

PSICRÒFILS



Escrit per **Mercè Berlanga¹ i Ricard Guerrero²**

¹ Departament de Microbiologia i Parasitologia Sanitàries de la Universitat de Barcelona
² Departament de Microbiologia de la Universitat de Barcelona

En qualsevol lloc on hi hagi les més mínimes condicions per a la vida, hi trobem microorganismes. Els que anomenem ambients extrems (deserts, volcans, guèisers, fonts termals submarines, regions gelades de la Terra), són extrems per als animals i les plantes, però no per als microbis. La vida microbiana és tremendament tenaç. S'ha descrit l'aïllament i cultiu d'un bacteri halotolerant, *Bacillus marismortui*, a partir d'espores trobades en un cristall de sal d'una antiguitat de 250 milions d'anys. Trobem microbis vius i actius en ambients impensables per als humans o per a altres organismes «superiors»: en ambients amb pH molt àcid, o molt alcalí, a concentracions de sals elevades (més de cinc vegades la de l'aigua de mar), a temperatures molt altes o a temperatures molt baixes (en ambdós casos, mentre hi hagi petits microambients amb aigua en estat líquid).

Un nom rar (psicròfils), per a un ambient freqüent (el gel)

Molts excursionistes han vist extenses taques rogenques sobre la neu; són algues pigmentades intensament (*Chlamidomonas nivalis*), que viuen en ambients freds. Les baixes temperatures no representen un obstacle per a la colonització i supervivència microbiana en aquests tipus d'ambients. Els microorganismes adaptats al fred (anomenats psicròfils) tenen una temperatura òptima de creixement de 15°C o inferior,

i no suporten temperatures superiors a 20°C. Els ambients que sempre estan freds són molt abundants a la Terra. La major part de les aigües marines, que cobreix un 70% de la superfície del planeta, té una temperatura de 2,5 a 5°C. Les regions polars, incloent-hi l'Antàrtida, i la part d'Amèrica del Nord i Euràsia dins del cercle polar àrtic, en constitueixen un 20%, i les zones muntanyoses com els Alps, l'Himàlaia, les muntanyes Rocalloses i els Andes, un 5%.

El gel és l'ambient més fred de la Terra, on les temperatures poden variar de 0 a -50°C, o més baixes. La temperatura en què comença la congelació depèn de la salinitat de l'aigua. Aquelles zones on hi ha una important presència d'aigües dolces, com ara les zones polars o el mar Bàltic, la congelació es dona a prop dels 0°C; però l'aigua de mar (salinitat de 35‰) es congela aproximadament a -1,8°C. Si la salinitat d'una aigua és del 100‰, a -6°C; si és del 145‰, a -10°C; i si és del 216‰, a -21°C (!). Quan l'aigua es congela, les sals queden lliures del cristall de gel i formen una matriu en els porus i les esquerdes al seu voltant. Els microorganismes trobats en el gel polar mostren adaptacions no solament al fred, sinó també a elevades concentracions de sals.

Plèthora de vida en un desert congelat

La capacitat dels microorganismes per sobreviure i multiplicar-se en ambients freds és el resultat d'adaptacions moleculars i fisiològiques. Els organismes psicròfils no solament han de fer front a les temperatures baixes, sinó també a possibles fluctuacions de temperatura, a la dessecació o hipersalinitat, a la radiació elevada, a períodes de foscor absoluta o a llargs pe-

ríodes de baixa quantitat de nutrients. Els enzims adaptats al fred presenten un augment de flexibilitat estructural que en redueix l'energia d'activació i n'augmenta l'eficiència catalítica. Les membranes cel·lulars tenen una composició lipídica especial que manté la seva fluïdesa i facilita per tant el transport de substrats. Els organismes psicròfils sintetitzen diferents compostos crioprotectors —com ara exopolisacàrids, proteïnes de xoc fred, o soluts biocompatibles— per contrarestar l'osmolaritat del medi, ja que les baixes temperatures persistents van acompanyades normalment d'una forta reducció de l'activitat de l'aigua (a_w; és a dir, que es produeix una intensa dessecació del medi).

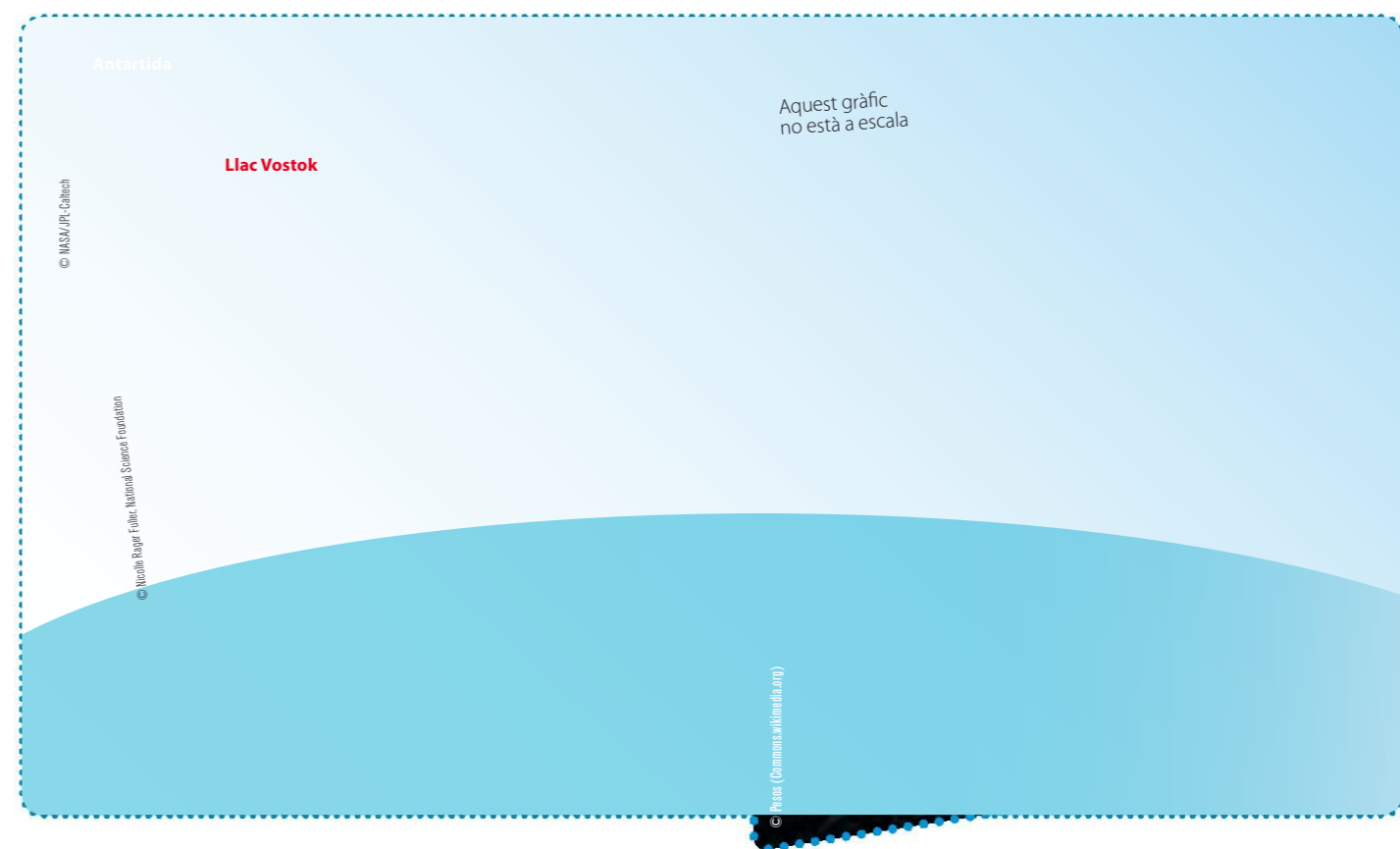
La principal dificultat que presenten les temperatures baixes és la síntesi de proteïnes, ja que, en disminuir la temperatura, hi ha una reducció de l'activitat enzimàtica en la transcripció i traducció, una reducció en els canvis conformacionals de les proteïnes i una disminució de l'estabilitat de l'estructura secundària del DNA i de l'RNA. En els organismes psicròfils, tots aquests enzims i proteïnes estan adaptats per treballar eficaçment a temperatures fredes permanents. L'adaptació dels enzims al fred depèn de la relació que hi hagi entre estabilitat i flexibilitat. Els enzims dels organismes psicròfils augmenten la flexibilitat de la seva estructura per compensar l'efecte de «congelació» en els hàbitats freds. Tot i que l'estructura

cristal·logràfica de les proteïnes dels psicròfils no presenten conformacions especials, en relació amb les conformacions de les proteïnes homòlogues dels mesòfils (que tenen la temperatura òptima de creixement de 30 a 37°C), o termòfils (amb temperatura òptima al voltant dels 55°C, o superior), l'augment de flexibilitat ve donada o bé per una reducció de les unions iòniques, dels ponts d'hidrogen o de les interaccions hidrofòbiques, o bé perquè és més fàcil accedir al centre actiu.

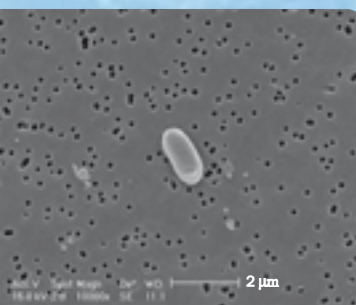
L'exposició sobtada dels organismes mesòfils a canvis de temperatura induïx la sobreexpressió transitòria d'algunes proteïnes (proteïnes de xoc tèrmic i proteïnes de xoc fred) que intervien en diversos processos cel·lulars, com ara la transcripció, la traducció, el plegament correcte de les proteïnes i la regulació de la fluïdesa de la membrana. En els organismes psicròfils, en els quals també s'han observat aquestes proteïnes de xoc tèrmic i xoc fred, les proteïnes de xoc fred s'expressen constitutivament, i no de manera induïda, com en els mesòfils.

S'ha seqüenciat el genoma complet de cinc procariotes psicròfils: tres bacteris (*Desulfotalea psychrophila*, *Colwellia psychrerythraea* i *Pseudoalteromonas haloplanktis*) i dos arqueus (*Methanogenium frigidum* i *Methanococoides burtonii*). Com era d'esperar, s'hi han trobat proteïnes de xoc fred i d'altres que intervien en

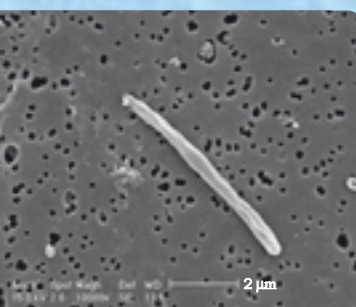
Representació transversal de la zona de mostreig i possible activitat geotèrmica del llac Vostok. Les mostres de gel s'han recollit fins a una fondària de 3.623 m, (aproximadament a 120 m per damunt de la superfície líquida).



VOSTOK 3.593



VOSTOK 3.602



Cèl·lules procariotes aïllades d'un testimoni de gel agafat d'entre 3.593 a 3.602 m de fondària, en la zona d'acreció dinàmica.

la síntesi d'àcids grassos insaturats de les membranes. No obstant això, quan s'intenta trobar adaptacions exclusives al fred comparant proteïnes homòlogues d'organismes psicrofils, mesòfils o termòfils, els resultats són ambigus. Indubtablement, l'estudi comparatiu dels genomes de més espècies psicrofils revelarà altres característiques d'aquests organismes fascinants.

La diversitat filogenètica dels microorganismes psicrofils és molt gran. Per exemple, els trobem entre els bacteris gramnegatius (*Pseudoalteromonas*, *Moraxella*, *Psychrobacter*, *Polaromonas*, *Psychroflexus*, *Polaribacter*, *Moritella*, *Flavobacterium*, etc.), els bacteris grampositius (*Arthrobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus*, etc.), els arqueus (*Methanogenium*, *Methanococcoides* i *Halorubrum*), els llevats (*Candida* i *Cryptococcus*), les floridures (*Penicillium* i *Cladosporium*) i les algues unicel·lulars (*Chloromonas*).

El llac Vostok: un model per a Europa

El llac Vostok es troba en el centre del continent antàrtic, sota l'estació antàrtica russa Vostok (78°S 106°E). Va ser descobert el 1974 mitjançant un sistema de sondeig per radar. Aquest llac és un dels més grans de la Terra, de grandària semblant al llac Ontàrio, a Amèrica del Nord. La superfície del llac Vostok és aproximadament de 14.000 km² (unes quatre vegades de la de Mallorca). S'estima que a l'Antàrtida hi ha uns 145 llacs (és a dir, aigua en estat líquid, a causa de l'enorme pressió) coberts per espesses capes de gel. El llac Vostok està cobert per una capa de gel d'aproximadament 4 km (en l'extrem nord, 4.150 m; en l'extrem sud, 3.750 m), i s'estima que ha estat aïllat de l'atmosfera durant més de 15 milions d'anys, la qual cosa el converteix en un ecosistema «antic» de propietats úniques. Els microorganismes que hi pugui haver en aquest llac (bacteris, arqueus, virus) hauran evolucionat durant milions d'anys de forma independent de la resta de les formes de vida que coneixem, i s'hauran adaptat a les difícils condicions existents en el seu hàbitat: una pressió mitjana de 400 atm, una temperatura d'aproximadament -3°C (a la qual l'aigua no es congela per la pressió existent i per la possible activitat geotèrmica) i foscor absoluta.

S'han recollit mostres de gel de la zona sud del llac fins a una fondària de 3.623 m, (aproximadament a 120 m per damunt de la superfície líquida, atès que la tecnologia actual no permet l'esterilitat del procés i, si s'agafessin mostres de l'aigua del llac, podria contaminar-se amb

microbis de l'exterior). L'anàlisi isotòpica de les mostres de gel (*cores* o testimonis) ha permès identificar tres zones principals de la columna de gel: a) la capa superior de 3.310 m (gel glacera), que correspon al canvi paleoclimàtic de la Terra dels passats 420.000 anys (cobreix les quatre glaciacions del quaternari tardà); b) la capa de gel entre 3.310 i 3.539 m (gel de transició), que presenta alteracions i deformacions de la capa de gel com a conseqüència de moviments de lliscament, de tal manera que no pot servir per a desxifrar el registre climàtic, i c) la capa per sota dels 3.539 m, d'aproximadament 200 m (zona d'acreció dinàmica), on hi ha un equilibri entre els processos de liquació i congelació que es produeixen a la superfície de contacte entre el gel i el llac.

Hi ha vida en el llac Vostok i en altres llacs sota el glaç antàrtic? De moment, no disposem de dades directes de mostres obtingudes de la pròpia aigua del llac. L'única informació d'organismes vius de la zona del llac Vostok prové dels testimonis del gel extrets de la profunda capa de gel que té pel damunt. Aquests testimonis de gel contenen diversos tipus de microorganismes que romanen actius, però que no es multipliquen o bé ho fan molt lentament. Hi ha moltes fotos al microscopi electrònic d'aquests microorganismes i també s'han detectat per mètodes bioquímics. Fins i tot, en una mostra de 3.607 m de profunditat, s'ha detectat, pel mètode de l'rRNA 16S, un betaproteobacteri quimiolitòtrof termòfil (!), *Hydrogenophilus thermoluteolus* (una espècie relacionada amb bacteris de fonts termals, com ara Yellowstone, als Estats Units). Encara que «una oreneta no fa estiu», es pensa que no és un contaminant i que aquest resultat podria corroborar la presència d'activitat geotèrmica en el llac Vostok, semblant a les fonts termals submarines (els *deep sea vents*).

El llac Vostok presenta un nou repte a la microbiologia, atès que pot contenir noves formes de vida amb estratègies adaptatives úniques. Un interès afegit és que les condicions existents en el llac Vostok podrien ser semblants a les existents a Europa (un satèl·lit de Júpiter) i a Encèlade (de Saturn). La confirmació de vida microbiana en el llac Vostok donaria suport a la hipòtesi de l'existència de vida per sota del gel de l'Europa i de l'Encèlade. Actualment es debat la possibilitat d'agafar mostres d'aigua del llac, però abans s'ha de trobar una forma segura de mostreig que eviti la contaminació del llac per organismes exteriors. La comunitat científica ha de preservar

Variable ambiental	Descripció	Exemples
Temperatura		
Psicrofils	Creix bé a ≤ 0°C i la temperatura òptima és ≤ 15°C	<i>Polaromonas vacuolata</i> (T _{min} 0°C), <i>Methanogenium frigidum</i> (T _{min} -17°C)
Psicrotrofs	Poden créixer entre 0-7°C, però la temperatura òptima és 20-30°C, i la màxima ~ 35°C	<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Yersinia enterocolitica</i>
Termòfils	La temperatura òptima és 55-65°C	<i>Geobacter sterothermophilus</i>
Hipertermòfils	La temperatura òptima és ~ 80°C	<i>Pyrolobus fumarii</i> (T _{max} 113°C), <i>Methanopyrus kandleri</i> (T _{max} 110°C)
pH		
Acidòfils	Creixement entre pH 0-5,5	<i>Picrophilus oshimae</i> (pH 0,7)
Alcalòfils	Creixement entre pH 8-12	<i>Natronobacterium gregoryi</i> (pH _{max} 12)
Pressió		
Baròfils	Mínim 500 atm	<i>Moritella yanosii</i> (màx. > 1.000 atm)
Salinitat		
Halòfils	Viu a concentracions de 7 a 15% NaCl	<i>Alivibrio fischeri</i>
Hiperhalòfils	Requereixen elevades concentracions de sal per créixer (de 15 a 30% NaCl)	<i>Halobacterium salinarum</i> (màx. 32% NaCl, saturació)

aquest tresor científic, únic a la Terra. S'ha suggerit de fer els mateixos experiments en altres llacs sota el glaç antàrtic, per comprovar si la tècnica utilitzada és segura i no es produeix contaminació amb microorganismes de la superfície en recollir les mostres d'aigua.

Vida «extrema», aquí..., i més enllà

Els hipertermòfils, els termòfils, els psicrofils, els baroresistents, els radioresistents, etc., són formes de vida que ens demostren els experiments de la naturalesa per provar els límits de la maquinària biològica i la seva capacitat de colonitzar els nínxols més hostils (des del punt de vista dels organismes «superiors»). Amb l'excepció dels organismes homeotermes (mamífers i ocells), que mantenim la temperatura del cos estable independentment de la de l'ambient, la majoria d'animals estan en equilibri tèrmic amb el seu ambient; com també ho estan les plantes, els fongs i els procariotes. Per tant, si la temperatura baixa, el metabolisme es redueix i s'atura, mentre que l'estructura cel·lular dels psicrofils està adaptada al fred i els permet sobreviure i reproduir-se.

El descobriment dels procariotes extremòfils ha ampliat el nostre coneixement dels límits de la vida i ens ha induït a pensar que el tipus de

«vida» que coneixem, també podria haver evolucionat en alguna altre part de l'univers. Actualment existeixen diverses teories sobre l'origen de la vida a la Terra: l'origen calent (model de les fonts termals submarines), l'origen fred (amb organismes primitius com els que hem tractat suara) i l'origen a partir d'un brou ric en matèria orgànica a temperatures moderades (la «sopa» primordial). En qualsevol cas, perquè la vida s'origini i mantingui (tal com la coneixem a la Terra), s'han de donar tres condicions: presència d'aigua en estat líquid, disponibilitat d'elements químics essencials i funcionament d'un sistema redox de donadors i acceptors d'electrons (els quals defineixen el tipus de metabolisme i hàbitat que ocupa un organisme). I si aquestes condicions es donen freqüentment en altres sistemes planetaris, cosa probable, podem pensar que la vida és un fenomen ineluctable, conseqüència de la pròpia evolució de les lleis universals de la física; com pensem que, en diverses ocasions, tal vegada s'esdevingué a la nostra Terra. I

Per saber-ne més...

Cowan, D. A. i Tow, L.A. (2004). «Endangered antarctic environments». *Annu. Rev. Microbiol.*, 58: 649-690.
 Deming, J. W. (2002). «Psychrophiles and polar regions». *Curr. Opin. Microbiol.*, 5: 301-309.
 Price, P.B. (2007). «Microbial life in glacial ice and im-

plications for a cold origin of life». *FEMS Microbiol. Ecol.*, 59: 217-231.
 Staley, J. T. i Gosink, J. (1999). «Poles apart: biodiversity and biogeography of sea ice bacteria». *Annu. Rev. Microbiol.*, 53: 189-215.

Alguns exemples de procariotes extremòfils.

Encèlade

Europa

Les condicions existents en el llac Vostok podrien ser semblants a les trobades en els satèl·lits Europa (Júpiter) i Encèlade (Saturn).