain a crust of salts. The same happens in the Altiplano, where mountains surround vast areas forming "pans" that have received water, especially underground, for millions of years forming extended salty lakes and subterranean reservoirs.

These "pans" do not form rivers, therefore, the only water loss is by evaporation, as a result of the decrease in precipitation the lakes are dried and part of the water evaporated while another part was accumulated under the surface of the earth in underground reservoirs. In this process, only salts remained on the surface. In a domestic pan the remains are called crust or tartar and this crust could be easily removed with vinegar; in Atacama, that pan is called a closed basin and the crust, salt flat. That is how salt flats and saline lagoons form. One of the features of wetlands in the Altiplano is the presence of great amounts of arsenic and sulphure compounds.

Salares y lagunas: un oasis en el desierto

En la actualidad el derretimiento de las nieves y las lluvias de las altas cumbres son los que aportan el agua, que se acumula en grandes depósitos subterráneos denominados acuíferos. Son lagos de roca o sedimentos, como esponjas, y el agua ocupa los espacios que quedan entre las rocas fracturadas o entre las partículas. Atrapada durante millones de años en las profundidades del planeta, el agua acumula minerales y presión, y escapa a través de pequeños agujeros. Al alcanzar la superficie forma vertientes que alimentan vegas y lagunas de agua dulce (en algunos casos el contacto con el magma volcánico hace que el agua salga caliente y cargada con elementos químicos, como carbonatos, sales minerales, azufre o arsénico). Se forman así oasis en medio del desierto andino. Si vas a Atacama, los reconocerás fácilmente, porque son lagunas rodeadas de zonas verdes adonde acuden aves y camélidos, como vicuñas, guanacos y llamas.

El agua que surge en estas vertientes termina acumulándose en la parte más baja de las cuencas cerradas formando lagunas saladas. Por evaporación las sales terminan concentrándose, por lo que llegan a superar varias veces la salinidad de mar; tanto es así que hasta se puede flotar en esas aguas sin hundirse, como ocurre en la laguna Cejar, producto de su alta densidad.

Cuando las lagunas se terminan de secar se convierten en salares. En estos ambientes las condiciones son tan duras que sólo pueden vivir los organismos extremófilos.

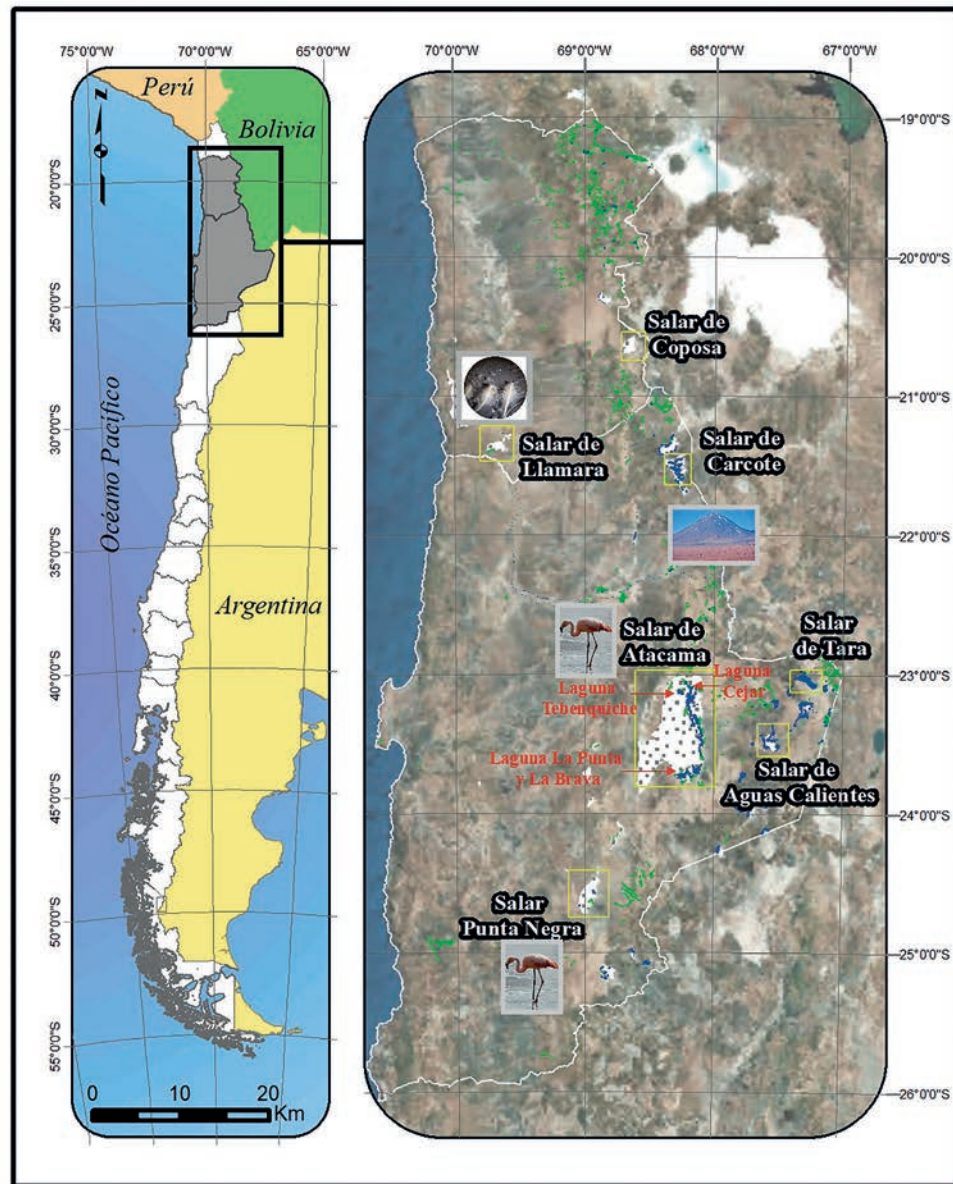
Lagoons and salt flats: an oasis in the desert

Water input to a closed basin can be produced by snow melting from high peaks, or the contribution of rivers, rainfall and underground water. In a desert, the major contribution comes from the latter, formed by the accumulation of rainwater and snowmelt. Trapped for millions of years in the depths of the Earth, in contact with minerals or magma from active volcanoes around that basin, waters spring to the surface. Sometimes they may be hot and they always contain chemicals such as carbonates, salts, sulphure or arsenic. Underground water springs through marshes, which are oasis within the Andean desert. If you go to Atacama, you will easily recognize them, as they are green areas where vicuñas and birds gather.

The water that springs up in these marshes eventually accumulates in the closed basins forming lagoons. As stated above, these lagoons only lose water by evaporation; in those cases, salts concentrate in the wetlands, which can reach up to eight times the salinity of the sea; you can even float on these waters, as in Cejar lagoon. When these lagoons get completely dry, they become salt flats. That is why saline lagoons and salt flats are so abundant in the Altiplano. In this environment, conditions are so harsh that only extremophiles can live.



Salar de Atacama, Chile
Foto de Diego Contreras



La vida en el altiplano: El arte de sobrevivir en lo extremo

Life in the altiplano: The art of surviving the extremes

En un desierto de altura donde la presión de O₂ es baja, la radiación es alta, el agua es escasa y los humedales son salados, alcalinos (alto pH) y cargados de azufre y arsénico, la biodiversidad es única, frágil a los cambios y sobre todo muy adaptada.

La vegetación, en esas zonas, se clasifica en dos grupos definidos por su fuente hídrica:

Una, la adaptada al uso de aguas proveniente de las precipitaciones, dentro de las cuales podemos encontrar las queñoas (árboles de altura) *Polylepis tarapacana* y *Polylepis rugulosa*, y otros arbustos dominantes tales como, *Parastrephia quadrangularis*, *Baccharis tola*, *Adesmia melanthes*, *Azorella compacta*, *Senecio nutans*, entre otros.



Vicuñas (*Vicugna vicugna*)

Foto de Pablo Soler

In a high-altitude desert, where O₂ is low, radiation is high, water is scarce and wetlands are saline, alkaline (high pH) and full of sulphure and arsenic, biodiversity is unique, fragile to changes and, overall, highly adapted.

*From the point of view of vegetation, there are two types defined by their water source: one those adapted to the use of water from precipitation, within which we can find the queñoas (tall trees) *Polylepis tarapacana* and *Polylepis rugulosa*, and other dominant*

La otra, es la que se desarrolla gracias a los afloramientos de vertientes, que puede ubicarse en quebradas y/o en salares, que, recordemos, son sistemas hidrobiológicos complejos con altísima salinidad.

Tanto en las vertientes como en los salares se pueden formar unidades de vegetación denominadas vegas, pajonales y bofedales; son humedales de altura que cubren y dan sustento a una gran diversidad de ani-

males altiplánicos, como vicuñas (*Vicugna vicugna*), guanacos (*Lama guanicoe*), suris (*Pterocnemia pennatta*), vizcachas (*Lagidium viscacia*), gatos andinos (*Leopardus jacobita*), diversos tipos de patos y otras pequeñas aves.

Los flamencos, en cambio, son los reyes de las lagunas saladas, y en el altiplano encontramos tres especies: flamenco andino o parina grande (*Phoenicoparrus andinus*), flamenco puna o parina chica (*Phoenicoparrus jamesi*) y flamenco chileno o austral (*Phoenicopterus chilensis*). Pasan el verano en el lugar, filtrando el agua y sedimentos de las lagunas; también ponen sus huevos y crían sus pichones en enormes colonias. Cuando llega el invierno migran, en un larguísimo viaje, a otros humedales, como la laguna de Melincué, en plena pampa argentina, y el lago Poopó, en Bolivia, en busca de mejores condiciones ambientales para continuar con su ciclo biológico.



Parina grande (*Phoenicoparrus andinus*)

Foto de Pablo Soler

shrubs such as Parastrephia quadrangularis, Baccharis tola, Adesmia melanthes, Azorella compacta, Senecio nutans, among others. In another hand there is another type of vegetation that develops due to the outcrops of slopes, which can be located in ravines and / or in salares, the latter are complex hydrobiological systems with very high salinity. Both on the slopes and in the salt flats can be formed units of vegetation called vegas, pa-

jonales and bofedales, all wetlands are support for a great diversity of fauna of the Altiplano which includes vicuñas (Vicugna vicugna), guanacos (Lama guanicoe), Andean suris (Pterocnemia pennatta garleppi), Andean felines (Felis jacobita), several types of ducks and other small birds. Flamingos, instead, are the kings of lagoons. In the Altiplano we can find three species: Andean or big parina (Phoenicoparrus andinus), Puna flamingo or small parina (Phoenicoparrus jamesi) and Chilean or southern flamingo (Phoenicopterus chilensis). They spend the summer in the Altiplano, filtering sediments as whales do; they also lay their eggs and raise their chicks in huge nurseries. In wintertime, they migrate on a very long journey to Melincue lagoon, in the Argentinean Pampas, and to Lake Poopo, in Bolivia, looking for adequate environmental conditions, in order to continue their biological cycle.



Volcanes
mucho más que gigantes dormidos

Volcanoes
much more than sleeping giants

Chile es tierra de volcanes. Los volcanes son básicamente respiraderos de la superficie de la Tierra por donde salen la roca fundida, los escombros y los gases desde el interior del planeta. Los montículos en forma de montañas que asociamos con los volcanes son lo que queda después que el material arrojado durante las erupciones se acumuló y se endureció alrededor de la chimenea volcánica. Esto puede suceder durante un período de varias semanas o durante muchos millones de años. Aunque se considera volcán activo cualquiera que haya tenido actividad en los últimos 10.000 años (De Silva y Francis, 1991), se los puede dividir en tres tipos, según la época en que erupcionaron. Los volcanes activos son aquellos que registran erupciones en un período que va de los últimos 10 a los últimos 30 años; volcanes latentes son los que evidencian, por su morfología, actividad reciente o respecto de los cuales hay registros de actividad histórica; y volcanes durmientes son aquellos de los que no se conoce actividad histórica, ni existen evidencias morfológicas de actividad reciente, pero sobre los que hay certezas de actividad durante el Holoceno (últimos 10.000 años).

Aproximadamente el 90% de todos los volcanes se sitúa dentro del “cinturón de fuego” a lo largo de los bordes del océano Pacífico. Chile está ubicado en ese cinturón. El paisaje de Atacama está dominado por grandes volcanes, y muchos de ellos humean todavía. Algunos de los más emblemáticos que se pueden ver desde Atacama son los siguientes:

- **Lastarria (5.706 msnm).** No se conocen erupciones recientes, pero su morfología indicaría que ha sido activo en tiempos históricos; además presenta flujo de azufre.



Niño de Lullaillaco, el menor de los tres hallados.

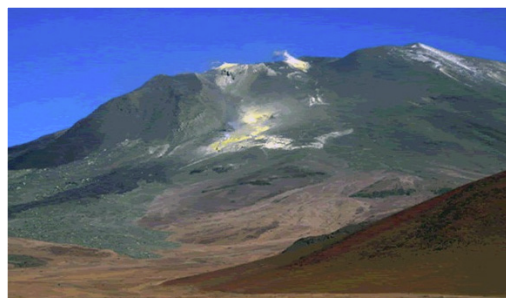
Chile is a land of volcanoes. Volcanoes are basically vents on the surface of the Earth through which molten rock, debris and gases come out from the core of the planet. The mountain-like mounds we associate to volcanoes are what remains after the material released during eruptions piles up and hardens around a volcanic chimney. This may happen over a period of a few weeks or millions of years. Though any volcano that has had activity over the last 10,000 years is considered active (Silva y Francis, 1991), volcanoes can be divided into three kinds, according to the period in which they erupted. Active volcanoes are those which have erupted in a period that ranges from the last 10 to 30 years; dormant volcanoes are those which evidence recent activity through their morphology or of which there are records of historical activity; and sleeping volcanoes are those of which there is not known historical activity nor morphological evidence of recent activity but of which there is certainty of activity during the Holocene (last 10,000 years).

About 90% of all volcanoes lie within the “fire belt” along the coast of the Pacific Ocean. Chile is in that belt. Great

- **Socompa (6.031 msnm).** Hace 5.250 años ocurrió la última erupción, y además presenta actividad de fumarolas. En su base, del lado argentino, hay una laguna con el mismo nombre, donde se reportaron los primeros estromatolitos del altiplano en 2009.
- **Llullaillaco: (6.739 msnm).** Todavía activo, presentó tres erupciones en el siglo XIX; la última en 1877. Es un volcán sagrado para los pueblos originarios y forma parte del camino del Inca. Cerca de la cumbre se encontraron las momias de tres niños ofrecidos en sacrificio.
- **Licancabur (5.920 msnm).** Es el gran protector de San Pedro de Atacama. Considerado volcán sagrado, en su cráter se encuentra la laguna de mayor altura en el planeta. La última erupción ocurrió en el Holoceno.
- **Ollagüe (5.868 msnm).** Todavía humeante, tuvo su última erupción hace 130.000 años. En su base se encuentra el salar de Carcote, con importantes ecosistemas microbianos.
- **Lascar (5.592 msnm).** 30 erupciones explosivas des-

volcanoes, many of which are still active and smoky, dominate the landscape of Atacama. Some of the more emblematic that can be seen from Atacama are the following:

- ***Lastarria (5,706 MASL).** There are not any known recent eruptions but its morphology may indicate that it was active in ancient times; besides, there is evidence of sulphure flow.*
- ***Socompa (6,031 MASL).** The last eruption was 5,250 years ago; besides, it has active fumaroles. In its base, on the Argentine side, there is a homonymous lagoon where the first stromatolites of the Altiplano were reported in 2009.*
- ***Llullaillaco (6,739 MASL).** It is still active, with three eruptions in the 19th century, the last one being in 1877. It is a sacred volcano for native peoples and is part of the Inca Trail. The mummies of three children offered as sacrifice were found near the summit.*
- ***Licancabur (5,920 MASL).** It is the great protector of San Pedro de Atacama. It is considered a sacred volcano; the highest lagoon on the planet is in its crater. The last eruption took place in the Holocene.*



Volcán Lastarria



Volcán Socompa



Volcán Llullaillaco



Salar de Carcote y volcán Ollagüe, Chile
Foto de José María Peralta

de el siglo XIX lo convierten en el volcán más activo del norte de Chile. La última fue en 1993; provocó caída de pómez y cenizas que alcanzaron un metro de espesor.

Estos gigantes tienen un gran impacto, no solo por darle un marco imponente al desierto, sino también porque son los responsables de generar las condiciones muy particulares que hacen de los humedales de Atacama un ambiente

- ***Ollagüe** (5,868 MASL). Still smoky, it erupted for the last time 130,000 years ago. The “Salar de Carcote” is at its foot, with plenty of important microbial ecosystems.*
- ***Lascar** (5,592 MASL). 30 explosive eruptions since the 19th century make it the most active volcano in northern Chile. The last one, in 1993, produced a plume of pumice and ashes one meter thick.*



Volcán Licancabur



Volcán Ollagüe



Volcán Lascar

donde se recrean las condiciones químicas de los mares primitivos. Estas condiciones están relacionadas con el aporte de arsénico, azufre y sales, además de temperatura, que dan lugar a aguas muy salinas, alcalinas y tibias. Se cree que así fue la sopa primitiva donde la vida comenzó a dar sus primeros pasos, hace 3.400 millones de años.

These giants have had a great impact, not only by giving the desert an amazing frame but also for being responsible of very particular conditions, which made wetlands in Atacama an environment that recreates the chemical conditions of the waters of primitive seas. These conditions are related to the input of arsenic, sulphure and salts, besides temperature, which produce very alkaline, saline, warm waters. It is believed that this was the primitive soup where life began, 3,400 million years ago.



Volcán Láscar, Antofagasta, Chile.
Foto de Diego Contreras.



Vega Tocarpu, Chile
Foto de Diego Contreras

Extremófilos: amantes de lo extremo

¿Qué son los extremófilos? Son microorganismos que viven en condiciones extremas. La ventaja de ser extremófilo es que hay poca competencia, porque la mayoría de las formas de vida que conocemos no las pueden soportar.

Los extremófilos de los salares se llaman halófilos (afinidad por la sal) y han desarrollado adaptaciones para no explotar o secarse en presencia de muchísima sal. Una de estas adaptaciones es acumular, dentro de la célula, compuestos que igualen la presión de la sal que hay afuera. Tanto es así, que si los ponemos en agua sin sal explotan como globos.

Extremophiles: love for the extreme

What are extremophiles? They are microbes that live in extreme conditions, those the great majority of life forms would not tolerate. The advantage of being extremophiles is that there is little competition as most forms of life would perish in conditions they can endure.

Salt flats extremophiles are called halophiles (for their affinity with salt) and have developed not to explode or dry in presence of abundant salt. One way in which they have adapted is that by accumulating, within the cell, compounds that equal the pressure of the salt from outside. So much so that if they are put into freshwater, they would explode like balloons.



Tapetes microbianos, salar de Antofalla, Argentina
Foto de Pablo Soler

Polvo de estrellas

Stardust



Origen de la vida, polvo de estrellas y la tabla periódica

El origen de la vida tiene mucho que ver con las estrellas. Todos los elementos que nos componen, a nosotros y a cuanto nos rodea, están hechos a partir de las estrellas.

¿Conoces la tabla periódica de elementos? Todos esos elementos se originaron en el espacio en tres etapas. La primera fue el *Big Bang*, una explosión gigantesca que significó el nacimiento del universo hace 13.800 millones de años. A medida que todo se fue enfriando, surgieron los dos elementos más livianos de la tabla periódica: hidrógeno y helio. Estos se concentraron por la fuerza de gravedad (condensación gravitacional) dando lugar a las estrellas. En el interior de las estrellas la temperatura es tan alta y hay tanta energía que se producen reacciones nucleares (nucleosíntesis nuclear) en-

The origin of life, stardust and the periodic table

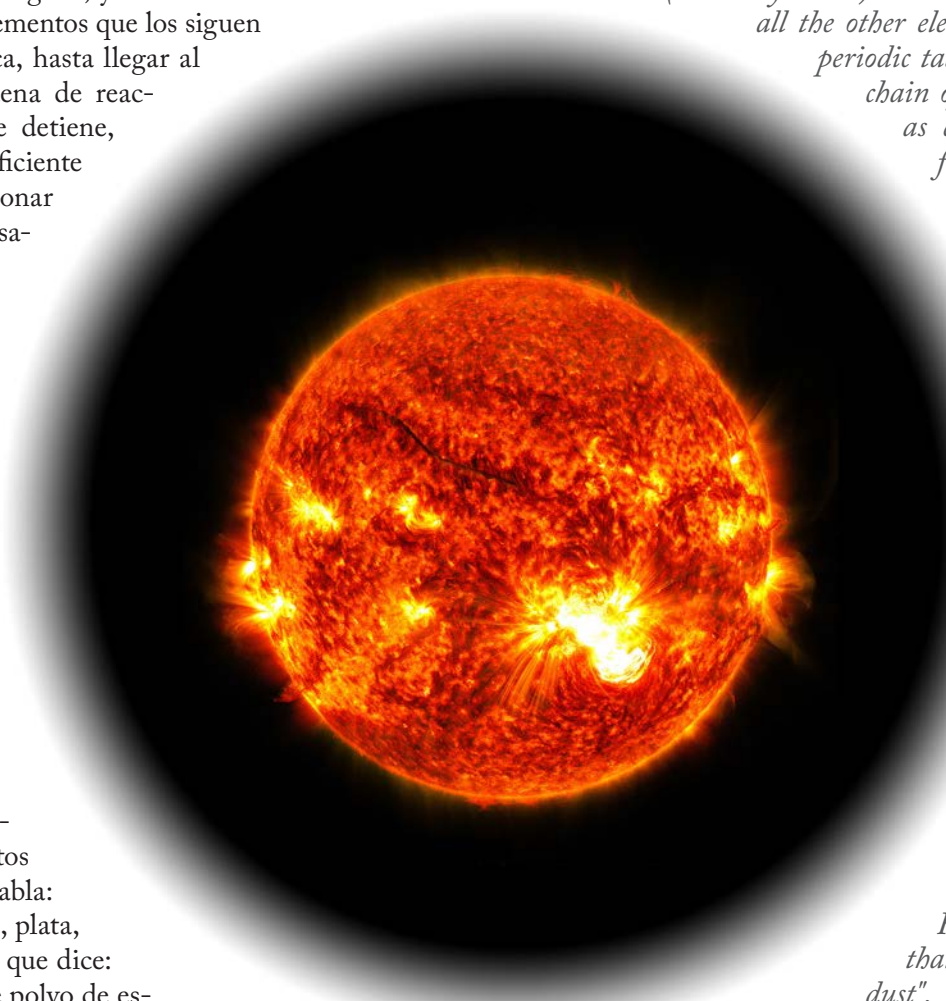
The origin of life has much to do with stars. All the elements we, and everything around us, are made of formed from stars.

Do you know the periodic table of elements? All those elements originated in space in three stages. The first one was the Big Bang, that huge explosion which meant the birth of the universe 13,800 million years ago. While everything was cooling down, the two lightest elements of the periodic table, hydrogen and helium, appeared. These elements got concentrated due to the gravitational force (gravitational condensation) giving birth to stars. In the core of stars, temperature is so high and there is so much energy that nuclear reactions between helium and hydrogen occur



Explosión de supernovas en estrellas gemelas. NASA/Hubble.

tre el helio y el hidrógeno, y esas reacciones dan lugar a todos los elementos que los siguen en la tabla periódica, hasta llegar al hierro. Allí la cadena de reacciones nucleares se detiene, ya que no existe suficiente energía para fusionar elementos más pesados que el hierro. Entonces, ¿cómo se forman los otros elementos? Este proceso ocurre durante la explosión de las estrellas que da lugar a las supernovas, y que no sólo difunden en el espacio los elementos sintetizados por nucleosíntesis estelar sino que sintetizan los elementos más pesados de la tabla: cobre, rubidio, cinc, plata, oro, etc. De ahí es que dice: “estamos hechos de polvo de estrellas”.



Nuestro sol
NASA

(nucleo-synthesis) and those reactions give rise to all the other elements that follow in the periodic table up to iron. There, the chain of nuclear reactions stops, as energy is not enough to fuse elements heavier than iron.

Then, how did the other elements form? It happened during the explosion of stars that originated supernovas; not only did they spread synthesized elements by stellar nucleo-synthesis in space but also, in those outbreaks, the heaviest elements in the periodic table- copper, rubidium, zinc, silver, gold, etc. -synthesized. Hence comes the statement that "we are made of star dust".



Géiseres del Tatio, Atacama, Chile
Foto de Nicolás López

El planeta primitivo y el altiplano

El planeta primitivo era muy diferente del planeta azul que conocemos hoy. Hace 3.600 millones de años la atmósfera era muy distinta de la actual: seguramente no había oxígeno (O₂) y sí metano (CH₄), amoníaco (NH₃), nitrógeno (N₂), agua (H₂O) e hidrógeno (H₂). No existía protección contra la radiación ultravioleta, y había alta actividad eléctrica, cósmica y volcánica. Los únicos que podían sobrevivir a esas condiciones eran los microorganismos extremófilos.

En la actualidad, las condiciones ambientales extremas del altiplano (baja presión de O₂, alta radiación UV, volcanes activos, ambientes desérticos, fuertes vientos, lagunas con aguas salinas y alcalinas, etc.) recrean el ambiente de esa Tierra primitiva y de otros planetas, como Marte. En estos ambientes encontramos también los microorganismos extremófilos formando ecosistemas muy antiguos: los estromatolitos y los microbialitos.

El funcionamiento de los extremófilos en estos ecosistemas fue estudiado en profundidad. Literalmente se le extrajo ADN a la piedra y, mediante técnicas moleculares de secuenciación masiva, se pudo determinar que funcionan de una manera muy primitiva, obteniendo energía de la respiración del arsénico y llevando a cabo fijación de carbono sin oxígeno.

The primitive planet and the altiplano

The primitive planet was very different from the blue planet we know now. 3,600 million years ago the atmosphere was very different from now: it was surely limited (without oxygen) and contained methane (CH₄), ammonia (NH₃), nitrogen (N₂), water (H₂O) and hydrogen (H₂). There was no protection against ultraviolet radiation and there was high electrical, volcanic and cosmic activity. Extremophile microorganisms were the only ones capable of surviving in those conditions.

Nowadays, the extreme environmental conditions at the Altiplano (low O₂ pressure, high UV radiation, active volcanoes, desert environment, strong winds, saline and alkaline lagoons, etc.) recreate the environment of the primitive Earth and other planets like Mars.

In these environments we also find the extremophile microorganisms forming very ancient ecosystems: stromatolites and microbialites.

The functioning of extremophiles in these ecosystems was studied in depth. DNA was literally extracted from the rock and, using molecular sequencing techniques, it was possible to determine that they are functioning in a very primitive way, obtaining energy from the arsenic respiration and carrying out carbon fixation without oxygen.

EL PLANETA PRIMITIVO

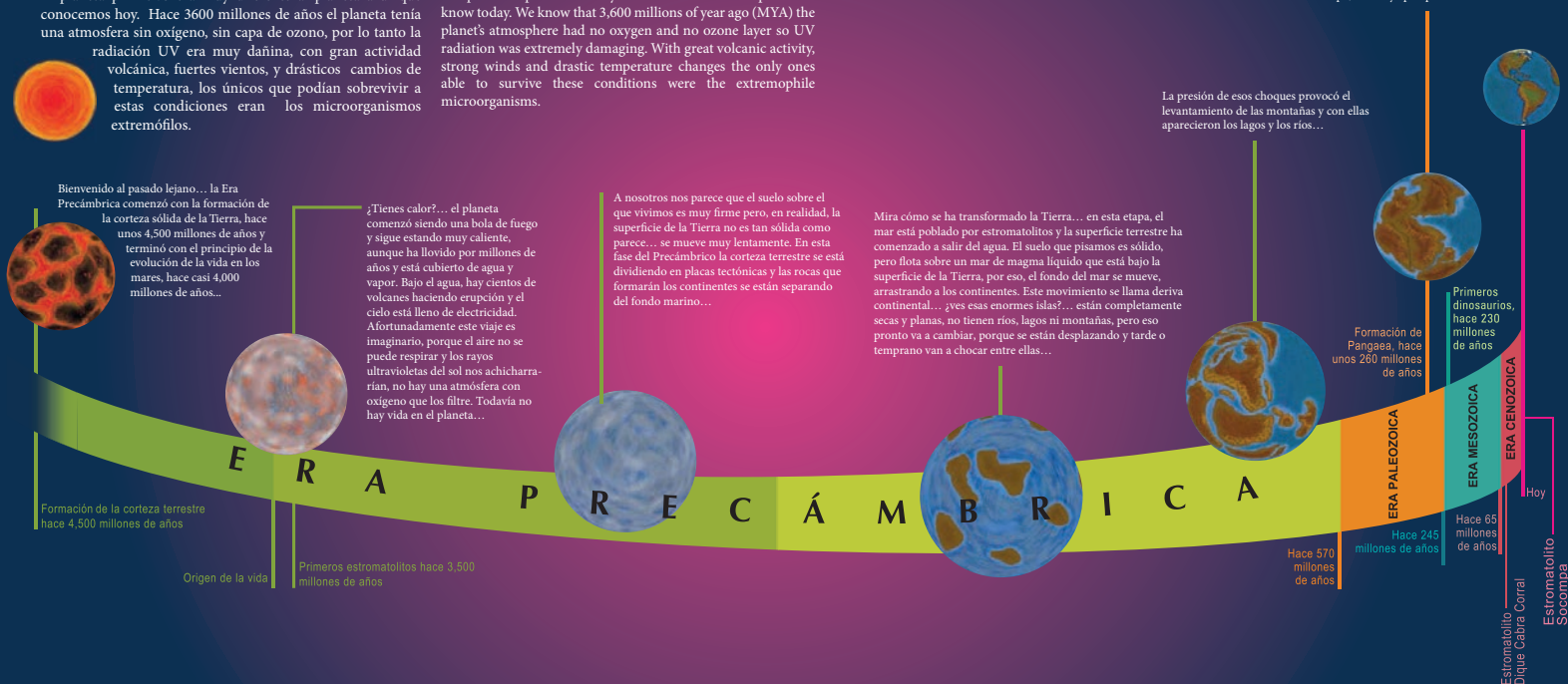
El planeta primitivo era muy diferente al planeta azul que conocemos hoy. Hace 3600 millones de años el planeta tenía una atmósfera sin oxígeno, sin capa de ozono, por lo tanto la radiación UV era muy dañina, con gran actividad volcánica, fuertes vientos, y drásticos cambios de temperatura, los únicos que podían sobrevivir a estas condiciones eran los microorganismos extremófilos.

THE PRIMITIVE PLANET

The primitive planet was very different from the blue planet we know today. We know that 3,600 millions of year ago (MYA) the planet's atmosphere had no oxygen and no ozone layer so UV radiation was extremely damaging. With great volcanic activity, strong winds and drastic temperature changes the only ones able to survive these conditions were the extremophile microorganisms.

Después de la Era Precámbrica vino la Era Paleozoica, hacia el final de ésta, todas esas grandes islas se juntaron formando un único supercontinente llamado Pangaea. En este tiempo, la vida ya prospera en la Tierra...

Figura tomada de Cuatro Climas y la mirada de sus niños



Representación de la Historia del Planeta
Representation of the History of the Planet



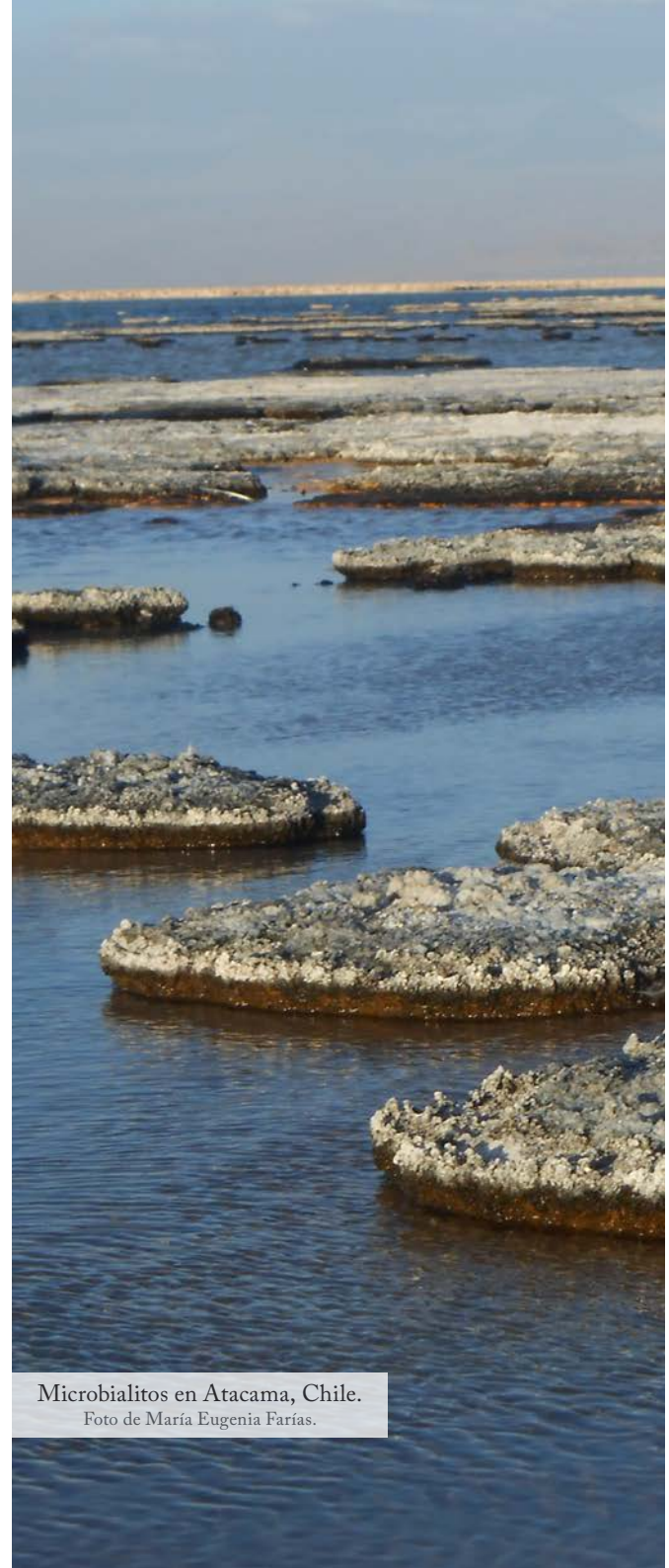
Representación de la historia de la vida en el planeta
A representation of the history of life on the Planet

¿Sabías que...

Did you know that...

... la sopa primitiva sería algo así como un charco de aguas tibias, cargadas de elementos químicos como el arsénico y azufre, sin oxígeno, y bajo la influencia de energía de la radiación ultravioleta (UV) que proviene del sol, ya que en la Tierra primitiva no había capa de ozono? En este “caldo” se habrían formado los primeros compuestos de la vida. Esta teoría fue propuesta por Oparin en 1924 y experimentada por Miller en 1953, quien reprodujo en el laboratorio las condiciones de esa sopa primitiva, logrando obtener todos los “ladrillos” esenciales que forman las proteínas (20 aminoácidos).

...the primitive soup would have been something like a pool of warm waters, full of arsenic and sulphure without oxygen compounds and under the influence of ultraviolet radiation energy coming from the sun (UV), as in the primitive Earth there was no ozone layer? The first compounds of life would have originated in this “broth”. This theory was presented by Oparin in 1924 and experimented in 1953 by Miller who reproduced the conditions of this primitive soup in a laboratory, thus obtaining all the essential bricks that form proteins (20 aminoacids).



Microbialitos en Atacama, Chile.
Foto de María Eugenia Fariás.

Agua de Atacama vs. Agua de la tierra primitiva

Condición	Tierra primitiva (Arqueano: 3200-3400 millones de años)	Atacama 2016
Agua salina	Los continentes no se habían formado y toda la sal acumulada se encontraba diluida en el mar, que era de 2 a 3 veces más salino que ahora.	Las cuencas cerradas acumulan sales formando extensos salares y lagunas hipersalinas. Llegan a tener una salinidad de entre 3 y 8 veces la del mar.
Alta concentración de azufre y arsénico	La Tierra primitiva era 4 veces más caliente que la Tierra actual, por la actividad de volcanes. El azufre y el arsénico son compuestos del manto terrestre y fueron liberados en cantidades masivas durante la actividad volcánica del Arcaico.	Actualmente la cordillera de Los Andes tiene una enorme actividad volcánica que influye en la composición química de las aguas subterráneas, cargándolas de arsénico, azufre y otros compuestos.
pH alto (alcalino)	El pH era alto (alcalino) por el contacto directo del agua de los océanos con rocas del manto (peridotita) y la influencia de las fuentes hidrotermales.	El pH es alto por la composición del agua que está cargada de compuestos como carbono y azufre, provenientes de las aguas subterráneas.
Vida dominada por microorganismos	El último antepasado común universal, conocido por sus siglas en inglés LUCA (Last Universal Common Ancestor)*	Bacterias, arqueas, cianobacterias y diatomeas
Alta UV	Por falta de capa de ozono.	Por la altura y el ambiente desértico.
Aguas tibias	Aguas tibias por influencia de volcanes.	
Baja presión de O ₂	No se había generado todavía en la naturaleza la fotosíntesis, que es el proceso que genera oxígeno.	Por la altitud, la presión de oxígeno es menor que a nivel del mar. Además las aguas salinas contienen menos oxígeno que las aguas dulces.

LUCA (Last Unique Common Ancestor) es un organismo hipotético. Fue propuesto como la primera célula desde la cual evolucionaron todas las formas de vida. LUCA habitó nuestro planeta hace 4.000 millones de años en la denominada sopa prebiótica. Sin embargo, LUCA no vivía aislado, vivía con sus compañeros de sopa, con los cuales compartía la comida y, probablemente, el modo de digerirla; además, se pasaban información (genes) con gran facilidad. Por eso nos imaginamos que esta evolución temprana ocurrió en lo que ahora llamamos “tapete microbiano” (comunidad microbiana que comparte un sitio y cuyos integrantes complementan funciones).

Water in Atacama vs. water in primitive earth

Condition	Primitive Earth (Archean-3,200-3,400 million years)	Atacama actual conditions
Saline water	Continents had not yet formed and all the currently accumulated salt was diluted in the sea, which was 2 or 3 times more saline than now.	Closed basins accumulate salt, forming extensive salt flats and hypersaline lagoons. They are from 3 up to 8 times more saline than the sea.
High concentration of arsenic and sulphure	Primitive Earth was 4 times hotter than Earth today due to volcanic activity. Sulphure and arsenic are compounds of the earth's mantle and were released in massive amounts during the volcanic activity in the Archean.	At present, the Andes have a huge volcanic activity that influences the chemical composition of underground waters, filling them with arsenic, sulphure and other compounds.
High pH (Alkaline)	pH was high (alkaline) because of the close contact of the ocean waters with the mantle rocks (peridotite) and the influence of hydrothermal springs.	pH is high because of the composition of water: full of compounds such as carbon and sulphure coming from underground waters.
Life ruled by microorganisms	LUCA: Last Unique Common Ancestor *	Bacteria, arquea, cianobacteria and diatoms
High UV	Due to the absence of the ozone layer.	Due to high altitude and desert environment.
Warm waters	Warm waters due to volcanoes.	
Low O ₂ pressure	It did not exist yet. Photosynthesis, the first form that generates O ₂ , did not happen yet.	At high altitude, O ₂ pressure is lower than at sea level. Saline waters contain less O ₂ than freshwater.

* LUCA (Last Unique Common Ancestor) is a hypothetical organism: the first cell from which all forms of life evolved. LUCA inhabited our planet 4,000 million years ago in the so called prebiotic soup. However, LUCA did not live in isolation; it lived with its soup companions with whom it shared food and, most probably, the way to digest it; they also passed information (genes) on to each other very easily. For that reason, we imagine this early evolution occurred in what we now call "microbial mat" (a microbial community sharing a place and with complementary functions and metabolism).

¿Estromato... qué?

Estromatolitos: los fósiles más antiguos del planeta

Los estromatolitos son *rocas vivas* formadas por microorganismos (bacterias, arqueas y cianobacterias) que ayudan a precipitar minerales (carbonatos de calcio); se los considera los ecosistemas más primitivos de la Tierra. Dominaron el planeta durante 3.000 millones de años, afectando su evolución. Fijaron CO₂ y produjeron grandes cantidades de O₂ a través de la fotosíntesis; liberaron el oxígeno a los mares y a la atmósfera, y crearon la capa de ozono.

Una vez que los estromatolitos comenzaron a liberar O₂ (hace alrededor de 2.450 millones de años), los organismos primitivos, que todavía eran unicelulares, se adaptaron a respirarlo o se extinguieron (selección natural). Respirar oxígeno les permitió obtener energía de forma más eficiente, y como consecuencia, la vida se expandió, evolucionó más rápidamente hacia otras formas y, en el periodo Cámbrico, se produjo el florecimiento de la biodiversidad, proceso que continúa hasta nuestros días.

Stromato...what?

Stromatolites: the oldest fossils on the planet

Stromatolites are live rocks formed by microorganisms (bacteria, archaea and cyanobacteria) which help minerals precipitate (calcium carbonates); they are considered the most primitive ecosystems on Earth. They dominated the planet over 3,000 million years, affecting its evolution. They fixed CO₂ and produced great amounts of O₂ through photosynthesis; they released oxygen into the seas and the atmosphere and created the ozone layer.

Once the stromatolites started releasing O₂ (about 2,450 million years ago) the primitive organisms, which were still unicellular, adapted to breathe it or got extinguished (natural selection). Breathing oxygen allowed them to obtain energy in a more efficient way and, as a consequence, life spread and evolved more rapidly into other forms and the Cambrian explosion, which has lasted up to our time, occurred.

Estromatolitos en Laguna Carachipampa, Argentina
Foto de María Eugenia Farías



EXTINCIONES MASIVAS

> los cinco eventos catastróficos en la tierra ocurrieron del período Ordovícico al final del Cretácico. Científicos anuncia la posible llegada de un ciclo más.



¿Sabías que...

... Se conoce que en el planeta hubo cinco extinciones masivas a partir del Cámbrico? La primera de todas fue causada por el oxígeno liberado por los estromatolitos. Debido a que los microorganismos no estaban preparados para respirar oxígeno, algunos se extinguieron y otros se adaptaron aprendiendo a respirarlo.



Estromatolitos en Pozo Bravo, Argentina
Foto de Agustina Lencina

Did you know that...

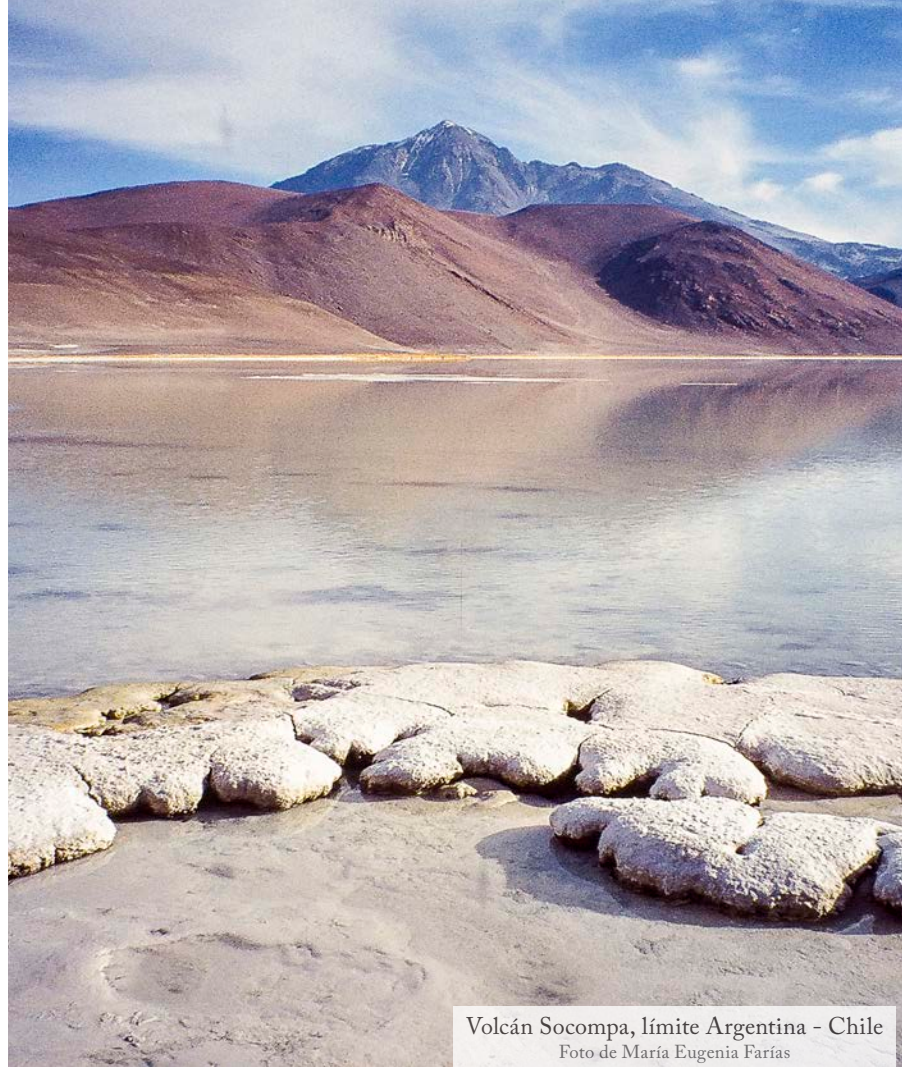
...on the planet there were five massive extinctions, known since the Cambrian? But the first one of all was caused by the oxygen released by stromatolites: as microbes were not ready to breathe oxygen, some got extinguished and others adapted by learning to breathe it.

¿Sabías que...

...en 2009 se reportaron por primera vez los estromatolitos vivos encontrados a mayor altura en el mundo en la laguna Socompa, de Argentina, a 3.600 msnm?. A partir de ese momento comenzó una búsqueda de este tipo de ecosistemas en el altiplano andino, lo que posicionó a Atacama como uno de los lugares más interesantes del planeta para estudiar cómo fue la Tierra primitiva y cómo se desarrolló la vida en el planeta.

Did you know that...

...in 2009 the highest living stromatolites in the world were first reported in Socompa Lagoon, Argentina, at 3,600 masl? From that moment on, a search for that kind of ecosystems began in the Andean Altiplano, which qualified Atacama as one of the most interesting places in the world to study what primitive Earth was like and how life has evolved on the planet.



Volcán Socompa, límite Argentina - Chile
Foto de María Eugenia Farías

¿Sabías que...

...los estromatolitos fósiles más antiguos son de hace entre 3.450 y 3.480 millones de años? Se los encontró en Strelley Pool y en la formación Dresser, ambos en Australia.

Did you know that...

...the oldest fossil stromatolites date back to 3,450 and 3,480 million years ago? They were found in Strelley Pool and the Dresser formation, both in Australia.

Algunos tipos de microbialitos:

Si bien los estromatolitos son los más conocidos, son solo un tipo de ecosistema microbiano dentro de los microbialitos. Todavía existe mucha controversia científica acerca de su clasificación, pero intentaremos entregar algunas definiciones generales:

Some definitions:

Even though stromatolites are the best known, they are just one type of microbial ecosystem within microbiolites. There is still much scientific controversy about their classification but we will intend to give a few general definitions:



Tapetes Microbianos
Microbial mats

Comunidades microbianas que forman una alfombra (tapete) continua, compacta y multilaminada. Las capas superiores necesitan O₂ y luz; las inferiores reciclan azufre. Pueden o no precipitar minerales.

Microbial communities which form a continuous, compact and multilaminated mat. The upper layers need O₂ and light. The lower ones recycle sulphure. They may or may not precipitate minerals



Microbialitos
Microbiolites

Comunidades de bacterias, diatomeas, cianobacterias y haloarqueas que influyen o inducen la precipitación de minerales (carbonato de calcio), formando una roca viva. La organización microbiana es similar a la de los tapetes microbianos. De acuerdo con cómo precipitan los minerales (estratos, trombos, etc.), los microbialitos pueden ser clasificados en estromatolitos, trombolitos, etc. Si la forma del microbialito es redonda, entonces tenemos un oncolito.

Community of bacteria, diatoms, cyanobacteria and haloarchaea that influence or provoke mineral precipitation (calcium carbonate), thus forming living rocks. Microbial organization is similar to that of microbial mats. According to how they precipitate minerals (strata, thrombi, etc.) microbiolites can be classified in stromatolites, trombolites, etc. If the microbiolite is round, it is called oncolite.



Evaporitas
Evaporites

Se forman en ambientes muy salinos como resultado de la evaporación de agua. Están formadas por yeso (sulfato de calcio) y/o sal (halita). Los microorganismos las colonizan para protegerse de las condiciones extremas del ambiente. La distribución microbiana es igual a la observada en los tapetes, por eso se las puede considerar tapetes evaporíticos.

They form in highly saline environments as a result of water evaporation. They are composed of gypsum (calcium sulfate) and/or salt (halite). Microorganisms inhabit them to get protection from extreme environmental conditions. Microbial distribution is much the same as that of mats; that is why they can be called evaporite mats.

¿Cómo los reconocemos?

Diferencias entre tapetes, microbialitos y evaporitas

Los ecosistemas microbianos que describimos en el punto anterior pueden ser observados a simple vista en los bordes de lagunas salinas del altiplano. Los podemos distinguir por que forman extensas alfombras o tienen formas redondeadas, están cubiertos por una especie de gelatina húmeda de colores rosados, amarillos, negros o rojos. La textura se debe a una matriz (exopolisacárido), y la coloración, a pigmentos, ambas producidas por los microorganismos.

How do we recognize them?

Differences among mats, microbialites and evaporites

The microbial ecosystems we described above can be seen by the naked eye on the margins of saline lagoons. We can distinguish them because they form extensive carpets or have rounded shapes, covered by a kind of wet gelatin of pink, yellow, black or red colors.

The hardest (lithified) ones can be white. They can also be identified by their "rotten egg smell" mainly due to sulphur.





Laguna La Brava, Atacama, Chile
Foto de Diego Contreras

mos. Los más endurecidos (litificados) pueden ser blancos. También se les puede reconocer por su olor, como a “huevo podrido”, debido principalmente a compuestos de azufre. En el altiplano chileno podemos reconocer tres tipos de ecosistemas microbianos: los microbialitos, las evaporitas habitadas por endoevaporitas y los tapetes microbianos. Debido a la presencia de estos organismos extremófilos, el Altiplano se está posicionando como un ambiente de alto valor científico y patrimonial, donde se recrean los ecosistemas microbianos de la Tierra primitiva, una especie de *Jurassic Park* microbiano.

re compounds. In the Andean Altiplano we can recognize three types of microbial ecosystems: microbialites, evaporites inhabited by endoevaporites, and microbial mats. Thus, the Altiplano is becoming an environment with high scientific and patrimonial value, where the microbial ecosystems of the primitive Earth recreate, somewhat like a microbial Jurassic Park.

Estratos de colores: ¿quién es quien?

Una de las principales características de tapetes microbianos, evaporitas y microbialitos es que si los cortamos en forma transversal veremos tres capas de colores: arriba, una capa clara que puede ser rosada, amarilla o blanca, donde dominan los microorganismos más resistentes a la radiación solar. Luego una de color verde, donde encontramos los microorganismos que hacen fotosíntesis con O₂ (cianobacterias); tienen un compuesto que se llama clorofila a, parecido al de las plantas. Abajo, en color púrpura, veremos los microorganismos que hacen fotosíntesis sin O₂, principalmente usando azufre; están acompañados por otros microbios que reciclan el azufre, y tienen unos pigmentos muy característicos (bacterioclorofilas) que les dan ese color púrpura. A veces más abajo podemos encontrar un estrato negro que corresponde a microorganismos que viven sin O₂ y que precipitan minerales de hierro y azufre. Estos estratos pueden continuar hasta varios metros de profundidad, sobre todo en los tapetes microbianos. En medio de estos estratos veremos pequeños cristales de diferentes colores (blancos, negros o grises) que pueden ser los minerales que precipitan los microorganismos, como el carbonato de calcio, o sales que se forman por evaporación, o bien partículas que quedan atrapadas en el tapete. Estas piedritas se van endureciendo y dando consistencia al tapete y pueden ayudarlo a transformarse en una roca viva tipo microbialito.



Corte de tapete microbiano
Foto de Luis Ahumada

Colour layers: who is who?

One of the main features of microbial mats, evaporites and microbialites is that, when we crosscut them, we can see three colored layers; an upper layer which can be pale pink, yellow or white, where the most resistant to solar radiation microorganisms predominate; then, a green layer where we find microorganisms which make photosynthesis with O₂ (cyanobacteria) as they have a compound called chlorophyll, similar to that of plants. Below, there is a purple layer where we can see the microorganisms that make photosynthesis without O₂, mainly by using sulphure; they live together with other microbes that recycle sulphure and have very typical pigments (bacterioclorophylls) which give it its colour. Underneath we can often find a black layer that corresponds to the microorganisms that live without O₂ and precipitate iron and sulphure minerals. These layers can continue until several meters deep, especially in microbial mats. Among these layers we can see little rocks of different colours (white, black or grey) that can be the minerals precipitated by microbes, as calcium carbonate, or salts formed by evaporation, or else particles trapped in the mat. These little rocks harden and give consistency to the mat and can help it become a live rock, like a microbialite.

El aire se hace piedra: carbonato de calcio y CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) es un componente de la atmósfera producido por los volcanes, por la respiración de los seres vivos, o cuando se queman combustibles fósiles. Su aumento produce el calentamiento global. A lo largo de miles de millones de años los estromatolitos lo capturaron y lo transformaron en mineral de carbonato de calcio.

Entonces, ¿los estromatolitos podrían salvar el planeta del calentamiento global?. Sí, pero eso les llevaría millones de años.

Air turns into rock: calcium carbonate and CO₂

Carbon dioxide (CO₂) is a component of the atmosphere produced by volcanoes, the breathing of living beings, or the combustion of fossil fuels. Its increase produces global warming. Over billions of years stromatolites have captured and transformed it into calcium carbonate mineral.

Then, could stromatolites save the planet from global warming? Yes, but that would take them millions of years.

¿Sabías que...

...en 5 mm de tapete microbiano se reciclan los elementos químicos esenciales para la vida: fósforo, nitrógeno, oxígeno, carbono, hidrógeno, hierro, azufre, etc. (ciclos geoquímicos)?. Es como tener todos los procesos químicos que se llevan a cabo en el planeta en una delgada capa de 3 colores: amarillo, verde y púrpura.

Did you know that...

...the essential elements for life: phosphorus, nitrogen, oxygen, iron, sulphure, etc (geochemical cycles) recycle in 0,2 in. of microbial mat? It is like having the entire chemical processes that take place on the planet within a thin layer of three colours: yellow, green and purple...



Corte de microbialito
Foto de María Eugenia Farías



Estromatolitos modernos en el mundo

A ctualmente quedan pocos estromatolitos vivos en el mundo. Se los puede encontrar en Bahía Tiburón (Australia), Cuatro Ciénegas (México), Yellow Stone y en Las Bahamas (Estados Unidos). Pero todos ubicados en climas cálidos y a baja altitud.

Modern stromatolites in the world

At present, there are few live stromatolites in the world. They can be found in Shark Bay (Australia), Cuatro Ciénegas (México) and in The Bahamas, all of them at sea level and with warm climates.



Laguna Amarga, Torres del Paine, Chile
Foto de María Eugenia Farías

Estromatolitos en otros ambientes de Chile

En la patagonia chilena tenemos ejemplos perfectos de estromatolitos, tanto fósiles como modernos, en la laguna Amarga y en el lago Sarmiento. Las estructuras fósiles se pueden encontrar en las costas de los lagos, fuera del agua por la disminución de la profundidad a lo largo de los últimos años. Al mismo tiempo, colonias activas están creciendo bajo la superficie del espejo de agua. Estas colonias poseen una estructura no laminada constituida por coágulos de carbonatos, la cual los clasifica como trombolitos (Airo, 2010).



Lago Sarmiento, Torres del Paine, Chile
Foto de María Eugenia Farías

Stromatolites in other environments in Chile

In Chilean Patagonia there are perfect examples of fossil and modern stromatolites in Laguna Amarga and Lago Sarmiento. It can be found that modern structures have dried due to the decrease in their depth over the last 15 years. At the same time, active colonies are growing below the surface of the water mirror. These have a non-laminated structure made up of carbonate clots, what makes them be classified as trombolites (Airo, 2010).

Salar de Atacama: desde el origen
de la vida hasta los confines del universo

*The Atacama salt flat: from the origin
of life to the confines of the universe*





Laguna Tebenquiche, Chile
Foto de Diego Contreras

El salar de Atacama, con una superficie de 3.000 km², es el más grande de Chile. Está ubicado en una cuenca cerrada de 18.100 km² entre la cordillera de los Andes, al este, y la cordillera de Domeyko, al oeste, rodeado de volcanes activos, como el Lascar y el Licancabur. Es el escenario perfecto para uno de los proyectos científicos más ambiciosos de la humanidad, el ALMA, un observatorio astronómico gigante, compuesto por 66 antenas de alta precisión que apuntan hacia los confines del universo. Es el mayor proyecto astronómico desarrollado hasta el momento en el mundo y estudiará componentes básicos de las estrellas, los sistemas planetarios, las galaxias y la vida misma. A los pies del observatorio, en las lagunas del salar, los científicos que estudian lo pequeño han reportado -y están estudiando- microbialitos y tapetes microbianos contruidos por microorganismos extremófilos que recrean las primeras formas de vida en el planeta hace 3.400 millones de años.

The Atacama Salt Flat, with an area of 3,000 km², is the largest of Chile. It lies in a closed basin of 18,100 km² between the Andes to the east and the Doemyko Range to the west. Surrounded by volcanoes, like the Lascar, the Lincancabur, the Sairecabur and others, it is the perfect scenery for one of the most ambitious projects of humankind: the ALMA, an astronomical observatory made up of 66 high precision antennas which point to the confines of the universe. It is the major astronomical project stationed on earth and developed up to the present and it will study basic components of stars, planetary systems, galaxies and life itself. At its foot, in the salt flat lagoons, the scientists who study the smallest living beings have reported-and are now studying- microbiolites and microbial mats made up of extremophiles that reproduce the early forms of life on the planet 3,400 million years ago.

Es así como en Atacama tenemos astrónomos buscando las huellas del origen del universo con inmensos telescopios, y microbiólogos buscando las huellas del origen de la vida con precisos microscopios. Todo en el mismo lugar, todo bajo la eterna custodia de los volcanes y el cielo de Atacama. En este salar encontramos importantes lagunas:



So, in Atacama there are astronomers looking for traces of the origin of the universe with immense telescopes as well as microbiologists looking for traces of the origin of life with accurate microscopes. Everything in the very same place, everything under the endless vigilance of volcanoes and the clear sky of Atacama. In this salt flat we found important lakes:

Laguna Tebenquiche

Ubicada cerca de San Pedro de Atacama, presenta tapetes microbianos y domos de yeso habitados por organismos extremófilos. Los tapetes microbianos se caracterizan por su color rosado y por tener forma de “cerebros”. Si se los corta transversalmente, se pueden ver las diferentes capas de distintos colores que forman el tapete; cada una representa una comunidad diferente de microorganismos. Los domos están formados por cristales de yeso que se llaman selenitas y tienen también coloración verde, púrpura o negra, que corresponde a diferentes microorganismos adheridos al yeso. Esta laguna es uno de los principales atractivos del salar de Atacama. Hasta hace poco, era visitada por turistas que concurrían al atardecer para tomar pisco sour sobre las evaporitas de Tebenquiche. Recientemente, la comunidad de Coyo tomó conocimiento del valor patrimonial de este sitio e implementó senderos, un centro de información y la labor de guías preparados en el tema. Paralelamente, la comunidad solicitó a las autoridades, en conjunto con la comunidad de Solor, apoyo

Laguna Tebenquiche

It is placed nearby San Pedro de Atacama. It contains microbial mats and gypsum domes inhabited by extremophiles. The microbial mats are characterized by their pinkish hue and for their brain-like shape. If you crosscut them, you can see the different layers of different colours which make up the mat; each one represents a different community of microorganisms. The domes are formed by Gypsum crystals called selenites; these domes may also be green, purple or black, according to the different microorganisms attached to the gypsum.

This lagoon is one of the main attractions of San Pedro de Atacama. Until recently, tourist agencies took their passengers at dusk to have “pisco” on the evaporites of Tebenquiche. Last year, the community of Ayllu de Coyo acknowledged the patrimonial value of this site and provided it with roads, an information centre and trained guides. They also asked authorities to declare it Nature’s Sanctuary, adding even more value to one of the most amazing landscapes of*

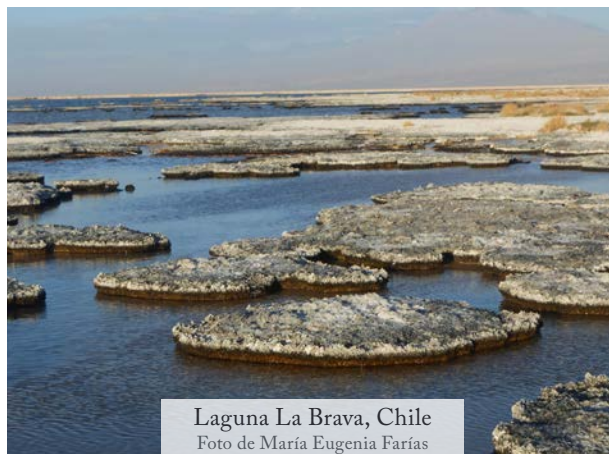
para la protección y la preservación de la laguna, como forma de agregarle valor a uno de los paisajes más maravillosos de Atacama (Farías y col, 2014, Fernández y col, 2016).

Laguna Cejar: domos de yeso con endoevaporitas y tapetes microbianos

Al igual que la de Tebenquiche, esta laguna está ubicada a sólo 20 km de San Pedro de Atacama. Presenta tres piletas profundas cubiertas de domos formados por evaporitas de yeso; algunas, todavía habitadas por microorganismos extremófilos, están rodeadas de tapetes microbianos de color rosado. Una de las principales atracciones para los turistas es flotar en estas piletas saturadas de sal (Rasuk y col, 2016).

Laguna La Brava: microbialitos, tapetes microbianos y oncolitos

Esta está ubicada en el extremo sur del salar de Atacama. De difícil acceso, es hasta ahora la única laguna de Atacama donde se encontraron microbialitos de carbonato de calcio. Son de tipo oncolitos, porque la precipitación se da en forma de “pequeñas pelotitas”. Está rodeada por abundantes tapetes microbianos; los microbialitos, bajo el agua, tienen forma de domos redondeados y crecen para formar plataformas cuando alcanzan la superficie. Los estudios científicos realizados en los últimos años nos cuentan que los microscópicos habitantes de laguna La Brava son capaces de obtener energía a partir del arsénico (Farías y col, 2014, 2017).



Atacama (Farias et.al 2014, Fernández et.al, 2016).

Cejar: gypsum domes with evaporites and microbial mats

Much like the Tebenquiche lagoon, this is situated only 20 km away from San Pedro de Atacama. It presents three deep pools covered with gypsum evaporite domes; some are still inhabited by extremophiles and surrounded by pink microbial mats. Floating on these pools saturated with salt is one of the main attractions for tourists. (Rasuk y col, 2016).

La Brava: microbialites, microbial mats and oncolites

This lagoon is situated in the southwest end of the Atacama salt flat. Difficult to access to, it is the only lagoon where calcium carbonate microbialites were found. They are of the oncolite type, as they precipitate like little balls. Many microbial mats surround the lagoon; under the water, microbialites have the shape of round domes and grow to form platforms when they reach the surface. Recent scientific studies have shown evidence that the microscopic inhabitants of La Brava are capable of obtaining energy from arsenic (Farias et.al 2014, 2017).

Puquios de Llamara - Salar de Llamara: estromatolitos que no son estromatolitos

Los Puquios de Llamara están ubicados en el salar de Llamara, entre Antofagasta e Iquique, a 750 msnm. Puquios significa en lengua quechua “vertiente de agua pura y cristalina”. Esta vertiente, que emana en el salar, forma piletas pequeñas donde se pueden observar unos domos blancos que se conocían popularmente como estromatolitos. Estudios recientes demostraron que son evaporitas de yeso colonizadas por extremófilos que les dan esas formas y colores, y que pueden confundirse con estromatolitos. Presentan la típica coloración amarilla en la superficie, verde en el medio y púrpura abajo. Se pueden observar también los enormes cristales transparentes que forman estos domos; son cristales de yeso y se denominan selenitas. Para comprender la diferencia entre un microbialito (estromatolito) y una evaporita vamos a poner un simple ejemplo: en los microbialitos los microorganismos construyen su casa con carbonato de calcio, mineral que producen a partir del CO₂ que hay

Llamara-Puquios salt flat: stromatolites which are not stromatolites

Puquios salt flat is in the Atacama Desert, between Antofagasta and Iquique, at 850 masl. Puquios means “fountain of pure and crystalline water” in Quechua. This spring, which flows out in the salt flat, forms little pools where there are white domes, popularly known as stromatolites. Recent studies have shown they are gypsum evaporites inhabited by extremophiles which give them their shape and color, and so they can be confused with stromatolites. They are yellow on the surface, green in the middle and purple at the bottom. One can also see the enormous transparent crystals these domes form; gypsum crystals called selenites. In order to understand the difference between a microbialite (stromatolite) and an evaporite a simple example is enough: microorganisms in microbialites make their houses with calcium carbonate, a mineral they produce from CO₂ from the air and the Ca from the water. Instead, in evaporites, microorganisms inhabit the gypsum (calcium sulfate) for-



Puquio de Llamara, Chile
Foto de María Eugenia Farías

en el aire y del calcio que hay en el agua. En cambio, en las evaporitas los microorganismos habitan el yeso (sulfato de calcio) que se forma por evaporación. Lo que está en discusión es si los habitantes de las evaporitas le dan al yeso esa forma de domo que hace que se confunda con microbialitos. La ciencia no tiene todavía todas las respuestas. (Rasuk y col 2015, 2016).

Salar de Carcote: el salar de los peces superpoderosos

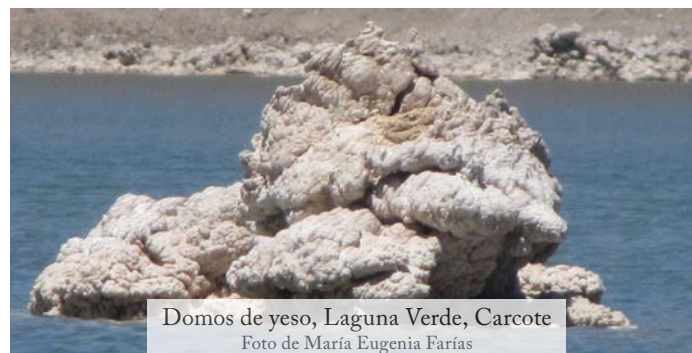
El salar de Carcote, ubicado a 3.690 msnm, tiene una superficie de 108 km² y se encuentra al noreste de la II Región, en el límite con Bolivia. El paisaje de este salar, dominado por el volcán Ollague y su incansable fumarola de azufre, tiene en su margen oeste humedales que son el remanente de una laguna más grande. Alimentada por vertientes, al borde del salar se destaca la laguna Verde, dominada completamente por evaporitas muy duras e inorgánicas (actualmente no están habitadas por microorganismos, pero pudieron estarlo durante su formación). En los humedales más someros se encontraron tapetes microbianos. Llama la atención la cantidad de aves que habita estos humedales; también se han reportado peces, algo muy extraño en un salar: se trata de especies del género *Orestias* conocidas como Karachi o Corvinilla, que migraron a través del agua desde el lago Titicaca y quedaron atrapados allí. Ahora solo pueden vivir asociados a surgencias subterráneas de agua dulce, alimentándose de microinvertebrados acuáticos que crecen entre las plantas acuáticas.

Al parecer las vegas y las vertientes se están salinizando. Es muy probable que en un futuro no muy lejano este salar solo quede habitado por los tapetes microbianos. Sería entonces como una recreación de lo que fue el pasado y de lo que podría ser el futuro escenario: condiciones extremas que producen extinciones masivas y donde los únicos sobreviven-

med by evaporation. If these inhabitants give gypsum the dome-like shape that makes them be confused with microbialites is still under discussion. Science has not found all the answers yet. (Rasuk et.al 2015, 2016).

Carcote salt flat: the superpowerful fish salt flat

The Carcote Salt Flat, situated at 3,690 masl, has an area of 108 km² and lies to the north of the II Region in Chile, on the borders with Bolivia. The landscape of this salt flat, dominated by the Ollague volcano and its endless sulphure fumarole, has wetlands on its west side, the remnants of a larger lagoon. Laguna Verde stands out, fed by springs on the borders of the salt flat, completely dominated by very hard, inorganic evaporites (nowadays not inhabited by microorganisms but they probably were at its formation time). Microbial mats were found in the shallowest wetlands. The amount of birds that inhabit these wetlands calls for attention. Fish were reported too; this is somewhat strange for a salt flat as they are fish that migrated through the water from Lake Titicaca and got caught there. Now they can only live associated with underground upwellings of fresh water, feeding on aquatic microinvertebrates that grow between aquatic plants.



Domos de yeso, Laguna Verde, Carcote
Foto de María Eugenia Farías



Salar de Carcote, Chile
Foto de María Eugenia Farías

tes son siempre los tapetes microbianos y los microbialitos.

Otros salares en Atacama

En el altiplano no todos los salares presentan tapetes microbianos, pero estos siempre están asociados a salares. Los trabajos de prospección detectaron tapetes en los salares de Aguas Calientes, Coposa, Tara y en el de Punta Negra. Presentan la típica línea verde por arriba y la purpura por debajo, formadas por las comunidades que hacen fotosíntesis con y sin oxígeno. Una de las características de estos tapetes es que una gruesa banda de color amarillo, que se extiende a lo largo de grandes extensiones en Coposa, Aguas Calientes y en Tara: un compuesto de origen volcánico que contiene azufre y arsénico (sulfuro de arsénico).

Apparently, marshes and springs are getting more saline. This salt flat is likely to be only inhabited by microbial mats in the near future, as a recreation of past times and of what it may be the future scenario where extreme conditions will provoke massive extinctions and the only survivors will be microbial mats and microbiolites, as always.

Other salt flats in Atacama

Not all salt flats in the Altiplano have microbial mats, even though the latter are always associated to them. Prospection works have detected microbial mats in Aguas Calientes, Coposa, Tara and Punta Negra Salt Flat. They show the typical upper green line and the lower purple one, formed by the communities that make photosynthesis with or wi-

Por ser muy venenoso, solo algunos microorganismos crecen en forma abundante asociados a este compuesto. De hecho es un fuerte colorante y se usaba como pigmento en las culturas de la antigüedad.

thout oxygen, respectively. One of the characteristics of these mats is a thick yellow strip along great areas in Coposa, Aguas Calientes and Tara Salt Flat. That is a volcanic compound containing sulphure and arsenic (arsenic sulfate). It can be highly poisonous; only a few microorganisms grow in abundance associated to this compound. In fact, it is a strong dye that was used as a pigment in ancient cultures.

Salar de Aguas Calientes, Chile
Foto de María Eugenia Farías



Otros ecosistemas en los Andes (Argentina y Bolivia)

Los países tienen fronteras, los microbialitos no las tienen

Lejos de las divisiones geográficas, estos *fósiles vivientes* se extienden por todo el altiplano. El objetivo de los científicos es realizar un reconocimiento completo de los humedales para hacer un catastro de este tipo de ecosistemas en Argentina, Bolivia y Chile. Hasta ahora se han investigado 80 ambientes y se detectó este tipo de ecosistemas extremófilos en 30 humedales, pero se estima que es una mínima parte de los ecosistemas microbianos presentes en el altiplano. La prospección integral llevaría diez años.

Argentina

En Argentina se reportó este tipo de ecosistemas (microbialitos y tapetes microbianos) en las lagunas Socompa, Carachipampa, Antofalla y Negra, todas ubicadas en la base de volcanes activos. También dentro de volcanes a 4.650 msnm, como la laguna Diamante, ubicada en la caldera de 40 km de diámetro del supervolcán Galán, en Catamarca. En esta laguna se reportaron ecosistemas microbianos que tienen la habilidad de respirar arsénico, como hacían los habitantes microscópicos de la Tierra primitiva.



Laguna Pozo Bravo, Catamarca, Argentina
Foto de María Eugenia Farías

Other ecosystems in the Andes (Argentina y Bolivia)

...Countries have boundaries, microbialites don't....

Unaware of geographical divisions, these living fossils extend throughout the Altiplano. The aim of scientists is to conduct a complete survey of the wetlands so as to keep records of this type of ecosystems in Argentina, Chile and Bolivia. Up to now, 80 environments have been prospected and extremophile ecosystems of this type have been detected in 30 wetlands. It is believed that this is just a minimal part of what there really exists. The entire prospection would take about 10 years.

Argentina

Ecosystems of this type (microbialites and microbial mats) have been reported in Argentina. They can be found in Socompa, Carachipampa and Negra Lagoons, all situated at the base of active volcanoes, even inside volcanoes at 4,650 MASL, as in the case of Diamante lagoon, which is in the 40 km diameter caldera of the super volcano Galan, in Catamarca. Here, microbial ecosystems, capable of breathing arsenic like the microscopic inhabitants of early Earth, have been reported.



Tapete evaporítico, Tebenquiche, Chile
Foto de Luis Ahumada

Bolivia

El reconocimiento en Bolivia comenzó en 2015, y se han reportado tapetes microbianos en la laguna Verde -en la base del Licancabur-, en la Mama Kuma y en la Hedionda. El nombre de esta última se debe a la enorme cantidad de azufre presente en las aguas, esencial en los ciclos biogeoquímicos de los tapetes.

Bolivia

The prospection works in Bolivia started in 2015; microbial mats have been reported in Laguna Verde, the base of the Licancabur, in Laguna Mama Kuma and Laguna Hedionda. The latter owes its name to its strong smell due to the enormous amount of sulphure in its water, essential for the cycle of the mat elements.



Habitantes humanos en ambientes extremos

Human inhabitants in the wetlands: enduring the extreme

Aldea ancestral de Tular, Atacama, Chile
Foto de María Eugenia Fariás

Igual que ocurre con los microorganismos, para los humanos enfrentar la adversidad del desierto fue y es todo un desafío. Desde tiempos ancestrales, los pueblos originarios de Atacama habitan este árido suelo desarrollando su agricultura y criando animales asociados a los humedales. Como las de los microorganismos, su suerte y su supervivencia están ligadas al fluir del agua de las vertientes que alimentan vegas y bofedales; los humanos de estos ambientes también son extremófilos: sobrevivientes con formas de vidas muy antiguas y vinculadas con la naturaleza. En los tiempos actuales el calentamiento global y el desarrollo económico de la región imponen un gran desafío a ambas comunidades. La falta de agua puede extinguir a ambos, pero también lo puede hacer el avance de la civilización.

As for microbiolites, for humans to face the adversity of deserts is a challenge. From ancient times, the native peoples of Atacama inhabit this arid soil, developing their agriculture and raising animals associated with wetlands. Like those of microorganisms, their luck and survival are linked to the flow of water from the slopes that feed vegas and bofedales; the humans of these environments are also extremophiles: survivors with life forms very ancient and linked to nature. In the present times global warming and economic development of the region impose a great challenge on both communities. The lack of water can extinguish both, but so can the advance of civilization.

Fósiles vivos en los Andes

Impacto económico: ciencia, biotecnología y medio ambiente

El descubrimiento de estos ecosistemas microbianos abre nuevas perspectivas, no solo para la ciencia sino también para las comunidades locales. Es posible incorporarlos como atractivos turísticos (turismo científico), pero también aprovecharlos como fuente de nuevas aplicaciones biotecnológicas y como biofertilizantes, buscar en ellos compuestos antibióticos, antioxidantes y antitumorales, o bien usarlos para remediar zonas contaminadas o hábitats degradados.

Lo que está pasando en la laguna de Tebenquiche con la Comunidad de Coyo es un claro ejemplo de este tipo de iniciativas, una en la que “todos ganan”. Internacionalmen-

Living fossils in the Andes

Economic impact: science, environment and biotechnology

The discovery of these ecosystems opens new perspectives, not only for science but also for the communities that live in Atacama. On the one hand, it gives them the chance to be incorporated as a tourist attraction in the desert, one of the areas most visited by tourists. This will foster the development of “scientific” tourism, with a direct impact on local communities. What is happening in Tebenquiche and to the inhabitants of the Ayllu of Coyo becomes a clear example of this initiative, with which “everybody wins”. On the other, these ecosystems keep within their genes the possibility to develop biotechnological applications like biofertilizers, to search for antibiotic, antioxidant and antitumoral compounds, even to fix contaminated areas.



Laguna Miscanti, Antofagasta, Chile
Foto de Diego Contreras

te, estas iniciativas están recogidas específicamente en el Tratado de Nagoya, donde se propone “la conservación de la biodiversidad, el uso sostenible de sus componentes, y la *participación justa y equitativa de los beneficios* resultantes de la utilización de los recursos genéticos”.

The interesting thing is that, should biotechnological developments be generated in these areas, the Nagoya Protocol, which establishes that “the conservation of biodiversity, the sustainable use of genetic resources and the fair and equal sharing of the benefits arising from the use of energetic resources”, must be complied with.



Explotación de litio, salar de Atacama, Chile

¿Cómo los protegemos?

Estos ecosistemas extremófilos tienen “super poderes” y son resistentes a todo; de hecho habitan la Tierra desde hace 3.400 millones años. Para vivir necesitan luz y un agua tan salina que no puedan sobrevivir allí otros seres que los desplacen. Por lo tanto, lo único que puede afectarlos es la ausencia de agua o el cambio de las condiciones de salinidad, además, por supuesto, del aporte de materia orgánica. Para preservarlos hay que mantener el agua con las condiciones de salinidad adecuadas y evitar arrojar basura o aguas servidas. Y en particular, protegerlos de pisadas humanas, sobre todo a los tapetes muy blandos.

No toque el agua de estas lagunas, ni se sumerja en ellas

Además de salinas, estas aguas tienen un pH extremo (alto o bajo) y muchas de ellas poseen un altísimo contenido de arsénico. Actividades de baño deben realizarse en lugares debidamente habilitados.

No conduzca con vehículos por salares húmedos ni por barros de colores

Además de arruinar un ecosistema frágil y único, usted se pone en riesgo de quedar empantanado, ya que bajo la sal puede haber un terreno muy fangoso. Además, estaría arruinando los neumáticos de su vehículo, porque la composición química de estos ambientes es sumamente agresiva.

No tire basura ni desperdicios

El aporte de materia orgánica afecta negativamente estos ecosistemas, que sobreviven solo bajo condiciones extremas.

How do we protect them?

These extremophile ecosystems have “superpowers” and are resistant to everything; indeed, they have inhabited the Earth for 3,800 million years. They need light to live and also so saline waters that no other living beings could survive there and displace them. Therefore, all that could affect them are changes in the salinity of water, or the lack of it and, of course, the input of organic material.

To preserve them, adequate salinity of water has to be kept and neither garbage nor domestic sewage has to be dumped into it. They should not be trampled over, especially very soft mats.

Do not touch the water of these lagoons; do not plunge into them

Besides being saline, they have an extreme pH (high or low), and many of them have a high content of arsenic. Swim activities must be done in duly qualified places.

Do not drive a 4x4 truck in wetlands or colored mud

Besides spoiling a unique and fragile ecosystem, you may get stuck in the mud, as there may be a muddy soil under the salt. Moreover, you would be spoiling the tires of your vehicle as these environments have a very aggressive chemical composition.

Do not dump garbage or waste

The input of organic matter kills those ecosystems that only survive under extreme conditions.

No se lleve un recuerdo, sólo fotografíe

Estas estructuras están vivas. Si usted saca un pedacito para llevarse de recuerdo, además de arruinar un ecosistema que tarda mucho en regenerarse, tendrá que tirar su recuerdo muy pronto porque el olor a compuesto de azufre y metano que despiden lo acompañará todo el viaje y finalmente no quedará nada más que barro y sal.

Nunca vaya solo

A la montaña hay que tenerle respeto. Por razones de seguridad se recomienda acceder a estos atractivos con guías locales autorizados.

Do not take a souvenir

These structures are alive. Should you cut a piece of them to take it as a souvenir, besides spoiling the ecosystem which takes a long while to regenerate, you will have to throw your souvenir away very soon as they give off an unpleasant smell of sulphure and methane and finally nothing but salt and mud will be left.

Never go alone

Mountains deserve respect. For safety reasons, it is highly recommendable to access to the attractions of the Puna in the company of trained tourist guides, or at least an authorized local guide, in case you travel in your vehicle.

Bibliografía en la que se basa este libro

- Airo, A. 2010. Biotic and abiotic controls on the morphological and textural development of modern microbialites at Lago Sarmiento, Chile. Stanford University, Geological and Environmental Sciences Department, Ph.D. thesis, May 2010, 123 pp.
- Alonso, R. N. La Puna Argentina. 2010. Ensayos geológicos, históricos y geográficos de una región singular. Mundo Editorial Lugar: Salta. 347 pp.
- Awramik, S. M., & Sprinkle, J. 1999. Proterozoic stromatolites: The first marine evolutionary biota. 13, 241-253. *Historical Biology*.
- Báez, W., Arnosio, M., Chiodi, A., Ortiz-Yañes, A., Viramonte, J. G., Bustos, E., y otros. 2015. Estratigrafía y Evolución del Complejo Volcánico Cerro Blanco, Puna Austral, Argentina. 32 (1), 29-49.
- Bull Alan T Juan A Asenjo, Michael Goodfellow Benito Gómez-Silva 2016. The Atacama Desert: technical resources and the growing importance of novel microbial diversity For Annual Review of Microbiology 2016, Volume 70.
- Costello, E.K., S.R.P. Halloy, S.C. Reed, P. Sowell & S.K. Schmidt. 2009. Fumarole-supported islands of biodiversity within a hyperarid, high-elevation landscape on Socompa Volcano, Puna de Atacama, Andes. *Appl. Environ. Microbiol.* 75: 735-747.
- De Silva, S.L. and P. W. Francis. 1991. *Volcanoes of the Central Andes*. 216 pp. Springer-Verlag, Berlin
- Demergasso C, Casamayor EO, Chong G, Galleguillos P, Escudero L, Pedrós-Alió C. 2004. Distribution of prokaryotic genetic diversity in athalassohaline lakes of the Atacama Desert, Northern Chile. *FEMS Microbiol Ecol* 48: 57-69.
- Dorador C, Vila I, Witzel K-P, Imhoff JF. 2013. Bacterial and archaeal diversity in high altitude wetlands of the Chilean Altiplano. *Fund Appl Limnol* 182:135-59.
- Demergasso C, Escudero L, Casamayor EO. 2008. Novelty and spatio-temporal heterogeneity in the bacterial diversity of hypersaline Lake Tebenquiche (Salar de Atacama). *Extremophiles* 12:491-504. doi: 10.1007/s00792-008-0153
- Dupraz, C., & Visscher, P. T. 2005. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*. (13,9), 429-438.

- Farías, M. E., Contreras, M., Rasuk, M. C., Kurth, D., Flores, M. R., Poiré, D. G. 2014. Characterization of bacterial diversity associated with microbial mats, gypsum evaporites and carbonate microbialites in thalassic wetlands: Tebenquiche and La Brava, Salar de Atacama, Chile. *Extremophiles*. 18, 301-329.
- Farías, M. E., Rascovan, N., Toneatti, D., Albarracín, V., Flores, R., Ordóñez, O., y otros. 2013. Discovery of Stromatolites Developing under Extreme Conditions in the Andean Lakes. <http://www.plosone.org/article/info:doi/10.1371/journal.pone.0053497>, 8 (1). Plos One.
- Farías María Eugenia y Manuel Contreras 2013 Ecosistemas Microbianos. ¿Nuevo patrimonio de la Humanidad?. *Revista Bitacora Ecológica Vol:1* (Chile).
- Farías María Eugenia y Luis Ahumada. 2015. Ecosistemas Arcaicos en la Puna Moderna: un Libro de Turismo Científico. Mundo Editorial. ISBN 978-987-698-104-0.
- Farías María Eugenia M. Cecilia Rasuk, Kimberley L Gallagher, Manuel Contreras, Daniel Kurth Ana B. Fernández, Daniel G. Poiré, Fernando Novoa, Pieter T. Visscher 2017. Prokaryotic diversity and biogeochemical characteristics of benthic microbial ecosystems at La Brava, a hypersaline lake at Salar de Atacama, Chile PLOS ONE
- Fernández Ana Beatriz, María Cecilia Rasuk, Pieter T Visscher, Manuel Contreras, Fernando Novoa, Daniel Poire, Molly M Patterson, Antonio Ventosa and María Eugenia Farías. 2016. Microbial diversity in sediment ecosystems (evaporites domes, microbial mats and crusts) of hypersaline Laguna Tebenquiche, Salar de Atacama, Chile *Front. Microbiol. - Extreme Microbiology* doi: 10.3389/fmicb.2016.01284.
- Gómez, FJ, LC Kah, JK Bartley, RA Astini. 2014 Microbialites in a high-altitude Andean lake: Multiple controls on carbonate precipitation and lamina accretion. *Palaios* 29 (6), 233-249.
- Gorriti, M. F., Díaz, G. M., Chimetto, L. A., Trindade-Silva, A. E., Silva, B. S., Mesquita, M. M., y otros. 2014. Genomic and phenotypic attributes of salinivibrios from stromatolites, sediment and water of the high altitude Andean Lake Socompa. 15, 473. *BMC Genomics*.
- Lynch R.C., A.J. King, P. Sowell, María E. Farías, Christian Vitry, and S.K. Schmidt. 2012. A preliminary assessment of the potential for microbial life in the highest elevation (>6000 m.a.s.l.) soils of the Atacama region. *J Geophys Res* 117:1-10.
- Rascovan, N., Maldonado, M. J., Vázquez, M. P., & Farías, M. E. 2014. Bioenergetic use of arsenic in haloarchaea

biofilms from Diamante Lake. ISMEJ doi:10.1038/ismej.2015.109.

- Rasuk, M. C., Kurth, D., Flores, R., Contreras, M., Novoa, F., Poiré, D. 2015. Bacterial diversity in microbial mats and sediments from Atacama Desert Microbial Ecology. DOI: 10.1007/s00248-015-0649-9.
- Rasuk MC, AB Fernández, D Kurth, M Contreras, F Novoa, D Poiré, and ME Farías 2016. Bacterial diversity in microbial mats and sediments from Atacama Desert Microbial Ecology Microbial ecology 71 (1), 44-56