



ACADEMIA DE CIENCIAS
DE LA REGION DE MURCIA

El calentamiento global visto al microscopio

Discurso de ingreso leído por el Académico electo

Ilmo. Sr. D. Mariano J. Gacto Fernández

en el acto de su Sesión Solemne de Toma de Posesión
como Académico de Número,
celebrado el día 6 de mayo de 2008

y

Discurso de contestación del Académico de Número

Ilmo. Sr. D. Juan Carmelo Gómez Fernández

Murcia, 2008

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y ss. del Código Penal).

© Academia de Ciencias de la Región de Murcia, 2008

I.S.B.N.: 978-84-612-3565-0

D.L.: MU-1250-2008

Imprime Compobell S.L., Murcia

Índice

	Pág.
Introducción	7
La grandeza de lo pequeño	10
Las modas en la ciencia	16
El cambio climático: hechos y paradojas	18
La naturaleza del problema	21
El efecto invernadero	24
El CO ₂ y la esperanza de los bio-combustibles	28
Bio-remediación de niveles medioambientales de CO ₂ por microorganismos	30
Formación y degradación de metano por microorganismos	34
El metano y el hombre, los animales... y hasta el arroz	40
Excrementos, ventosidades y eructos: un efecto invernadero insospechado	42
La vida en un mundo caliente	45
Mecanismos microbianos de defensa frente al estrés ambiental	49
Perspectivas de futuro	52
Epílogo	55
Bibliografía	57

*Si la insignificante gota de lluvia abriera su corazón,
contemplaríamos en su interior el fausto de cien mares.
En cada átomo, si miras atentamente,
verás miles de seres que razonan...
Gotas minúsculas tan vastas como las corrientes del Nilo.
En cada grano late un millar de cosechas.
El mundo entero está en el corazón de un grano de maíz...
En ese punto espacial en que giran los cielos.
En ese lugar insignificante dentro del corazón
donde descansa el Amo y Señor de los mundos.
Allí dentro se vislumbran dos mundos convergentes...*

- M. SHABISTARI, sabio del siglo XIV. “En nuestra rosaeda”

...este minúsculo mundo de granos de arena es también el mundo de seres increíblemente diminutos que nadan en la membrana líquida que rodea cada grano como peces en los océanos de la esfera terrestre...viven, mueren, se desplazan, se alimentan, respiran y se reproducen en un mundo tan insignificante que escapa a nuestros sentidos, un mundo en que la gota minúscula de agua que separa un grano de arena de otro semeja un mar vasto y profundo.

- R. CARSON, bióloga del siglo XX. “The edge of the sea”

(Fragmentos extraídos de “Instrucciones para un descenso al infierno”. Doris Lessing, premio Nobel de Literatura 2007. Zeta Bolsillo, Barcelona. 2007)

*“Everything should be made as simple
as possible, but not simpler”*

Albert Einstein

Excmo. Señor Presidente,
Ilma. Sra. y Señores Académicos,
Compañeros y amigos,
Señoras y Señores:

Introducción

En un acto tan grato para mí, como el que nos reúne hoy, resulta obligado comenzar agradeciendo a los señores Académicos el honor con que me han distinguido al recibirme como miembro de número de la Academia de Ciencias de la Región de Murcia. Y lo hago así no sólo para cumplir con una elemental exigencia de cortesía sino desde el sincero convencimiento de que mi ingreso en esta ilustre Corporación se debe más a su generosa benevolencia que a mis méritos. A ella espero corresponder, y desde ahora ofrezco mi esfuerzo para colaborar en aquellos quehaceres que puedan contribuir al cumplimiento de los fines propios de nuestra Academia. Mi agradecimiento en especial al Prof. Gómez Fernández, que tan amablemente ha asumido la contestación a mi discurso.

En esta hora de gratitudes quiero expresar también las que debo a mi familia, a mis maestros, a mis colaboradores y discípulos, y a mis amigos, porque a lo largo de mi peripecia vital y al lado de ellos, yo, que

he pasado más de media vida dando clases, he tenido ocasión de aprender lecciones inestimables.

No es mi propósito retribuir la atención que han tenido conmigo al acompañarme en este acto con un tedioso relato de mi trayectoria científica o de mis logros profesionales, ni con la exposición de algún tema puntual de mi actividad investigadora. Remito a los posibles interesados a la lectura de mis trabajos publicados, a las bases de datos o a los resúmenes curriculares (ver, por ejemplo, [1]). Mi actual dedicación al estudio de la transducción de señales intracelulares en microorganismos eucariotas, como un modelo de análisis similar al de células superiores, me llevaría sin duda a una exposición poco atractiva para los no especializados. Como todos sabemos, nuestras aportaciones a la ciencia (generalmente modestas) no aparecen en los periódicos diarios sino en las revistas científicas de la especialidad, en páginas de difícil digestión intelectual para el gran público en general. Casualmente, además, el mismo tema ha recibido atención especial en un reciente acto de significación similar al presente por parte de un distinguido amigo y colega [2]. Esta circunstancia recorta seriamente cualquier intento de originalidad al exponer los últimos avances sobre mecanismos moleculares de transmisión de señales y su conversión en respuestas celulares. He decidido por ello presentarles un tema científico de actualidad, desde la perspectiva particular de un microbiólogo, intentando destacar el papel de los microorganismos en la producción y en el control de gases con efecto invernadero.

Pero, como homenaje al pasado, me gustaría iniciar esta exposición recordando el primer experimento que realicé en el campo de la Microbiología y que determinó en gran parte mi dedicación a esta ciencia. En el Departamento de Microbiología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca, en una atmósfera inolvidable de trabajo y compañerismo presidida por el Prof. Julio R. Villanueva, trataba de aislar un microorganismo productor de enzimas capaces de hidrolizar celulosa, que constituye el polímero más abundante en la naturaleza. Debía aislarlo prácticamente de la nada, pues lo único que se me suministró fue una placa de Petri vacía, que carecía incluso de medio de cultivo. Sin embargo, se me ocurrió colocar dentro de la placa un trozo de cuerda de esparto (compuesta por fibras de celulosa natural) y la regué cuidadosamente con una solución de nitratos y otras sales minerales. Este preparativo poco ortodoxo provocó el estupor en más de un observador, pero la placa contenía así todos los requisitos nutricionales necesarios para que creciera el microorganismo buscado: una fuente de carbono y energía (la glucosa derivada de la celulosa de la cuerda), una fuente de nitrógeno, y los elementos químicos más comunes. También estaban presentes los microorganismos contaminantes de la cuerda. Por tanto, solo faltaba esperar a que la aplicación en microescala del principio de selección natural hiciera el resto, favoreciendo el crecimiento de candidatos celulolíticos. Y, en efecto, el diseño funcionó. Al cabo de unos días, creció sobre la cuerda un microorganismo con gran potencia celulolítica que fue luego cultivado y aislado en medios microbiológicos convencionales. Lógicamente ningún otro tipo microbiano había podido crecer dentro de la placa, por carecer de una fuente alternativa de carbono y energía asimilable.

La percepción del resultado de aquel simple experimento me indicó que la Microbiología, con ventajas de tiempo y de espacio, permitía comprobar todos los principios y paradigmas importantes en Biología, aunque estuvieran tan separados entre sí como la noción de la selección natural, la existencia de vida anaerobia o la unidad bioquímica fundamental de todos los seres vivos. La Microbiología terminó de fascinarme cuando, más tarde, descubrí que –dejando aparte las actividades indeseables de algunos patógenos– todas las formas superiores de vida en nuestro planeta dependen directa o indirectamente de los microorganismos. Como curiosidad, les diré que ese primer trabajo personal –con aspectos ligeramente modificados– se publicó casi 30 años después de su realización en una revista internacional, lo que evidencia la continua actualidad de algunas estrategias y principios básicos [3].

La grandeza de lo pequeño

Los microorganismos no sólo son bellos por la elegancia de sus formas, de su bioquímica y de su fisiología (Fig. 1). Son también intrínsecamente poderosos. Estas pequeñas gotas de vida, por su tamaño y dispersión, y por la resistencia que ofrecen a las condiciones ambientales más extremas, resultan ser los seres más ubicuos y los que definen los límites mismos de la biosfera. Donde hay vida siempre hay microorganismos. La vida microbiana sería posible sin la existencia de vida no microbiana pero ni plantas ni animales existirían sin microorganismos sobre la Tierra.

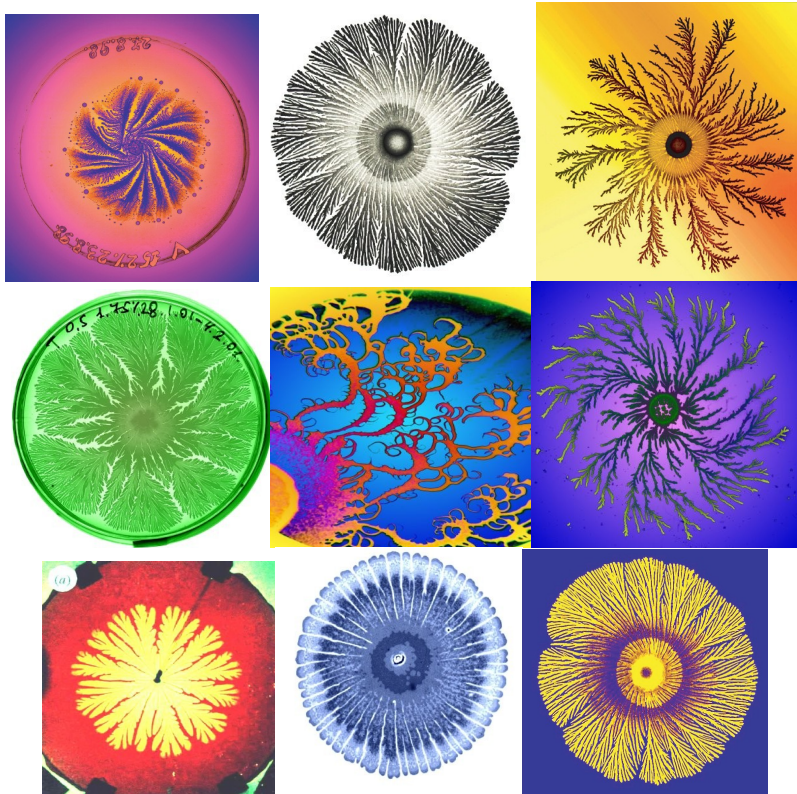


Figura 1- Arte y Ciencia: detalles del crecimiento colonial de bacterias en medios de cultivo sólido (Tomado del Prof. E. Ben-Jacob, Tel-Aviv University, Israel).

La visión popular contempla a los microbios como seres indeseables que sólo causan enfermedades y que ponen en peligro a otros seres vivos (Fig. 2). Tienen mala prensa y representan un caso de relaciones públicas negativas. Sin embargo, una visión más exacta debería incluir el papel beneficioso que los microbios juegan en cada aspecto de la vida. Hace ya más de un siglo que el papel de los microorganismos como soporte de la biosfera fue resaltado por el propio Cajal en su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, al decir “... *Juzgamos pequeño lo que vemos de lejos o no sabemos ver... no obstante,*

si desaparecieran estas humildes criaturas... bien pronto el planeta se tornaría inhabitable..." [4]. Muchos millones de años antes de que otros seres aparecieran en escena, los microorganismos controlaron los equilibrios químicos globales gracias a su variedad metabólica y a su enorme diversidad genética, haciendo posible que nuestro planeta fuera ocupado por formas de vida más complejas y frágiles. Y continúan haciéndolo en la actualidad [5].



Figura 2- Representación popular de bacterias patógenas.

Causan sorpresa las estimaciones realizadas sobre las especies microbianas existentes. Recientes estudios de metagenómica indican que el conjunto con mayor biodiversidad en la biosfera es el microbiano, con un repertorio de genes y de capacidades que exhibe una flexibilidad mayor que la presente en plantas o en animales [6]. Una aproximación conservadora indica, según se puede rastrear por técnicas metagenómicas, que no conocemos con detalle más del 1% de la variedad existente [7]. Pero esta mínima parte que conocemos abre ya expectativas en áreas de aplicación tan innovadoras como el empleo de microorganismos en biosensores detectores de explosivos, de drogas o de metales preciosos [8].

Podrían incluso ser instrumentos que contribuyeran a la reducción del CO₂ o del metano atmosférico mediante el simple principio de su utilización como fuente de carbono [9, 10]. Sin embargo, resulta sorprendente que el estudio y la conservación de esta biodiversidad no despierte preocupación, probablemente porque es algo que no se puede ver a simple vista. Esta situación equivale a que en Química se ignorara la existencia de los átomos, simplemente porque no se ven.

Se considera que en el planeta existen al menos 5×10^{31} células microbianas, con un peso equivalente a 50.000 billones de Tm [11]. Es difícil tener una idea dimensional de lo que los microorganismos representan, pero téngase en cuenta que ser invisible a simple vista no significa estar ausente sino, al contrario, poder estar muy distribuido (Fig. 3, 4). Como ejemplo, un solo gramo de tierra suele contener unos 100 millones de bacterias (cantidad que, por cierto, se presenta también en un gramo de yogurt o en un litro de agua aunque parezca transparente a simple vista) [12,13]. Y un buen suelo agrícola del tamaño de un campo de fútbol alberga normalmente una población microbiana cuyo peso total se aproxima al de una vaca que pastase en ese campo [14].

Otras estimaciones apuntan que los microbios constituyen el 90% de la biomasa total de la biosfera si se excluye del cómputo la celulosa o el 60% si se incluye la masa que corresponde a este polímero natural. Para materializar cuantitativamente la impresionante presencia de los microorganismos, basta añadir que —por extraño que nos pueda parecer— en términos de número total de células, nuestro propio cuerpo contiene más células microbianas que células humanas [11, 15].

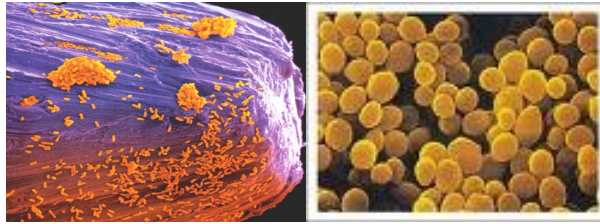


Figura 3 - Bacterias detectadas en la punta de un alfiler.

El grupo biológico que se suele considerar más diversificado es el de los artrópodos, con más de un millón de especies. No obstante, esta idea puede ser susceptible de reconsideración cuando se analiza el concepto clásico de especie desde el punto de vista genético. A un nivel estructural y molecular, el genoma humano es casi idéntico al de un chimpancé [16] y su diferencia porcentual es del orden de la diferencia que existe entre algunas cepas de una misma especie bacteriana. Esto indica que dentro de una misma especie microbiana puede existir una diversidad genética tan amplia como la que separa a especies zoológicas dispares. Otro ejemplo similar indica que las levaduras que se dividen por gemación están filogenéticamente tan apartadas de las que se dividen por fisión, como cada una de ellas lo está respecto al hombre, lo que ilustra el amplísimo margen genético existente entre lo que se consideran especies microbianas clásicas [17]. No es por tanto extraño que en esta enorme biodiversidad microbiana podamos encontrar soluciones biotecnológicas a muchos problemas.

El papel de lo pequeño, a veces tan desconocido, es el tema que he elegido para desarrollar mi discurso de incorporación a esta Academia. En apariencia, el calentamiento global y los microorganismos no parecen asuntos relacionados, pero están unidos por el mismo vínculo invisible que caracteriza a muchas de las acciones microbianas. En ocasiones como ésta,

la expresión “*lo esencial es invisible a los ojos*” es algo más que una mera frase literaria [18].

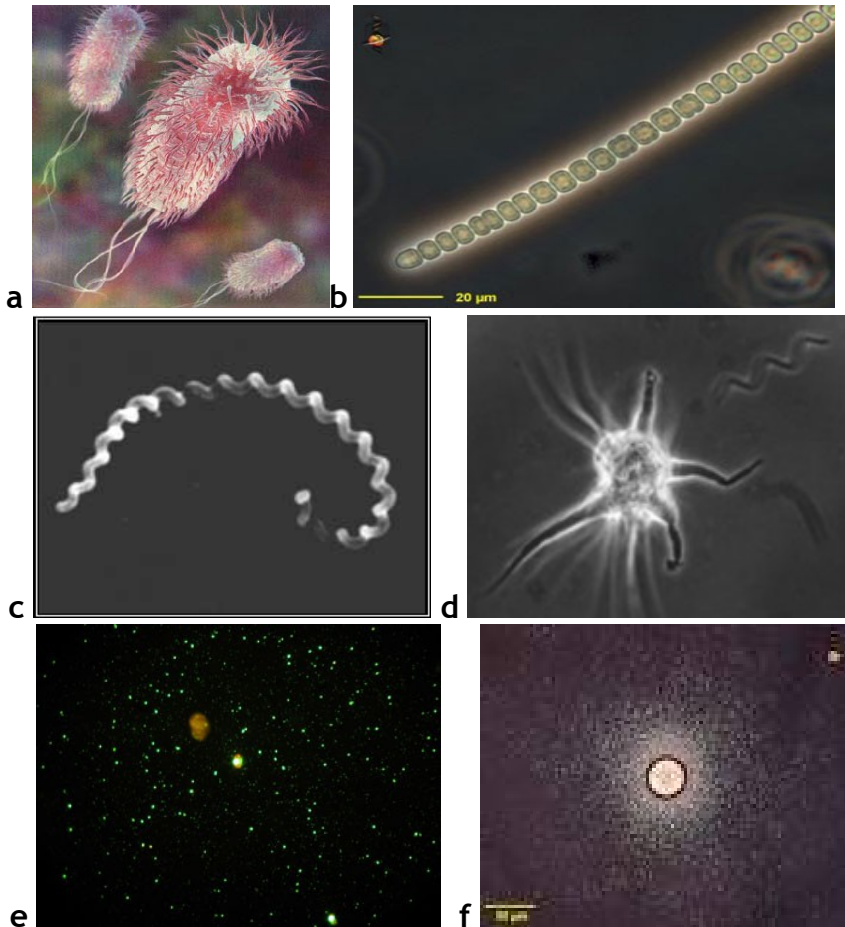


Figura 4 - Un mundo invisible a nuestro alrededor: a) Bacterias desplazándose con flagelos en un medio líquido; b) Una elegante cianobacteria pluricelular; c) Una espiroqueta típica; d) Bacteria prostecada semejante a una estrella de mar. ¿Microbiología o Astronomía?; e) Bacterias de una gota de agua marina, como estrellas en un cielo nocturno; f) Agrupación de bacterias aerobias alrededor de una burbuja de aire, formando un sol imaginario.

Las modas en la ciencia

Para el desaparecido Erwin Chargaff, un científico es un profano fuera de su estrecho campo de especialización y, en su opinión, lo que compartimos los miembros de una Academia de Ciencias como ésta es, de algún modo, una relación que favorece un tipo de parasitismo intelectual, por depender en algunos temas de lo que dicen otros [19]. Según este mismo científico (autor de las reglas que llevan su nombre, y que fueron decisivas para establecer la estructura del DNA), la ciencia biológica, como toda actividad humana, está sujeta a modas que en ocasiones duran poco más que las modas femeninas [20]. Estas *fashions of science* se perciben periódicamente por el impacto que determinados temas generan en la opinión pública y por el dinero que se dedica a la investigación en asuntos relacionados con ellos.

En el curso académico 96-97, tuve ocasión de pronunciar la lección de apertura de curso de la Universidad de Murcia, y abordé en ella un problema de inquietante actualidad por aquel tiempo [21]. La conciencia pública despertaba entonces a la existencia de los priones causantes de las encefalopatías espongiformes. Como toda moda científica, la “enfermedad de las vacas locas” acaparó por un tiempo la atención pública, generó pavorosas visiones del futuro más cercano y terminó desvaneciéndose poco después en el vacío del olvido. Los anuncios de sombríos presagios, que invitaban incluso a revolucionar nuestras costumbres gastronómicas, inundaron por un tiempo los medios de comunicación, pero pronto el mercado periodístico se saturó de este tipo de vaticinios, y la existencia de los agentes neurodegenerativos volvió a evaporarse. Hasta el punto de que, meses más tarde, ya no se encontraba sobre ellos noticia alguna. Al

poco tiempo, una nueva moda biológica ocupó su lugar y hemos visto cómo —con el genoma humano, la clonación y las células madre como telón de fondo— el virus SARS que causa el síndrome agudo respiratorio severo, y el de la gripe aviar, han seguido una trayectoria similar en el escaparate público.

El cambio climático es probablemente otra *fashion of science*, aunque es posible que esta moda sea algo más duradera debido a que su contenido multidisciplinar admite cierta carga ideológica como acompañamiento adicional (Fig. 5). Pocas veces la ciencia ha ocupado tantas portadas y concedido protagonismo a tantos y tan variopintos personajes. Los medios periodísticos, fieles a la máxima de no permitir que la realidad estropee una buena historia, se han volcado otra vez en un asunto que para el ciudadano de a pie —y en muchos casos, para los mismos periodistas— resulta tan amplio como desconocido. Los resultados no dejan de ser irónicos. Muchos activistas anti-americanos y anti-globalización se han convertido en seguidores del americano Al Gore, galardonado largamente por una profética campaña ambientalista cuyos principios proclama con estupendos honorarios. Pero este agorero catastrofista, que ahora abraza el activismo ecologista con la vehemencia de un neófito, es el mismo que no quiso apoyar el protocolo de Kioto cuando era vicepresidente de su país. Quizás la mayor contradicción de su discurso no radique en los errores científicos que contiene su afamado documental *An inconvenient truth (Una verdad incómoda)* [22], sino en su propio estilo de vida. Además del llamativo consumo eléctrico personal, su jet privado emitió 20 toneladas de CO₂ en tan solo una semana de gira por España [23], lo que supone que si el calentamiento global fuera debido sólo

a la mano del hombre, la suya habría contribuido con prodigiosa eficacia a aumentar la temperatura que dice combatir. Un documental crítico con la ominosa visión de este personaje, "*La gran estafa del calentamiento global*", elaborado por el Channel Four británico [24], fue emitido en España por Telemadrid, pero silenciado en otros foros como políticamente incorrecto por inquisidores y catequistas de la doctrina del cambio climático.

El cambio climático: hechos y paradojas

De pocas cosas podemos estar tan seguros como de que el clima cambia: lo ha hecho desde antiguo y probablemente lo seguirá haciendo. Ahora la atmósfera de la Tierra se está calentando, y esto puede representar una grave crisis debida al efecto invernadero que producen los gases emitidos por las actividades humanas. Pero hay opiniones para todos los gustos, y para algunos no está tan claro que los hombres tengan mucho que ver en ello, ni en el pasado ni el presente. Hay quien supone que el calentamiento podría estar causado por cambios en el sol, en las corrientes oceánicas, o en factores no determinados. Incluso un reciente artículo aparecido en la prestigiosa revista estadounidense *Proceedings of the National Academy of Sciences* analiza el impacto del divorcio en el cambio ambiental y establece también una relación positiva [25].

Si el hombre fuera el único determinante del calentamiento global y del cambio climático, cabe preguntarse por qué el Ártico tuvo un período cálido a comienzos del siglo pasado o el motivo por el que en los años 20 las temperaturas aumentaron en Groenlandia más rápidamente que en la actualidad [26]. Además, hace cosa de 65 millones de años, la Tierra

experimentó —sin el hombre— uno de los cambios climáticos más veloces y extremos que se conocen: el período del “máximo térmico del Paleoceno-Eoceno” [22,28]. Entonces, las aguas oceánicas eran 20°C más cálidas que hoy, la Antártida albergaba bosques templados de hayedos y helechos, y no había casquetes polares permanentes. Los medios de comunicación y los ecologistas rara vez se plantean preguntas de este tipo y el tema es fácilmente manipulable al servicio de corrientes tan diversas como interesadas. Una escena del documental patrocinado por Al Gore presenta unos niveles crecientes de dióxido de carbono que relaciona directamente con la temperatura, pero olvida decir que tales incrementos surgieron después de que las temperaturas aumentaran, y no antes.



Figura 5 -¡De acuerdo! Creo que la humanidad causa el calentamiento global...
-Muy bien...devuelve a este hereje los fondos de investigación.

Por otra parte, no todos los miembros del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) comparten todas las conclusiones, y de hecho hay importantes discrepancias entre ellos [29-32]. En *Una verdad incómoda*, Gore dice que "los niveles del mar en todo el mundo podrían subir hasta 6 o 7 metros". Basándose en esta predicción de fácil asimilación, todos pudimos contemplar la interpretación artística de esta profecía mediante imágenes fotográficas impactantes que aparecieron en la primera página de muchos diarios nacionales e internacionales. Pero el grupo con el que Gore compartió el Premio Nobel, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, afirma que dentro de un centenar de años, los océanos podrían subir de nivel un máximo de 59 centímetros. Gore habla también de osos polares que se ahogan. Pero la World Conservation Union y el U.S. Geological Survey afirman que la mayor parte de las poblaciones de osos polares permanecen estables o están creciendo [33,34].

El Tribunal Superior de Londres ha puesto reparos a la presentación del citado documental en las escuelas del Reino Unido por incurrir en al menos nueve errores importantes y lo ha declarado claramente alarmista, contrario al consenso científico y carente de análisis imparcial, calificándolo de visión apocalíptica y de toma política de partido.

Gran parte de esta realidad no llega a los periódicos. Sin embargo, no se puede negar que los gases de efecto invernadero emitidos por las actividades humanas están aumentando, y es aconsejable prever su potencial influencia en el futuro de la humanidad. La ciencia es dinámica y lo que permite el avance del conocimiento no son los dogmas o verdades absolutas sino la discusión y el debate.

Estos principios no siempre aparecen cuando se habla del calentamiento global, una revelación angustiada que cimienta una nueva religión existencial para unos y, para otros, un negocio nutrido de sensacionalismo. Como ejemplo de referencia alternativa, John Coleman, un escéptico del calentamiento global, considera que el revuelo provocado por el tema constituye "el mayor fraude de la historia". Este meteorólogo, fundador del *Weather Channel*, afirma con rotundidad que "los fundamentalistas medioambientales, entre ellos políticos destacados, se inventan este escenario 'científico' apocalíptico de la civilización, y amenazan con consecuencias medioambientales de Calentamiento Global para que suscribamos su agenda radical... He leído docenas de artículos científicos. He hablado con numerosos científicos. No hay cambio climático drástico. El impacto de los seres humanos sobre el clima no es catastrófico. Nuestro planeta no corre peligro... En cuestión de una década o dos, el indignante timo será evidente por sí mismo" [35].

El caso es que en torno a esta cuestión se prodigan afirmaciones que son sólo incertidumbres, los errores científicos pueden convertirse en aciertos políticos y las aproximaciones simplistas en axiomas ecológicamente correctos. En cambio, los planteamientos científicamente válidos no suelen llegar al ciudadano medio, incapaz de analizar el panorama con cierta perspectiva y de conocer algunos aspectos que suelen resultar encubiertos.

La naturaleza del problema

Cuando el hombre aprendió a utilizar el fuego, inició la imparable carrera de contaminar el ambiente a un nivel global, pero sólo

recientemente ha empezado a darse cuenta de su participación en las alteraciones del medio que le rodea a través de sus actividades. Aunque la preocupación por estos asuntos forma ya parte del paisaje cultural de nuestra sociedad, tal concienciación no significa información, pues una característica evidente de la sociedad actual es la de ser científicamente analfabeta en muchos aspectos. Sus confusas y poco contrastadas fuentes de conocimiento no permiten interpretar correctamente algunos temas importantes, en particular cuando, como en el caso que abordamos, la cuestión está sometida a debate y a controversia. Lejos de clarificar aspectos esenciales del problema, el fanatismo de algunos colectivos –incluidos ciertos ecologistas y sectores de la prensa– acepta por inercia interpretaciones que abonan con tenacidad posiciones claramente demagógicas, como abolir o limitar algunos avances tecnológicos que hicieron viable el significativo progreso humano de los últimos siglos. Con referencia a un pasado reciente, previo a la era del automóvil, la situación de nuestro hábitat quedó gráficamente descrita en palabras el premio Nobel de Economía Robert Fogel en los siguientes términos: "*A principios del siglo XX había en la ciudad de Nueva York 200.000 caballos, que defecaban en cualquier parte. Con el aire respirabas partículas de estiércol*". Debido a dicha contaminación, que afectaba tanto al aire como al agua, la población contraía enfermedades mortales como el cólera y las fiebres tifoideas [35]. Un panorama que no recuerda, precisamente, el retorno al bucólico Edén, porque este pretendido paraíso perdido va pareciendo cada vez más al infierno a medida que retrocedemos en el tiempo.

Aun cuando algunas posturas del ecologismo radical –el del griterío, pancarta y pegatina– enfocan puntos objetivos de mejora, no presentan casi nunca toda la verdad. El empleo racional de la energía nuclear, por

ejemplo, que en muchos aspectos resultaría ambientalmente más limpio, podría ilustrar esta situación. Esta propuesta es la defendida por muchos biólogos para estabilizar con garantía el calentamiento global, entre ellos James Lovelock, el creador de la teoría de Gaia (nombre griego para la diosa Tierra) que concibe la biosfera como un único organismo [36].

En definitiva, admitiendo como hecho objetivo que la Tierra está experimentando un lento aumento térmico, la cuestión clave consiste, primero, en determinar si este progresivo incremento tiene un origen exclusivamente antropogénico y, segundo, si demostrada la causa, es posible plantear soluciones.



Figura 6 -¡Paremos el calentamiento global!
-Deberíamos ajustar nuestra agenda.

El efecto invernadero

Fundamentalmente, los gases con efecto invernadero en la atmósfera son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), y los óxidos de nitrógeno (NO_x) junto a otros gases de origen industrial. Estos gases controlan el flujo de energía solar en la atmósfera al absorber la radiación infrarroja de rebote emitida por la Tierra. Actúan como una especie de cubierta para mantener en la superficie terrestre una temperatura superior a la que habría si la atmósfera contuviera sólo oxígeno y nitrógeno, los dos constituyentes naturales mayoritarios.

Se considera erróneamente que el nivel de contaminantes con efecto invernadero se debe exclusivamente a la acción humana. Sin embargo, el estudio del papel de los microorganismos en la aparición y desaparición de estos gases conduce a la insólita y sorprendente conclusión de que los microbios son unos eficaces y silenciosos participantes tanto del efecto invernadero como de su control, y con una influencia aún mayor que la del propio hombre. Esta acción ocurre en un nivel dimensional que es de capital importancia para el equilibrio entre formas oxidadas y reducidas del ciclo del carbono y del nitrógeno y, por tanto, para establecer los niveles globales de los gases de forma natural en la atmósfera terrestre. Ciertamente, esta afirmación puede resultar a primera vista exagerada, pero el análisis detallado de la cuestión no plantea dudas.

Aunque los principales gases que causan este efecto son cuantitativamente residuales y constituyen menos del 1% de la atmósfera, sus niveles pueden desarrollar una enorme influencia. Su concentración viene determinada por un equilibrio entre los procesos que los generan y

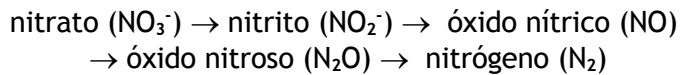
los que los consumen. Durante millones de años la mayoría de ellos (excepto los gases fluorados y otros) ha estado presente de forma estable en la atmósfera, pero los seres humanos pueden afectar ahora sus niveles actuales al introducir nuevas fuentes de producción o interferir con sus sumideros naturales. Estos últimos constituyen reservorios terrestres y oceánicos de Carbono que actúan como amortiguadores y que protegen de los efectos de las emisiones humanas.

El CO_2 es actualmente el responsable de gran parte del efecto invernadero. Su presencia en la atmósfera es natural, pero el empleo de carbón, del petróleo y del gas natural (metano) está liberando, en forma de CO_2 , el carbono almacenado en estos “combustibles fósiles” a una velocidad sin precedentes. A la vez, la deforestación libera el carbono almacenado en los árboles y, además, disminuye la fijación vegetal del CO_2 por fotosíntesis, limitando su desaparición. Las emisiones anuales de este gas ascienden en la actualidad a casi el 1% de su masa total en la atmósfera. Pero un aspecto poco conocido es que tanto la fijación microbiana del CO_2 por microorganismos autótrofos y fotosintéticos (además de la fijación vegetal), como su producción mediante respiración por organismos heterótrofos, son factores importantes a tener en cuenta para equilibrar los niveles atmosféricos de CO_2 .

El metano es también un gas con efecto invernadero [37]. Contribuye actualmente a casi la cuarta parte del efecto y, aunque su rápido aumento en la atmósfera es más reciente, ha ido adquiriendo una notable importancia. El metano tiene una vida media efectiva de 12 años en la atmósfera, mientras que el período de persistencia del CO_2 es de

unos 100 años. No obstante, el metano puede descomponerse para producir CO_2 a través de la oxidación lenta realizada por los microorganismos, que obtienen así energía para su crecimiento, o mediante la oxidación rápida realizada por el hombre (combustión del gas natural). Además, pese a su menor duración en la atmósfera, su capacidad de absorber calor es 24 veces mayor que la del CO_2 . Hay que resaltar de nuevo que, como en el caso del CO_2 , la formación y la degradación de este gas también está controlada en la biosfera por acción de microorganismos: lo producen numerosos géneros de metanógenos anaerobios (ej., *Methanobacterium*) y lo consumen diversos metilótrofos y metanotrofos aerobios (ej., *Methylosinus*).

Tanto el óxido nítrico (NO) como el óxido nitroso (N_2O) tienen también un potente efecto invernadero. El N_2O es más activo que el CO_2 en el calentamiento global de la atmósfera, por lo que se considera uno de los gases más perjudiciales. Por otra parte, ambos destruyen la capa de ozono de la estratosfera que nos protege de la luz ultravioleta. El NO también se puede convertir químicamente en NO_2^- que, a su vez, puede hidratarse para formar HNO_2 y HNO_3 y caer a la tierra como “lluvia ácida”. En este contexto, el fenómeno microbiano de la desnitrificación tiene asimismo un enorme interés medioambiental porque ocurre con producción de NO y de N_2O . En ausencia de oxígeno, hay microorganismos anaerobios facultativos —los quimioheterótrofos desnitrificantes del tipo de *Paracoccus*— que realizan este proceso en la naturaleza utilizando nitratos o sus derivados como aceptores finales de electrones para su reducción hasta N_2 en una cadena respiratoria. En este proceso, el nitrógeno libre vuelve de nuevo a la atmósfera, de acuerdo con la siguiente secuencia de reacciones:



Los aspectos fisiológicos, bioquímicos y genéticos de la desnitrificación bacteriana son conocidos con detalle [38, 39]. Se lleva a cabo por la actuación secuencial de los enzimas respiratorios nitrato reductasa (Nar/Nap), y nitrito reductasa (NirK/NirS), óxido nítrico reductasa (cNor/qNor) y óxido nitroso reductasa (Nos), codificados por los genes *nar/nap*, *nir*, *nor* y *nos*, respectivamente. Como en otros mecanismos respiratorios, la reducción de los óxidos de N está acoplada a la formación de ATP, lo que permite a las células crecer en ausencia de oxígeno.

Los nitratos y nitritos que emplean los microorganismos desnitrificantes se originan alternativamente por la acción geoquímica nitrificante de otros microorganismos, los quimiolitótrofos aerobios, a partir de sales amoniacales, cerrando así el ciclo del N en conjunción con los quimiheterótrofos anaerobios [40]. En consecuencia, los óxidos de nitrógeno en la biosfera están también bajo control microbiano: los generan a partir de nitratos y nitritos, y los pueden transformar en nitrógeno.

Por cuestiones de tiempo y espacio, nos limitaremos a considerar solamente algunos detalles sobre la implicación de los microorganismos en la formación y desaparición de los dos gases contaminantes mayoritarios, el CO₂ y el metano. No obstante, hay que resaltar que los microorganismos también pueden influenciar los niveles de otros gases contaminantes, e incluso determinar el tiempo atmosférico sin intervención del efecto invernadero. Por ejemplo, algunos fotótrofos de ambientes marinos

producen dimetil-sulfóxido (DMS), un compuesto volátil que escapa a la atmósfera, donde es fotooxidado a sulfato y actúa como un agente nucleador del agua favoreciendo la formación de nubes. Estas nubes oscurecen los océanos regulando negativamente la producción de más DMS, favorecen la formación de lluvia y, finalmente, reflejan la radiación solar incidente moderando así el calentamiento [13].

El CO₂ y la esperanza de los bio-combustibles

Todos los elementos de la biosfera acaban muriendo, y el resultado final de la cadena de sucesos que conduce a su completa descomposición es la respiración heterotrófica. Una pequeña fracción escapa a este ciclo y se convierte en combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo. Su utilización (oxidación) produce —como la respiración misma— gases contaminantes, el CO₂ entre otros. La obtención de bio-combustibles, como sustitutos directos de los combustibles fósiles, está ganando popularidad en la idea de que pueden reducir en parte las emisiones de CO₂. Pero esta alternativa es engañosa porque algunos bio-combustibles, como el etanol de la caña de azúcar o del maíz, producen emisiones netas de CO₂ equivalentes a las de los combustibles fósiles, de manera que no son neutros en términos de contaminación [41]. Además, un aumento masivo en la producción de bio-combustibles implica que se realice a expensas de la vegetación, que es un sumidero natural de CO₂.

Esta estrategia esconde también costes ocultos porque requiere la energía de combustibles fósiles para el crecimiento y la recolección de los cultivos y para el mismo proceso de bio-conversión de los azúcares a

etanol. Por otra parte, el etanol tiene sólo el 65% del contenido energético de las gasolinas. A este respecto, se han realizado estudios muy ilustrativos [42].

En el Reino Unido, por ejemplo, donde pese a su menor rendimiento el trigo podría ser una fuente de etanol alternativa a la caña de azúcar, hay registrados 26 millones de automóviles que, como media, se desplazan unos 15.000 km al año. Si para rebajar las emisiones de CO₂ se emplearan gasolinas con 22% de etanol (lo que supondría un consumo medio de un litro por cada 9 km), cada conductor necesitaría al año 0,67 Ha de trigales, puesto que cada Ha sembrada de trigo puede producir alrededor de 0,43 Tm de etanol. Esto supondría ocupar el 75% del área del Reino Unido para que todos los conductores británicos pudieran recorrer la distancia media anual. Es decir, con la tecnología actual, incluso sin sustituir por completo las gasolinas, la producción de bio-combustibles no supone una solución práctica para reducir las emisiones de CO₂.

El 4% del suelo de Brasil se emplea ya en la producción de caña de azúcar para su conversión a etanol. Su huella reparadora en el efecto invernadero es, sin embargo, insignificante. Algunas modificaciones locales del ciclo del carbono, del tipo de aumentar cultivos para la obtención de bio-combustibles, pueden mitigar emisiones puntuales de CO₂, pero su uso generalizado para reducir el impacto del nivel global de CO₂ no parece adecuado. Tal vez la única respuesta real para ejercer tal reducción radique en poder cambiar a sistemas energéticos no basados en el carbono, sino en el hidrógeno [42].

Bio-remediación de niveles medioambientales de CO₂ por microorganismos

Otra alternativa es la bio-remediación. La bio-remediación utiliza sistemas biológicos para producir cambios moleculares en los contaminantes, de modo que se generan compuestos de menor o ningún impacto ambiental. Estas conversiones pueden ocurrir espontáneamente en la naturaleza, pero la manipulación de tales sistemas permite acelerar y optimizar la velocidad natural del cambio. El diseño de cepas bacterianas autótrofas con fondos genéticos modificados podría conducir a sistemas metabólicos mejorados y con eficacia aumentada para la fijación de CO₂.

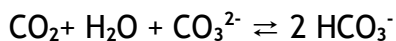
Hay objetivos naturalistas que, además de proteger la biodiversidad, son muy llamativos desde el punto de vista estético y paisajístico. Por ejemplo, mantener intacta la vegetación de los bosques tropicales es un anhelo ecológico que resulta biológicamente encomiable. Pero la defensa de este tipo de propuestas con argumentos terminales esconde a veces la ignorancia de que, en conjunto, la fijación autotrófica de CO₂ en los suelos y en las aguas continentales y oceánicas, por algas eucarióticas y cianobacterias, es mayor que la de todos los exuberantes bosques tropicales [42]. No obstante, ningún grupo ecologista reclama el cuidado y mantenimiento de los tipos autotróficos microbianos, ni protesta por las agresiones contra esta porción de biosfera con la misma vehemencia con la que defiende los bosques o las macro-especies protegidas.

La principal fuente de CO₂ liberado a la atmósfera por el hombre deriva del carbono fósil fijado en tiempos prehistóricos por la fotosíntesis vegetal y bacteriana y, en menor medida, por la fijación de otros

autótrofos. El CO₂ liberado de tales combustibles fósiles, además de gas con efecto invernadero, es de nuevo un sustrato para la fijación autótrofa de la fotosíntesis, no sólo vegetal sino bacteriana, y este mecanismo a nivel global puede fijar más CO₂ que el producido por las actividades humanas [42].

La suma de la fijación de CO₂ mediante fotosíntesis vegetal y bacteriana más la fijación autótrofa microbiana no fotosintética (menos el CO₂ emitido durante la respiración auto y heterótrofa) representa la “producción primaria neta” que proporciona fuente de energía y sustratos básicos a prácticamente todas las cadenas alimenticias de la Tierra. Solamente la producción neta del Océano Pacífico equivale a la de todos los bosques tropicales, y lo mismo ocurre con la registrada conjuntamente en el Atlántico y el Índico [38]. Convenientemente tratados, estos sumideros –de naturaleza fundamentalmente microbiana– pueden por tanto proteger de los efectos nocivos de las emisiones humanas de CO₂, aunque hasta un límite que el informe del Grupo de Trabajo II del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) ha resaltado recientemente [43].

El intercambio químico del CO₂ con el agua y la formación de bicarbonatos ocurre según la reacción:



Un aumento en la concentración de CO₂ atmosférico incrementa por tanto la concentración de CO₂ disuelto, pero el aumento de temperatura reduce su solubilidad, lo que conduce a un descenso de iones carbonato y

por tanto del pH, originando una disminución final de la producción primaria neta y, en consecuencia, de la eficacia del sumidero [42]. Esta acidificación de las aguas podría llegar a ser el factor más crítico para la acción microbiana de bio-remediación climática [44].

Los versátiles microorganismos tienen muchos más recursos para fijar el CO₂ que las plantas fotosintéticas [45]. El ciclo de Calvin o ciclo reductor de las pentosas-fosfato es el mecanismo más extendido entre los autótrofos microbianos, y es la estrategia que posteriormente copiaron las plantas durante la evolución, pero no es el único mecanismo entre los procariotas. Existen otras dos vías adicionales importantes: el ciclo de Krebs inverso, que fija dos moléculas de CO₂ en vez de liberarlas (como ocurre en el caso de *Chlorobium*), y la ruta cíclica del hidroxipropionato (que opera en fotoautótrofos del tipo de *Chloroflexus*). La existencia de un cuarto mecanismo de fijación de CO₂, la vía del acetyl-CoA, que utiliza H₂ para reducir el CO₂, y que se presenta en bacterias como *Desulfobacterium*, *Clostridium* y en varias arqueas, ejemplifica que la selección natural ha desarrollado múltiples caminos para lograr de modo redundante un mismo fin: poder reducir la concentración de CO₂ (Fig. 7).

Tener en cuenta todo esto debe alterar nuestra visión convencional de la contaminación atmosférica por CO₂. Los procesos microbianos que he descrito incluyen reacciones bioquímicas que parecen casi esotéricas, pero que ocurren a escala muy amplia y que son esenciales en los ciclos de la materia carbonada. Sin esta extraña bioquímica microbiana, la vida no podría mantenerse en la Tierra, y potenciar su actividad supone una garantía real de solución al problema de la contaminación por CO₂. Parece evidente que los ecologistas (y algunos ecólogos y ambientalistas) no

apuntan del todo bien a la diana con sus armas. No sólo no defienden a estos obreros invisibles de la naturaleza, sino que desconocen incluso su misma existencia. No se puede defender lo que no se ama y no se puede amar lo que no se conoce.

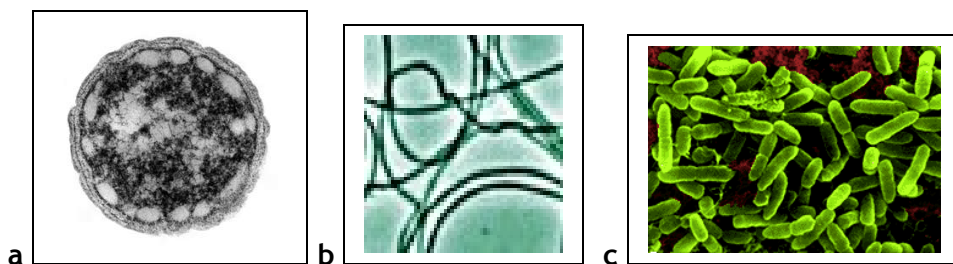


Figura 7- Tres microorganismos con rutas originales para fijar CO₂: a) *Chlorobium tepidum*; b) *Chloroflexus aurantiacus*; c) *Desulfobacterium* sp.

El enzima clave del ciclo de Calvin, la ribulosa-bisfosfato-carboxilasa, es el enzima más abundante en la naturaleza y el responsable de casi toda la producción primaria del planeta. Pese a su papel central, es relativamente ineficaz a nivel molecular, porque tiene un bajo número de cambio y cierta dificultad para distinguir entre el CO₂ y el O₂. Presenta 100 veces mas afinidad por el CO₂ que por el O₂ pero, como en la atmósfera terrestre la concentración del segundo es normalmente superior, se fija una molécula de O₂ por cada tres de CO₂, produciendo un metabolito tóxico (el fosfoglicolato) que debe ser eliminado. La aplicación de principios de ingeniería genética para ampliar y mejorar la fijación de CO₂ ayudaría a luchar contra la contaminación por este gas mediante un método natural y silencioso, que es una de las características de la acción microbiana. Sirva esta simple consideración como propuesta para una verdadera defensa ecológica de la biosfera.

Por otra parte, el aumento en la concentración atmosférica de CO₂ no es siempre necesariamente perjudicial y puede ocasionar cambios en el clima difíciles de predecir con los modelos que actualmente se manejan. Una “verdad incómoda” para el ecologismo radical, es que tales concentraciones favorecen el crecimiento vegetal [46]. El que los aumentos de CO₂ sean beneficiosos para la productividad de los organismos autótrofos se explica por las propiedades de afinidad antes comentadas de la ribulosa-bisfosfato-carboxilasa. Hay, además, evidencias de que el enriquecimiento en CO₂ puede rebajar el efecto de otros gases polucionantes [47].

Formación y degradación de metano por microorganismos

La especialización metabólica de los microorganismos resulta sorprendente. Hay otros que generan metano como producto final de reacciones que llevan a cabo para obtener energía (y por eso se llaman metanógenos) (Fig. 8). Esto es algo más que una mera curiosidad carente de relevancia cuali o cuantitativa, pues son los productores en la naturaleza del llamado gas natural, gas de los pantanos o el peligroso grisú de la minería. Cada año, los microorganismos de nuestro planeta producen aproximadamente 1000 millones de toneladas de metano, lo que parece superar los cálculos más imaginativos porque esa cantidad equivale al metano extraído por la industria del gas natural [48]. Los metanógenos, junto a las halobacterias y a los microorganismos termófilos sulforreductores, forman el grupo de las arqueas (filum Archaea), cuya estructura y fisiología es muy diferente a la de las bacterias ordinarias.

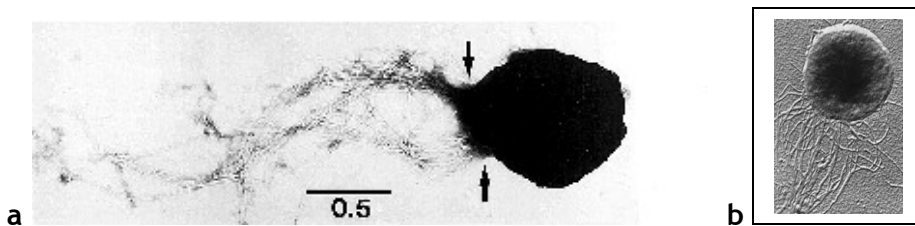


Figura 8 - Dos microorganismos metanogénicos representativos:
a) *Methanococcus jannaschii*; b) *Methanopyrus kandleri*.

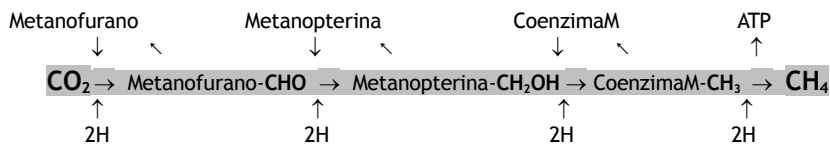
Los microorganismos con esta capacidad están ecológicamente muy diversificados y habitan muchos ambientes extremos y anaerobios, que muestran condiciones semejantes a la Tierra primitiva, cuando el oxígeno era escaso. Por ejemplo, las burbujas que aparecen en lagos, playas y estanques poco oxigenados son acumulaciones de metano producido por los metanógenos presentes en los lodos anaerobios de los fondos ricos en compuestos orgánicos. Esto se puede comprobar mediante un sistema ingenioso: basta remover dichos fangos y recolectar el gas liberado de las burbujas mediante un embudo invertido, colocado sobre la vertical, y en cuyo extremo se encaja un globo (o un tubo flexible pinzado) que sirva como cierre y recipiente de recogida. El gas captado queda retenido y se puede identificar luego observando la llama que produce su combustión. El físico italiano Alessandro Volta descubrió así el metano, al que designó como “aire combustible”.

Pero también encontramos metanógenos más cerca, actuando dentro de nosotros mismos y de muchos animales. Los gases intestinales de humanos, y los expelidos por vacas, ovejas, y otros rumiantes pueden contener metano como componente mayoritario, que es producido por los metanógenos del intestino y del rumen de estos animales. En conjunto, los

rumiantes originan por sí solos cantidades enormes de metano, cerca del 20% de todo el que se detecta actualmente en la atmósfera terrestre [45]. A ello hay que añadir el metano intestinal generado en los no rumiantes, como el hombre, y el producido por los metanógenos libres en la naturaleza. Esta preocupación se agrava al considerar que la producción biológica de metano está aumentando continuamente y que en la actualidad lo hace a una velocidad del 1% al año.

La formación de metano es una forma variante de respiración anaerobia y su significación biológica es la de un subproducto del proceso de obtención de energía celular. En el caso más simple (que es el de muchos metanógenos) el H_2 es el donador de electrones y el CO_2 es el aceptor terminal de los mismos: cuando de cuatro moléculas de H_2 se transfieren ocho electrones a una molécula de CO_2 , se origina una molécula de metano (CH_4). Esto crea un gradiente de protones a través de la membrana que el microorganismo puede usar para generar ATP o para dirigir otros procesos celulares que necesitan energía. Entre las distintas especies de metanógenos hay variaciones sobre el mecanismo general de producción. En algunos casos, en lugar del H_2 se puede utilizar un compuesto orgánico como donador de electrones (formiato o un alcohol). En otros, en vez del CO_2 se emplea como aceptor de electrones un compuesto que contenga grupos metilo (como metanol, trimetilamina o dimetil sulfóxido). Finalmente, hay ejemplos en que el acetato puede servir tanto de donador como de aceptor de electrones. La molécula de acetato se rompe y su grupo metilo, que actúa como donador de electrones, es oxidado a CO_2 , mientras su grupo carboxilo, que sirve como aceptor de electrones, se reduce a metano. Los metanógenos son únicos,

además, desde el punto de vista bioquímico porque presentan algunos cofactores que solo producen ellos en la naturaleza, como el metanofurano, la metanopterinina, el coenzima M y otros [40]. La reducción escalonada del CO_2 tiene lugar cuando esta molécula está unida a dichos cofactores específicos:



Muchos de los substratos que los metanógenos usan para originar metano (CO_2 , H_2 , formiato, acetato y alcoholes de cadena corta) se forman en abundancia a partir de compuestos orgánicos de mayor peso molecular por bacterias fermentativas presentes en ambientes anaerobios. Mediante la conversión de estos productos de fermentación a un producto gaseoso, los metanógenos proporcionan una ruta por la que la materia orgánica abandona los ambientes anaerobios. Los metanógenos son los seres vivos más sensibles al oxígeno y su presencia les resulta letal por carecer de citocromos y de catalasa. Como consecuencia, el oxígeno que entra en sus células se convierte en peróxido de hidrógeno, que es un antiséptico.

Aunque el principal gas con efecto invernadero es el CO_2 , el metano, además de ser directamente perjudicial en el ambiente, puede oxidarse formando más CO_2 . Cumpliendo la llamada “doctrina de la infalibilidad microbiana”, que señala que *no existen compuestos orgánicos naturales que no puedan ser modificados por microorganismos*, no sólo la génesis, sino también la degradación del metano está bajo control

microbiano, es decir, ocurre independientemente de la acción directa del hombre. En presencia de O_2 parte del metano se oxida hasta CO_2 por microorganismos metanotrofos o metilotrofos (Fig. 9), convirtiéndose así en otro gas con importante efecto invernadero. Sin embargo, la mayor parte del metano producido escapa ahora a la atmósfera, donde actúa directamente como gas perjudicial. La vía general de degradación comprende oxidaciones sucesivas por transferencia de dos electrones:

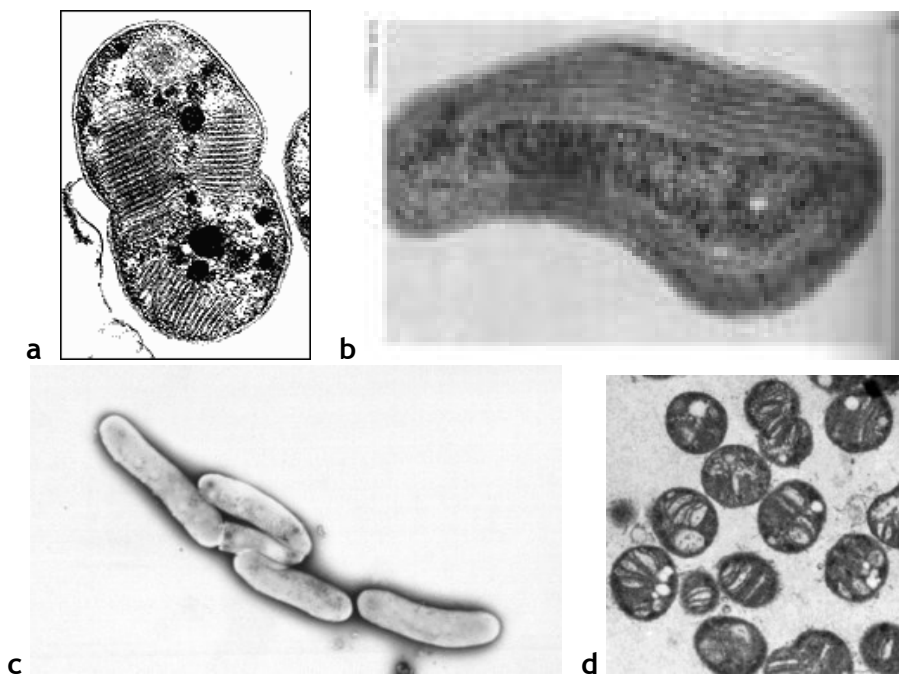
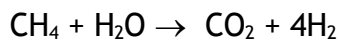


Figura 9 - Algunas bacterias metanotrofas: a) *Methylomonas methanica*; b) *Methylosinus* sp.; c) *Methylobacterium* sp.; d) *Methylococcus capsulatus*.

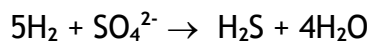
Además de esta oxidación aeróbica del metano hasta CO_2 , existe una ruta anaerobia de consumo biológico de metano realizada por un consorcio microbiano de dos miembros (sintrofia entre una arquea y una bacteria) que oxidan el metano en ausencia de O_2 a la vez que reducen el sulfato a sulfuro de hidrógeno, según:



Estos microbios llegan a consumir el 80% del metano producido en ambientes marinos y su existencia se ha demostrado por métodos completamente moleculares, pues todavía no se ha logrado el cultivo de los dos miembros del consorcio [45]. Las arqueas implicadas realizan una metanogénesis inversa, es decir convierten el metano en CO_2 e hidrógeno:



Para favorecer esta reacción, el acompañante bacteriano (probablemente una *Desulfosarcina*) se encarga de reducir la concentración del H_2 producido mediante su oxidación a expensas de reducir el sulfato, catalizando el proceso:



De este modo, ambos tipos microbianos obtienen la energía necesaria para crecer y forman asociaciones de grandes masas microbianas que se sitúan en los fondos, sobre los escapes de metano que originan los metanógenos de los suelos marinos [49, 50].

El metano del hombre, de los animales... y hasta del arroz

El metano es, por supuesto, un combustible valioso pero también un posible peligro ecológico para el calentamiento global por ser un gas con efecto invernadero. Resulta interesante considerar que cerca de la tercera parte de los humanos producen metano como gas intestinal por estar colonizados por metanógenos [45]. Aquéllos que lo generan lo hacen durante toda la vida, pues este carácter no se modifica incluso cuando se toman antibióticos ya que los metanógenos, por ser arqueas, resisten los agentes quimioterápicos empleados en clínica médica y veterinaria. Los otros dos tercios de los humanos producen hidrógeno y CO₂, que son precisamente los substratos necesarios para la producción de metano si se está colonizado por metanógenos. Estos gases que son el punto de partida para la biogénesis del metano intestinal se originan, a su vez, por la fermentación ácido-mixta de los azúcares ingeridos (el producto final es una mezcla de H₂, CO₂ y ácidos orgánicos) llevada a cabo por las enterobacterias de la microflora intestinal normal. El hombre, por tanto, es un contaminante directo y un importante catalizador del efecto invernadero y del calentamiento global no sólo por sus actividades industriales sino a través de una vía tan insospechada como ésta.

Por algún tiempo se consideró que los metanógenos eran carcinogénicos, pero no hay evidencias de que produzcan daño al hospedador. Sin embargo, resulta obvio que originan indudables perjuicios de índole social, pues su principal producto afecta al olfato del prójimo, en particular cuando va acompañado por el característico olor indeseable de pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno procedente del catabolismo de aminoácidos azufrados. Aunque el experimento parezca escatológico, la

naturaleza de los gases intestinales puede detectarse mediante el uso del embudo antes mencionado, que permite comprobar *de visu* si un sujeto es o no portador de arqueas metanogénicas, tal como intuyó en sus oníricos grabados, hace ya 500 años, el genio artístico del Bosco.

Como hemos dicho, el gas natural asociado a la industria petrolera no se generó en otras eras geológicas por sí solo a partir de la materia orgánica fosilizada: deriva de la acción de metanógenos que actuaron sin oxígeno sobre materia orgánica en descomposición. En muchos otros ambientes naturales, incluyendo pozos ciegos y plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales, los metanógenos siguen produciendo hoy día grandes cantidades de metano. Incluso hay biodigestores comercializados para el tratamiento de estiércol y de residuos caseros o de otros orígenes que generan metano mediante la conversión anaeróbica realizada por estos organismos. La generación natural de biogás constituye una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono donde el metano producido por arqueas metanógenas representa el último eslabón de una cadena microbiana que degrada material orgánico y que devuelve los productos de la descomposición al medio ambiente. Este proceso generador de biogás se considera una fuente de energía renovable. Incluso el cultivo del arroz y de otros vegetales sobre extensiones encharcadas, favorece la metanogénesis por estos microorganismos en los barros anóxicos de las tierras inundadas.

De lo expuesto se deduce que tanto la agricultura extensiva como la prolífica ganadería son importantes actividades productoras de metano por medio de microorganismos. Todos los años millones de toneladas de este

gas, que provienen de la descomposición de biomasa, son producidas por microbios que viven en condiciones anaerobias degradando la materia orgánica. Como hemos visto, los medios en los que actúan son muy variados: el intestino del hombre o animales, el interior de un estercolero, un campo inundado para el cultivo de arroz o el fondo de una marisma. Desde este punto de vista, incluso los rumiantes que nos proporcionan carne y leche o las plantas de cultivo tan extendido como el arroz, están también incluidos en el grupo de los "contaminantes".

Excrementos, ventosidades y eructos: un efecto invernadero insospechado

Nueva Zelanda tiene una de las cabañas ganaderas de mayor densidad del planeta. Con sólo cuatro millones de habitantes y una extensión equivalente a la mitad de España, sus más de 10 millones de vacas, 40 millones de ovejas, 2 millones de ciervos y gamos y varias decenas de miles de llamas y de alpacas, hacen de este país una verdadera nación de rumiantes [51]. Naturalmente, las digestiones de estos animales originan enormes cantidades de gases generados por los microorganismos metanogénicos del rumen, que son expelidos sin la menor discreción. Con un adecuado encendido, estos animales podrían convertirse en la versión actualizada de los fabulosos dragones que coloreaban con inquietantes fantasías de fuego y color el imaginario popular de la Edad Media. Se calcula que una vaca expulsa cada año de 90-100 kilos de metano. Para tener una idea de la magnitud de estas emisiones por vaca, basta considerar que esa cantidad equivale, aproximadamente, a las emisiones

que produce un coche durante 1000 kilómetros. Esto es una realidad, por inquietante que resulte.

Aunque se pretende controlar la circulación y el consiguiente consumo de combustibles fósiles generadores de gases indeseables, apenas oímos comentarios sobre los efectos del impacto cuantitativo de estas emisiones. La igualdad vaca/año = coche/1000 kms produce efectos espectaculares. Según cálculos del propio gobierno neozelandés, la suma de tales gases supone el 50% de las emisiones totales del país que pueden incidir en el calentamiento terrestre. En el año 2003 se intentó implantar un impuesto sobre las emisiones gaseosas de vacas y ovejas que finalmente no fue aprobado. En lo que se refiere a nuestro propio país, las estimaciones conducen a la conclusión de que las flatulencias ganaderas suponen solamente unos cuantos puntos menos que las emisiones originadas por nuestros procesos industriales [43]. Y en este cómputo quedan fuera de la contabilidad los gases digestivos producidos por los metanógenos en los humanos. En Irlanda, el metano de procedencia ganadera supone igualmente un alto porcentaje de las emisiones totales de gases con efecto invernadero [52].

Estos datos coinciden con las conclusiones de un reciente informe emanado de la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (Food and Agriculture Organization, FAO) que, bajo el intrigante título *Livestock's long shadow (La larga sombra del ganado)*, resalta que, por paradójico que resulte, el sector ganadero genera en muchos casos más gases con potencial influencia en el calentamiento global que el sector del transporte [53]. A un nivel global, los expertos

calculan que los gases generados por el ganado (en realidad debidos a microorganismos metanógenos) suponen el 20% de las emisiones gaseosas con efecto invernadero. El ganado es, por tanto, uno de los principales responsables de los graves problemas medioambientales actuales, y deberían adoptarse medidas urgentes para hacer frente a esta situación. Además de su contribución al calentamiento global, las explotaciones ganaderas limitan los recursos hídricos, pues utilizan el 8% del agua que consume el ser humano incluyendo la usada en el riego de los cultivos necesarios para su alimentación. Según el mencionado informe de la FAO, el sector ganadero es también el principal productor de contaminantes del agua, ejemplificados sobre todo por restos de animales, antibióticos, hormonas, fertilizantes y plaguicidas. En EEUU, el ganado produce una tercera parte del nitrógeno y del fósforo que contamina el agua [54]. Estas consideraciones, sumadas al hecho de que un 30% de la superficie total del planeta se dedica a la ganadería, ofrecen un panorama cuya realidad suele ser escasamente valorada en sus justos términos.

Curiosamente sin embargo, los mayores productores de metano no son los vertebrados, sino los insectos, y más concretamente las termitas, que están fuera de nuestro control. Los microorganismos del intestino de estos insectos producen medio miligramo de metano al día, pero dado el increíble número de termitas existentes, su producción anual supone cientos de millones de toneladas [45].

La vida en un mundo caliente

La determinación de la temperatura superior a la que todavía resulta posible la existencia de vida constituye un parámetro importante porque ayuda a definir el punto térmico alrededor del cual pudo tener lugar el origen de la vida sobre la Tierra en su fase primitiva de enfriamiento. Por otra parte, esa temperatura límite permite intuir la presencia potencial de vida en ambientes hipertérmicos, tanto terrestres como extraterrestres. Parece improbable que los seres vivos puedan resistir por encima de 150°C, ya que las fuerzas de cohesión del DNA y de otras moléculas biológicas vitales se pierden a esa temperatura o mucho antes. Sin embargo, la termorresistencia de la vida microbiana alcanza extremos impresionantes.

Imaginemos por un momento que se hicieran realidad las más funestas predicciones sobre un cambio climático global y que, por las causas que fuesen, la temperatura aumentara durante décadas, siglos o incluso milenios. Mientras la temperatura no sobrepasara ese máximo vital, la evolución, actuando a través de la selección natural, perfilaría un nuevo escenario biológico y la Tierra se convertiría de nuevo en un tubo de ensayo cósmico donde la vida iniciaría una nueva andadura. En lo que a temperatura se refiere, el aspecto de ese mundo caliente sería algo similar al de la Tierra primitiva, y las formas vivientes adaptadas al ambiente se parecerían también a las que existieron por aquel entonces. La vida en nuestro planeta, tras un largo recorrido de ensayos evolutivos, retornaría casi a sus orígenes.

No resultaría sorprendente que, bajo condiciones extremas de temperatura, lo único que se detectara fuera vida microbiana del tipo que representan los microorganismos termófilos e hipertermófilos (Fig. 10). Los mismos que existieron en tiempos primigenios y cuyos descendientes podemos detectar incluso hoy día en nichos ecológicos especializados de nuestro planeta, como chimeneas asociadas con el vulcanismo, fondos oceánicos (*thermal vents* o *smokers*) o el agua que fluye de fuentes termales, géiseres, fumarolas y chimeneas eruptivas. Estos microorganismos, que constituyen auténticos fósiles vivientes y que han permanecido casi sin cambios a lo largo de miles de millones de años, serían de nuevo la semilla de otro periplo vital. Actualmente la lista de especies descritas de termófilos e hipertermófilos pasa del centenar, pero los más conocidos son representantes de los géneros *Bacillus*, *Thermus*, *Thermotoga*, *Sulfolobus*, *Pyrococcus*, *Pyrolobus*, *Methanopyrus*, *Aquifex* o *Geothermobacterium*. La mayoría de ellos son arqueas, un grupo de procariotas descubierto hace 30 años, al que ya nos hemos referido, y cuyo análisis bioquímico y filogenético revela que constituye una línea evolutiva más afín a los eucariotas que a las propias bacterias [55]. Existen numerosas evidencias en favor de un escenario hipertermófilo para los orígenes de la vida y de una unión directa entre este origen caliente y los hipertermófilos actuales.

La temperatura óptima de crecimiento de estos seres vivos siempre supera los 80 °C. En el caso de *Pyrolobus fumarii*, la temperatura máxima de crecimiento en cultivos puros llega a los 113 °C. Sin embargo, la existencia más calurosa la puede llevar a cabo un microorganismo denominado “cepa 121”, que lleva el límite a los 121°C [56]. Las presiones

que se registran en las inmensas profundidades oceánicas evitan que el agua que emerge de los escapes térmicos hierva a esa temperatura tan elevada. Este microorganismo casi surrealista, con aspecto de una pelota de tenis minúscula recubierta por una docena de flagelos, no solamente resiste el autoclave sino que es capaz de multiplicarse a dicha temperatura y presión. Aunque no crece a mayor temperatura, resiste un tratamiento de 2 horas a 130°C y crece de nuevo cuando se transfiere a un medio fresco y a una temperatura inferior.

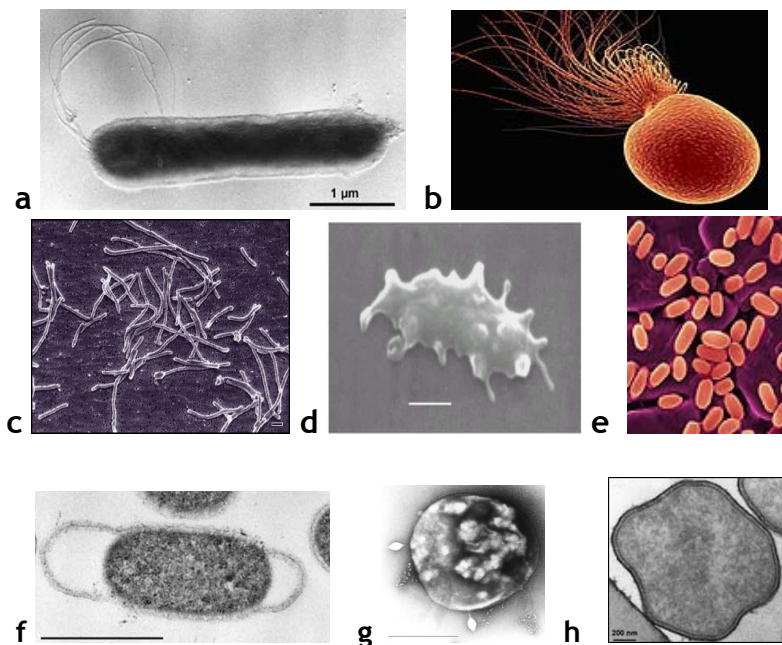


Figura 10 - Algunos microorganismos extremófilos que pueden vivir a temperaturas levadas: a) *Aquifex* sp.; b) *Pyrococcus furiosus*; c) *Thermus aquaticus*; d) *Thermo-plasma* sp.; e) *Bacillus stearothermophilus*; f) *Thermotoga maritima*; g) *Sulfolobus acidocaldarius*; h) *Pyrolobus fumarii*.

Ni que decir tiene que todos los hipertermófilos son especiales. Las membranas celulares no están compuestas por bicapas fosfolipídicas sino por monocapas de isoprenoides unidos a glicerol mediante enlaces de tipo éter en vez de éster, que es más fuerte y que confiere propiedades moleculares más estables a altas temperaturas. Las moléculas proteicas de los hipertermófilos exhiben una elevada estabilidad estructural y funcional a altas temperaturas. Estas proteínas son homólogas a sus análogos funcionales en los organismos mesófilos o psicrófilos que se desarrollan a menores temperaturas, pero han evolucionado para presentar esta resistencia característica. Tal hipertermoestabilidad es a veces importante desde el punto de vista comercial ya que muchas reacciones químicas operan a mayor velocidad en temperatura elevada (la utilización de la polimerasa de *Thermus aquaticus* –polimerasa Taq– en las reacciones de PCR es un ejemplo). Por otra parte, los hipertermófilos producen numerosas proteínas de “choque térmico” que protegen a otras proteínas de la desnaturalización térmica. Hasta el 80% del peso seco de la arquea *Pyrodictium occultum* es una proteína de este tipo cuando crece a 108°C [45]. Además, estas células contienen el enzima “girasa inversa”, una topoisomerasa específica que induce un superenrollamiento positivo del DNA para reforzar su estabilidad térmica [57].

Por tanto, con la desaparición del hombre y de otras formas biológicas “superiores” la biosfera experimentaría un impacto temporal que no sería biológicamente irreparable. En realidad, no tendría mucho que lamentar porque posee suficientes recursos para continuar la aventura de la vida en circunstancias ambientales más extremas.

Con relación a otra situación límite –como es la radiación– hay microorganismos, como *Deinococcus radiodurans*, que parecen igualmente indiferentes a cambios tan drásticos como los que podrían representar los desastres nucleares [21]. Mientras que una dosis de 10 Gy es suficiente para matar a un ser humano, *D. radiodurans* no pierde su viabilidad hasta los 5.000 Gy. De hecho, esta bacteria poliextremófila aparece en *The Guinness Book of World Records* como el organismo más resistente de todos los seres vivos: puede sobrevivir a condiciones extremas de radiación, calor, frío, deshidratación, vacío y acidez (Fig. 11).

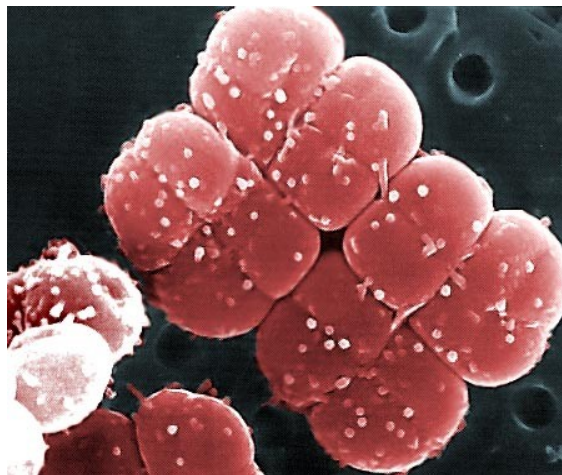


Figura 11 - Agrupación de células de *Deinococcus radiodurans*, el ser vivo más resistente.

Mecanismos microbianos de defensa frente al estrés ambiental

Es bien conocida la existencia en microorganismos procariotas de múltiples defensas contra las variaciones de temperatura como, por

ejemplo, la síntesis de dipicolinato durante la formación de las endosporas o las peculiares adaptaciones bioquímicas y estructurales de los psicrófilos y los termófilos [14, 40, 45]. Nuestras propias investigaciones sobre la respuesta de microorganismos eucariotas (como el caso de *Saccharomyces cerevisiae* o *Schizosaccharomyces pombe*) revelan que, cuando las células se someten a situaciones de estrés, existe una amplia batería de mecanismos adaptativos que se pone en marcha ante cambios ambientales drásticos que incluyen variaciones osmóticas, calor, frío, falta de nutrientes, presencia de agentes oxidantes, deshidratación y otras muchas situaciones [1].

En general, la percepción de una señal de variación en las condiciones externas comienza por una alteración de sensores de membrana, que dispara una cascada de reacciones de fosforilación llevada a cabo por MAP-quinasas. El efecto final de estas reacciones es la fosforilación de un factor de transcripción que favorece la expresión de productos génicos relacionados con la adaptación a las nuevas circunstancias.

Este tipo de vías de señalización, ejemplificadas en la ruta SAPK (ver Fig. 12), se ha conservado en el desarrollo evolutivo y está presente tanto en eucariotas unicelulares como en el hombre [1]. Tales vías de transducción de señales constituyen la base molecular de las respuestas biológicas adaptativas a nivel celular y contienen siempre un módulo funcional operativo formado por al menos tres MAP-quinasas que actúan de modo secuencial.

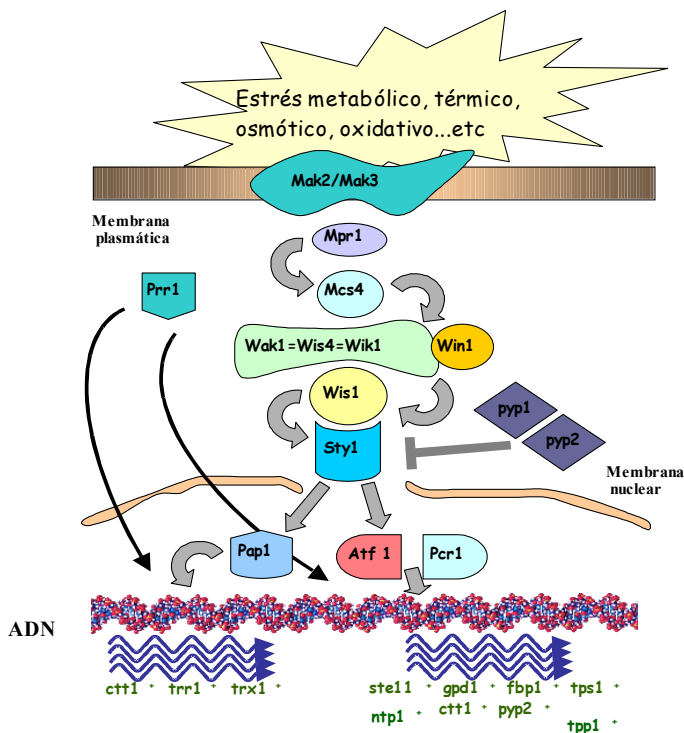


Figura 12 - Principales elementos de la cascada de la ruta SAPK en *Schizosaccharomyces pombe*. Esta vía de señalización integra reacciones que se activan por estrés y su efecto final es la modificación de un factor transcripcional que emigra al núcleo y que activa genes cuya expresión permite la adaptación celular a las nuevas condiciones ambientales.

En concreto, la transducción de señales a través de la ruta SAPK de *Schizosaccharomyces pombe* comprende elementos superficiales (Mak2, Mak3, Mpr1) y un regulador de respuesta (Mcs4) que, bajo estímulos externos condicionantes, se asocia con las MAP-quinasas Wak1 y/o Win 1. Estas quinasa fosforila y activa la MAP-quinasa Wis 1. A su vez, esta quinasa Wis1 fosforila y activa a la MAP-quinasa Sty1, que muestra una gran homología estructural y funcional con la quinasa p38 de mamíferos y

humanos. Sty1 controla la actividad del factor de transcripción Atf1 que, cuando es fosforilado por Sty1, pasa al núcleo y favorece la expresión de una serie de genes que responden al cambio ambiental determinando una respuesta específica (Fig.12). En el caso particular del calor (por encima de 28°C), el nivel de fosforilación de Sty1, y por tanto el nivel de operatividad de Atf1, parece estar mediado por la inactivación de las fostatasas específicas Pyp1 y Pyp2, que actúan como sensores intracelulares en condiciones de choque térmico (Fig.12). En cambio, bajo condiciones de choque frío (por debajo de 10°C) se activa toda la ruta y resultan necesarios todos los elementos para la respuesta [1]. Mediante estas y otras estrategias, se convierten las variaciones térmicas del medio ambiente en distintos patrones de expresión génica. La adaptación de los microorganismos unicelulares a cambios de temperatura parece así asegurada dentro de unos márgenes relativamente amplios.

Perspectivas de futuro

Durante los últimos 3.500 millones de años los microorganismos han moldeado y definido la biosfera terrestre, creando condiciones que han permitido la evolución de las comunidades biológicas, incluida la sociedad humana. Los recientes avances científicos y tecnológicos han revelado la impresionante información genética contenida en los microorganismos. Esto representa una oportunidad para abordar una ecología molecular, desarrollar estudios metagenómicos y emplear microorganismos para combatir el calentamiento global mediado por gases contaminantes. Los autótrofos pueden reducir el nivel de CO₂ atmosférico usando este gas como fuente de carbono y, de modo análogo, los metanotrofos aerobios

pueden consumir metano a medida que difunde de las zonas metanogénicas de suelos y sedimentos, actuando como bio-filtros de estas emisiones [9, 10]. Estas son dianas naturales que hay que explotar en estrategias orientadas a combatir el cambio climático global.

Ante las consideraciones anteriores, cabe realizar algunas reflexiones que apuntan a que nosotros mismos –los 7 mil millones de humanos que habitamos el planeta– somos una amenaza para el futuro, independientemente de nuestro nivel de tecnificación. No estamos prestando la debida atención a los sumideros microbianos de CO₂, ni a la génesis microbiana de metano. Incluso actividades tan naturales como la ganadería y la agricultura pueden convertirse en un serio peligro para nuestra continuidad.

Mantener estáticos los ecosistemas es un objetivo quimérico y, por otra parte, no se puede pretender una vuelta atrás en el desarrollo de la civilización humana. La simplicidad ecologista que propicia un alejamiento de las tecnologías modernas mediante antiguos equilibrios naturales no es la solución, porque esos equilibrios no son los mismos y porque el problema es más profundo. Un reciente estudio revela que el metabolismo de 1 kg de carne produce 36 kg de CO₂, y que el proceso de producción de esa carne tiene en potencia un efecto perjudicial sobre el clima equivalente a un viaje de 250 km en coche. Esto conduce a la aparente conclusión de que si comiéramos menos carne protegeríamos más el ambiente y, de hecho, un vegetariano produce menos CO₂ que un carnívoro, con cerca de 1 Tm por año frente a 1,82 Tm [58]. Como contrapartida, si nos dedicásemos todos a comer vegetales esquilmaríamos directamente los sumideros naturales de CO₂.

No se ve, por tanto, cómo el hombre puede evitar fácilmente el dilema que su propio desarrollo y su expansión plantean respecto a los gases con efecto invernadero. Por un lado, no es capaz de cambiar radicalmente la bioquímica digestiva de los herbívoros ni la suya propia, es decir, la naturaleza misma de los metanógenos. Por otro, tampoco puede reducir la densidad de población humana que debe ser alimentada y que produce CO₂ hasta cuando respira. Ambas alternativas supondrían cambios ecológicos fenomenales. Pero, de otro modo, no saldremos de un contrasentido que no resulta aparente a primera vista.



Figura 13 - ¿Prueba contundente del calentamiento global?

Precisamente por ser estrictamente naturales, producimos cantidades ingentes de gases con efecto invernadero cuya emisión, como hemos visto, no está relacionada con procesos petroquímicos, ni se debe sólo a nuestra industria sino a nuestro propio éxito biológico y a lo que ello supone en términos de alimentación requerida. Aparentemente, por tanto, la humanidad tiene una capacidad muy reducida para modificar estas cifras ya que la adopción de medidas drásticas, como limitar el número de

habitantes del planeta o sus raciones alimenticias, parece inalcanzable más allá de la mente de un escritor de ciencia-ficción. Algo se puede hacer para reducir el flujo de CO₂ generado por combustión, pero poco se está haciendo para controlar la liberación de metano a la atmósfera, ni su eventual conversión natural o forzada a CO₂, salvo reducir pérdidas en gaseoductos [59]. Los datos pueden provocar perplejidad, pero no engaño.

Se hace inevitable un cambio para evitar una mayor degradación de los ecosistemas que proporcionan las bases de nuestra supervivencia y para la adopción de sistemas energéticos alternativos no basados en el carbono.

Epílogo

Los humanos consideramos nuestra especie como cumbre de la evolución. Pero si el éxito en la escala de la vida se contempla como capacidad de adaptación, de supervivencia, de replicación y de presencia o distribución, los microorganismos nos superan. En cada intestino humano hay más bacterias que humanos en todo el planeta. Son la forma de vida predominante aunque no tengan el aparato intelectual de los humanos ni puedan crear ideas con nuestra eficacia. No les hace falta.

Ni la Tierra ni la biosfera están probablemente en peligro. Mucho tendría que calentarse nuestro planeta para afectar a microorganismos hipertermófilos, como *Pyrococcus* o *Thermotoga*, que sabemos que son capaces de crecer por encima de 100°C [60]. Los microorganismos fueron los primeros en aparecer y serán muy posiblemente los últimos seres vivos que queden antes de que desaparezca la vida en la Tierra. Gaia —la encarnación de la biosfera— ya ha demostrado que si pierde un miembro

puede regenerar otro. Pero lo que sí está en juego es la continuidad de los sistemas sociales y productivos de la especie humana [61]. Lo que resulta una “verdad incómoda” es que estas incertidumbres deben ser asimiladas por todos aquellos con capacidad de influenciar el pensamiento público, particularmente por una clase política mediocre que piensa que el problema se arregla con declaraciones demagógicas o firmando carísimos protocolos que luego no se cumplen. La puesta en marcha y el mantenimiento del protocolo de Kioto supone un gasto anual de unos 300.000 millones de dólares y sus objetivos no se están alcanzando [24].

El tema del calentamiento global y el cambio climático seguirá resultando polémico mientras los puntos de vista científico, político y mediático no se superpongan. Hasta entonces, veremos el mañana poco claro.

En los pasados años cincuenta, la actriz Doris Day aludía al futuro en su magistral interpretación de la canción *Whatever will be, will be....* (*Qué será, será...*). Nos tranquilizaba asegurando que en el futuro será lo que deba ser. Puede resultar chocante que un planteamiento científico acabe desembocando en una canción, pero poco más se puede decir sobre el incierto panorama que se vislumbra. Tan solo, quizás, destacar como proféticas para ese futuro la elocuente sentencia de Pasteur “...señores, son los microbios los que tendrán la última palabra”. Porque puede que muy pronto necesitemos su ayuda.

Muchas gracias por su atención.

He dicho.

Bibliografía

- [1] Ver Gacto en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez>
- [2] Nombela C (2007) Discurso de ingreso en la Real Academia Nacional de Farmacia. Madrid.
- [3] Gacto M, Vicente-Soler J, Cansado J, et al. (2000) *J. Appl. Microbiol.* 88:1-8.
- [4] Ramón y Cajal S (1896) Discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales. Madrid.
- [5] Jannasch HW (1997) *Ann. Rev. Microbiol.* 51:1-45.
- [6] Lilly Foundation, 12th Scientific Symposium (2007). Environmental changes, microbial systems and infections. Madrid.
- [7] Kuypers MM (2007) *Science* 317:1510-1511.
- [8] Radhika V, Proikas-Cezanne T, Jayaraman M, et al. (2007) *Nat. Chem. Biol.* 3:325-330
- [9] de Morais MG, Costa JA (2007) *J. Biotechnol.* 129: 439-445.
- [10] Dunfield PF, Yuryev A, Senin P, et al. (2007) *Nature* 450:879-882.
- [11] American Academy of Microbiology (2004) Microbiology in the 21st century. Where we are and where we are going. *American Society for Microbiology*.
- [12] Pelczar MJ, Reid RD, Chan ECS (1977) *Microbiology*, 4th edition. McGraw Hill Book Co., NY.

- [13] American Academy of Microbiology (1997). The microbial world: foundation of the biosphere. *American Society for Microbiology*.
- [14] Tortora GJ, Funke BR, Case CL (1993) *Introducción a la Microbiología*. Ed. Acribia, Zaragoza.
- [15] NIH Human Microbiome Project.
<http://nihroadmap.nih.gov/hmp/index.asp>
- [16] The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium (2005) *Nature* 437: 69-87.
- [17] Russell P, Nurse P (1986) *Cell* 45:781-782.
- [18] de Saint-Exupery A (2000) *El Principito*. Ed. Salamandra, Barcelona.
- [19] Chargaff E (1973) *Perspect. Biol. Med.* 18:313-330.
- [20] Chargaff E (1976) *On the fashions of science*. 4th Annual M McLean Lectures in Biochemistry. Houston, TX.
- [21] Gacto M (1996) *Del origen de la vida a las vacas locas*. Servicio de Publicaciones. Universidad de Murcia.
- [22] Gore A. (2007) *Una verdad incómoda: la crisis planetaria del calentamiento global y como afrontarla*. Editorial Gedisa, Barcelona.
- [23] Diario *La Nueva España*. 28 octubre de 2007. El aeropuerto pone en aprietos Kioto. Edición digital.
- [24] Alcalde J (2007) *Las mentiras del cambio climático*. Ed. Libros Libres, Madrid.

- [25] Yu, E., Liu, J. (2007) *PNAS* 104: 20629-20634.
- [26] Chylek, P., Dubey, M.K., Lesins, G. (2006) *Geophys. Res. Lett.* 33: L11707.
- [27] Bowen GJ, Beerling DJ, Koch PL, et al. (2004) *Nature* 432:495-499.
- [28] Pagani M, Zachos JC, Freeman KH, et al. (2005) *Science* 309:600-603.
- [29] Reiter, P. (2005) Memorandum on the IPCC and technical information. Impacts on Human Health. *Select Committee on Economic Affairs for the House of Lords*. 31 marzo.
- [30] Christy J. (2003) En: Perlman D., Chronicle Science Editor, *San Francisco Chronicle*, 18 diciembre.
- [31] The Natural Resources Stewardship Project (NRSP). (2006) *Understanding climate change*. <http://www.nrsp.com/>
- [32] Spencer RW (2007) Statement to the Committee on Oversight and Government Reform of the United States House of Representatives. *House Committee on Oversight and Government Reform*. 19 marzo. <http://oversight.house.gov/documents/20070320152338-19776.pdf>
- [33] Stossel J (2007) *Myths, Lies, And Downright Stupidity*. Hyperion, NY.
- [34] Stossel J (2007) *Man versus Nature*. <http://abcnews.go.com/2020/Stossel/Story?id=3751219&page=1>
- [35] Grupo de estudios estratégicos, GEES (2007) *El libre mercado mejora el medio ambiente*. Colaboración nº 2083. 11 de diciembre.
- [36] Lovelock JE. (1985) *Gaia, una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Ed. H. Blume, Barcelona.
- [37] Lelieveld J (2006) *Nature* 443:405-406.

- [38] Zumft WG (1997) *Microbiol Mol Biol Rev.* 61:533-616.
- [39] Bedmar EJ, Robles EF, Delgado M.J. (2005) *Biochem. Soc. Trans.* 33:141-144.
- [40] Madigan MT, Martinko JM, Parker J (2003) *Biology of Microorganisms.* 10th edition. Prentice Hall, NJ.
- [41] Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, et al. (2006) *Science* 311:506-508.
- [42] Woodward FI (2007) *Curr. Biol.* 17:269-273.
- [43] Reay D (2007) *Nature* 446:727-728.
- [44] Watson AJ, Orr JC (2003) en: *Ocean Biogeochemistry* (ed. Fasham MJR). Springer, Heilderberg.
- [45] Schaechter M, Ingraham JL, Neidhardt F (2006) *Microbe.* ASM Press. Washington, DC.
- [46] Woodward FI (2007) *New Phytologist* 174:169-170.
- [47] Ashmore M, Toet S, Emberson L (2006) *New Phytologist* 170:201-204.
- [48] Renneberg R (2008) *Biotechnology for beginners.* Academic Press, NY.
- [49] Nauhaus K, Albrecht M, Elvert M, et al. (2007). *Environ. Microbiol.* 9:187-196.
- [50] Kniermeyer O, Musat F, Sievert SM, et al. (2007) *Nature* 449:898-901.
- [51] Merino A (2007) Pedos de vaca. *El Mundo*, 20 de abril.
www.elmundo.es/elmundo2007/04/20/ecología/1177062080.html
- [52] Dennis C (2004) *Nature* 429:119.
- [53] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, et al. (2006) *Livestock's long shadow.* Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.

- [54] Chavarrias M (2007) Producción ganadera e impacto ambiental. <http://www.consumaseguridad.com/sociedad-y-consumo/2007/03/01/26920.php>.
- [55] Woese CR, Fox GE (1977) *PNAS* 74:5088-5090
- [56] Kashefi K, Lovley DR (2003) *Science* 301: 934-935
- [57] Forterre P, Bergerat A, López-García (1996) *FEMS Microbiol. Rev.* 18:237-248
- [58] Forum Science News (2007) *Biochemica* 4: 31-32.
- [59] Lelieveld J, Lechtenböhmer S, Assonov SS, et al. (2005) *Nature* 434:841-842.
- [60] Robb FT, Maeder DL, Brown JR, et al. (2001). *Methods Enzymol.* 330: 134-135.
- [61] Sapiña F (2006) *¿Un futuro sostenible?* Publ. Universitat de Valencia.