

La perspectiva Gaia de l'ecologia

Dorion Sagan i Lynn Margulis*

La hipòtesi Gaia estableix que la temperatura i la composició de l'atmosfera de la Terra estan regulades activament pel total de la vida del planeta, la biota. Aquesta visió representa un enfocament radicalment diferent del concepte científic anterior segons el qual la vida a la Terra està immersa i adaptada en un medi essencialment estàtic.

*L'article que us oferim a continuació va aparèixer a **The ecologist**, Vol. 13, N° 5, pp. 166-167, 1983.*

Introducció

La hipòtesi gaia ha esdevingut una teoria d'interès creixent per a gent de les disciplines més diverses, i probablement ara assenta les bases per a la construcció d'una ecologia nova. En aquests moments ja aporta una nova visió del món, en alguns cercles. Quina és la base científica de la hipòtesi, i quines són les seves implicacions socials més controvertides? Exposada per primer en la seva formulació moderna pel químic atmosfèric James Lovelock, amb l'ajut dels coneixements biològics de la microbiòloga Lynn Margulis, fou el novel·lista William Golding, autor de *Senyor de les mosques*, qui li donà el nom de Gaia, a instància del seu amic Lovelock. (Vegeu *Ecologist*, nº 213, p. 57).

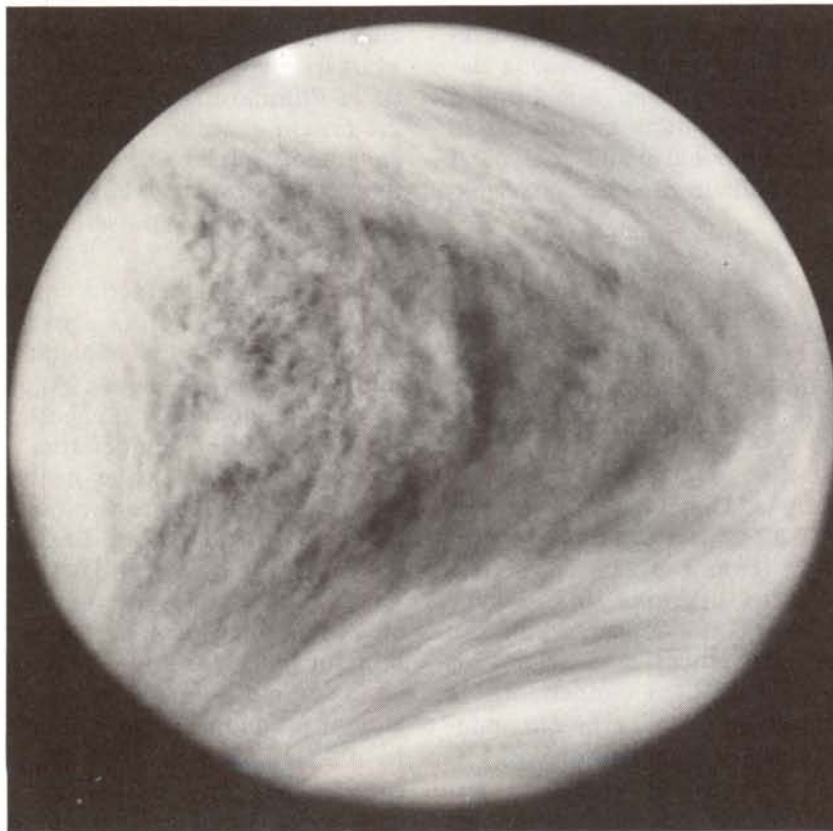
En principi, la hipòtesi gaia estableix que tant la composició de tots els gasos reactius com la temperatura de la baixa atmosfera s'han mantingut relativament constants des de fa molt de temps, malgrat totes les pertorbacions externes.

Allò que és particularment interessant és que la composició química s'ha mantingut constant malgrat que els gasos siguin lluny de llurs equilibris químics. Per tant, la teoria suggereix que la vida, en gran part, genera el seu propi entorn. Veritablement, la vida reacciona dinàmicament davant les crisis còsmiques i globals, com per exemple una radiació solar creixent o la primera aparició de l'oxigen a l'atmos-

(La vida, com a termòstat, ha permès la constància de la temperatura de la Terra)

fera, ja sigui adaptant-se per superar la crisi, l'opinió clàssica, darwiniana, de la relació de la biota amb el seu entorn, o bé contraatacant efectivament la crisi a través de la seva pròpia activitat biològica. Tant científicament com filosòfica, la hipòtesi gaia proporciona una finestra teòrica clara i important per a una "nova visió de la vida a la Terra".¹

Pel que fa a temperatura, generalment els astrònoms estan d'acord que la lluminositat total del Sol s'ha incrementat al llarg dels darrers quatre mil milions d'anys; i per tant fóra natural esperar que la temperatura mitjana de la superfície de la Terra hagués augmentat consegüentment. Però l'evidència dels registres fòssils indica que la temperatura ha romàs relativament estable. La hipòtesi gaia sosté que tal estabilitat és conseqüència de la vida que hi ha a la seva superfície. Amb un simple model basat en conceptes cibernètics que es refereixen al creixement, al comportament i a la diversitat de les poblacions, Lovelock ha demostrat com, en principi, les propietats intrínseques de la vida porten a una activa regulació de la temperatura de la superfície de la Terra. Per fer-ho, Lovelock va considerar un món mític, amb margarides com a únics éssers vius, i va arribar a la conclusió que a la biota li és teòricament possible exercir control sobre factors tan potents com un increment de la lluminositat del Sol. En el seu model no cal invocar cap força



conscient desconeguda; al contrari, la regulació de la temperatura és conseqüència de propietats de la vida ben conegudes.

Modulació de la química atmosfèrica

La regulació atmosfèrica pot atribuir-se a la combinació de les activitats metabòliques i de creixement dels organismes, especialment dels microorganismes amb capacitat per transformar el nitrogen i els gasos atmosfèrics que contenen sofre i carboni.² Prèviament a la formulació del model de les margarides de Lovelock, se suggeria que si alguna cosa controlava la concentració atmosfèrica de metà,³ hi hauria un sistema mitjançant el qual es podria mantenir constant la temperatura de l'atmosfera. A més, J. Shukla i el seu company Y. Mintz van mostrar, en un model quantitatiu, que l'evapo-transpiració dels boscos determinava la concentració de vapor d'aigua a l'atmosfera, i per tant també certes característiques climàtiques correlacionades amb aquesta concentració.⁴ Malgrat que aquells meteoròlegs no realitzaven el seu treball en un context gaia, van establir un exemple de la perspectiva gaia sense pretendre-ho. En efecte, moltes observacions dels efectes de la biota en el manteniment de l'entorn poden reinterpretar-se en un context gaia.⁵

Com és possible que la composició i la temperatura de l'atmosfera puguin ser regulades activament pels organismes?. Encara que vulguem creure que el metà de l'atmosfera és biogènic i que l'evapo-transpiració trasllada grans quantitats d'aigua del sòl a l'atmosfera a través dels arbres, s'han fet algunes crítiques que han rebutjat la hipòtesi gaia perquè no es veu de quina manera tota la superfície planetària pot haver estat regulada durant milers de milions d'anys per una biota circumdant en què no hi ha hagut cap planificació ni previsió de cap tipus.⁶

Fig. 1
La Terra, Mart i Venus.
(Aquesta última fotografia ha estat gentilmente servida per la NASA).



Fig. 1 bis. El Món de les Margarides (fosques i clares).

Com a contrapunt d'aquestes crítiques, Lovelock ha formulat un model general de la modulació de la temperatura per part de la biota, que duu el poètic nom de "Món de Margarides".

El model del "Món de Margarides" utilitza més la temperatura de la superfície que no pas la composició dels gasos per demostrar les diferents menes possibles de regulació que concorden amb el comportament dels organismes. L'exemple del Món de Margarides és ben bé allò que hi ha d'essencial al concepte gaia, perquè es basa en una analogia entre els sistemes cibernètics i les propietats de creixement dels organismes. D'una manera que ja s'admet que és simplificada, demostra que la regulació de la temperatura pot considerar-se una conseqüència lògica de propietats de la vida ben conegudes: potencial de creixement exponencial i ritmes de creixement variables amb la temperatura, de manera que el ritme més fort correspon a la temperatura òptima per a cada població, i decreix quan aquesta se separa del nivell òptim, i està limitat per les temperatures altes o baixes en extrem.

Sens dubte, qualsevol model ha d'explicar la regulació de la temperatura de la superfície tenint en compte diverses observacions. Per

exemple, les roques més antigues no metamorfositzades tant del Swaziland System, al sud d'Àfrica,⁷ com de la Warrawoona Formation, a l'oest d'Austràlia,⁸ mostren evidència de vida en èpoques molt antigues. Ambdues seqüències sedimentàries tenen més de tres mil milions d'anys d'antiguitat. Des d'aquella època fins ara tenim registres ininterromputs de vida damunt la Terra, cosa que implica que la temperatura mitjana de la superfície no ha assolit mai ni el grau d'ebullició ni el de congelació

**(La constància
atmosfèrica i de la
salinitat dels mars
poden ser degudes als
organismes)**

de l'aigua. Donat que en una glaciació la temperatura de la superfície a les latituds mitjanes no sofreix un descens superior a 10 °C, i que a més les èpoques de glaciacions han estat relativament rares segons els registres fòssils, la temperatura de la superfície de la Terra s'ha mantingut probablement entre 5° i 15 °C almenys en els darrers tres mil milions d'anys. Molts astrònoms creuen que la lluminositat solar ha

augmentat almenys un 10% en els darrers quatre mil milions d'anys.⁹ Així, la Terra (o més acuradament, la vida segons el context gaia) hauria actuat com a termòstat global. Cap de les estimacions de l'increment de lluminositat del Sol, de les quals n'hi ha que el valoren d'un 30 a un 70%,⁹ no modifica les conclusions del model del Món de Margarides. Un increment relatiu de la lluminositat del valor 0,6 al 2,2 (essent el valor actual 1,0) fóra congruent amb les asseveracions del model del Món de Margarides, ja que es contempla una serie de valors.

Els sistemes cibernètics mantenen constants de forma activa determinades variables, malgrat les influències pertorbadores. Aquests sistemes s'anomenen homeostàtics si llurs variables (temperatura, direcció, pressió, intensitat de llum, etc.) estan regulades al voltant de punts de partida fixos. Exemples d'aquests punts de partida podrien ser 22 °C per a un termòstat o un 40% d'humitat relativa per a un humidificador. Si el punt de partida no és constant, sinó que canvia amb el temps, s'anomena punt operatiu. Es diu que els punts operatius, al contrari dels punts de partida, són més aviat homeorrètics en lloc d'homeostàtics. Els sistemes de re-

gulació gaia, com els embriològics descrits per C.D. Waddington,¹⁰ són més pròpiament homeorrètics que homeostàtics.

Fins i tot els sistemes cibernètics mínims tenen certes propietats que els defineixen: un sensor, un input, un guany (la quantitat en què s'amplia un sistema) i un output. Per tal d'assolir l'estabilitat, de partida i amb els operatius, de manera que els errors es corregeixin. La correcció dels errors significa que, d'alguna manera, l'output ha de retornar al sensor per tal que un input nou compensi la diferència existent en l'output. Aquest tipus de reciclatge, positiu o negatiu, sovint d'ambdós signes, té molt a veure amb la correcció dels errors. En un primer intent d'aplicar aquesta anàlisi cibernètica a la hipòtesi gaia, Lovelock,¹¹ de primer ell sol i després amb Andrew Watson,¹² de la Marine Biological Association de Plymouth, va establir el model matemàtic del Món de Margarides.

El model del Món de Margarides

El model del Món de Margarides s'utilitza per expressar com s'hauria pogut regular la temperatura de la superfície planetària. Fa suposicions senzilles: únicament hi ha una població polimorfa de margarides clares i fosques, i aquests organismes sempre es reproduïen efectivament i asexualment, sigui quin sigui el valor del seu albedo.

Les temperatures locals s'utilitzen en dues equacions de creixement estàndard:

$$\begin{aligned} dL / dt &= L (x B_1 - 0) \\ dD / dt &= D (x I_2 - 0) \end{aligned}$$

on L i D són les àrees cobertes de margarides clares i fosques respectivament, x és el sòl fèrtil no ocupat per cap tipus de margarides, i 0 són els ritmes de creixement i de mort. Se suposa que la dependència de la temperatura dels ritmes de creixement és parabòlica:

$$\begin{aligned} B &= aT^2 + bT + c \\ b &= 0,0032265 T_1 + 0,1469 T_1 - 0,6531 \end{aligned}$$

que és zero quan la temperatura local és de 0 °C i té un valor màxim d'1,0 quan la

temperatura és $T_1 = 17,5$ °C. La temperatura mitjana del planeta, T_m , es troba calculant la radiació absorbida i l'emesa:

$$(T_m + 273)^4 = SL (1-A)$$

on S és una constant, L és la lluminositat del Sol en aquell moment i A és l'albedo esfèric del planeta. L'albedo del planeta ve determinat per

$$A = (xA_g + LA + DA_e + DA_d) / x + D + L$$

on A_g és l'albedo del sòl nu i A_e i A_d són els albedos del sòl cobert de margarides clares i fosques respectivament. En estat constant se suposa que les margarides poden cobrir només el 70% del total del sòl.

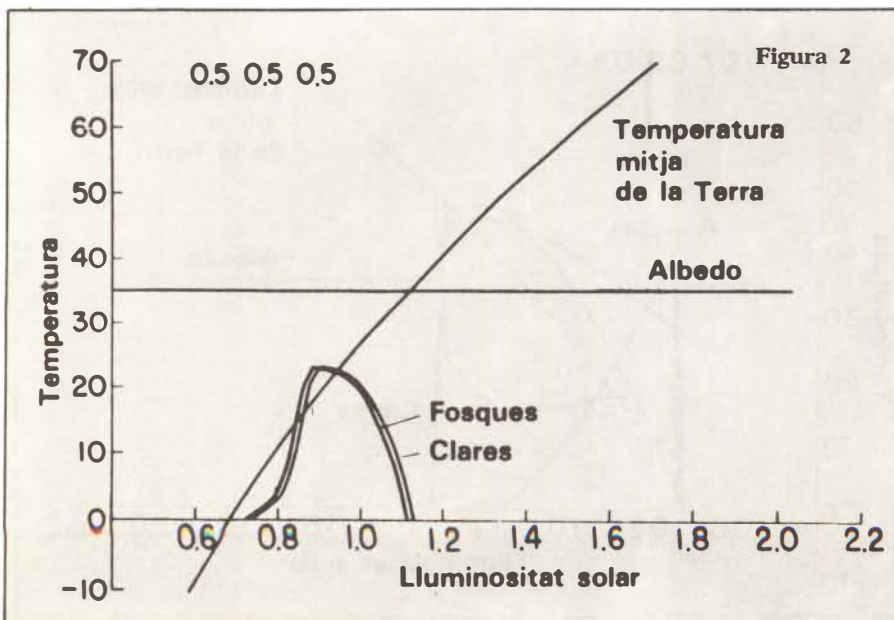
Les margarides completament negres (albedo 0) absorbeixen tota la llum i les completament blanques la reflecteixen tota, i posseeixen un albedo d'1,0. Un albedo de 0,4 significa que es reflecteix el 40% de la llum i l'organisme n'absorbeix el 60% restant. Hom parteix del supòsit que la lluminositat solar s'incrementa en funció del temps des del seu valor de 0,6 fins al doble aproximadament. Es considera que la temperatura òptima tant per a les margarides clares com per a les fosques és la mateixa: el creixement és nul per sota de 5 °C, s'incrementa en funció de la temperatura fins a arribar al nivell òptim a 20° C, i el ritme es fa decreixent a partir d'aquí fins a 40 °C, temperatura a la qual acaba tot creixement.

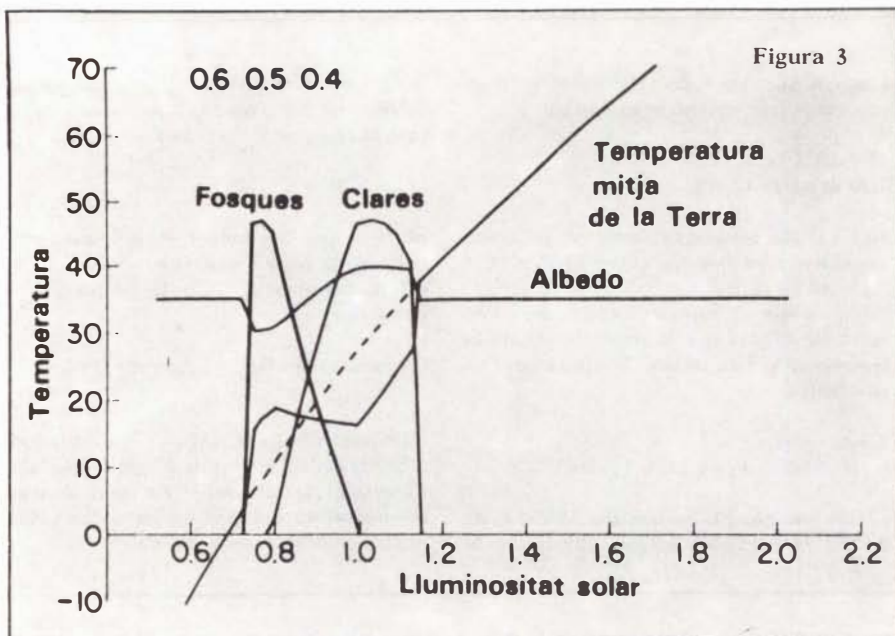
A temperatures més baixes, se suposa que les margarides més fos-

ques absorbeixen més calor, i per això creixen més ràpidament a la seva zona que les més clares. A temperatures més altes, les margarides clares reflecteixen i perden més calor, i això porta a un ritme de creixement més elevat a la seva zona. Arribats en aquest punt, observem algunes gràfiques. Aquells que no se sentin prou còmodes en les matemàtiques poden estalviar-se els nombres i passar directament a les conclusions.

A totes les gràfiques es dona per suposat que l'àrea total de la superfície disponible per al creixement és constant; a més, el "sòl fèrtil" no pot ser superior al 70% de la superfície del planeta. L'albedo del sòl s'estima arbitràriament constant i igual a 0,5. L'extensió de la terra estèril és el total de sòl menys el colonitzat per les margarides blanques i negres: $G = I - (L + D)$, on L és l'àrea coberta de "margarides clares" i D és l'àrea coberta de "margarides fosques". A fi de provocar el debat se suposa que ja que les margarides difereixen entre elles en les propietats de reflexió a mesura que cobreixen més sòl, la temperatura local d'una colònia de margarides fosques és poc o molt superior a la temperatura mitjana del planeta. Les margarides fosques assoleixen l'extensió màxima a temperatures més baixes (corbes D). Les clares generen temperatures inferiors a la mitjana. Per tant, creixen més ràpidament i assoleixen l'extensió màxima a temperatures més altes que la mitjana (corbes L).

Es reproduïen només quatre exemples de gràfiques generades pel





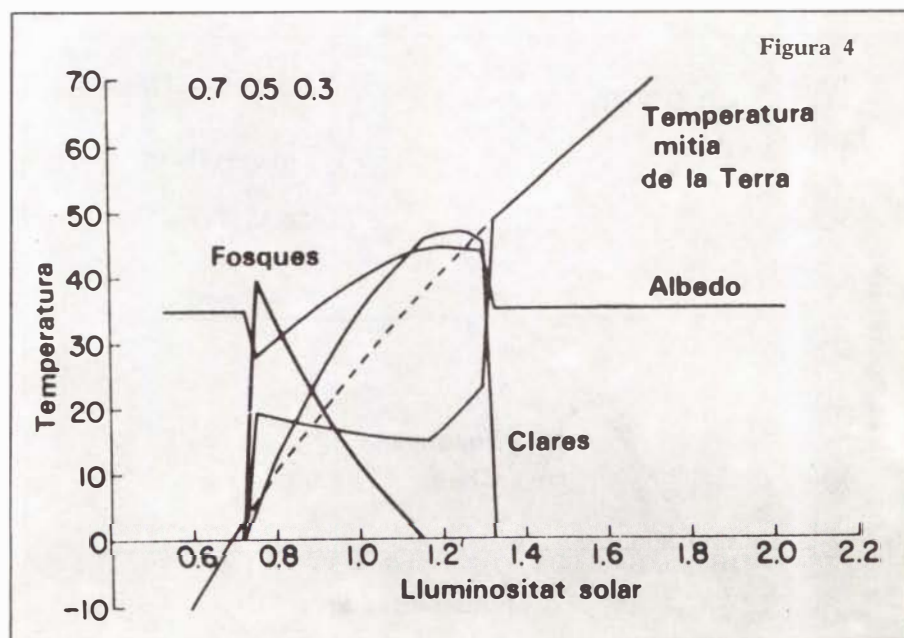
model, però es resumiran els resultats de moltes més. Les diferències entre les Figs. 2 i 5 impliquen canvis només en el valor del albedo de les margarides clares i fosques. La Fig. 1 mostra les margarides. La Fig. 2 mostra el moment en què les margarides clares i les fosques tenen totes el mateix albedo, idèntic també al del sol. En aquest exemple l'albedo del planeta roman constant a 0,5, i la temperatura mitjana de la Terra s'incrementa de manera constant en funció directa de la lluminositat solar. Com és sabut, per a molts organismes eucariòtics (aquells amb les cèl·lules nucleades), i tal com se suposa en les margarides d'aquest model, el creixement és simplement funció de la temperatura, que apareix cap a 5 °C i desapareix cap a 40 °C. El màxim ritme de creixement es dona entre 20° i 30 °C. A la Fig. 3 se suposa que l'albedo de les margarides clares és de 0,6, i el de les fosques, de 0,4. Sota aquestes condicions, quan hi ha diferència entre les margarides i el sol s'observa una tendència a l'homeòstasi: a temperatures baixes absorbeixen calor i creixen més de pressa (corba "fosques"). Les margarides clares, que perden calor i assoleixen densitats de població més grans a temperatures altes, comencen el seu ràpid creixement més tard, a valors més alts de lluminositat solar (corba "clares"). Això afecta tant la temperatura com l'albedo del Món de Margarides: la temperatura roman gairebé constant entre 0,8 i 1,2 lluminositats

solars. A més, s'assoleix una major densitat de població dels organismes, representada per les àrees sota les corbes de "fosques" i "clares", que quan es fan les suposicions utilitzades per a generar la Fig. 2.

A la Fig. 3, es pren 0,7 com a valor de l'albedo de les margarides clares, i 0,3 per al de les fosques. A la Fig. 4, els valors presos són 0,8 per a les clares i 0,2 per a les fosques. La quantitat de regulació s'estén damunt abastos relativament més grans de lluminositats solars en cada cas. La temperatura d'un món sense organismes la marca la línia discontinua. A lluminositats solars baixes, les margarides fosques s'escalfen més ràpidament i creixen més de pressa; moren totes quan les temperatures locals asso-

leixen els seus valors màxims. Les margarides clares tenen el límit vital a temperatures més elevades. En aquest punt, la temperatura retorna al valor que hauria tingut si no hi hagués organismes. Amb uns valors de 0,9 per a les clares i de 0,1 per a les fosques, la regulació de la temperatura del planeta va més enllà de 2,2 vegades la lluminositat solar. Això concorda amb l'observació que com més gran és la diferència entre els albedos de dues poblacions d'organismes més gran és la tendència a l'homeòstasi. Els models que permeten només uns tipus d'organismes (clars o foscos) condueixen a algun tipus de regulació de temperatura en la mesura que el seu albedo difereix del del sol. En el cas que només n'hi hagi d'una classe, però, la dimensió de la població total que es desenvolupa és menor que quan se'n representen de dues classes.

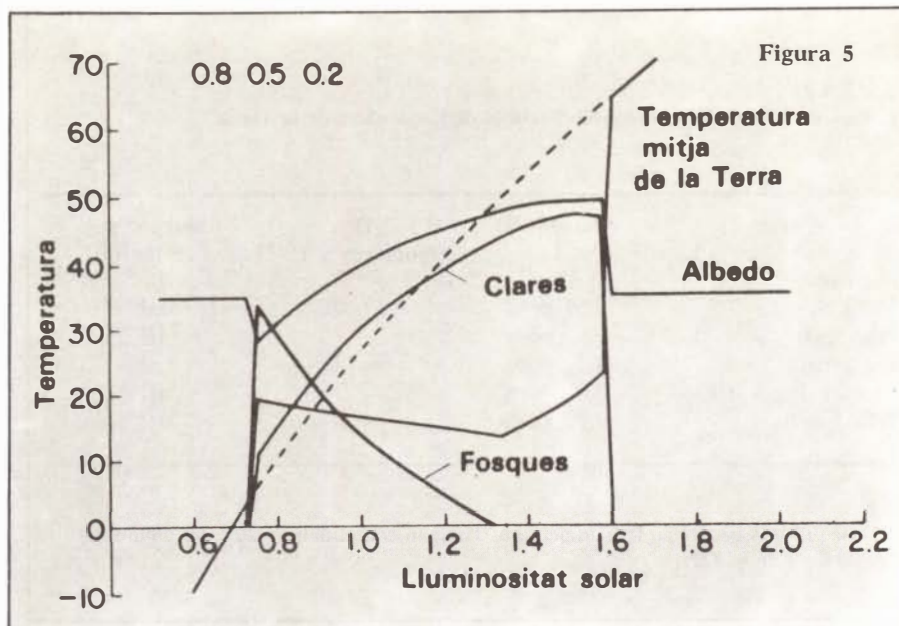
Hem dedicat força espai a comentar el model del Món de Margarides perquè és prou important de veure que les propietats d'amplificació del creixement exponencial sota temperatures canviant són suficients per elles mateixes per a explicar el començament d'un mecanisme d'homeorresi termal global. En general, un increment de la diversitat (la presència dels dos tipus de margarides i la diferenciació creixent entre els albedos dels organismes) porta a un increment de la capacitat de regulació i també a un increment de la dimensió total de la població.



El Món de Margarides no és sinó un model. Però malgrat la seva extremada simplificació, el model del Món de Margarides demostra força clarament que l'homeorresi termal de la biosfera no és pas tan misteriosa i que té un mecanisme. Per simplificació, suggereix d'altres anomalies observades, tals com la salinitat gairebé constant dels oceans al llarg de vastos períodes de temps, i la coexistència de gasos reactius a l'atmosfera que poden tenir explicacions relacionades activament amb els éssers vivents. La innovació radical aportada pel model del Món de Margarides és que *en principi l'homeorresi global és possible sense la negació de cap dogma conegut de la biologia*. El sistema gaia no ha de planejar per endavant ni s'ha de planificar perquè mostri tendències homeorrètiques. Un sistema biològic que actua cibernèticament ofereix una impressió de teleologia; si només s'establissin els resultats i no els processos de reciclatge, semblaria que els organismes haurien fet una mena de conspiració per assegurar-se la pròpia supervivència.

Els gasos reactius encara envolten la Terra

La hipòtesi gaia diu, en essència, que la totalitat de la Terra funciona com una màquina cibernètica gegant o com un organisme responsable. A part que moltes creences antigues i populars coincideixen amb concepcions similars, la formulació moderna de Jim Lovelock és atractiva perquè és el resultat d'una amalgama sòlida i moderna d'informació provinent de diverses disciplines científiques. Potser el cos més consistent d'evidència no li ve de les demostracions de la regulació termal que es troben al model del Món de Margarides, sinó del camp propi de Lovelock: la química atmosfèrica. Val a dir que Lovelock és inventor a més de científic. Ha ideat el "mecanisme de captura d'electrons", un sensor per a cromatògrafs de gasos que detecta el freó i d'altres compostos halogenats en força menys de tres parts per milió a l'aire. De fet, l'invent i les observacions de Lovelock foren les gus-



pires que encengueren les preocupacions ecològiques per l'esgotament de l'ozó, els càncers produïts pels raigs ultravioleta i la catàstrofe atmosfèrica general.

Des d'un punt de vista químic, l'atmosfera de la Terra és anòmala. Veiem a la Taula 1 que no tan sols els gasos importants, com el nitrogen, sinó també els gasos menys abundants, com el metà, l'amoniac o el diòxid de carboni són presents amb uns nivells molts ordres de magnitud superiors a aquells que corresponen a un planeta amb un 20% d'oxigen lliure a la seva atmosfera. Aquesta superabundància de gasos reduïts en una atmosfera oxidant va ser el que inicialment va convèncer Lovelock que no calia que la nau Viking anés a Mart a

pràcticament no hi ha oxigen lliure, mentre que a la de la Terra el component principal de l'atmosfera és el nitrogen, i l'oxigen constitueix ben bé una cinquena part del total de l'aire.

La Taula 2 compara l'atmosfera de la Terra amb vida i la que se suposa que hi hauria sense vida. Una Terra sense vida seria calenta, envoltada de diòxid de carboni i sense oxigen respirable. La Terra seria molt més semblant als seus veïns (Fix. X). En un sistema químicament estable, el nitrogen i l'oxigen reaccionarien i formarien grans quantitats d'òxids de nitrogen verinosos. El fet que aquests gasos, inestables en presència dels altres, com l'oxigen, l'hidrogen i el metà, es mantinguin a la Terra en grans quantitats, hauria de convèncer tots els pensadors racionals perquè reexaminessin l'*status quo* de la ciència tal i com s'ensenya als llibres de text, i s'adonessin que hi ha hagut una atmosfera molt passiva des de fa molt, molt de temps, que resulta que conté, en termes químics, una sèrie de violents gasos reactius en una concentració adequada per a la major part de la vida.

A la teoria gaia de l'atmosfera, la vida sintetitza i elimina contínuament els gasos necessaris per a la seva pròpia supervivència. La vida controla la composició dels gasos reactius de l'atmosfera. Mart i Venus, i la hipotètica Terra sense vida, tenen totes atmosferes químicament estables, compostes en més d'un 95% de diòxid de carboni. No

(Una Terra sense vida seria calenta, envoltada de CO₂ i sense oxigen)

veure si hi havia vida. Senzillament, veient l'atmosfera de Mart, una atmosfera d'acord amb els postulats de la química de l'equilibri, hom podia deduir que allí no hi havia vida.¹³ L'atmosfera de la Terra, de fet, no és en absolut allò que caldria esperar amb una simple interpolació de les atmosferes de Mart i de Venus. En aquelles, hi ha principalment diòxid de carboni, i

TAULA 1:
Composició de gasos i desequilibri relatiu de l'atmosfera de la Terra*

Gas	Abundància	flux (mols/any x 10 ¹³)	Factor de desequilibri
Nitrogen	78%	3,6	10 ¹⁰
Metà	1.5 ppm	6,0	10 ³⁰
Hidrogen	0.5 ppm	4,4	10 ³⁰
Òxid nítrós	0.3 ppm	1,4	10 ¹³
Monòxid de carboni	0.08 ppm	2,7	10 ³⁰
Amoníac	0.01 ppm	8,8	10 ³⁰

* Desequilibris basats en l'assumpció que l'oxigen constitueix el 20% del volum de l'atmosfera de la Terra.

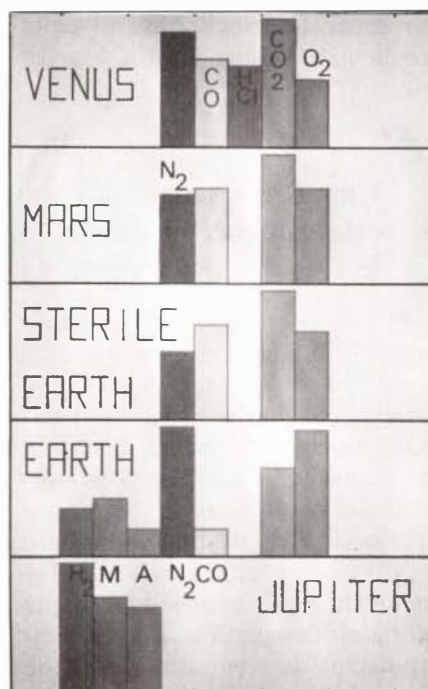
obstant això, la Terra en la qual vivim només té un 0,03% d'aquest gas estable en la seva atmosfera. L'anomalia es deu, en gran part, a una faceta de les operacions de Gaia, el procés de la fotosíntesi. La fotosíntesi dels bacteris, de les algues i de les plantes extreu contínuament diòxid de carboni de l'aire. Part d'aquest gas s'incorpora a estructures sòlides, com dics de calcàries i, eventualment, closques d'animals. Els cossos de plantes i els bacteris fotosintètics morts, igualment que totes les altres formes de vida que consumeixen organismes fotosintètics, s'incorporen al sòl en forma de carboni orgànic o reduït. Amb la utilització de l'energia solar per convertir el diòxid de carboni en carbonats càlcics o en materials orgànics, i més tard, amb llur mort, les plantes, les algues, i els bacteris fotosintètics han atrapat i enterrat el diòxid de carboni, que segons els geoquímic era un gas abundant en l'atmosfera antiga de la Terra. Si no hagués estat per la vida, el diòxid de carboni seria un dels gasos principals de la nostra atmosfera fins i tot avui.

Microbis i Gaia

Els bacteris, les primeres formes de vida que aparegueren, semblava de fet que són el centre del fenomen Gaia. Els bacteris fotosintètics sepultaven el carboni del diòxid fa milions d'anys abans del desenvolupament d'animals i plantes.

A més, els metanògens i alguns d'oxigen lliure, havien estat relacionats amb la regulació Gaia dels gasos atmosfèrics des de bon començament. Des d'un punt de vista Gaia, els animals, tots coberts i envaïts per bacteris canviadors de gasos, podien ser simplement una manera adequada de distribuir més nombrosament aquells bacteris, fins i tot per tota la superfície del Globus. Els animals, i fins i tot les plantes, entren molt tard a l'escena

Taula 2.
Composició de les diferents atmosferes dels planetes (segons dibuix original de Jim Lovelock).



Gaia. Les primeres comunitats d'organismes que extreien diòxid de carboni atmosfèric a gran escala han d'haver estat els bacteris fotosintètics. De fet, tenim un registre directe de les seves activitats en forma de fòssils. Aquests membres del món microbià antic constituïen mortalles microbianes complexes, algunes de les quals s'han preservat com a estructures estromatolítiques (Fig. 6). Malgrat que tals comunitats de microorganismes consumidors de diòxid de carboni encara prosperen avui dia, les han suplantades i camuflades unes altres comunitats més grans d'organismes, com els boscos i els dics de corall.

Per mantenir la temperatura i la composició dels gasos a valors habitables, la vida –i encara estem parlant essencialment de vida microbiana– reacciona davant les amenaces d'una manera controlada, que sembla feta a posta. De tot això deduïm que la composició dels gasos i la temperatura han d'haver romàs estables al llarg de grans períodes de temps. Per exemple, si el percentatge d'oxigen atmosfèric hagués decregut només uns quants punts, tota la vida animal que necessita concentracions altes d'oxigen hauria mort. D'altra banda, tal i com Andrew Watson ha demostrat, un increment en el nivell de l'oxigen atmosfèric hauria portat a perillosos incendis forestals.³ Un petit increment en l'oxigen comportaria que les incendis es propagessin fins i tot si queien llamps a boscos humits. Així, la quantitat d'oxigen de l'atmosfera deu haver romàs relativament constant des del moment que els animals que respiren aire van començar a viure als boscos –d'això fa uns 300 milions d'anys–. De la mateixa manera que les abelles i els tèrmitz controlen la temperatura i la humitat de llurs ruscos i nius, d'alguna manera la biota controla la concentració d'oxigen i d'altres gasos a l'atmosfera de la Terra.

Els escèptics

Aquest d'alguna manera preocupa i enfurisma alguns dels biòlegs darwinians més tradicionals. El problema general més seriós que impedeix la total acceptació de la

hipòtesi gaia consisteix en les implicacions de previsió i planificació de les capacitats que la hipòtesi gaia dóna a entendre per a reaccionar contra les crisis imminents i evitar les catàstrofes ecològiques. Els escèptics tradicionalistes es demanen com és possible que les ingents quantitats de gens que es debaten a l'interior de les cèl·lules dels organismes de la superfície de la Terra *sàpiguen* com regular les macrocondicions com la composició dels gasos i la temperatura.

El biòleg molecular W. Ford Doolittle, per exemple, un home que per raons del seu treball potser està més predisposat a contemplar l'evolució a petita escala que no pas a gran escala, veu la hipòtesi gaia com a insostenible, com a teoria "maternal" de la natura, sense mecanisme.⁶ Doolittle, membre del Departament de bioquímica de la Universitat de Dalhousie, a Nova Scotia, Canadà, encara no accepta la hipòtesi gaia.

Un altre científic, l'evolucionista de la Universitat d'Oxford Dawkins, encara és més taxatiu en el rebuig de la teoria. La compara amb el "teorema de la BBC" (és una referència pejorativa al concepte dels documentals televisius de la natura com a meravellós equilibri harmònic). Dawkins troba una dificultat extrema per a imaginar-se una situació realista en la qual hagués actuat el mecanisme gaia en la perpetuació de la vida com a fenomen planetari. Dawkins, autor de *The Selfish Gene*, només pot concebre l'evolució de l'homeòstasi planetària en relació a la "selecció interplanetària": "L'univers hauria estat ple de planetes estèrils el sistema de regulació hemeostàtica dels quals hauria fallat, i entre ells, es trobaria un grapat de planetes afortunats i ben regulats, un dels quals fóra la Terra".¹⁴

Aquests arguments poden semblar molt taxatius, però si els crítics de Gaia no poden acceptar la noció de planeta en tant que entitat amorfa, però d'alguna manera biològica viable, han de tenir motius iguals, si no superiors, per a rebutjar l'origen de la vida. Segurament, en un moment de la història de la Terra, va existir una cèl·lula bacteriana homeostàtica simple que no va haver de lluitar amb les altres cèl·lules

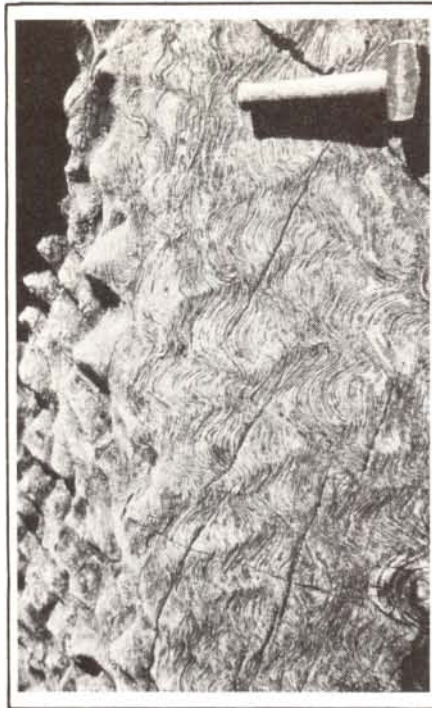


Fig. 6
Stromatolits: bacteris que formen estructures semblants a roques.

per sobreviure, perquè no n'hi havia cap més. La gènesi de la primera cèl·lula ja no pot explicar-se amb un punt de partida estrictament darwinian de lluita entre individus egoistes, tant la primera cèl·lula com el planeta actual poden interpretar-se com a éssers individuals, són sols del camp de la genètica de la població moderna.

(Els microbis tenen un paper decisiu en el control de compostos rars i reactius)

De tota manera, Lovelock, que és un home sensible però amb un profund sentit de l'agudesia intel·lectual, ha respost als seus crítics amb una de llurs armes preferides: fent models matemàtics de la manera que s'ha exposat abans, el Món de Margarides.¹⁵ Els crítics de Lovelock, que no creien que la temperatura i els gasos de la Terra haguessin estat regulats amb precisió mecànica durant milers de milions d'anys, perquè els organismes possiblement no poden planificar per

endavant, van rebutjar la seva personificació del planeta en una entitat femenina responsable anomenada Gaia. Com que al començament no s'hi veu un mecanisme explícit, i cau fora del principal paradigma darwinian de l'egoisme individualista, era difícil, i a vegades encara ho és, que els evolucionistes experts no contemplessin Gaia com la darrera deïficació de la Terra. Ells fan la següent pregunta: com pot ser que una massa heterogènia de microbis desarticulats que es barallen entre si aconseguixin algun tipus d'acord global, fins a un punt que ens permeti de concebre la Terra com un organisme únic? Per descomptat, la resposta és el tipus d'anàlisi practicada al Món de Margarides, i hom encara espera que aquells que acusen Lovelock de misticisme conscient i d'ecologia "pop" ho demostrin en tota la seva intrincada matemàtica.

A la vida real, oposada al Món de Margarides, els microbis fan un paper decisiu en la producció contínua i en el control de compostos rars i reactius. També són els responsables, possiblement a través de la producció de gasos que retenen calor (més que no pas l'albedo dels organismes de la superfície), de l'antiga termotaxi de la Terra. Des del punt de vista de l'evolució, els microbis són els protagonistes de l'establiment del sistema gaia. En aquest sentit, com que les formes superiors de vida són essencialment conjunts de microbis que s'interaccionen, el fenomen gaia pot concebre's completament com un fenomen microbià. Nosaltres, formats de microbis, som part de Gaia.

La gent com a part de Gaia

Ecològicament parlant, la hipòtesi gaia ben just si reserva un lloc especial al pantó de la vida als éssers humans. Recentment apareguts i, per tant, immadurs en el sentit Gaia estricte, els éssers humans fa ben poc que s'han integrat a l'escena biològica global. La nostra relació amb Gaia encara és superficial. D'una banda, el nostre potencial bàsic com a *sistema nerviós de reaccions ràpides* encara no



Fig. 6
Superfície de Mart.

ha estat superat. Desviar a l'espai la caiguda d'asteroides, o colonitzar de vida altres planetes, serien addicions al repertori gaia que ara podríem ajudar a realitzar. D'altra banda, Gaia va ser un desenvolupament crucial en la història del passat evolutiu de la vida. Tan sols conciliant-nos amb els envitricolls de Gaia podem esperar descobrir la manera com la biota ha controlat la temperatura, la composició de l'atmosfera i altres factors, al voltant de punts operatius òptims per a la vida, en els darrers dos o tres mil milions d'anys. Al costat del seu intrínsec valor filosòfic, la plena exploració científica dels mecanismes de control gaia és probablement el camí més segur per a arribar a utilitzar amb èxit hàbitats autònoms a l'espai. Si mai projectem grans estacions espacials que reproduïxin els seus subministaments vitals, haurem d'estudiar la tecnologia natural de Gaia. De manera encara més ambiciosa, l'habitabilització d'un altre planeta, Mart per exemple, per tal que hi pugui haver éssers humans vivint efectivament a l'aire lliure, és una tasca gegant que només pot ser imaginable des d'una perspectiva gaia.

Referències

- ¹ Lovelock J.E.: 1982. *A new look at life on Earth*. Oxford University Press. Nova York i Londres.
- ² Margulis L. i Lovelock J.E.: 1974. Biological modulation of the Earth's atmosphere. *Icarus* 21: 471-489.
- ³ Watson A.; Lovelock J.E. i Margulis L.: 1978. Methanogenesis, fires and the regulation of atmospheric oxygen. *Bio-Systems*, 10: 293-298.
- ⁴ Shukla J. i Mintz, Y.: 1982. Influence on the land-surface evapotranspiration of the Earth's climate. *Science*, 215: 1498-1501.
- ⁵ Botkin D.B. i Keller E.A.: 1982. *Environmental Studies: The Earth as a Living Planet*. Chas. E. Merrill Publishers, Columbus OH.
- Hutchinson B.E.: 1954 *Biogeochemistry of Vertebrate Excretion*. American Museum of Natural History, Nova York.
- ⁶ Doolittle W.F.: 1981. Is nature really motherly? *CoEvolution Quarterly*, 29: 58-63.
- Garrels R.M.; Lerma A. i MacKenzie F.T.: Controls of atmospheric oxygen: past, present and future. *American Scientist*, 61: 306-315.
- ⁷ Margulis L.: 1982. *Aearly Life*. Science Books International Boston.
- Schopf J.W. ed; 1983. *Precambrian Paleobiology Research Group REport*. Princeton. Walters, M.J. de; 1976. *Stromatolites: Developments in Sedimentology*, Vol. 20. Elsevier, Amsterdam, Oxford i Nova York.
- ⁸ Awramik S.M.; Schopf J.W. i Walter M'R.: 1983. Filamentous fossil bacteria from the archaean of Western Australia. *Precambrian Research*, vol. 20, pp. 357-374, 1983.
- ⁹ Newman M.J.; 1980. Evolution of the solar "constant". in *Limits to Life*. C. Ponnamperuma i L. Margulis, eds; Reidel Publishing Co. Dordrecht, Holanda.

¹⁰ Waddington C.H.: 1976. notes definitives a *Evolution and Consciousness*. E. Jantsch i C.H. Waddington, eds. Addison Wesley Publ. Co. Reading, MA.

¹¹ Lovelock J.E., 1983. Gaia as seen through the atmosphere in *The Fourth International Symposium on Biomineralisation*. P. Westbroek i E. de Jong, eds. Reidel Publishing Co. Dordrecht, Holanda.

¹² Watson A., i Lovelock J.E., 1983. Biological homeostasis of the global environment: The parable of "daisy world". *Tellus*, en premsa.

¹³ Margulis L. i Lovelock J.E.: 1980. After Viking: Life on Eath. *The Sciences*, Novembre, p. 24-26.

¹⁴ Dawkins R.: 1982. *The Extended Phenotype*. W.H. Freeman Company.

¹⁵ Lovelock, J.E.: 1983. Daisy World: a Cybernetic Proof of the Gaia H y pothesis. *CoEvolution*, p. 66-72.

* Dorion Sagan és graduat en història per la Universitat de Massachusetts, Amherst, el 1981, i autor de diverses publicacions científiques.

Lynn Margulis és professora de biologia de la Universitat de Boston des de fa setze anys. Estudia el paper de les simbiosis bacterianes a l'evolució de les cèl·lules encariotes.
