

# Artículos

## *¿VIVIENDO AL LÍMITE?*

### *ORGANISMOS EXTREMÓFILOS EN AGUAS ÁCIDAS DE LA MINA PAN DE AZÚCAR, JUJUY*

Jesica Murray \* y Javier Goldberg \*

\* IBIGEO-CONICET. Museo Ciencias Naturales-UNSa

El espacio, la frontera final. Estos son los viajes de la nave espacial *Enterprise*. Su continua misión: **explorar extraños nuevos mundos, buscar nuevas formas de vida** y nuevas civilizaciones, viajando temerariamente a donde nadie ha llegado antes. Esta famosa frase, era pronunciada por el capitán Kirk al inicio de cada episodio de la serie de ciencia ficción 'Viaje a las Estrellas' (Star Trek) que narra las aventuras de la tripulación de dicha nave en el siglo XXIII. Buscar vida en otros planetas (actualmente estudiada por la exobiología) usualmente presupone que ésta debe seguir ciertos parámetros que nosotros consideramos "normales" para la existencia de vida en la Tierra. Sin embargo, existen lugares en nuestro planeta muy diferentes de los considerados "normales" los cuales están habitados por organismos que pueden vivir en ambientes que anteriormente se suponían incapaces de sostener vida, dichos organismos son llamados extremófilos.

Un extremófilo (etimológicamente proviene de "extremus", literalmente extremo, y "philia", amor, amistad o afiliación) es un microorganismo que es capaz de vivir, desarrollarse y prosperar en condiciones extremas, entendiéndose por tales aquellas que son muy diferentes a las que viven la mayoría de las formas de vida en la Tierra (Rothschild, 2002). Estas condiciones pueden ser extremos físicos (por ejemplo, muy altas o bajas temperaturas, enormes presiones o alta radiactividad) y geoquímicos (por ejemplo, pH, salinidad, oxígeno).

Ahora bien, ¿quién o qué define a partir de qué umbral en uno de estos factores el ambiente es extremo y por lo tanto el organismo que lo habita es extremófilo? A primera vista se podría pensar que lo que determina a un extremófilo está basado en una definición un tanto antropocéntrica, sin embargo, todos estos parámetros ambientales están en un continuo en la naturaleza y los extremos, que hacen difícil la presencia de vida, representan los "ambientes extremos". En este contexto, Oarga (2009) y Johnson (2010) definen como ambientes normales a aquellos con temperaturas entre 4 y 40 °C, con valores de pH entre 5 y 8.5<sup>1</sup>, la salinidad entre el agua dulce (<0.05%) y el agua de mar (3-5%) y una presión de 1 Bar, que es la presión media atmosférica sobre la superficie de la tierra a la altura del nivel del mar. Por lo tanto, aquellos hábitats en nuestro planeta, en donde uno o más parámetros difieren dramáticamente del escenario ideal, son llamados ambientes extremos y sus habitantes extremófilos.

La nave espacial *Enterprise* observa desde el espacio al tercer planeta del sistema solar, el Oficial científico Spock, mira asombrado las diferentes formas de vidas que habitan nuestro planeta y tras un relevamiento sobre las características de la vida se pregunta -¿cómo pudieron crecer allá?-. Existen alrededor de 1.75 millones de organismos en la Tierra y, probablemente, muchos millones más que aún se desconocen. Aparentemente, la mayoría de ellos vine en condiciones que los humanos llaman "normales" aseveró Spock. ¡Esto es asombroso! ¿Así que existen aún, formas de vida más extrañas? ¿Y cuáles son? ¿Dónde se encuentran? ¿Acaso los humanos viven allí? - Allí mismo decidió teletransportarse a la Tierra, y explorar dichos ambientes, se trataba de una experiencia demasiado interesante como para dejarla pasar; además confiaba en que su naturaleza mitad humana, iba a permitirle percibir lo que los humanos llamaban "anormal".

<sup>1</sup> El pH es un parámetro utilizado para expresar la acidez del agua, ya que tiene en cuenta la concentración de protones libres en la misma. La escala de pH va de 1 a 14, agua con pH = 7 es neutra, por debajo de 7 es ácida y por arriba es básica. Su fórmula química es:  $\text{pH} = -\text{Log}(\text{H}^+)$  y la forma más común de obtener este valor es a través de mediciones en el agua con un instrumento de medición denominado peachímetro (Kirschbaum y Murray, 2011).

Retomando la definición de ambientes normales para el desarrollo de la vida en nuestro planeta, cabe preguntarnos ahora ¿cuáles son entonces aquellos ambientes cuyas características se alejan de los parámetros normales o ideales y los convierten en extremos? ¿Cuáles son los sitios extremos en nuestro planeta que el Oficial Spock debería recorrer para responder a la curiosidad de los tripulantes del Enterprise?

*-Me encuentro bien mi Capitán, he solicitado ser teletransportado a un sitio "normal", tenemos una temperatura ambiente de 25°C, estamos a unos pocos metros sobre el nivel del mar y me encuentro cerca de la costa, los ríos que llegan tienen agua que los humanos y muchos animales pueden beber. Hay muchos peces, animales, la vegetación es abundante. Ahora a visitar sitios extremos!!!*

Así, Spock se teletransportó a centros geotermales (Salado Paz, 2012; Monasterio de Gonzo et al., 2011) donde el agua termal proveniente de las fisuras de la tierra alcanza temperaturas muy elevadas que llegan hasta los 400°C, visito sitios como el parque nacional Yellowstone en Estados Unidos y varias en Argentina, como las termas de Incachule en la Puna Salteña y otras ubicadas a menores altitudes como las de Caviahue próximas al Volcán Copahue en Neuquén. Recorrió sitios tan helados como glaciares de alta montaña, la mismísima Antártida y el polo Norte. También realizó excursiones en el océano profundo hasta llegar a las fumarolas submarinas donde no llega la luz del sol y no sólo la presión por la masa del agua del océano era extremadamente alta sino también la temperatura y concentración de sales y metales del agua que circula por las dorsales centro-oceánicas. Realizó paseos por el continente asiático donde visitó el Mar Muerto, 11 veces más salado que el agua del mar. Continuó su recorrido por ambientes donde el agua poseía valores de pH muy bajos producto de la interacción de minerales metalíferos con el agua como el Río Tinto en España y una pequeña laguna ácida en la Puna Jujeña que se encuentra en la Mina Pan de Azúcar.

El científico Spock pudo, durante su recorrido por los distintos ambientes extremos de la tierra, identificar a los distintos organismos capaces de tolerar las condiciones adversas de temperatura, presión, acidez y salinidad entre otras... así pudo recabar suficiente información.

La mayoría de los extremófilos conocidos son unicelulares, siendo en gran parte miembros de los dominios Arquea y Bacteria. Sin embargo, organismos de los tres dominios de la vida (Archaea, Eubacteria y Eucariota<sup>2</sup>) se encuentran en condiciones extremas. Varios ejemplos de peces de ambientes extremos continentales en Argentina han sido reportados por Monasterio de Gonzo et al. (2011). Resulta importante e interesante destacar que las enzimas<sup>3</sup> de los extremófilos, denominadas extremo-enzimas, funcionan como catalizadores de reacciones químicas en condiciones que las enzimas comunes del resto de los seres vivos no lo harían. Esto trae aparejado también un gran potencial en cuanto a la aplicación tecnológica-productiva que se ha descubierto para los microorganismos como el descubrimiento de nuevos antibióticos, procesos químicos industriales y tareas de biorremediación y biominería (en el primero algunas especies de bacterias son utilizadas para inmovilizar metales pesados generando el proceso inverso al de la formación de drenaje ácido de minas y liberación de metales en el medio; mientras que en el segundo las bacterias aceleran el proceso de lixiviación y liberación de metales de las rocas) (Johnson & Hallberg, 2005).

De los organismos **extremófilos** descritos hasta el momento se hará referencia a los acidófilos ya que son de principal interés en esta nota (Fig. 1). Se trata de microorganismos que



**Figura 1:** Representación caricaturesca (y antropomorfa) de un organismo unicelular acidófilo. La extremofilia de un organismo indica que éste puede vivir y desarrollarse bajo condiciones donde la mayoría de los seres vivos no pueden hacerlo.

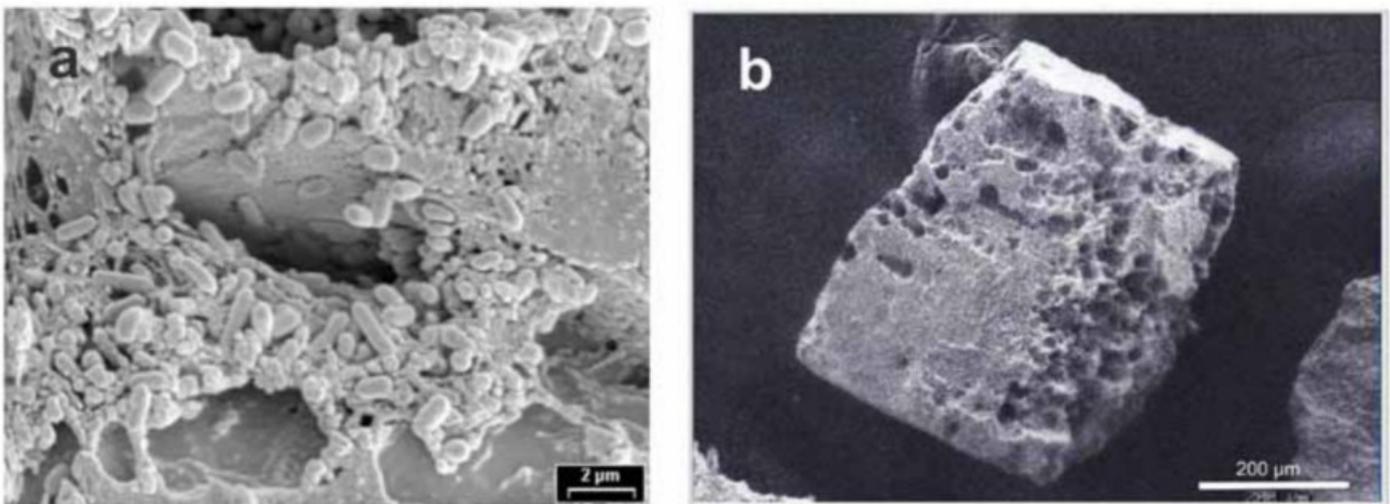
<sup>2</sup> Tres grandes dominios en los que se divide la diversidad de la vida en la tierra. Este sistema, basado en las características de las células, propone que una célula antepasada común (progenote) dio lugar a tres tipos diferente de célula y cada una representaría un dominio. Archaea incluye a los usualmente denominados microbios, Bacteria a las bacterias y Eucariota al resto de los organismos vivos: plantas, hongos y animales.

<sup>3</sup> Las enzimas son proteínas que controlan, facilitan y agilizan todas las reacciones químicas que ocurren en las células.

toleran valores de pH bajos y que a su vez requieren ambientes extremadamente ácidos para desarrollar su metabolismo. Según Johnson (2010), aquellos microorganismos cuyo óptimo desarrollo se produce a pH entre 3-5 se denominan moderados-acidófilos, mientras que los que pueden tolerar pH inferior a 3 son llamados extremo-acidófilos. Los sitios donde se encuentran son extremadamente ácidos, como los campos sulfatados de las áreas geotermales (aguas termales ácidas con altos contenidos de sulfatos, suelos y barros termales ácidos) y sitios impactados por la actividad minera de extracción de metales y de carbón. En estos últimos, la fuente de acidez proviene de la oxidación de los minerales que contienen metales y azufre, denominados sulfuros ( $\text{FeS}_2$  sulfuro de hierro o pirita,  $\text{ZnS}$  sulfuro de zinc o esfalerita,  $\text{PbS}$  sulfuro de plomo o galena,  $\text{FeCuS}_2$  sulfuro de hierro y cobre o calcopirita), de ellos el principal responsable de la generación de acidez es la pirita, ya que al oxidarse, libera protones y disminuye el pH en el agua.

Los minerales metálicos y la pirita se encuentran estables bajo la superficie de la tierra, pero al ser extraídos en el proceso minero y pasar a estar en contacto con la atmósfera, el oxígeno y el agua oxidan y disuelven estos minerales; en el proceso se liberan protones que incrementan el grado de acidez del medio (Kirschbaum y Murray, 2011).

Además del proceso físico químico de la interacción con agua y el oxígeno con los minerales, ocurre que en estos medios se ve favorecida la presencia de microorganismos acidófilos como *Leptospirillum*, *Acidithiobacillus* y *Sulfobacillus* (Fig. 2). Se trata de bacterias que obtienen energía fundamentalmente a partir de la oxidación del hierro contenido de los minerales metálicos. Estos microorganismos descomponen los minerales y colaboran con la disminución del pH ya que durante su metabolismo oxidan el hierro contenido en los sulfuros el que luego reacciona con el agua para formar complejos minerales y libera protones disminuyendo el pH y favoreciendo el medio ácido y su medio de vida (Johnson, 2009).



**Figura 2:** Imágenes de microscopio electrónico. a)- Bacterias de *Acidithiobacillus Thiooxidans* sobre grano de pirita b)- Grano de pirita luego de ser atacado en laboratorio durante cinco meses por microorganismos. Gentileza del Dr. Edgardo Donati, Universidad Nacional de La Plata. (Tomado de Kirschbaum y Murray, 2011).

Un ejemplo de lo anteriormente descrito ocurre en el altiplano de la Provincia de Jujuy, Argentina, a una altura de aproximadamente 3600 msnm donde se encuentra la mina Pan de Azúcar. Aquí se extraían minerales para obtener metales como plomo, plata y cinc y dejó de explotarse hace ya más de 20 años. En la actualidad puede observarse la formación de aguas ácidas producto de la interacción de los desechos mineros ricos en pirita con el agua de lluvia y oxígeno atmosférico (Fig. 3a). En un sector de la mina el drenaje ácido se acumula dando lugar a la formación de una laguna cuyas dimensiones varían siendo de mayor tamaño en estación húmeda de verano y disminuyendo en estación seca de invierno producto de filtraciones y evaporación. El pH y la concentración de metales varían estacionalmente con un valor de 2 para estación seca y 3.7 para estación húmeda, los principales metales disueltos son hierro, cinc, cobre, arsénico y plomo, entre otros.

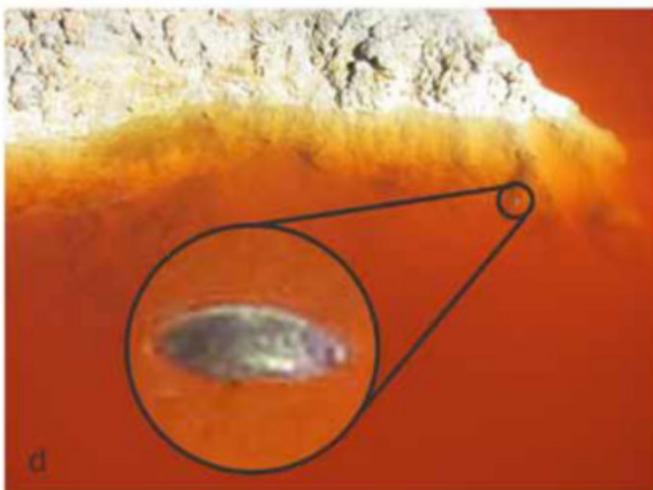
Durante el período 2011 se observó la presencia de macroinvertebrados tanto sobre como por debajo de la superficie del agua de la laguna (Fig. 3b-e). Estos insectos pertenecen a los Órdenes Hemiptera y Coleóptera, vulgarmente conocidos como chinches y escarabajos, respectivamente. Más precisamente se los ubica en las familias Corixidae, posiblemente del género *Sigara* (Hemiptera) y Dytiscidae (Coleóptera). A simple vista, el fondo de la laguna aparece desnudo de toda vegetación y no se observaron otros organismos desarrollándose en él. Sin embargo, un estudio más detallado del agua permitiría determinar la presencia de bacterias que no puedan ser observados a simple vista y que implicaría la posible presencia de otros organismos extremófilos en este sitio en particular. Este lugar, con valores de pH bajos representa tanto un sitio ideal para estudiar organismos extremófilos como para comprender el posible impacto del drenaje ácido en la calidad del agua y del ecosistema. Descubrir nuevas especies en ambientes tan extremos (extremos desde nuestro punto de vista) no sólo conlleva el hecho de la descripción *per se* sino de la posibilidad de descubrir nuevas especies y que puedan ser utilizadas como bioindicadores o para desarrollar estrategias de biorremediación o biominería en el caso de los microorganismos.

Varios estudios han demostrado una fuerte relación entre la acidez del agua y la presencia de macroinvertebrados. Insectos de los órdenes Coleóptera y Hemiptera fueron encontrados también en arroyos ácidos de mina en Pensilvania (EE.UU.) cuyos valores de pH varían entre 3 y 4,7. Los estudios llevados a cabo en estos sitios indican que estos insectos son los más resistentes al estrés producido por el drenaje ácido (Roback and Richardson, 1969). En nuestro país, se describió la presencia de Dípteros quironómidos en aguas con un pH=3 en la cuenca del Río Andalgalá y de algunas especies de coleópteros y hemípteros en el arroyo ácido (pH=4,5) de la mina de oro La Carolina en la Provincia de San Luis que se encuentra fuera de actividad desde hace ya varios años (Grosso et al., 2009; Tripole et al., 2009). A diferencia de las características mencionadas en estos trabajos, la presencia de Coleópteros y Hemípteros en la mina Pan de Azúcar se registra a valores de pH mucho más bajos.

Los macroinvertebrados, que comprenden una amplia variedad de grupos de insectos, tienen gran importancia dentro de la cadena trófica en los ríos y arroyos ya que en general conforman parte del alimento de los peces. Además son indicadores de las condiciones ambientales; su estudio ofrece un diagnóstico a largo plazo acerca del estado ambiental de los ríos y arroyos lo cual no puede ser obtenida únicamente a través de los análisis químicos de la calidad del agua que otorgan un diagnóstico inmediato (Dominguez y Fernández, 1998; Tripole et al., 2009).

La presencia de organismos en aguas ácidas, en este caso del drenaje ácido de la mina Pan de Azúcar, no indica que dicha agua sea apta para consumo o que no perjudique al ambiente. Por las características del medio, bajo pH y elevados niveles de metales disueltos, por encima de los límites para distintos tipos de usos del agua, dichos organismos sólo indican que existen formas de vida que son capaces de soportar condiciones ambientales extremas y que han podido adaptarse o permanecer al menos por un período de varios meses en el agua ácida de la laguna. Surgen así innumerables preguntas en relación a la biología de estos insectos, preguntas que exceden esta nota pero que quedan aún por resolver y que hacen a la gran diversidad de formas que habitan nuestro planeta: 1) ¿son los únicos organismos que habitan esta laguna?; 2) ¿todo el ciclo de vida de estos insectos ocurre en este sitio? o ¿existe algún tipo de migración durante el desarrollo?; 3) ¿qué pasa si la laguna se seca?, ¿poseen alguna resistencia a la sequía además de ser acidófilos y metalo-resistentes? de ser así implicaría un caso muy interesante de organismos poliextremófilos; 4) la literatura indica que ambos insectos son carnívoros, entonces, ¿Existe canibalismo? ¿De qué se alimentan? ¿Cuál es el rol de estos insectos y su posición en la cadena trófica? 5) ¿Acumulan alguno de los metales disueltos en el agua de la laguna?

En síntesis, la presencia de estos organismos en condiciones de bajo pH y alta concentración de metales refleja la capacidad de estos organismos de habitar un sitio con condiciones tan extremas donde la riqueza de especies aparentemente es baja. Por otro lado, innumerables preguntas relacionadas a la biología de estos insectos quedan aún por responder y podrían ser motivo de futuras investigaciones.



**Figura 2:** a) Drenaje ácido de minas,  $\text{pH} = 2.08$ , el color del agua rojizo es característico, se debe a la presencia de hierro disuelto proveniente de los sulfuros de hierro oxidados. b) Insectos del **Orden Hemiptera, Familia Corixidae**, mejor conocidas como chinches o mulitas del agua. Una de las características de estos insectos es su habilidad tanto para caminar sobre la superficie del agua como para nadar. c) Detalle de un individuo. d) Insecto del **Orden Coleoptera, Familia Dytiscidae**, conocidos como escarabajos buceadores, en el agua ácida. e) detalle de un individuo.

---

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Axel Bachmann y a Verónica Manzo por su aporte en el reconocimiento de los insectos y a los revisores por los aportes realizados para la mejora de la nota.

---

## Literatura citada y recomendada

Domínguez, E.; Fernández, H. R. 1998. Calidad de los ríos de la Cuenca del Salí (Tucumán, Argentina) medida por un índice biótico. Serie Conservación de la Naturaleza 12. 40 pp.

Johnson, D.B.; Hallberg, K.B. 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment* 338: 3–14

Johnson, B. 2010. Habitats and characteristics of extremophilic microorganisms. *Géosciences* 11: 72-81.

Johnson, D. B. 2009. Extremophiles: Acidic Environments. *Encyclopedia of Microbiology*. (Moselio Schaechter, Editor), pp. 107-126 Oxford: Elsevier.

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

Monasterio de Gonzo, G.; Martínez, V.; Fernández, L. 2011. Peces de ambientes extremos del Noroeste argentino. *Temas de Biología y Geología del NOA 1: 129–139*.

Oarga, A. 2009. Life in extreme environments. *Revista de Biología e Ciências da Terra* 9: 1-10.

Roback, S. S.; Richardson, J. W. 1969. The Effect of Acid Mine Drainage on Aquatic Insects. *Proceedings of The Academy of Natural Science of Philadelphia* 121: 81-107.

Rothschild, L. 2002. Life in Extreme Environments. *Ad Astra* 14: 32-41.

Salado Paz, N. 2012. Ambientes termales: evidencias de actividad biológica en sistemas termales fósiles (vetas epitermales) y actuales en la laguna Incachule, Puna Salteña. *Temas de Biología y Geología del NOA 2: 54-63*.

Tripole, S.; Vallania, E. A.; Corigliano, M. C. 2008. Benthic macroinvertebrate tolerance to water acidity in the Grande river sub-basin (San Luis, Argentina) *Limnetica* 27: 29-38.

---

## Sitios web recomendados:

<http://www.ciencia.nasa.gov/>

<http://www.hablandodeciencia.com/articulos/2013/02/05/extremofilos-las-verdaderas-cucarachas/>

## Astrobiología:

<https://cab.inta-csic.es/es/inicio>

<http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/annia/astrobio.htm>