

# Ambientes termales: evidencias de actividad biológica en sistemas termales fósiles (vetas epitermales) y actuales en la laguna Incachule, Puna Salteña

Natalia Salado Paz\*

\*IBIGEO-CONICET, Museo de Ciencias Naturales y Facultad de Ciencias Naturales-UNSa

El agua es el mayor constituyente del planeta Tierra, cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre y está representado por los océanos, ríos, lagos, lagunas y masas glaciares. Además es un componente primordial para los organismos vivos. En nuestro planeta se encuentra en los tres estados: sólido en las masas de hielo polar, glaciares de montañas y en suelos congelados (permafrost); líquido en los océanos, ríos, lagunas y atrapado en los poros de las rocas; y en estado gaseoso en la atmósfera y en las emisiones volcánicas.

En algunas regiones del planeta, donde las condiciones físico-químicas del agua harían impensable la existencia de seres vivos, existen formas de vida muy simples que reflejan cómo fueron las condiciones del planeta hace millones de años.

El planeta Tierra se formó hace aproximadamente 4.600 millones de años. La presencia de rocas sedimentarias de 3.800 millones de años (Jack Hill, Australia) indicaría que la hidrosfera y la atmósfera habrían sido estables para ese tiempo. Pero nos preguntamos ¿de dónde proviene el agua? Numerosos estudios demuestran que el agua se originó por la desgasificación del manto y en menor grado por impactos de meteoritos. Por otra parte, los volcanes emiten una considerable cantidad de agua a la atmósfera, pero la mayor parte del agua es reciclada del manto. También se ha postulado que gran proporción del agua procede de separación directa de magmas. Algunos estudios indican que los meteoritos que colisionaron con la Tierra, en la etapa de formación terrestre, entre los 4600 y los 4200 millones de años pudieron aportar agua mediante su deshidratación y la de las rocas superficiales de la Tierra sobre las que impactaron. Posteriormente a estos eventos, el agua se fue acumulando en estado líquido, formando pequeños océanos primitivos que, al cambiar las condiciones atmosféricas y disminuir los gases de efecto invernadero (principalmente el dióxido de carbono) dieron lugar a los grandes volúmenes de agua de los océanos.

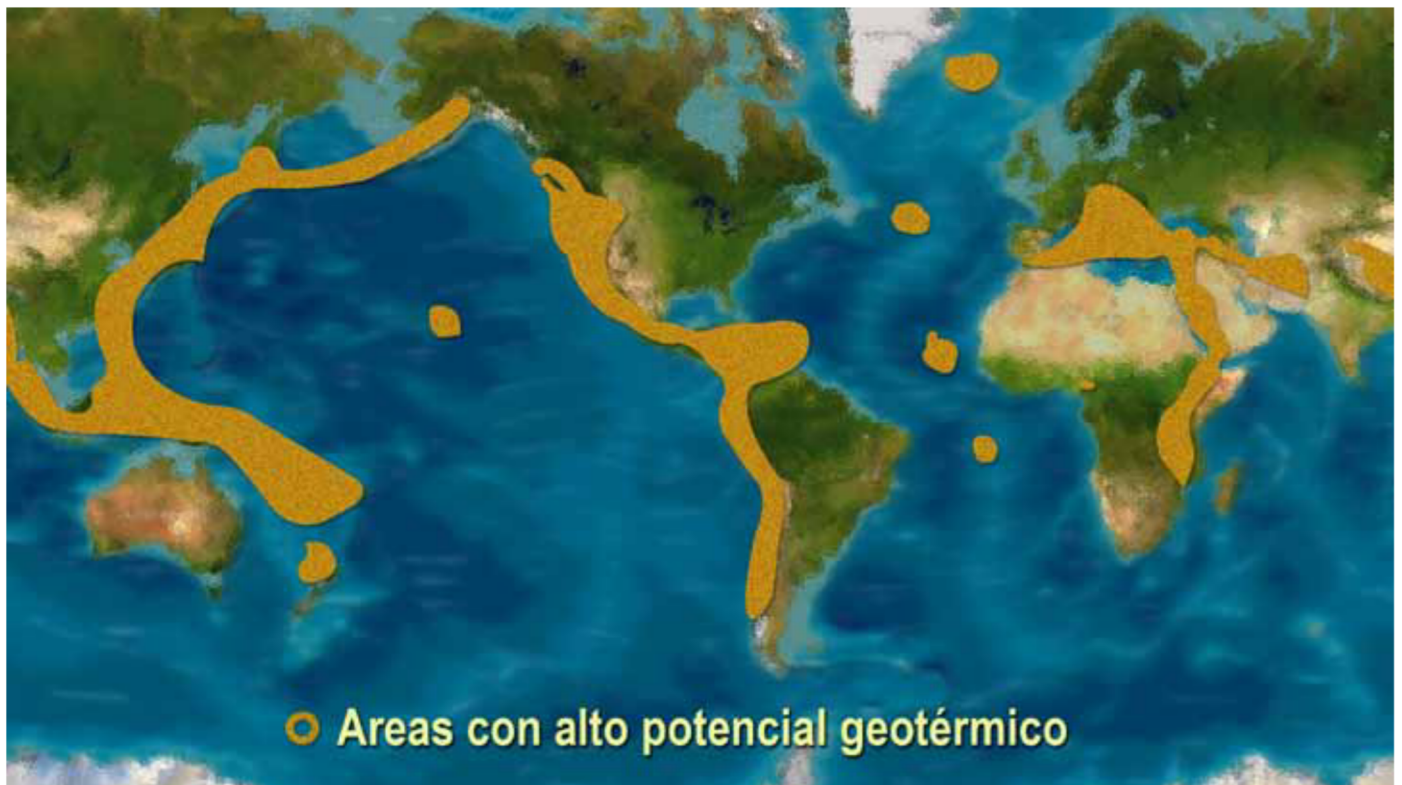
En la actualidad, el vulcanismo subaéreo y submarino es el proceso geológico responsable en mayor grado de la transferencia de agua, volátiles y otros componentes desde el interior del planeta a la atmósfera.

Relacionadas a las primeras etapas de formación de los océanos, algunas teorías del origen de la vida sugieren que las primeras moléculas orgánicas fueron sintetizadas en soluciones acuosas y que las formas vivas más primitivas tuvieron lugar cerca de los sitios con exhalaciones hidrotermales. Los estromatolitos (estructuras órgano-sedimentarias laminadas formadas por comunidades de microbios fotosintéticos y heterótrofos y su interacción con procesos sedimentarios) han sido reconocidos como las formas de vida más antiguas desarrolladas en la tierra, las cuales permitieron transformar la atmósfera de un ambiente hostil a un ambiente apto para la vida tal como lo conocemos hoy.

En el presente existen numerosos ejemplos que denotan la íntima relación de organismos extremófilos (seres que viven en condiciones únicas donde se pensaba que no era posible la vida) y medios termales. Por esta razón, haremos una breve introducción sobre los ambientes termales, mostrando donde se forman y de donde proviene la fuente de calor para luego enfatizar en un ejemplo de la Puna Central, en el cual se han encontrado evidencias de actividad biológica en rocas de edad miocena con mineralización y formadas a partir de aguas termales, y presencia de algas y estructuras órgano-sedimentarias, en el área de Incachule.

## AMBIENTES TERMALES

El término geotérmico o geotermal hace referencia a un sistema compuesto por un fluido y una roca caliente. Los sistemas geotermales e hidrotermales activos ocupan los mismos ambientes tectono-magmáticos. Estas zonas, a su vez coinciden en la mayoría de los casos con los márgenes constructivos o destructivos de placas litosféricas (Hongn y García, 2011). Una de las zonas volcánicas más importante del planeta



**Figura 1.** Mapamundi, en amarillo las áreas con alto potencial geotérmico las cuales coinciden con la zona de mayor actividad volcánica y zonas hidrotermales.

es el cinturón cincumpacífico, que sigue aproximadamente los márgenes del Océano Pacífico, en la cual se encuentran cerca del 60% de los volcanes del mundo (Figura 1).

En general las áreas geotérmicas se asocian a zonas con actividad volcánica, donde el calor es producido por magmas (roca fundida a profundidad). Existen también ejemplos de emanaciones de aguas calientes no asociadas a volcanes, como los de las termas del Río Hondo (Santiago del Estero) y las termas del Rosario de la Frontera (Salta) entre las más conocidas. El calor producido en los sistemas geotérmicos puede usarse como recurso energético natural y explotados para el turismo, muchas veces con fines medicinales. Cuando el calor generado alcanza temperaturas entre  $400^{\circ}$  a  $150^{\circ}$  C se lo aprovecha como energía para producir electricidad. Entre los rangos de temperatura de  $150^{\circ}$  a  $50^{\circ}$ , la energía se obtiene para hacer funcionar pequeñas usinas y para usos diversos en agricultura y en invernaderos. Cuando la temperatura es menor, entre los  $50^{\circ}$  a  $20^{\circ}$  se usa para calefacción urbana.

El término hidrotermal hace referencia a todos los fenómenos de aguas naturales calientes en la corteza terrestre. Comúnmente el término es usado para caracterizar a la actividad de géiseres, fumarolas, barros y manantiales calientes, etc. comunes en áreas volcánicas como Yellowstone Park (EEUU), Islandia, Nueva Zelanda y poco comunes en otros ambientes que pueden hospedar actividad hidrotermal relativamente baja (Henley, 1985). El agua subterránea que emerge a la superficie en corrientes tranquilas se denomina manantial termal, con temperaturas no demasiado alejadas del punto de ebullición del agua (Figura 2A).

En algunas localidades se producen emisiones periódicas de chorros de vapor y agua caliente a través de aberturas que reciben el nombre de géiseres (Figura 2B), tales como los del Tatio en la Puna de Atacama (Chile). El agua caliente emitida por los manantiales termales y por los géiseres es en su mayor parte agua freática que se ha calentado por contacto con las rocas, a su vez calentadas por conducción a partir de un magma situado debajo. Algunas zonas geotérmicas poseen aberturas llamadas fumarolas, por las que únicamente se emite vapor caliente (Figura 2C).

Los fluidos hidrotermales pueden ser definidos como soluciones acuosas calientes, con temperaturas entre  $5^{\circ}$  a  $500^{\circ}$  C que contienen solutos comúnmente precipitados por cambios en las propiedades de la solución a través del espacio y el tiempo (Pirajno, 2009).



**Figura 2.** A) Manantial termal en la zona volcánica del Tatio, Chile. B) Geiser de la zona volcánica de Islandia. C) Fumarolas en la zona volcánica del Tatio, Chile.

El agua de soluciones hidrotermales puede ser derivada de las siguientes fuentes: agua de mar, meteórica, connata, metamórfica, juvenil o magmática. Muchas de las soluciones hidrotermales son mezclas de dos o más de estas fuentes las cuales se definirán a continuación.

**El agua de mar:** ocupa gran volumen penetrando varios kilómetros debajo del lecho marino en las zonas abisales profundas, alrededor de las dorsales oceánicas. Como resultado, se calienta y se torna altamente enriquecida en metales aportados por el magmatismo submarino y posteriormente se descarga en el fondo del mar generando un depósito mineral producido por aguas termales.

**Las aguas meteóricas:** incluyen el agua de lluvia, lagos, ríos y subterránea. Estas pueden penetrar dentro de la corteza y ser calentadas, mineralizadas por la disolución de elementos metálicos y no metálicos de las rocas que están en contacto y luego emerger como aguas calientes

**Agua connata o de formación:** es el agua que queda atrapada en los intersticios o poros entre los granos de sedimentos que se acumulan en diferentes ambientes como océanos, ríos, lagunas y dunas.

**Las aguas metamórficas:** son derivadas de la deshidratación de minerales durante el proceso de metamorfismo que se produce por la presión y la temperatura que afecta a rocas preexistentes.

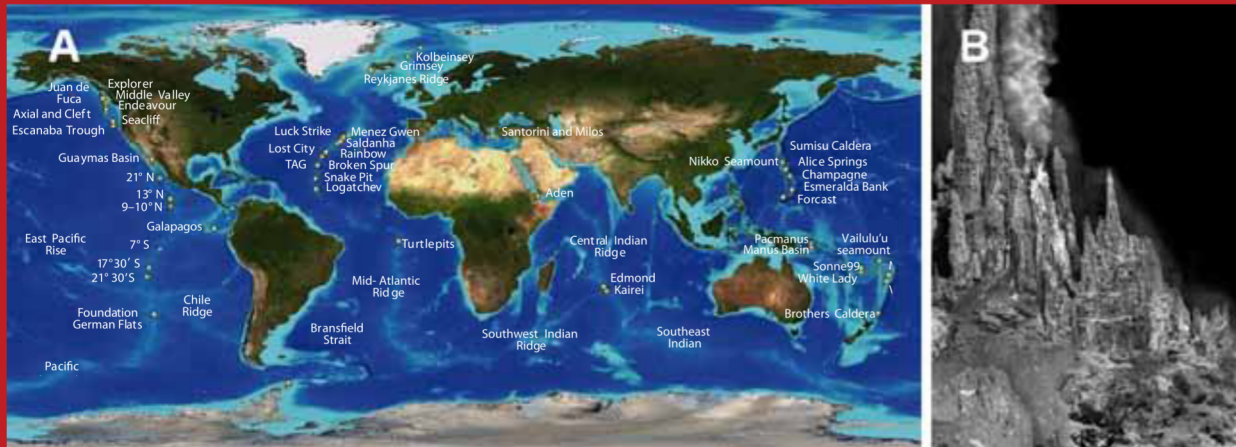
**Las aguas magmáticas o juveniles** son aquellas que se separan a partir de una masa fundida durante el enfriamiento de un magma, generando un sistema magmático-hidrotermal, que es quizás el agente más poderoso para formar depósitos de minerales metálicos. Además de agua, otros componentes volátiles pueden estar presentes en el magma (ácido sulfhídrico, dióxido de carbono, dióxido de azufre, boro, flúor, ácido clorhídrico, entre otros) por lo que el contenido de agua de los magmas varía aproximadamente entre 0,2–6,5% en peso. La presencia de estos volátiles es importante para el transporte en solución de las diferentes especies metálicas que pueden ser precipitadas formando minerales. Algunos geólogos limitan el concepto de agua juvenil a las derivadas de rocas del manto.

La circulación de los fluidos hidrotermales en el planeta da lugar a la creación y desarrollo de los sistemas hidrotermales que de acuerdo con la temperatura y profundidad se clasifican en epitermales, mesotermales e hipotermales.

Un sistema epitermal es un sistema formado por fluidos hidrotermales superficiales (0–1000 metros) a baja temperatura (hasta 300°C). De la actividad de emanación y circulación de agua caliente, resulta una zona en la que ocurre alteración de las rocas y a la vez formación de nuevos minerales otorgando al conjunto alterado-mineralizado colores llamativos, generalmente con tonalidades blancas amarillentas a verdosas. La pérdida de temperatura y cambios del pH durante el recorrido del agua provoca la precipitación de los nuevos minerales. Los cambios bruscos en la temperatura y composición de los fluidos durante su ascenso generan que los minerales de elementos metálicos ocurran comúnmente en las zonas de canales y conductos. Los metales pueden ser plomo, plata, zinc, mercurio, antimonio, entre otros.

El estudio de estos depósitos minerales fósiles que han quedado preservados en el pasado geológico ha revelado su relación con los sistemas geotermales superficiales ya que se encuentran los mismos rasgos que caracterizan a las actividades actuales de géiseres, fumarolas y circulación de aguas calientes hospedados en terrenos volcánicos terciarios en la región circumpacífica (Henley, 1985).

## FUMAROLAS HIDROTERMALES Y EL ORIGEN DE LA VIDA



**Figura 3.** A) Distribución mundial de localidades con fumarolas hidrotermales submarinas. B) Detalle de fumarola hidrotermal. Ambas imágenes obtenidas de Martin *et al.*, 2008.

La teoría más conocida para el origen de los componentes orgánicos está basada en la “sopa prebiótica”. Un reconocido bioquímico ruso, Alexander Oparin, desarrolló las primeras teorías sobre el origen de la vida en 1922. Oparin estimaba que en los primeros momentos de la historia de la Tierra, la atmósfera no contenía oxígeno por lo que la vida habría comenzado como sustancias orgánicas simples con organismos que utilizaban como alimento sustancias inorgánicas como el dióxido de carbono, similares a los organismos autótrofos actuales. La teoría recibió soporte con la demostración experimental realizada por Miller en 1953 quien preparó una mezcla de gases reductores (metano, amoníaco e hidrógeno) en un matraz y luego la sometió durante una semana a descargas eléctricas. Del análisis de los compuestos resultantes pudo comprobar que se habían obtenido, entre otras sustancias, aminoácidos, que son las moléculas orgánicas fundamentales para la formación de proteínas (Reguant Serra, 2005). Sin embargo, la condensación y polimerización de estas moléculas precursoras requieren algún mecanismo energético para las transformaciones y reacciones metabólicas que Miller ideó con mecanismos que simulaban rayos.

Hace aproximadamente 30 años, se descubrieron fumarolas submarinas donde habitan importantes comunidades de microbios. Sin duda, este hallazgo revolucionó la teoría del origen de la vida por ser ambientes inhóspitos donde se pensaba que no se podía desarrollar la vida. Por otra parte, los ambientes hidrotermales activos de aguas profundas se asemejan a la Tierra primitiva, debido a que sistemas similares existieron tan pronto como había agua acumulada en los primeros océanos primitivos hace más de 4.200 millones de años.

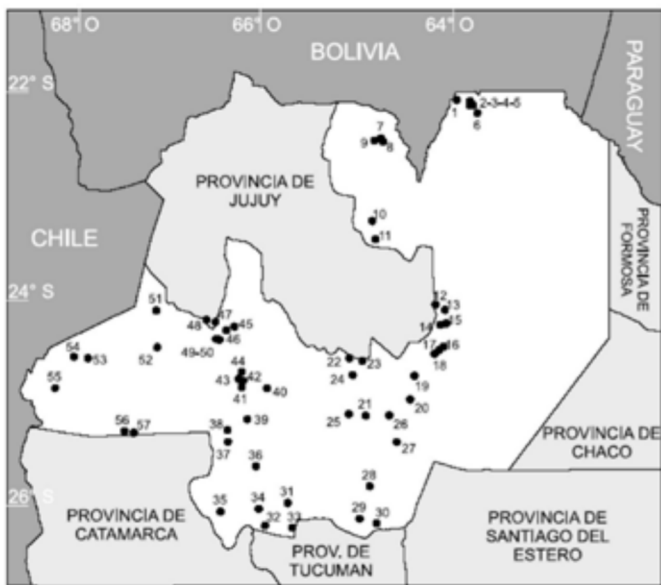
Los ecosistemas de fumarolas se albergan en conductos hidrotermales donde la fuente de energía se deriva principalmente del vulcanismo de las dorsales centro-oceánicas. Las chimeneas de sulfuros a 360°C son ambientes que presentan equivalencia con la Tierra primitiva, con gases reactivos, elementos disueltos y energía térmica (Martin *et al.*, 2008).

Las fuentes hidrotermales se producen en las zonas del fondo marino y tienen una amplia distribución mundial. Los sistemas de conductos hidrotermales se han descubierto en numerosos puntos del fondo marino (Figura 3). En las zonas de extensión como las dorsales, las cámaras de magma que contienen roca fundida (800–1.200 °C) descargan lavas en el fondo del océano; la periodicidad o frecuencia de las erupciones es variable, en algunos casos ocurren cada decenas de años, en otros están separadas por lapsos de más de 50.000 años. Estas erupciones producen las fumarolas negras que albergan densas y diversas comunidades biológicas (Martin *et al.*, 2008).

El descubrimiento de estos sistemas hidrotermales ha cambiado profundamente la forma de ver la historia geológica, geoquímica y ecológica de la Tierra. Las chimeneas son abundantes en el suelo de los océanos y son una importante fuente de muchos elementos y compuestos orgánicos que se transfieren a la hidrosfera. Los organismos que habitan en las chimeneas hidrotermales pueden vivir sin el aporte de la radiación solar y con relaciones simbióticas que convierten el calor, el metano (CH<sub>4</sub>) y compuestos del azufre en energía para los procesos metabólicos. Además utilizan energía química provista por reacciones de oxidación-reducción, las cuales aceleran mediante su actividad enzimática.

## MANANTIALES TERMALES DE LA PUNA

El esquema tectónico de la cordillera de los Andes, con cuerpos magmáticos emplazados en niveles superiores de la corteza que generan áreas térmicamente anómalas lo transforma en un sector de recursos geotérmicos de alta y baja temperatura. En la Puna salteña, la actividad geotérmica ha sido reconocida ampliamente, donde algunas expresiones de baja temperatura se explotan con fines turísticos (Aguas de Pompeya, Baños de Incachule). Las fuentes de calor de estos manantiales calientes son magmas asociados al intenso vulcanismo implantado en la región.



Manifestaciones termales de la provincia de Salta. (Tomado de Catalogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina, SEGEMAR, 2003)

- |                                      |                               |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1- Río Itaú                          | 29- Baños El Ceibal           |
| 2- Río Carapari                      | 30- Morenillo                 |
| 3- Río Itangué                       | 31- La Punilla                |
| 4- Arroyo Agua Blanca                | 32- Cerro Cajón               |
| 5- Río Itaqué                        | 33- Puesto Aguadas            |
| 6- Tobontirenda                      | 34- Puesto La Cueva           |
| 7- Río San José                      | 35- Luingo                    |
| 8- Baños de Lipeón                   | 36- El Carmen                 |
| 9- El Cayotal                        | 37- Cuchiyaco                 |
| 10- Río Paraní                       | 38- Agua Caliente La Hoyada   |
| 11- Arroyo Agua Blanca               | 39- La Playa                  |
| 12- Arroyo Laurel                    | 40- El Potrero                |
| 13- Puesto La Laguna                 | 41- Santa Elena               |
| 14- Arroyo Las Tortugas              | 42- La Salinita               |
| 15- Chorro de Mealla                 | 43- Quebrada del Porongo      |
| 16- Manantial El Gallo               | 44- Quebrada Paya             |
| 17- Pozo Río Dorado 1                | 45- Baños de Pompeya          |
| 18- Barrialito                       | 46- Baños de Incachule        |
| 19- El Espinillo                     | 47- Tocomar                   |
| 20- Pozo Candelaria                  | 48- Antuco                    |
| 21- Baños de Lumbrera                | 49- Baños de Pastos Grandes   |
| 22- Baños El Sauce Colorado          | 50- Aguas Calientes de Corral |
| 23- Aguas Calientes                  | 51- Salar de Rincón           |
| 24- Baños El Saladillo               | 52- El Macón                  |
| 25- El Coro                          | 53- Vega Salar Arizoro        |
| 26- Pozo Las Cañas 282-U-1           | 54- Socompa                   |
| 27- Baños El Galpón                  | 55- Salar Llullaillaco        |
| 28- Termas de Rosario de La Frontera | 56- Vega Antofalla            |
|                                      | 57- El Hervidero              |

El Departamento de Geotermia del Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM) del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) realizó un mapa que recopila todos los sitios con manifestaciones termales de la provincia de Salta en el cual se encuentra la zona de estudio (Figura 4, dato 46).

El manantial termal de Incachule se encuentra localizado al oeste de la provincia de Salta, a 23 km de la localidad de San Antonio de los Cobres, aproximadamente a 4400 m.s.n.m. Es una pequeña laguna de 10x5 m<sup>2</sup> de superficie alojada en el borde oriental de la caldera volcánica mioceña del Cerro Aguas Calientes. El tamaño de la laguna varía según las estaciones de lluvia (Figura 5 A y 5B) el cual disminuye considerablemente en los periodos de sequedad. La temperatura del agua ha sido medida en rangos de hasta 53°C, con pH cercanos a la neutralidad (pH 6,5–6,8). En este cuerpo termal, se observan algas verdes con formas alargadas, que por sectores simulan estructuras burbujeantes (Figs. 6A y 6B) asociadas a sedimentos de colores rojizos debido a la presencia de óxidos de hierro.

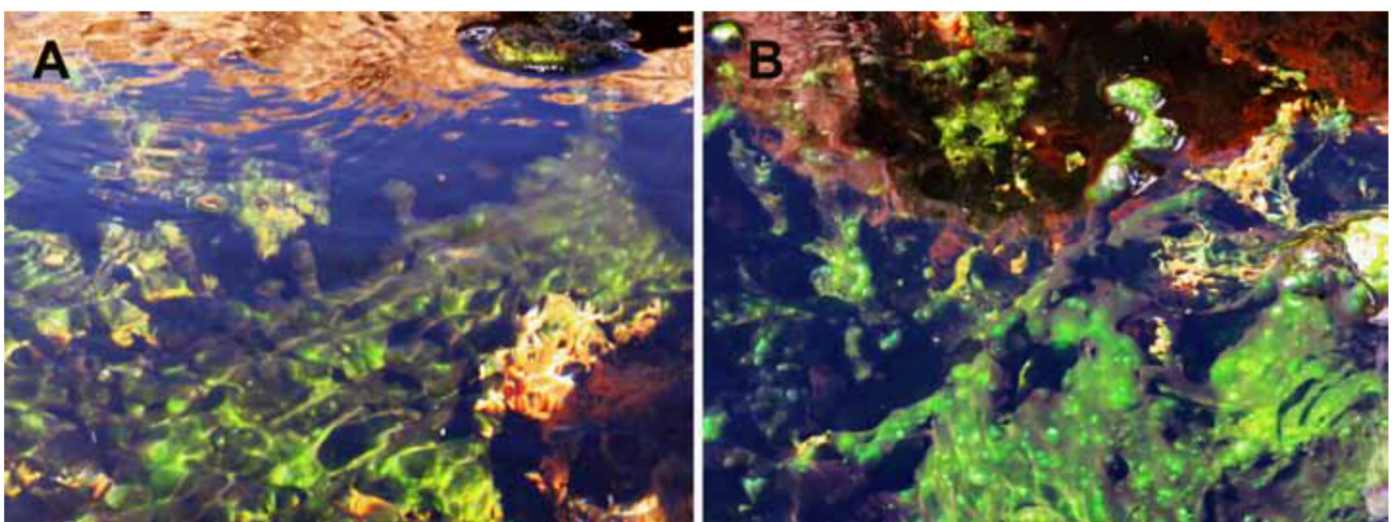
Por otra parte, la actividad química del agua calentada disolvió cantidades importantes de carbonatos, que al enfriarse rápidamente, precipitó material mineral acumulado cerca del manantial termal en forma de costras calcáreas (Figura 7A y 7B). También se distinguen estructuras órgano-sedimentarias laminadas (estromatolitos) que se producen por la precipitación química de carbonato de calcio mediante la intervención de cianobacterias (Figura 7C y 7D).

**Figura 4.** Mapa de la provincia de Salta con las manifestaciones termales estudiadas por el Departamento de Geotermia del Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM) del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). El punto 46 corresponde a la zona de estudio.

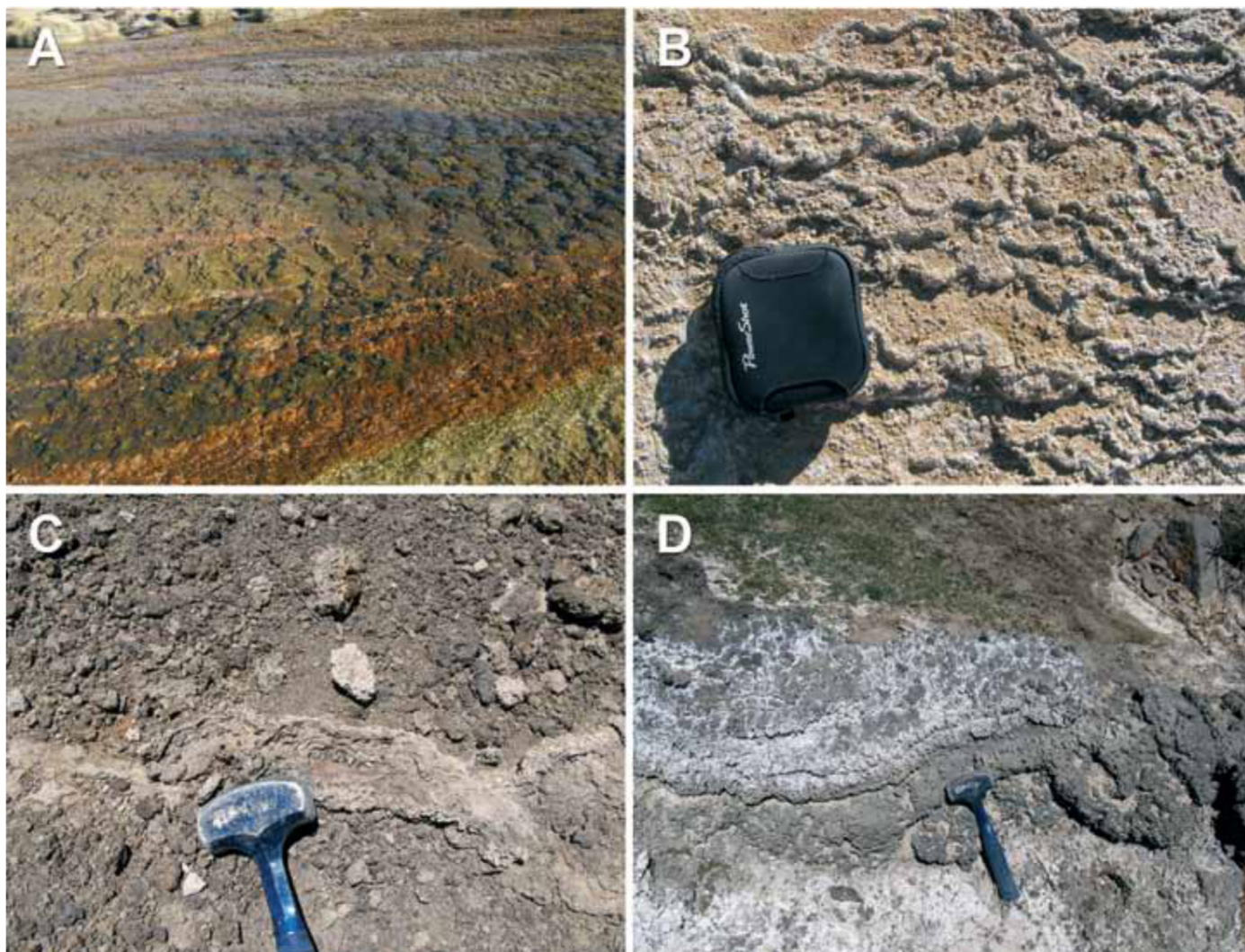


**Figura 5.** Laguna Incachule. A) En estación de lluvia (diciembre). B) En estación seca (Abril).

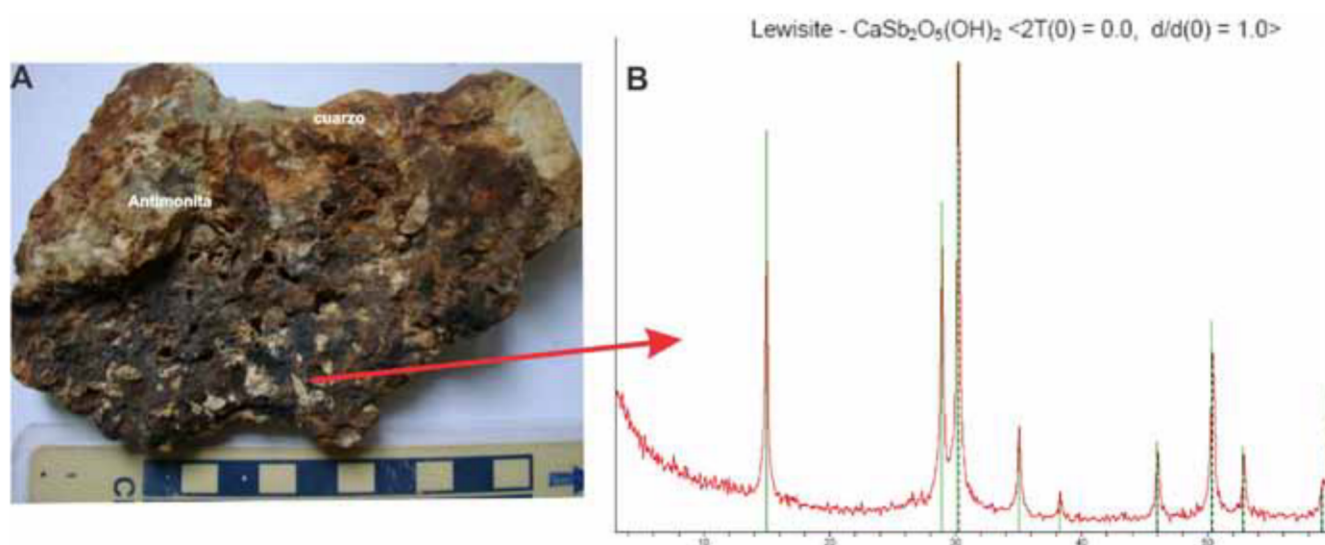
En aéreas aledañas a la laguna, aproximadamente a 100 m de los baños de Incachule afloran depósitos de antimonio ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) epitermales fósiles, con mineral en vetas y diseminado (Kirschbaum y Murray, 2011). Los sulfuros habrían sido depositados a partir de un fluido caliente rico en sílice a temperaturas de  $200^\circ\text{C}$  aproximadamente. Las muestras analizadas contienen antimonita ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) alterada en un mineral blanquecino cubierta por costras negras y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) (Figura 8). Los minerales blanquecinos han sido determinados por Rayos X como Lewisita ( $\text{CaSb}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$ ) y para mayor detalle se obtuvieron imágenes de alta resolución mediante microscopio electrónico de barrido en el Laboratorio de Microscopía Electrónica (LASEM) de la Universidad Nacional de Salta. Dichas imágenes revelaron la presencia de organismos fósiles asociados a la mineralización. Estos organismos poseen estructuras en cadenas tipo cocoides (esferoidales) revelando actividad biológica asociada a los depósitos de antimonio. Esta observación, si bien representativa de una pequeña porción del depósito, sugiere antiguos cuerpos de agua termal que permitieron alojar estos organismos (Figs. 9A–F).



**Figura 6. A y B)** Algas verdes actuales en las emanaciones termales con formas columnares, alargadas y con apariencia de burbujas.



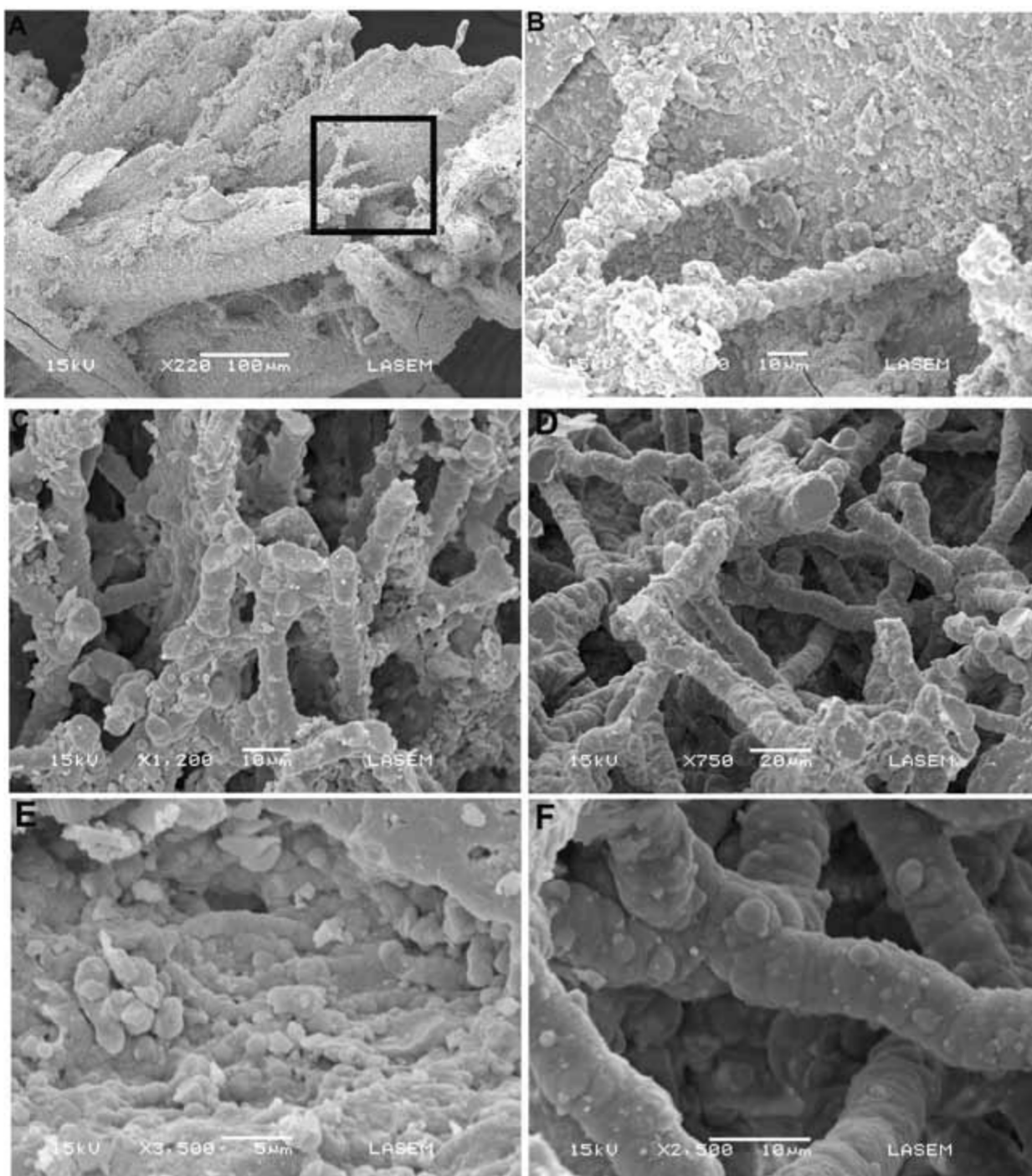
**Figura 7.** A) Costras calcáreas actuales por donde circulan los fluidos calientes. B) Costras calcáreas por donde, en la actualidad, no circulan fluidos. C y D) Estructuras órgano-sedimentarias laminadas.



**Figura 8.** A) Roca compuesta principalmente por cuarzo, cristales remanentes de antimonita (SbS), minerales blanquecinos (lewisita) y costra negrusca. B) Difracción de Rayos X determinando el mineral lewisita ( $\text{CaSb}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$ ).



**Figura 8.** C) Detalle de cristales de antimonita (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>). D y E) Imágenes en microscopio electrónico de barrido de los cristales blanquecinos.

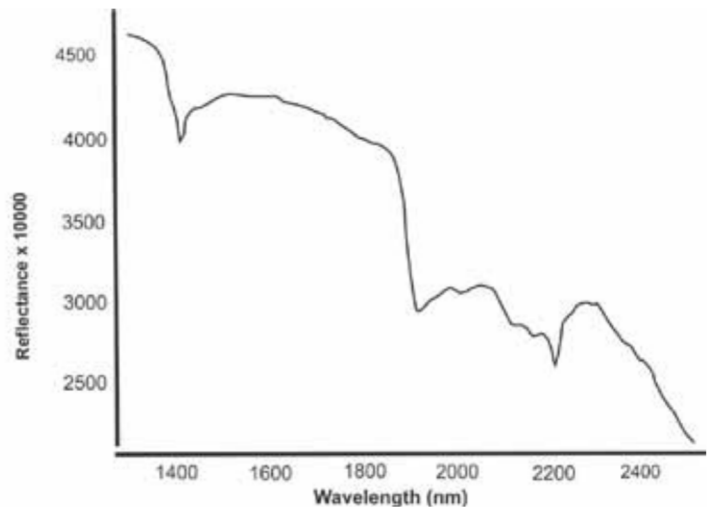


**Figura 9.** A –F) Imágenes de microscopio electrónico de barrido en costra negrusca, mostrando organismos que constituyen cadenas cocoides (esferoidales) típicas de las cianobacterias.





**Figura 10.** Roca ignimbrita de coloración blanquecina debido a la alteración por fluidos hidrotermales y su espectrometría de reflectancia (SWIR) mostrando la determinación mineralógica compuesta por mezcla de illita con amonio 80% y alunita con amonio 20%.



La actividad termal de esta zona está asociada a las etapas finales del magmatismo de la caldera del Cerro Aguas Calientes. Es decir, al formarse la caldera arrojó grandes volúmenes de ignimbrita como nubes piroclásticas, entre los 17,15 y 10,3 millones de años. La cámara magmática siguió emitiendo calor, permitiendo al agua que ingresaba por grietas y poros, calentarse y dar lugar a los depósitos fósiles y a la actividad termal actual en la laguna de Incachule. Probablemente, la actividad termal fue mucho mayor en épocas pasadas, hecho que es puesto en evidencia por los sistemas epitermales fósiles y la abundancia local de costras calcáreas con estructuras de algas en la zona.

Los estudios de espectrometría de reflectancia (SWIR) realizados por Godeas (2010), caracterizaron a rocas alteradas hidrotermalmente con la asociación mineralógica compuesta por adularia e illita con amonio (Figura 10). El amonio es aportado por la materia orgánica contenida en las rocas de caja de las mineralizaciones metalíferas u otras que se encuentran en las cercanías de los depósitos por donde circulan los fluidos hidrotermales (Godeas y Litvak 2006). En este estudio se sugiere que el amonio encontrado en rocas alteradas hidrotermalmente podría derivar de la misma actividad termal, que produce la energía y el medio químico para favorecer la vida de organismos tales como cianobacterias que comparten con algunas otras bacterias la habilidad de tomar el  $N_2$  del aire y reducirlo a amonio ( $NH_4$ ).

## ¿QUE ES UNA CIANOBACTERIA?

Las cianobacterias son bacterias (dominio Bacteria) conocidas como algas verdes-azuladas por su coloración, también se conocen como cianofitos. Las cianobacterias son organismos fotosintetizadores, es decir, capaces de tomar la energía solar y transformarla en energía química. Las cianobacterias comparten con algunas otras bacterias la capacidad de usar  $N_2$  atmosférico como fuente de nitrógeno, facilitan la precipitación del carbonato cálcico dando lugar a las estructuras organo-sedimentarias (estromatolitos). Representan un indicador del comienzo de la vida en la tierra, los datos más antiguos encontrados en Warrawoona (Australia) representan estromatolitos fósiles de hace 3500 millones de años.

También se han hallado algas antiguas (*Grypania spiralis*) en rocas de unos 2200 millones de años en Michigan (Estados Unidos) que correspondería al primer organismo del dominio Eukarya.

La presencia de las cianobacterias es muy importante para la historia y diversificación de la vida en la tierra. En los inicios, la proto-atmósfera era rica en dióxido de carbono, las cianobacterias captaban el dióxido de carbono y lo transformaban en oxígeno permitiendo la rápida oxigenación de la atmósfera, así comenzó a formarse la capa de ozono y comenzó a evolucionar el ambiente allanando el camino para la aparición de organismos multicelulares. Sin embargo la vida existía sin oxígeno pues hay evidencias de que reducción bacteriana de sulfatos, reducción y oxidación de hierro y metanogénesis ya eran metabolismos activos e importantes en la biosfera primitiva.

Los ambientes termales son lugares aptos para el desarrollo de la vida, tal como ha sido registrado en el pasado geológico por organismos primitivos en rocas antiguas y como podemos observar en la actualidad en los volcanes submarinos y fumarolas superficiales. En los últimos años se han descubierto diversos tipos de organismos, a los cuales se los denomina extremófilos, que viven en condiciones extremas de temperatura. En la Puna, en Laguna Socompa y Tolar Grande, se han encontrado estromatolitos que viven en lagunas de altura. Si bien no están asociados a lagunas termales, son los primeros estromatolitos vivientes hallados en regiones altas (por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar). En el ejemplo de Incachule podemos observar organismos que vivieron en un sistema termal de baja temperatura, en un pasado no muy lejano y estructuras algales que viven en la actual laguna termal, como ejemplos de vida en medios donde solíamos creer que no era posible encontrarla.

---

## Literatura citada

Godeas, M., 2010. Estudio de muestras mediante el método de espectrometría de reflectancia SWIR. Chorillos, distrito La Poma (Salta). SEGEMAR, Instituto de Geología y Recursos Minerales. Inédito. 2 páginas. Buenos Aires.

Godeas, M., V. Litvak. 2006. Identificación de anomalías de amonio por espectrometría de reflectancia: implicancias para la exploración Minera. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 61: 438–443.

Henley R., 1985. The geothermal framework of epithermaldeposits. Reviews in Economic Geology. Geology and geochemistry of epithermal systems, 2: 1–21.

Hongn F.D., V. García. 2011. Tectónica de Placas. Temas de Biología y Geología del NOA, 1: 21–31.

Kirschbaum A.M., J. Murray. 2011. Minería y aguas acidas: contaminación y prevención. Temas de Biología y Geología del NOA, 1:40–51.

Martin W. J. Baross, D. Kelley, M. Russell.. 2008. Hydrothermal vents and the origin of life. Nature Reviews, Microbiology. Volume 6:805–814.

Miller S. L. 1953. Production of amino acids under possible primitive earth conditions. Science 117 (3046): 528–9.

Pesce A., F. Miranda.2003. Catálogo de manifestaciones termales de la Republica Argentina. Vol.1 Región Noroeste. SEGEMAR, ANALES 35. Buenos Aires.

Pirajno F. 2009. Hydrothermal Processes and Mineral systems. Geological survey of Western Australia. Editorial Springer.

Reguant Serra S. 2005. Historia de la tierra y de la Vida. Editorial Ariel, España.