

101

CONCEPTOS BÁSICOS DE ASTROBIOLOGÍA



David Barrado y Susana Cabanero
EDITORES



David Barrado y Susana Cabanero (eds.)

101

CONCEPTOS BÁSICOS DE ASTROBIOLOGÍA

Astrobiology 101
concepts

EDITA
PUBLISHED BY:



EN COLABORACIÓN CON:
IN COLLABORATION WITH:



Código Ministerio:
MCIN/AEI/
10.13039/501100011033/MDM-2017-0737

NIPO (edición impresa):
078-22-005-2

NIPO (edición en línea)
078-22-006-8

Depósito legal:
M 31082-2022

ISBN
978-84-9091-727-5

EDITORES

EDITORS:

David Barrado y Susana Cabañero

COORDINADORES

COORDINATORS:

David Barrado, Susana Cabañero, Felipe Gómez, Benjamín Montesinos, Marta Ruiz Bermejo, Daniel Viúdez-Moreiras

REDACTORES

CONTRIBUTORS:

David Barrado, Antonio Molina, Felipe Gómez, Benjamín Montesinos, José Antonio Rodríguez-Manfredi, Daniel Viúdez-Moreiras, Ester Lázaro Lázaro, Guillermo M. Muñoz Caro, Carlos Briones, Eduardo Sebastián, María Paz Zorzano, Jorge Pla-García, Ángeles Aguilera, Cristóbal Bordiú, Cristina Cid, Laura García-Descalzo, Elena González-Toril, Alain Lepinette Malvitte, Carolina Martín-Rubio, Eva Mateo-Martí, Marta Ruiz Bermejo, Carmen Sánchez Contreras, Laura Sánchez-García, Jesús Sobrado, Eva Villaver, Miguel Arribas-Tiemblo, Jacobo Aguirre, Carlos Cifuentes, Nuria Huélamo, Eduardo Alonso-Pintado, Armando Azua-Bustos, Daniel Carrizo, Eduardo Cueto-Díaz, José Eduardo González-Pastor, Isabel Herreros, David Hochberg, Jorge Lillo-Box, Salvador Mirete, Victoria Muñoz Iglesias, Jens Ormö, Olga Prieto Ballesteros, Jorge Sanz Forcada, Roser Urquí O'Callaghan, Montserrat Villar, Yolanda Blanco, Patricia Cruz, María Ángeles Lezcano, Emilio Gómez Marfil, Jesús Martín-Pintado, Mercedes Moreno-Paz, Víctor M. Rivilla, Rita Severino, Héctor Vives-Arias, Víctor Parro

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)

Junio 2023

ÍNDICE GENERAL / INDEX

101 Conceptos de Astrobiología / Astrobiology 101 concepts	5	6. ANTRÓPICO O COSMOLÓGICO, PRINCIPIOS.....	38
ÍNDICE GENERAL	7	ANTHROPIC OR COSMOLOGICAL PRINCIPLE.....	39
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14	7. ATMÓSFERAS: REDUCTORAS Y OXIDANTES, CONEXIÓN BIOLÓGICA.....	40
PRÓLOGO.....	19	ATMOSPHERES: REDOX, BIOLOGICAL CONNECTION	41
FOREWORD.....	19	8. ARQUEA.....	46
¿QUÉ ES LA ASTROBIOLOGÍA?	22	ARCHAEA.....	47
¿WHAT IS ASTROBIOLOGY?.....	23	9. BACTERIA	50
1. ACRECIMIENTO	26	BACTERIA	51
ACCRETION	27	10. BIODIVERSIDAD.....	54
2. ABIOGÉNESIS.....	26	BIODIVERSITY	55
ABIOGENESIS.....	27	11. BIOMARCADOR, FÓSIL QUÍMICO	56
3. ADAPTACIÓN BIOLÓGICA.....	28	BIOMARKER, CHEMICAL FOSSIL	57
BIOLOGICAL ADAPTATION	29	12. BIOPOLÍMERO	60
4. AGUA	30	BIOPOLYMER	61
WATER.....	31	13. BIOSFERA.....	64
5. ANÁLOGOS TERRESTRES.....	34	BIOSPHERE.....	65
TERRESTRIAL ANALOGS.....	35		

14. BIOSENSOR	68	22. CRÁTERES DE IMPACTO:	
BIOSENSOR	69	FORMACIÓN Y TIPOS.....	96
15. CÁMARAS DE SIMULACIÓN		IMPACT CRATERS:	
PLANETARIA.....	72	FORMATION AND TYPES.....	97
PLANETARY SIMULATION CHAMBERS	73	23. CRONOESTRATIGRAFÍA.....	102
16. CÉLULA.....	76	CHRONOSTRATIGRAPHY.....	103
CELL	77	24. CUASIESPECIE.....	106
17. CICLO HIDROLÓGICO EN MARTE.....	80	QUASISPECIES	107
HYDROLOGIC CYCLE ON MARS	81	25. DIAGRAMA	
18. CIVILIZACIONES EXTRATERRESTRES,		HERTZSPRUNG-RUSSELL (H-R)	110
INICIATIVA SETI,		HERTZSPRUNG-RUSSELL	
ECUACIÓN DE DRAKE	82	(H-R) DIAGRAM	111
EXTRATERRESTRAL CIVILIZATIONS,		26. DINÁMICA QUÍMICA.....	114
SETI INITIATIVE, DRAKE EQUATION	83	CHEMICAL DYNAMICS	115
19. COMETA, EXOCOMETA.....	86	27. DISCOS CIRCUNESTELARES:	
COMET, EXOCOMET	87	PROTOPLANETARIOS Y DE DEBRIS.....	116
20. COMPLEJIDAD.....	90	CIRCUMSTELLAR DISKS:	
COMPLEXITY	91	PROTOPLANETARY AND DEBRIS DISKS	117
21. CORONA: SOLAR Y ESTELAR.....	94	28. ECOLOGÍA MICROBIANA.....	118
SOLAR AND STELLAR CORONA.....	95	MICROBIAN ECOLOGY.....	119

29. ECOSISTEMA ENDOLÍTICO120	38. EXOPLANETA / EXOPLANETAS, TIPOS:
ENDOLITHIC ECOSYSTEM121	SUPERTIERRA, MININEPTUNO,
30. ENTROPÍA124	JÚPITER CALIENTE,
ENTROPY, ENERGY AND LIFE125	PLANETA ROCOSO / [EXOTIERRA].....150
31. ESPECTROSCOPÍA.....126	EXOPLANET / EXOPLANETS, TYPES:
SPECTROSCOPY.....127	SUPER-EARTH, MININEPTUNE,
32. ESTRELLA.....130	WARM JUPITER,
STAR131	ROCKY PLANET / [EXOTHERRA].....151
33. ESTRELLAS BINARIAS	39. EXOPLANETAS:
EN INTERACCIÓN.....134	MÉTODOS DE DETECCIÓN.....154
INTERACTING BINARY STARS.....135	EXOPLANETS:
34. ESTROMATOLITOS136	DETECTION METHODS.....155
STROMATOLITES137	40. EXPLORACIÓN ESPACIAL:
35. EUKARYA140	PREPARACIÓN PARA
EUKARYA140	LA EXPLORACIÓN HUMANA.....158
36. EVOLUCIÓN BIOLÓGICA.....144	SPACE EXPLORATION:
BIOLOGICAL EVOLUTION145	PREPARING FOR HUMAN
37. EVOLUCIÓN ESTELAR.....148	EXPLORATION159
STELLAR EVOLUTION.....149	41. EXTREMÓFILO / AMBIENTES
	EXTREMOS160
	EXTREMOPHILE / EXTREME
	ENVIRONMENTS161

42. FILOGENIA.....162	51. INTERACCIÓN ESTRELLA-PLANETA:
PHYLOGENY163	CLIMA ESPACIAL.....194
43. FIRMAS ISOTÓPICAS166	STAR-PLANET INTERACTION:
ISOTOPIC SIGNATURES.....167	SPACE WEATHER195
44. FUERZAS DE MAREA.....170	52. INTERACCIONES MINERAL-AGUA198
TIDAL FORCES.....171	MINERAL-WATER INTERACTIONS199
45. GALAXIA, VÍA LÁCTEA174	53. INTERACCIÓN SUELO-ATMÓSFERA200
GALAXY, MILKY WAY175	SOIL-ATMOSPHERE INTERACTION.....201
46. GEN176	54. LUCA.....202
GENE177	LUCA.....203
47. HABITABILIDAD: EN MARTE,	55. MARS 2020, MISIÓN
EN OTROS PLANETAS.....180	DE EXPLORACIÓN DE MARTE206
HABITABILITY OF MARS,	MARS 2020, MARS EXPLORATION
PLANETARY HABITABILITY181	MISSION207
48. HIDROTHERMAL, SISTEMA182	56. MARTE.....210
HYDROTHERMAL, SYSTEM183	MARS211
49. HIELOS.....186	57. MARTE, REGIONES ESPECIALES
ICE187	DE MARTE.....212
50. INSTRUMENTO ESPACIAL190	MARS, SPECIAL REGIONS OF MARS213
SPACE INSTRUMENT.....191	58. MARTE, TORRENTERAS
	O CÁRCAVAS216
	MARS: GULLY, GULLIES217

59. MEDA, INSTRUMENTO EN MARS 2020220 MEDA, MARS 2020 INSTRUMENT221	66. MODELADO Y SIMULACIÓN PLANETARIA.....242 PLANETARY MODELING AND SIMULATION243
60. METABOLISMO224 METABOLISM225	67. MUESTRAS PLANETARIAS, RETORNO244 PLANETARY SAMPLES, RETURN OF245
61. METALICIDAD.....226 METALLICITY227	68. MUNDOS OCEÁNICOS246 OCEAN WORLDS247
62. METANO MARCIANO: DETECCIÓN Y CONTROVERSA.....228 MARTIAN METHANE: DETECTION AND CONTROVERSY229	69. MUTACIÓN250 MUTATION.....251
63. METEORITOS232 METEORITES233	70. NEA, NEO Y PHA: ASTEROIDES POTENCIALMENTE PELIGROSOS.....254 NEA, NEO AND PHA: POTENTIALLY HAZARDOUS ASTEROIDS.....255
64. METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA EXTRATERRESTRE234 METEOROLOGY AND EXTRATERRESTRIAL CLIMATOLOGY235	71. PALEOAMBIENTES PLANETARIOS256 PLANETARY PALEOENVIRONMENTS257
65. MISIONES PLANETARIAS EN EL SISTEMA SOLAR238 PLANETARY MISSIONS IN THE SOLAR SYSTEM239	72. PALEOATMÓSFERA.....258 PALEOATMOSPHERE.....259
	73. PANSPERMIA262 PANSPERMIA263

74. PDS Y PSA (ACRÓNIMOS): SISTEMA DE DATOS PLANETARIOS Y ARCHIVO DE CIENCIAS PLANETARIAS264	81. QUÍMICA ATMOSFÉRICA, OZONO Y OTROS GASES290
PDS AND PSA (ACRONYMS): PLANETARY DATA SYSTEM AND PLANETARIAN SCIENCE ARCHIVES265	ATMOSPHERIC CHEMISTRY, OZONE AND OTHER GASES291
75. PERCLORATO268	82. QUÍMICA EN EL MEDIO INTERESTELAR Y CIRCUNESTELAR292
PERCHLORATE269	CHEMISTRY IN THE INTERSTELLAR AND CIRCUMSTELLAR ENVIRONMENT293
76. PERMAFROST272	83. QUÍMICA PREBIÓTICA296
PERMAFROST273	PREBIOTIC CHEMISTRY297
77. POLÍMEROS INFORMACIONALES: ADN, ARN Y PROTEÍNAS276	84. QUIMIOLITOTROFÍA300
INFORMATIONAL POLYMERS: DNA, RNA AND PROTEINS277	CHEMOLITHOTROPHY301
78. POLVO INTERESTELAR E INTERPLANETARIO280	85. QUIRALIDAD, HOMOQUIRALIDAD302
INTERSTELLAR AND INTERPLANETARY DUST281	CHIRALITY, HOMOCHIRALITY303
79. PROTECCIÓN PLANETARIA282	86. RADIACIÓN, RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y ESPACIAL306
PLANETARY PROTECTION283	RADIATION, ULTRAVIOLET AND SPACE RADIATION307
80. PROTEÍNA286	87. RADIÓMETRO310
PROTEIN287	RADIOMETER311
	88. REGOLITO314
	REGOLITH315

89. REMS, INSTRUMENTO EN EL RÓVER CURIOSITY, MISIÓN MSL316	96. TWINS, INSTRUMENTO EN LA SONDA INSIGHT328
REMS, INSTRUMENT ON THE CURIOSITY ROVER, MSL MISSION317	TWINS, INSTRUMENT ON INSIGHT PROBE329
90. SISTEMA SOLAR320	97. UTILIZACIÓN DE RECURSOS ...IN SITU340
SOLAR SYSTEM321	USE OF IN SITU RESOURCES341
91. SOL322	98. VIDA, ACTIVIDAD BIOLÓGICA344
SUN323	LIFE, BIOLOGICAL ACTIVITY345
92. SUPERFICIES MINERALES326	99. VIRUS348
MINERAL SURFACES327	VIRUS349
93. TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS: NUCLEOSÍNTESIS Y RELEVANCIA ASTROBIOLÓGICA328	100. XERÓFILOS352
PERIODIC TABLE OF THE CHEMICAL ELEMENTS: NUCLEOSYNTHESIS AND ASTROBIOLOGICAL RELEVANCE329	XEROPHILES353
94. TIERRA, EL FUTURO332	101. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA354
THE FUTURE OF THE EARTH333	HABITABILITY ZONE, GALACTIC HABITABILITY ZONE355
95. TORMENTA DE POLVO MARCIANA334	LECTURAS ADICIONALES / FURTHER READING359
MARTIAN DUST STORM335	

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURE INDEX

Figura 1:

Acreción.

Accretion 27

Figura 2:

Diagrama de estabilidad de las fases del agua.

Water phase stability diagram. 33

Figura 3:

Imagen de afloramientos de carbonatos marinos.

Image of marine carbonate outcrops. 34

Figura 4:

Surgimiento hidrotermal de Dallol, en la depresión de Danakil (Etiopía).

Hydrothermal upwelling of Dallol, in the Danakil depression (Ethiopia). 37

Figura 5:

Espectros de la atmósfera de la Tierra en las diferentes fases evolutivas. Spectra of the Earth's atmosphere in different evolutionary phases. 42

Figura 6:

Composición de la atmósfera terrestre previa a la aparición de la vida (izquierda) y a día de hoy (derecha).

Composition of Earth's early (left) and current (right) atmosphere. 43

Figura 7:

Dominios del árbol de la vida.

Domains of the tree of life. 47

Figura 8:

Tapetes de bacterias en arroyos hidrotermales.

Bacterial mats in hydrothermal streams. 52

Figura 9:

Ejemplos de fósiles moleculares.

Examples of molecular fossils. 59

Figura 10:

Segmento de una cadena de ADN y detalle.

Segment of a DNA strand and detail. 62

Figura 11:

Espectro.

Spectrum. 71

Figura 12:

Cámara de simulación.

Simulation chamber. 72

Figura 13:

Células.

Cells. 78

Figura 14:

Diagrama de condiciones atmosféricas.

Atmospheric conditions diagram. 81

Figura 15:

El cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko 1 (1969 R1), observado por la misión europea Rosetta.

Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko 1 (1969 R1), observed by the European mission Rosetta. 88

Figura 16:

Bucles coronales.

Coronal loops. 97

Figura 17: <i>Cráter Barringer, Arizona.</i> <i>Meteor Crater, Arizona.....</i>	98	Figura 26: <i>Métodos de detección de exoplanetas.</i> <i>Exoplanet detection methods.</i>	154
Figura 18: <i>Unidades cronoestratigráficas.</i> <i>Chronostratigraphic units.</i>	105	Figura 27: <i>Técnicas de detección de planetas.</i> <i>Planet detection techniques.....</i>	155
Figura 19: <i>Diagrama de Hertzsprung-Russell.</i> <i>Hertzsprung-Russell diagram.....</i>	112	Figura 28: <i>Método del tránsito.</i> <i>Transit method.</i>	157
Figura 20: <i>Evolución de una reacción química con el tiempo.</i> <i>Evolution of a chemical reaction over time.</i>	115	Figura 29: <i>Árbol filogenético.</i> <i>Phylogenetic tree.....</i>	165
Figura 21: <i>Discos circunestelares.</i> <i>Circumstellar discs.....</i>	116	Figura 30: <i>Fuerzas de marea.</i> <i>Tidal forces.....</i>	172
Figura 22: <i>El efecto Doppler.</i> <i>The Doppler effect.</i>	129	Figura 31: <i>Secuencia de imágenes que muestra la Tierra saliendo tras el horizonte lunar.</i> <i>Sequence of images showing the Earth rising behind the lunar horizon.....</i>	173
Figura 23: <i>Mecanismos de formación de un estromatolito.</i> <i>Mechanisms of stromatolite formation.</i>	139	Figura 32: <i>La galaxia espiral M81.</i> <i>The spiral galaxy M81.....</i>	175
Figura 24: <i>Familias de planetas según el tamaño.</i> <i>Families of planets according to its size.....</i>	152	Figura 33: <i>Secuenciación de genes.</i> <i>Gene sequencing.....</i>	179
Figura 25: <i>Recreación artística de un objeto de masa planetaria joven.</i> <i>Artistic recreation of a young planetary mass object.....</i>	153		

Figura 34: <i>Sistema hidrotermal.</i> <i>Hydrothermal system.</i>	183	Figura 42: <i>Aumentos repentinos de metano en el lugar de aterrizaje del Curiosity.</i> <i>Sudden increases in methane at the Curiosity landing site.</i>	228
Figura 35: <i>Explorer 1, primer satélite estadounidense dotado de un instrumento espacial.</i> <i>Explorer 1, the first U.S. satellite equipped with a space instrument.</i>	193	Figura 43: <i>Posibles vías de generación del metano en Marte.</i> <i>Possible pathways for methane generation on Mars.</i>	229
Figura 36: <i>Erupción solar.</i> <i>Solar flare.</i>	194	Figura 44: <i>Júpiter, su Gran Mancha Roja y su luna Europa, observados por el HST.</i> <i>Jupiter, its Great Red Spot and its moon Europa, observed by HST.</i>	236
Figura 37: <i>Interacción estrella-planeta.</i> <i>Star-planet interaction.</i>	195	Figura 45: <i>Encélado, una de las lunas de Saturno.</i> <i>Enceladus, one of Saturn's moons.</i>	246
Figura 38: <i>LUCA y el árbol de la vida.</i> <i>LUCA and the tree of life.</i>	204	Figura 46: <i>Europa, la luna helada de Júpiter.</i> <i>Jupiter's icy moon Europa.</i>	247
Figura 39: <i>Regiones especiales de Marte.</i> <i>Special Regions of Mars.</i>	214	Figura 47: <i>Fases de la atmósfera terrestre frente a las eras geológicas.</i> <i>Phases of the Earth's atmosphere versus geological eras.</i>	261
Figura 40: <i>Imagen de varios gullies (torreteras o cárcavas).</i> <i>Image of several gullies.</i>	218	Figura 48: <i>Líneas recurrentes en pendiente.</i> <i>Recurring Slope Lineae (RSL).</i>	268
Figura 41: <i>MEDA en Marte.</i> <i>MEDA on Mars</i>	222	Figura 49: <i>Permafrost.</i>	272

Figura 50: <i>Estructura de cinco polímeros informacionales.</i> <i>Structure of five informational polymers.</i>	278	Figura 58: <i>Tabla periódica de los elementos químicos.</i> <i>Periodic table of the chemical elements.....</i>	330
Figura 51: <i>Complejidad estructural de una proteína a lo largo del tiempo.</i> <i>Structural complexity of a protein over time.....</i>	288	Figura 59: <i>Polvo en el sensor de un instrumento en Marte.</i> <i>Dust on the sensor of an instrument on Mars.</i>	334
Figura 52: <i>Molécula Z-1,2-etendiol en el medio interestelar.</i> <i>Molecule Z-1,2-ethendiol in the interstellar medium.</i>	295	Figura 60: <i>La superficie de Marte cubierta por una tormenta global de polvo.</i> <i>The surface of Mars covered by a global dust storm.</i>	335
Figura 53: <i>Aparición de la vida a partir de la química compleja anterior.</i> <i>Emergence of life from prior complex chemistry....</i>	298	Figura 61: <i>Nube de polvo en Marte. Dust cloud on Mars.....</i>	335
Figura 54: <i>Quiralidad: simetría especular en una molécula.</i> <i>Chirality: specular symmetry in a molecule.....</i>	305	Figura 62: <i>Representación artística de un hábitat lunar.</i> <i>Artistic representation of a lunar habitat.</i>	342
Figura 55: <i>Los Pilares de la Creación de la Nebulosa del Águila.</i> <i>The Pillars of Creation of the Eagle Nebula.....</i>	308	Figura 63: <i>Imagen de la doble hélice del ADN. Image of the DNA double helix.....</i>	344
Figura 56: <i>El instrumento REMS.</i> <i>The REMS instrument.</i>	319	Figura 64: <i>Recreación de la estructura vírica. Recreation of the viral structure.....</i>	348
Figura 57: <i>Ciclo de actividad solar en la corona.</i> <i>Solar activity cycle as seen in the corona.....</i>	324	Figura 65: <i>El Desierto de Atacama en el norte de Chile. The Atacama Desert in northern Chile.</i>	352
		Figura 66: <i>El sistema solar y espectros de los planetas rocosos. The solar system and the spectra of the rocky planets.</i>	354

PRÓLOGO

FOREWORD

Demócrito de Abdera, un erudito heleno de los ss. V–IV a. e. c., ya especuló con la posibilidad de la existencia de una gran diversidad de mundos. Aunque no ha sobrevivido ninguno de sus textos, referencias posteriores proporcionan un esbozo de su pensamiento, que incluso podría haber reflexionado sobre la posibilidad de vida fuera de los confines de la Tierra. Según Hipólito de Roma, un escritor de los ss. II–III:

“Hay (según Demócrito) innumerables mundos, diferentes en tamaño. En algunos no hay sol ni luna, en otros son menores que los nuestros y en otros mayores. Las distancias entre los mundos son desiguales y en unos sitios hay más (mundos), en otros menos, y unos están creciendo, otros en su plenitud, otros están decayendo. Aquí nacen, allí desaparecen, pues se destruyen por colisión mutua. Hay algunos mundos desiertos, sin animales ni plantas ni agua en absoluto.”¹

Sin embargo, esta visión cosmológica ha sido minoritaria y la interpretación de la realidad física ha estado marcada por un

profundo sentido antropocentrista, en donde el ser humano se encontraba en el centro de la naturaleza. Desde la publicación del texto heliocéntrico de Nicolás Copérnico De *Revolutionibus*, en 1543, se ha venido forjando un cambio de perspectiva. En la actualidad se sabe que la Tierra no ocupa un lugar privilegiado en el universo y que probablemente existen cientos de miles de millones de planetas solo en nuestra galaxia. Se conocen también los principios esenciales de la biología y de los mecanismos de la vida. La estructura del planeta Tierra presenta pocas incógnitas y se empiezan a desvelar las de los otros miembros del sistema solar. El siguiente paso representa un salto abismal: identificar la presencia de actividad biológica más allá de los límites del planeta Tierra.

La respuesta a este apasionante problema la tiene la Astrobiología, un área de la investigación verdaderamente multidisciplinar que requiere la intervención de actividades tan diversas como la geoquímica, la biología, la astronomía o la ingeniería, por mencionar unas pocas.

Con este texto se pretende definir de una manera asequible pero rigurosa diversos conceptos de uso frecuentes en la Astrobiología. Ha sido escrito de manera colaborativa por un gran número de investigadores de primera línea pertenecientes al Centro de Astrobiología (CAB), un centro puntero perteneciente a Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Se enmarca dentro de las variadas iniciativas realizadas como Unidad de Excelencia María de Maeztu, un programa del Ministerio de Ciencia e Innovación y, en cierta medida, pone un broche de oro a todas las iniciativas formativas que se han realizado durante el tiempo que ha durado este programa.

Por tanto, con este glosario se quiere proporcionar una terminología actualizada y rica que proporcione una visión de conjunto, unos primeros escalones en esa apasionante aventura que es, posiblemente, el desafío más importante al que se enfrenta la humanidad, saber si estamos solos en este inmenso cosmos.

1. HIPÓLITO, *Refutación de todas las herejías* 1.13.2 (68A40), Fragmento 15 en BERNABÉ, A. (1988). *Fragmentos presocráticos. De Tales a Demócrito*, Alianza editorial, Madrid, p. 319.

Democritus of Abdera, an ancient Greek scholar of the 5th-4th centuries B.C.E. already speculated on the possibility of the existence of a great diversity of worlds. Although none of his texts have survived, later references provide an outline of his thought, which may even have reflected on the possibility of life outside the confines of the Earth. According to Hippolytus of Rome, a Christian writer of the 2nd-3rd centuries:

“There are (according to Democritus) innumerable worlds, different in size. In some there is neither sun nor moon, in others they are smaller than ours and in others larger. The distances between the worlds are unequal and in some places there are more (worlds), in others less, and some are growing, others in their fullness, others are decaying. Here they are born, there they disappear, for they are destroyed by mutual collision. There are some deserted worlds, without animals or plants or water at all.”

However, this cosmological vision has been in the minority and the interpretation of physical reality has been marked by a deep anthropocentric sense, where the human being was at the center of

nature. Since the publication of Nicolaus Copernicus' heliocentric text *De Revolutionibus* in 1543, a change of perspective has been taking place. It is now known that the Earth does not occupy a privileged place in the universe and that there are probably hundreds of billions of planets in our galaxy alone. The essential principles of biology and the mechanisms of life are also known. The structure of the planet Earth presents few unknowns and those of the other members of the solar system are beginning to be revealed. The next step represents an abysmal leap: to identify the presence of biological activity beyond the limits of planet Earth.

The answer to this exciting problem lies in Astrobiology, a truly multidisciplinary area of research that requires the intervention of activities as diverse as geochemistry, biology, astronomy and engineering, to mention but a few.

The aim of this text is to define in an accessible but rigorous way several concepts frequently used in Astrobiology. It has been written collaboratively by a large number of well-known researchers belonging to the Centro de

Astrobiología (CAB), a leading center belonging to the Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) and the Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). It is part of the various initiatives carried out as the María de Maeztu Unit of Excellence, a program of the Spanish Ministry of Science and Innovation and, to a certain extent, puts the finishing touch to all the training initiatives that have been carried out during the time that this program has lasted.

Therefore, this glossary aims to provide an updated and rich terminology that delivers an overview, the first steps in this exciting adventure that is possibly the most important challenge facing humanity, to know if we are alone in this immense cosmos.

David Barrado Navascués

Director científico

Unidad de Excelencia María de Maeztu

Centro de Astrobiología (CAB),

CSIC-INTA, 2018-2023

¿QUÉ ES LA ASTROBIOLOGÍA?

La astrobiología es una disciplina ecléctica que recoge los esfuerzos de muchas otras para abordar la hipótesis general que afirma que la vida es una consecuencia de la evolución de la energía y la materia en el universo. En un tiempo remoto debió producirse una cadena de acontecimientos para que las partículas elementales se combinaran para formar elementos y moléculas y, a partir de ellos, una cascada de procesos condujera a la aparición de fenómenos bioquímicos complejos y, finalmente, a la vida. El objetivo de esta disciplina científica es contribuir a llenar las lagunas de esta cadena de acontecimientos que conectan el Big Bang con la diversificación de la vida en el planeta y, posiblemente, en otros lugares.

Según esta hipótesis, la vida es una historia exitosa de complejidad química y estructural que tuvo lugar en dos escenarios: i) cósmico, dominado por fenómenos altamente energéticos que generaron los elementos y las moléculas simples, y ii)

planetario, donde los entornos templados y protegidos de la radiación proporcionaron protección a las moléculas mientras seguían siendo lo suficientemente energéticos (por ejemplo, hidrotermalismo, radiación poco energética, luz, calor) para producir nuevas moléculas, incluyendo los bloques de construcción basados en el carbono. Los entornos planetarios también permitieron nuevos procesos: a) la evolución química, los entornos más suaves permitieron una mayor estabilidad y concentración para que las moléculas basadas en el carbono reaccionaran entre sí y formaran polímeros (péptidos, ARN o polisacáridos) estabilizados por fuerzas débiles, y b) la evolución biológica, donde las células simples tomaron conjuntos bioquímicos para adaptarse al entorno y evolucionar a la multicelularidad hasta la aparición de la inteligencia. Un corolario de la hipótesis es que la bioquímica basada en el carbono debería ser universal y común en otros entornos planetarios y, quizás, también en la vida microbiana simple.

La llegada de nuevos, sofisticados y precisos instrumentos para la exploración espacial abrirá nuevas vías para la investigación en Astrobiología. La comprensión de la habitabilidad potencial de los miles de planetas por descubrir y la detección a distancia de biomarcadores siguen necesitando de una investigación básica multi y transdisciplinar sobre la vida y sus límites en la Tierra.

La Astrobiología desafía a la ciencia y a la comunidad científica a desarrollar y aplicar nuevos métodos y enfoques. Este libro, con 101 conceptos relevantes para la Astrobiología, es oportuno y necesario para consolidar un lenguaje común para que los científicos e ingenieros de múltiples disciplinas, pero también para cualquier persona con una mente curiosa y que quiera familiarizarse con la situación actual, puedan entenderse en el desarrollo de verdaderos proyectos transdisciplinares para abordar cuestiones astrobiológicas clave.

¿WHAT IS ASTROBIOLOGY?

Astrobiology is an eclectic discipline that gathers the efforts of many others to tackle the general hypothesis stating that life is a consequence of the evolution of energy and matter in the universe. In a remote past, a chain of events must have occurred so that elemental particles combined to form elements and molecules and from them a cascade of processes led to complexity and eventually life. The goal is to contribute to fill the gaps in this chain of events that connect the Big Bang to the diversification of life on Earth and, possibly, elsewhere.

Based on this hypothesis, life is a successful story of chemical and structural complexity that took place in two scenarios: i) cosmic, dominated by high energetic phenomena that generated the elements and simple molecules, and ii) planetary, where temperate and radiation protected environments provided protection to molecules while still energetic enough (e.g. hydro-

thermalism, low energetic radiation, light, heat) to produce new molecules, including the carbon-based building blocks of life. Planetary settings also allowed new processes: a) chemical evolution, milder environments permitted higher stability and concentration for carbon-based molecules to react each other and to form polymers (peptides, RNA, or polysaccharides) stabilized by weak forces, and b) biological evolution, where simple cells took biochemical sets for adapting to the environment and evolving to multicellularity till the appearance of intelligence. A corollary of the hypothesis is that carbon-based biochemistry must be universal and common in other planetary settings and, perhaps, simple microbial life too.

The advent of new, sophisticated, and accurate instrumentation for space exploration will open new avenues for Astrobiology research. Understanding the potential habitability of the thou-

sands of planets to be discovered, and remote detection of biomarkers still need of multi and transdisciplinary basic research about life and its limits on Earth.

Astrobiology challenges science and the scientific community to develop and apply new methods and approaches. This book, with 101 concepts relevant to Astrobiology, is timely and necessary to consolidate a common language so that scientists and engineers from multiple disciplines, but also for anyone with a curious mind and who wants to familiarize themselves with the current situation, can understand each other in developing true transdisciplinary projects to address key astrobiological questions.

Víctor Parro
Director Centro de Astrobiología
(CAB), CSIC-INTA

CONCEPTOS BÁSICOS

CONCEPTS

1. ACRECIMIENTO

También denominado acreción, es el proceso por el que una **estrella** joven, desde prácticamente la formación del núcleo prestelar hasta que el objeto en formación tiene unos pocos millones de años, adquiere material de su entorno, normalmente del **disco circunestelar** que la rodea. Este término se puede aplicar también a un planeta joven que acrece material de su disco circumplanetario, o a una **galaxia**, cuando el agujero negro central acumula material en una zona toroidal. El proceso de acrecimiento se puede producir a través de distintos procesos físicos. En el caso de las estrellas jóvenes de tipo solar el mecanismo más plausible es una canalización del material a través de las líneas de campo magnético que conectan el disco y la estrella, un fenómeno que se conoce como acreción magnetosférica.

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <<https://www.sea-astronomia.es/glosario/>>

Lecturas adicionales/Further reading

HUXLEY, T. H. (2011). *Collected Essays. Volume 8. Discourses: Biological and Geological*. Part of Cambridge Library Collection – Philosophy. ISBN: 9781108040587.

GARGAUD, M. (ed.) (2011). *Encyclopedia of Astrobiology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

2. ABIOGÉNESIS

El término abiogénesis fue utilizado por primera vez por Thomas Huxley (*Biogenesis and Abiogenesis*) en un destacado capítulo del libro *Collected Essays. Volume 8. Discourses: Biological and Geological*, publicado en 1870. En este texto rechaza la idea de la generación espontánea y acuña dos nuevos términos: “biogénesis” para explicar que los organismos vivos proceden de otros similares a ellos mismos, no pudiendo originarse de material sin **vida** y “abiogénesis” para plantear la posibilidad de la evolución de la materia inerte a materia viva. En este contexto, desde finales del siglo XIX, la abiogénesis evolutiva se interpreta como el aumento de la **complejidad** y la evolución de la materia desde el estado inerte al vivo en el contexto abiótico de la evolución de la Tierra primitiva.

ACCRETION

It is the process by which a young **star**, from almost the formation of the prestellar core until the forming object is a few million years old, acquires material from its environment, usually from the surrounding **circumstellar disk**. This term can also be applied to a young planet accreting material from its circumplanetary disk, or to a **galaxy**, when the

central black hole accretes material in a toroidal zone. The accretion process can occur through various physical processes. In the case of young solar-type stars, the most plausible mechanism is a channeling of material through the magnetic field lines connecting the disk and the star, a phenomenon known as magnetospheric accretion.



Figura 1:

El material de un disco de acreción se arremolina alrededor de la joven estrella FU Orionis en esta imagen artística.

Material from an accretion disk swirls around the young star FU Orionis in this artist's concept. Credit: NASA/JPL-Caltech

Crédito: NASA/JPL-Caltech

ABIÓGENESIS

The term abiogenesis was first used by Thomas Huxley in an outstanding book chapter (Biogenesis and Abiogenesis) of the book *Collected Essays. Volume 8. Discourses: Biological and Geological*, published in 1870. In this text, Huxley rejected the idea of spontaneous generation and proposed two new terms: “biogenesis” to explain that living organisms come from others similar to themselves, not being able to originate from non-living matter, and “abiogenesis” to refer the possibility of evolution of inert matter to living matter. In this context, since the end of the 19th century, evolutionary abiogenesis has been interpreted as the increase of **complexity** and the evolution of matter from the inert to the living state in the abiotic context of the evolution of the early Earth.

3. ADAPTACIÓN BIOLÓGICA

La adaptación biológica es el proceso por el que los seres vivos cambian su estructura, fisiología y comportamiento de manera aleatoria, pero que tiene como consecuencia una optimización de su supervivencia y de su éxito reproductivo en un hábitat que haya sufrido cambios importantes o un nuevo hábitat. Estos cambios no solo se refieren a variables fisicoquímicas, sino que pueden incluir también alteraciones en las especies con las que un determinado organismo interactúa. También se puede emplear el término de adaptación como a cualquier característica concreta morfológica, fisiológica o de conducta que incrementa la supervivencia y el éxito reproductivo de una especie. La ausencia de adaptaciones a cualquier tipo de cambio en el hábitat de una determinada especie conduce a su extinción.

Las adaptaciones aparecen y se mantienen en los organismos como resultado de la selección natural. Para ello es necesario que haya diversidad fenotípica (la expresión o visibilidad del genoma en términos de rasgos de conducta o físicos) en los individuos de una población,

originada por mutaciones al azar en el genoma. Aquellos rasgos adaptativos que confieran una mayor supervivencia y éxito reproductivo, y que se correspondan con una variación genética, serán transmitidos a la siguiente generación. Por tanto, la adaptación tiene que ser heredable. No hay que confundir adaptación con flexibilidad, que es la capacidad de un organismo de vivir en distintos ambientes o la aclimatación, que permite realizar ajustes fisiológicos para facilitar la supervivencia. La flexibilidad y aclimatación se corresponden con variaciones en la expresión de genes, pero no con mutaciones que afecten a los genes.

La **vida** se ha adaptado a condiciones específicas del planeta **Tierra**, tales como **radiación**, gravedad y ciclos de luz y oscuridad, y además también ha podido colonizar hábitats con condiciones extremas de temperatura, salinidad, radiación, pH, metales y metaloides tóxicos, aridez y presión (ver el término **Extremófilos**). La **exploración espacial** supone un reto para los organismos que han desarrollado adaptaciones para optimizar su supervivencia en la Tierra, pero que

no sirven para vivir en el espacio o en la superficie de otros planetas. Entre las condiciones que más limitan la vida, por una parte, está la ausencia de gravedad en el espacio o la reducción de gravedad en otros cuerpos planetarios como en **Marte** o la Luna, y por otra parte las elevadas dosis de radiación ionizante y UV que son muy superiores a las de la Tierra. Estas condiciones suponen un problema para el correcto desarrollo y funcionamiento del cuerpo humano y también del de las plantas u otros organismos que se pueden emplear en sistemas de soporte de la vida para el mantenimiento de los astronautas. Los organismos multicelulares se han adaptado a la gravedad y los niveles de radiación terrestres, y cualquier variación en estas condiciones tendría efectos importantes sobre su supervivencia y éxito reproductivo. Mediante biología sintética se podrían manipular genes y diseñar rutas biológicas que no existen en los organismos conocidos para acelerar la adaptación de algunos organismos a resistir mayores dosis de radiación, a cambios en la gravedad o a otras condiciones extremas que se pudieran encontrar en otro planeta.

BIOLOGICAL ADAPTATION

It is the process by which living beings change their structure, physiology and behavior in a random manner, but which results in an optimization of their survival and reproductive success in a habitat that has undergone important changes or in a new habitat. These changes do not only refer to physicochemical variables, but may also include alterations in the species with which a given organism interacts. The term adaptation can also be used to refer to any specific morphological, physiological or behavioral characteristic that increases the survival and reproductive success of a species. The absence of adaptations to any type of change in the habitat of a given species leads to its extinction.

Adaptations appear and are maintained in organisms as a result of natural selection. This requires phenotypic diversity (the expression or visibility of the genome in terms of behavioral or physical traits) among individuals in a population, caused by random mutations in the genome. Those adaptive traits that confer greater survival and reproductive success, and which correspond to genetic variation, will be transmitted to the next generation. Adaptation must therefore be heritable. Adaptation should not be confused with

flexibility, which is the ability of an organism to live in different environments, or acclimation, which allows physiological adjustments to facilitate survival. Flexibility and acclimatization correspond to variations in gene expression, but not to mutations that affect genes.

Life has adapted to specific conditions on planet **Earth**, such as **radiation**, gravity and light-dark cycles, and has also been able to colonize habitats with extreme conditions of temperature, salinity, radiation, pH, toxic metals and metalloids, aridity and pressure (see the term **Extremophiles**). **Space exploration** is a challenge for organisms that have developed adaptations to optimize their survival on Earth, but which are not suitable for living in space or on the surface of other planets. Among the most limiting conditions for life are, on the one hand, the absence of gravity in space or the reduced gravity on other planetary bodies such as **Mars** or the Moon, and on the other hand, the high doses of ionizing radiation and UV radiation that are much higher than on Earth. These conditions pose a problem for the proper development and functioning of the human body and also of plants or other organisms that

can be used in life support systems for the maintenance of astronauts. Multicellular organisms have adapted to terrestrial gravity and radiation levels, and any variation in these conditions would have major effects on their survival and reproductive success. Synthetic biology could manipulate genes and design biological pathways that do not exist in known organisms to accelerate the adaptation of some organisms to withstand higher doses of radiation, changes in gravity, or other extreme conditions that might be encountered on another planet.

Lecturas adicionales/Further reading

- BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica
- GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.
- GOULD, S. J. (1983). RICHARD LEWONTIN, R. (1983). "La adaptación biológica". *Mundo Científico*, Volumen 3, No 22.
- LLOYD, E. (2021). *Adaptation (de la serie: Elements in the Philosophy of Biology)*. Cambridge University Press.

4. AGUA

El agua (H_2O) es una sustancia compuesta por dos átomos de hidrógeno (H) y uno de oxígeno (O), dos de los elementos más reactivos y abundantes del universo. La molécula que se forma es pequeña, ligera, eléctricamente neutra, aunque con polaridad eléctrica. Esto es debido a la distribución de las cargas positivas y negativas que genera enlaces por puentes de hidrógeno y le confiere un comportamiento inusual, en relación a otros compuestos simples, y es un efecto que tiene unas consecuencias esenciales para la actividad biológica.

El agua puede presentarse en los tres estados fundamentales de la materia: sólido, líquido y gaseoso. En estado gaseoso, es uno de los materiales más ligeros que se conocen y el sólido formado en condiciones estándar es anómalamente menos denso que el líquido. Sin embargo, no les ocurre lo mismo a las más de 18 fases sólidas del agua descritas hasta el momento entre cristalinas y amorfas, algunas de las cuales aún no tienen verificada su exis-

tencia experimentalmente (ver figura 2). La fuerza y la dirección de los enlaces de hidrógeno controlan las propiedades térmicas y dinámicas del agua especialmente en el estado líquido. Tiene una alta capacidad calorífica, alta conductividad térmica y altos puntos de congelación y fusión que permiten una regulación térmica eficiente, si el líquido es abundante, a diferentes escalas tanto a nivel de microorganismos como a nivel planetario. La constante dieléctrica del agua líquida (permitividad, que describe cómo se ve afectada por un campo eléctrico) también es inusualmente alta debido a la alta concentración de dipolos. Como consecuencia, es un excelente solvente particularmente para sales y compuestos polares como alcoholes de bajo peso molecular. Además, al disociarse puede aceptar y donar protones, revelando así su carácter anfótero, es decir, puede comportarse como un ácido o como una base. En las disoluciones acuosas se utiliza el concepto de “actividad del agua” para medir la cantidad de agua disponible (en equilibrio) útil en la

hidratación de materiales. Un material tiene actividad igual a uno en su estado puro, y será inferior a la unidad cuando se mezcla con otras sustancias. Las propiedades del agua líquida pueden variar significativamente si esta se confina en espacios nanométricos como huecos en materiales granulares porosos, alrededor y dentro de **células**, macromoléculas, estructuras supramoleculares o en geles. Las propiedades del agua confinada son difíciles de predecir porque dependen del efecto específico de cada superficie cargada, como las de las micelas, en las que los grupos polares están en la superficie y las partes apolares quedan en el interior.

El agua es una de las sustancias más buscadas en **exploración espacial** y se ha encontrado en múltiples ambientes, principalmente como moléculas libres y **hielo** sólido, en el espacio interestelar, en planetas y asteroides, y en las **atmósferas** de **estrellas** como el **Sol**. Sin embargo, para formar un ambiente habitable es indispensable la presencia de agua líquida.

WATER

Water (H₂O) is a substance composed of two atoms of hydrogen (H) and one of oxygen (O), two of the most reactive and abundant elements in the universe. The molecule that forms is small, light, electrically neutral, yet electrically polar. This is due to the distribution of positive and negative charges that generates hydrogen bonds and gives it an unusual behavior, compared to other simple compounds, and is an effect that has essential consequences for biological activity.

Water can occur in the three fundamental states of matter: solid, liquid and gaseous. In the gaseous state, it is one of the lightest materials known and the solid formed under standard conditions is anomalously less dense than liquid. However, the same is not true of the more than 18 solid phases of water described so far, including crystalline and amorphous phases, some of which have not yet had their existence experimentally verified (see figure 2).

The strength and direction of hydrogen bonds control the thermal and dynamic properties of water, especially in the liquid state. It has a high heat capacity, high thermal conductivity and high freezing and melting points that allow efficient thermal regulation at different scales if the liquid is abundant, both at micro-organism and planetary scales. The dielectric constant (permittivity) of liquid water is also unusually high due to the high concentration of dipoles. As a consequence, it is an excellent solvent particularly for salts and polar compounds such as low molecular weight alcohols. Furthermore, upon dissociation it can accept and donate protons, thus revealing its amphoteric character. In aqueous solutions, the concept of “water activity” is used to measure the amount of available water (in equilibrium) useful in the hydration of materials. A material has activity equal to one in its pure state, and will be less than unity when mixed with other substances. The properties of liquid water can vary significantly if

it is confined in nanometer spaces such as voids in porous granular materials, around and within **cells**, macromolecules, supramolecular structures or in gels. The properties of confined water are difficult to predict because they depend on the specific effect of each charged surface, such as those of micelles, in which the polar groups are on the external part and the nonpolar parts are in the interior.

Water is one of the most sought-after substances in **space exploration** and has been found in multiple environments, mainly as free molecules and solid **ice**, in interstellar space, on planets and asteroids, and in the **atmospheres of stars** such as the **Sun**. However, to form a habitable environment, the presence of liquid water is indispensable, which requires specific pressure and temperature conditions (see figure 2). Water is detected mainly by **spectroscopy** with instruments on space missions or from ground-based

da, lo cual requiere unas condiciones de presión y temperatura específicas (ver figura 2). El agua se detecta principalmente por **espectroscopía** con instrumentos en misiones espaciales o desde telescopios en tierra. En el **sistema solar**, el agua condensó principalmente en las regiones más externas del **disco circunestelar** primordial debido a las altas temperaturas reinantes en órbitas internas. Es ahí donde se encuentran los denominados mundos oceánicos, lunas con cortezas de hielo que albergan capas acuosas profundas. Ejemplos son los satélites Europa y Ganimedes de Júpiter, y Encelado y Titán de Saturno.

El agua también es un componente importante de los **cometas** y de las atmósferas y el interior de los planetas gigantes como Urano y Neptuno. La abundancia de agua en la **Tierra** podría explicarse por la dispersión de planetesimales (agregados de materia rocosos) ricos en agua durante la formación del sistema solar interior. Nuestro planeta contiene alrededor del 1 % en peso de agua, pero casi todo se alberga en el manto terrestre y el núcleo. Solo el 2 % de este constituye la hidrosfera (zonas con agua líquida) y la atmósfera que han permitido el desarrollo de la **vida**.

Lecturas adicionales /Further reading

FRANKS, F. (ed.) (1975). *Water: A Comprehensive Treatise Vol. 1*. Plenum Press, New York.

BALL, P. (2008). "Water, an enduring mystery". *Nature* 452, pp. 291–292.

BLANDAMER, M. J., ENGBERTS, J. B. F. N., GLEESON P. T., REIS, J. C. R. (2005). "Activity of water in aqueous systems; A frequently neglected property", *Chemical Society Reviews*, 34, pp. 440-458.

telescopes. In the **solar system**, water condensed mainly in the outermost regions of the primordial **circumstellar disk** due to the high temperatures in inner orbits. This is where the so-called ocean worlds are found, moons with ice crusts that harbor deep aqueous layers. Examples are Jupiter's Europa and Ganymede, and Saturn's Enceladus and Titan. Water is also an important component of **comets** and of the atmospheres

and interiors of giant planets such as Uranus and Neptune. The abundance of water on **Earth** could be explained by the dispersion of water-rich planetesimals during the formation of the inner solar system. Our planet contains about 1% by weight of water, but almost all of it is harbored in the Earth's mantle and core. Only 2% of this constitutes the hydrosphere and atmosphere that have allowed **life** to develop.

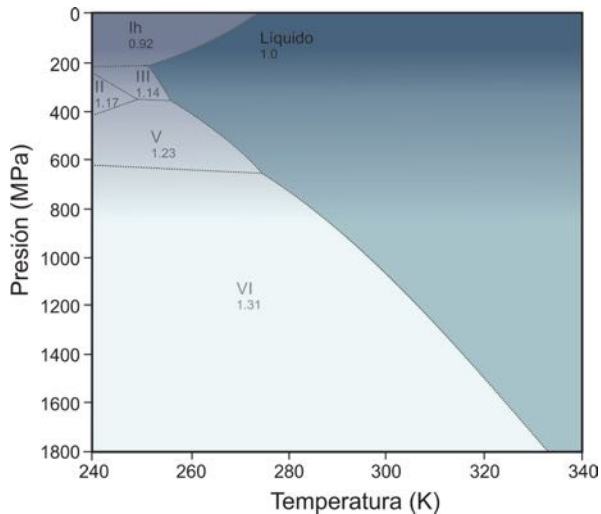


Figura 2:

Diagrama de estabilidad de las fases del agua.

Water phase stability diagram.

Corresponde al rango de presión y temperatura de las lunas heladas del sistema solar. La densidad de cada fase cristalina está indicada bajo el nombre de las mismas: Ih (hielo I hexagonal), II, III, IV y VI.

It corresponds to the pressure and temperature range of the icy moons of the solar system. The density of each crystalline phase is indicated under the phase names: Ih (hexagonal ice I), II, III, IV and VI.

Crédito: O. Prieto-Ballesteros.

5. ANÁLOGOS TERRESTRES

Un ambiente análogo terrestre se define como aquel que comparte, o compartió en el pasado, una o más similitudes físicas, químicas y/o geológicas con algún lugar fuera del planeta **Tierra**. Así un análogo marciano es un ambiente terrestre que comparte alguna similitud con algún lugar del planeta rojo. Los estudios sobre análogos terrestres son cruciales para el desarrollo de robots de **exploración**, así como de los protocolos adecuados de estudios en ambientes extraterrestres antes de su desarrollo *in situ*. Este tipo de estudios es clave para una mejor comprensión del **sistema solar** y, por tanto, del universo.

Los análogos terrestres tienen gran valía desde el punto de vista astrobiológico fundamentalmente porque permiten estudiar los límites de la **vida** en el planeta Tierra, su adaptación a condiciones adversas y por servir como plataforma para los estudios de **habitabilidad** (ver también **Zona de habitabilidad galáctica**). El potencial de habitabilidad en planetas como **Marte**, con sus similitudes geológicas con algunos lugares de la Tierra, puede ser investigado en

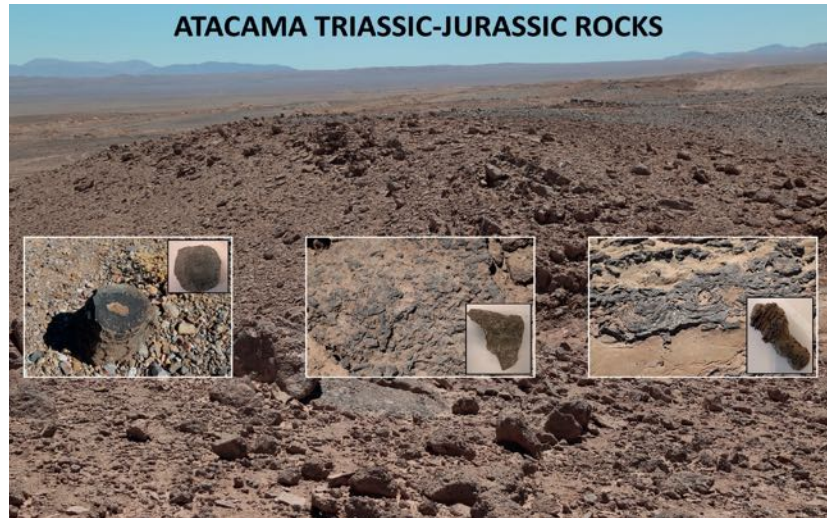


Figura 3:

Imagen de afloramientos de carbonatos marinos.

Image of marine carbonate outcrops.

Carbonatos marinos del Triásico-Jurásico superior en el Desierto de Atacama (norte de Chile) en los que se han detectado restos de vida de distinta naturaleza y grado de preservación correspondiente a los últimos 200 millones de años.

Upper Triassic-Jurassic marine carbonate outcrops in the Atacama Desert (northern Chile) where remains of life of different nature and degree of preservation corresponding to the last 200 million years have been detected.

Créditos: Prof. Guillermo Chong (Universidad Católica de Chile) y Dra. Laura Sánchez-García (Centro de Astrobiología).

TERRESTRIAL ANALOGS

A terrestrial analogue is defined as an environment that shares, or shared in the past, one or more physical, chemical and/or geological similarities with some place outside the planet **Earth**. Thus a Martian analogue is a terrestrial environment that shares some similarity with some place on the red planet. Studies on terrestrial analogues are crucial for the development of **exploration** robots, as well as proper protocols for studies in extraterrestrial environments prior to their development *in situ*. Such studies are key to a better understanding of the **solar system** and thus the universe.

Terrestrial analogues are of great value from an astrobiological point of view, mainly because they allow us to study the limits of **life** on planet Earth, the adaptation of life to adverse conditions and to serve as a platform for **habitability** studies (see also **Galactic habitability zone**). The habitability potential on planets such as **Mars**, with its geological similarities to some places on Earth, can be investigated in these natural laboratories. As part of

the studies of habitability potential, the importance of **biomarker** investigations, their presence and preservation, in these terrestrial analogous adverse environments stands out.

The physicochemical characteristics that can characterize an analogous environment can be temperature with very low or high temperature conditions, humidity and aridity conditions, high or low pressure, exceptional ionic conditions, redox potential or extreme electrical conductivity, among others. The most representative in the case of Mars would be extreme aridity and low temperature. These characteristics are found in the dry valleys of Antarctica or, in the case of extreme aridity, in the Atacama Desert in Chile. Geological features similar to the planet Mars include volcanic systems in the area of the Teide volcano in Spain, fields rich in iron oxides and hydroxides (as in the terrestrial analogue of Río Tinto, also in Spain), hydrothermal systems such as Dallol in Ethiopia, dune fields (Ibbn Battuta desert in Morocco), **impact craters** (Popigai crater in Russia) or polar zones and alpine deserts.

Lecturas adicionales /Further reading

AGUILERA, A., SOUZA-EGIPSY, V., GONZÁLEZ TORIL, E., (2020). *La vida en Río Tinto*. INTA.

AMILS, R. (2010). *Río Tinto... Viaje a Marte*. Alfar. (español/English).

BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata. ISBN 978-84-1352-190-9.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

estos laboratorios naturales. Como parte de los estudios del potencial de habitabilidad destaca la importancia de las investigaciones sobre **biomarcadores**, su presencia y su preservación, en estos entornos adversos análogos terrestres.

Las características fisicoquímicas que pueden caracterizar un ambiente análogo incluyen la temperatura con condiciones de muy baja o alta temperatura, condiciones de humedad y aridez, alta o baja presión, condiciones iónicas excepcionales, potencial redox o conductividad eléctrica extrema, entre otras. Las más representativas en el caso de Marte serían la extrema aridez y la baja temperatura. Estas condiciones se dan en los valles secos de la Antártida o, en el caso de la extrema aridez, en el desierto de Atacama en Chile. Entre las características geológicas similares al planeta Marte destacan los sistemas volcánicos la zona del volcán del Teide en España, los campos ricos en

óxidos e hidróxidos de hierro (como en el análogo terrestre de río Tinto, también en España), sistemas hidrotermales como el de Dallol en Etiopía, campos de dunas (desierto de Ibbn Battuta en Marruecos), **cráteres de impacto** (cráter Popigai en Rusia) o zonas polares y desiertos alpinos.

Los análogos terrestres son campos de prueba naturales donde verificar los desarrollos robóticos, o mejorar sus prestaciones de movilidad en entornos marcianos de dificultad, como es el caso de los campos de dunas. También son los entornos ideales para entrenar a científicos e ingenieros implicados en los procesos de operación y manejo de misiones espaciales, así como a futuros astronautas. Se han desarrollado varios ensayos de este tipo en ambientes aislados donde estos aprenden tanto a sobrevivir en entornos adversos aislados como a desarrollar su trabajo de investigación sin soporte de apoyo.

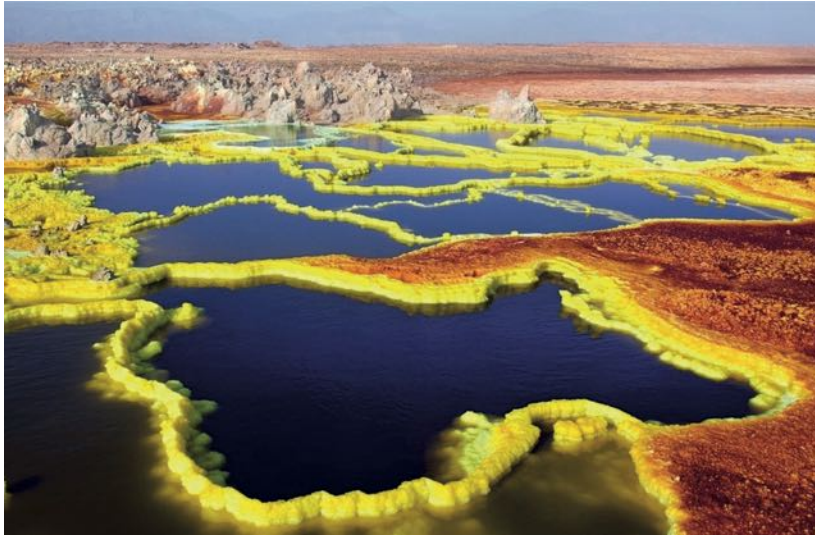


Figura 4:

Surgimiento hidrotermal de Dallol, en la depresión de Danakil (Etiopía).

Hydrothermal upwelling of Dallol, in the Danakil depression (Ethiopia).

Un ambiente poliextremo marcado por su adversidad en varios parámetros fisicoquímicos como son el pH (algunos puntos de muestreo tienen pH 0 o inferior), temperatura (los surgimientos de agua procedentes del interior de la corteza tienen temperaturas próximas o superiores a los 100 °C), concentración de metales y minerales en solución que acaban precipitando y formando las chimeneas y depósitos de diversos y llamativos colores.

A poly-extreme environment marked by its adversity in several physico-chemical parameters such as pH (some sampling points have pH 0 or lower), temperature (the water upwellings coming from the interior of the crust have temperatures close to or above 100 °C), concentration of metals and minerals in solution that end up precipitating and forming the chimneys and deposits of diverse and striking colors.

Créditos: Dr. Felipe Gómez, Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA

The terrestrial analogues are natural testing grounds where to test robotic developments, to improve their mobility performance in difficult Martian environments, as is the case of dune fields. They are also ideal environments for training scientists and engineers involved in the operation and management processes of space missions, as well as future astronauts. Several such trials have been developed in isolated environments where future astronauts learn both how to survive in isolated harsh environments and how to carry out their research work without support.

6. ANTRÓPICO O COSMOLÓGICO, PRINCIPIOS

El denominado principio cosmológico establece que la materia está distribuida de una manera uniforme (misma estructura) e isotrópica (mismas propiedades físicas) cuando se consideran grandes escalas espaciales. Representa una evolución moderna del principio copernicano, según el cual ni la **Tierra** ni el **sistema solar** se encuentran en una posición privilegiada del universo. Sin embargo, la presencia de **vida** en la Tierra y, en general, en el universo, depende de un gran número de parámetros que deben ser los adecuados.

Desde una perspectiva fisicoquímica, existen numerosos parámetros o características que de tener valores distintos habrían impedido el desarrollo de un universo complejo y la posibilidad de vida. Entre otros se encuentran: i) La constante cosmológica Λ , o relación entre la densidad de la denominada energía oscura y la densidad crítica de energía del universo. Un valor ligeramente mayor al estimado hubiera provocado una rápida

expansión del universo e impedido la formación de **estrellas**. ii) La constante Omega (Ω), o relación entre la densidad de la masa y la densidad crítica, próxima a 1. De ser mucho menor, el universo hubiera colapsado poco después del Big Bang; de ser mayor, no se habrían generado estrellas. iii) El parámetro Epsilon (ϵ), que determina la eficiencia energética de la fusión termonuclear del hidrógeno en helio (véanse términos **Evolución estelar** y **Diagrama H-R**). Durante la conversión de cuatro protones en un núcleo de helio un 0,7 % de la masa se transforma en energía, una variación más allá del rango 0,6-0,8 % hubiera impedido la formación de helio o hidrógeno, respectivamente. iv) Los niveles energéticos del ^{12}C , isótopo estable y más abundante del carbono, en particular de uno de sus niveles de excitación, que permite su formación mediante la fusión de ^4He y ^8Be . De ser muy distinto no habría suficiente carbono en el universo. v) La estructura de la molécula de **agua**. Por tanto, de no tener estas leyes y constantes físicas, no

habría aparecido vida en el universo y no habría evolucionado ninguna forma racional para realizar esa apreciación. Sin embargo, el principio antrópico no está libre de controversias y se critica la imposibilidad de realizar una falsabilidad o refutación, es decir, de la aplicación del método científico.

El denominado principio antrópico débil (WAP, por su acrónimo en inglés) fue formulado por Brandon Carter e implica que existe un proceso de sesgo de selección, un efecto estadístico, denominado sesgo del superviviente, que consiste en resaltar aquello que es aparente, ignorando los fenómenos invisibles. Sin embargo, el principio antrópico fuerte (SAP), postulado por John D. Barrow y Franck Tipler, implicaría que el universo es compelido hacia la aparición de formas de vida inteligentes. Diferentes autores, entre los que destaca Jesús Mosterín, critican el primero como una tautología, es decir, como algo obvio o evidente, y el segundo como mera especulación sin base científica.

ANTHROPIC OR COSMOLOGICAL PRINCIPLE

The so-called cosmological principle states that matter is uniformly distributed (same structure) and isotropic (same physical properties) when large spatial scales are considered. It represents a modern evolution of the Copernican principle, according to which neither the **Earth** nor the **solar system** is in a privileged position in the universe. However, the presence of **life** on Earth and, in general, in the universe, depends on a large number of parameters that must be appropriate.

From a physicochemical perspective, there are numerous parameters or characteristics that if they had different values would have prevented the development of a complex universe and the possibility of life. Among others are: i) The cosmological constant Λ , or ratio between the density of the so-called dark energy and the critical energy density of the universe. A value slightly higher than estimated would have caused a rapid expansion of the universe and prevented the formation of **stars**. ii) The Omega

constant (Ω), or ratio between the mass density and the critical density, close to 1. If much lower, the universe would have collapsed shortly after the Big Bang; if higher, no stars would have been generated. iii) The Epsilon parameter (ϵ), which determines the energy efficiency of the thermonuclear fusion of hydrogen into helium (see terms **Stellar evolution** and **H-R diagram**). During the conversion of four protons in a helium nucleus 0.7% of the mass is transformed into energy, a variation beyond the range 0.6-0.8% would have prevented the formation of helium or hydrogen, respectively. iv) The energy levels of ^{12}C , stable and most abundant isotope of carbon, in particular of one of its excitation levels, which allows its formation by the fusion of ^4He and ^8Be . If it were very different there would not be enough carbon in the universe. v) The structure of the **water** molecule. Therefore, in the absence of these laws and physical constants, no life would have appeared in the universe and no rational form would have evolved to make such an appreciation. However, the anthropic

principle is not free of controversy and is criticized for the impossibility of falsifiability or refutation, i.e., of the application of the scientific method.

The so-called weak anthropic principle (WAP) was formulated by Brandon Carter and implies that there is a process of selection bias, a statistical effect, called survivor bias, which consists of highlighting what is apparent, ignoring invisible phenomena. However, the strong anthropic principle (SAP), postulated by John D. Barrow and Frank Tipler, would imply that the universe is compelled towards the appearance of intelligent life forms. Different authors, including Jesús Mosterín, criticize the former as a tautology, i.e., as something obvious or evident, and the latter as mere speculation without scientific basis.

Lecturas adicionales / Further reading

BARROW, J. D., y TIPLER, F. J. (1986). *The Anthropic Cosmological Principle*. ISBN 0-19-282147-4.

7. ATMÓSFERAS: REDUCTORAS Y OXIDANTES, CONEXIÓN BIOLÓGICA

EL CARÁCTER OXIDANTE O REDUCTOR DE UNA ATMÓSFERA

A lo largo tanto de su historia geológica como biológica, la atmósfera de la **Tierra** (ver también **Química atmosférica**) ha tenido composiciones muy diferentes. Aunque el nitrógeno molecular (N_2) ha sido el componente dominante desde que surgió la **vida**, su condición de gas mayormente inerte le ha restado importancia, en particular sobre sus efectos sobre los seres vivos. La atmósfera que amparó el origen de la vida hace más de tres mil millones de años era principalmente reductora, siendo mayoritario el N_2 , y conteniendo cantidades menores de dióxido de carbono (CO_2) y **agua** (H_2O). Se ha especulado sobre la presencia de gases reductores como el amoníaco (NH_3), metano (CH_4) y monóxido de carbono (CO), pero los tres mencionados previamente probablemente componían la mayor parte de la atmósfera.

Sobre estas condiciones emergió la vida, que se mantuvo de forma anaerobia (sin oxígeno y produciendo nitrógeno entre otros productos), durante sus etapas ini-

ciales. La aparición de las cianobacterias, organismos capaces de llevar a cabo la fotosíntesis, hace entre 2000 y 3000 millones de años, provocó la progresiva acumulación de oxígeno en la atmósfera. Esta acumulación fue causando la desaparición de gases reductores de la atmósfera y su transformación en un ambiente oxidante. Este proceso también conllevó la aparición de ozono (O_3) en las capas superiores, protegiendo la superficie de la **radiación** ultravioleta dañina que era capaz de penetrar previamente. El incremento en la eficiencia energética que conlleva la aerobiosis (por la respiración del oxígeno molecular), junto con la protección frente a la radiación que supuso la capa de ozono, permitió la aparición de los organismos eucariotas y la progresiva colonización de capas superficiales de los océanos y, llegado el momento, de la superficie terrestre. El oxígeno es, aun así, una molécula tremendamente reactiva, por lo que aquellos microorganismos incapaces de hacer frente a su toxicidad perecieron, o se tuvieron que limitar a habitar nichos anaerobios. El oxígeno también inhibe la fijación de nitrógeno,

un proceso esencial en la **biosfera** terrestre, es decir, para los seres vivos en la Tierra, por lo que, aunque la atmósfera actual sea oxidante, los procesos anaerobios son aún de gran importancia para el mantenimiento de una biosfera sana.

Tanto las atmósferas reductoras como oxidantes son compatibles con la existencia de la vida, ya que ambas han sido dominantes en la Tierra en algún momento de su historia biológica. Aun así, cada atmósfera lleva asociadas una serie de idiosincrasias que es necesario evaluar a la hora de valorar su **habitabilidad**. Además, la historia atmosférica de un planeta puede dar ideas no solo de los procesos que han tenido en su superficie a lo largo de la historia, sino de su potencial habitabilidad en distintos momentos. Así, aunque Marte tiene hoy en día una atmósfera oxidante, algunas rocas extremadamente antiguas parecen haber sufrido condiciones reductoras, lo que podría sugerir la presencia de una atmósfera reductora en las etapas iniciales de su historia, algo de gran interés a la hora de buscar indicios de vida en el planeta.

ATMOSPHERES: REDOX, BIOLOGICAL CONNECTION

OXIDIZING OR REDUCING CHARACTER OF AN ATMOSPHERE

Throughout both its geological and biological history, the **Earth's** atmosphere (see also **Atmospheric chemistry**) has had very different compositions. Although molecular nitrogen (N_2) has been the dominant component since the emergence of **life**, its status as a largely inert gas has made it less important, particularly in terms of its effects on living things. The atmosphere that supported the origin of life more than three billion years ago was mainly reducing, with N_2 being the major component, and containing minor amounts of carbon dioxide (CO_2) and **water** (H_2O). There has been speculation about the presence of reducing gases such as ammonia (NH_3), methane (CH_4) and carbon monoxide (CO), but the three previously mentioned probably made up most of the atmosphere.

Under these conditions life emerged remaining anaerobic (without oxygen and producing nitrogen among oth-

er products) during its initial stages. The appearance of cyanobacteria, organisms capable of photosynthesis, between 2-3 billion years ago, caused the progressive accumulation of oxygen in the atmosphere. This accumulation caused the disappearance of reducing gases from the atmosphere and its transformation into an oxidizing environment. This process also led to the appearance of ozone (O_3) in the upper layers, protecting the surface from the harmful ultraviolet **radiation** that was previously able to penetrate. The increase in energy efficiency brought about by aerobiosis (by the respiration of molecular oxygen), together with the protection against radiation provided by the ozone layer, allowed the appearance of eukaryotic organisms and the progressive colonization of surface layers of the oceans and, eventually, of the Earth's surface. Oxygen is, however, a tremendously reactive molecule, so those microorganisms unable to cope with its toxicity perished, or had to limit themselves to inhabiting anaerobic niches. Oxygen also inhibits nitrogen

fixation, an essential process in the terrestrial **biosphere**, i.e., for living things on Earth, so even though today's atmosphere is oxidizing, anaerobic processes are still of great importance for the maintenance of a healthy biosphere.

Both reducing and oxidizing atmospheres are compatible with the existence of life, since both have been dominant on Earth at some point in its biological history. Even so, each atmosphere has a series of idiosyncrasies associated with it that need to be evaluated when assessing its **habitability**. In addition, the atmospheric history of a planet can give ideas not only of the processes that have taken place on its surface throughout history, but also of its potential habitability at different times. Thus, although Mars today has an oxidizing atmosphere, some extremely ancient rocks seem to have undergone reducing conditions, which could suggest the presence of a reducing atmosphere in the early stages of its history, something of great interest when looking for signs of life on the planet.

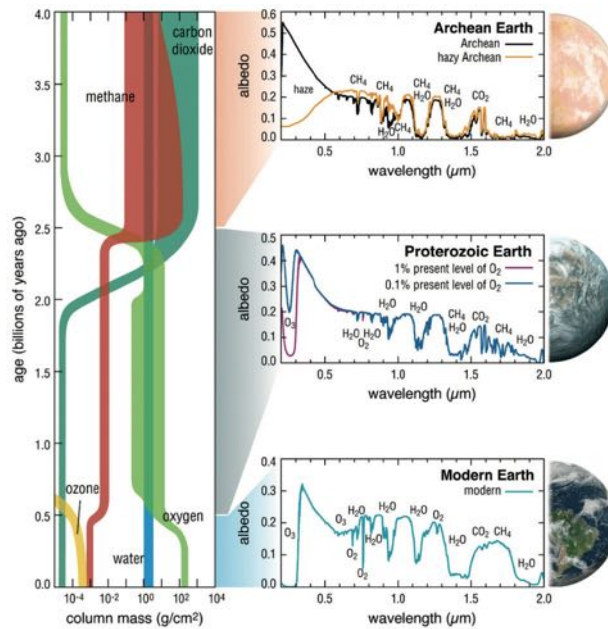


Figura 5:

Espectros de la atmósfera de la Tierra en las diferentes fases evolutivas.

Spectra of the Earth's atmosphere in different evolutionary phases.

En todos los casos la vida se ha desarrollado, a pesar de las extraordinarias diferencias entre las propiedades químicas y la composición de cada momento.

In all cases life has developed, despite the extraordinary differences between the chemical properties and composition of each moment.

Crédito: NASA, HabEx, Britt Griswold, Giada Arney y Shawn Domagal-Goldman.

ATMÓSFERA Y BIOLOGÍA

La hipótesis Gaia, ideada por el químico James Lovelock y extendida por la bióloga Lynn Margulis, sugiere que la presencia de la vida en la Tierra fomenta unas condiciones adecuadas para el mantenimiento de la biosfera. Según esta hipótesis, la atmósfera y la parte superficial del planeta Tierra se comportan como un sistema donde la vida se encarga de autorregular sus condiciones. Aunque es tan solo una hipótesis, sí que sabemos que la actividad biológica en nuestro planeta tuvo y tiene una fuerte repercusión en nuestra atmósfera. ¿La tendrá también en otras atmósferas? Es importante tener en cuenta que solo conocemos un tipo de vida, la de nuestro planeta, y por este motivo estamos buscando vida extraterrestre -y sus repercusiones- basada en la que conocemos aquí.

Uno de los grandes anhelos de la astrobiología es el estudio de las atmósferas de **exoplanetas**, y la relación que estas podrían tener con la presencia de vida. En la actualidad tenemos la capacidad de conocer la composición de estas atmósferas. Para ello, obtenemos espectros de una **estrella** justo cuando uno de sus planetas pasa por delante de la misma. La luz de la estrella, al atravesar la atmósfera del planeta, se

ATMOSPHERE AND BIOLOGY

The Gaia hypothesis, formulated by the chemist James Lovelock and co-developed by the biologist Lynn Margulis, suggests that the presence of life on Earth encourages suitable conditions for the maintenance of the biosphere. According to this hypothesis, the atmosphere and the surface of Earth behave as a system where life is responsible for self-regulating its conditions. Although it is just a hypothesis, we do know that biological activity on our planet had and has a strong impact on our atmosphere. Would it also have an impact on other atmospheres? It is important to keep in mind that we only know of one kind of life, the one from our planet, and for this reason we are looking for extraterrestrial life -and its repercussions- based on what we know here.

One of the great desires of astrobiology is the study of the atmospheres of **exo-planets**, and the relationship that these could have with the presence of life. At present, we have the ability to know the composition of these atmospheres. To do this, we obtain spectra of a star just as one of its planets passes in front of it. The light from the **star**, as it passes through the atmosphere of the planet, is “marked” with its atmospheric constituents, which

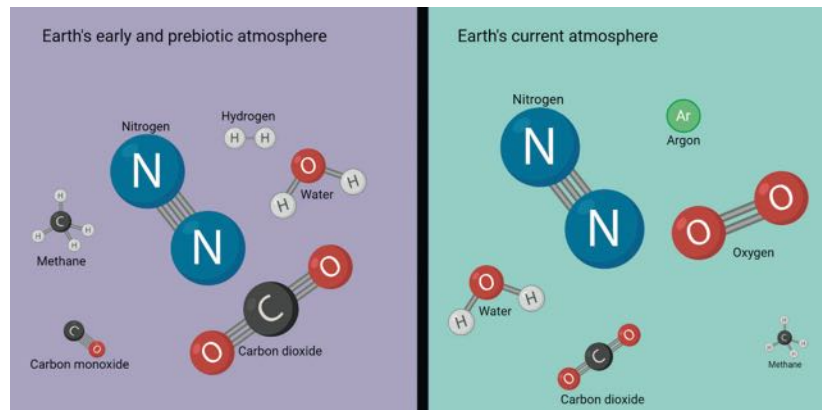


Figura 6:

Composición de la atmósfera terrestre previa a la aparición de la vida (izquierda) y a día de hoy (derecha).

Composition of Earth's early (left) and current (right) atmosphere.

Aunque elementos como el nitrógeno se han mantenido bastante constantes, otros como el dióxido de carbono y el oxígeno han sufrido grandes cambios.

Although elements like nitrogen have remained mostly stable throughout its history, other like oxygen and nitrogen have suffered significant changes.

Crédito: Miguel Arribas-Tiemblo.

we can identify if we subtract from this **spectrum** the one obtained from the star when the planet is not transiting. Thanks to this technique, we can search Earth-like exoplanets for habitability

markers such as carbon dioxide and water, and potential biomarkers such as oxygen, ozone and methane. We call them “potential biomarkers” because only the organic compounds that derive clearly

queda “grabada” con sus componentes atmosféricos, los cuales podemos discernir si le sustraemos a este **espectro** el obtenido de la estrella cuando el planeta no transita. Gracias a esta técnica buscamos en exoplanetas similares a la Tierra sustancias indicadoras de habitabilidad como el dióxido de carbono y el agua, y potenciales biomarcadores como el oxígeno, el ozono y el metano. Son potenciales porque solamente es biomarcador aquel compuesto orgánico que procede clara y unívocamente de actividad biológica. Los mencionados compuestos no son por tanto biomarcadores puros, ya que conocemos procesos abióticos que pueden producirlos. El oxígeno y el metano en la Tierra están directamente asociados con la biosfera, aunque la actividad biológica no es el único mecanismo capaz de explicar su presencia. Una atmósfera con una fuerte huella espectral de oxígeno junto con agua, metano y dióxido de carbono sería muy atractiva. Los futuros telescopios espaciales intentarán identificar potenciales biomarcadores en atmósferas de exoplanetas similares a la Tierra si estos estuvieran presentes en niveles de concentración similares a los de las diferentes fases evolutivas en las que la vida ha estado presente en nuestro planeta, ya que sabemos que la vida en la Tierra, y su repercusión en nuestra

atmósfera, han ido evolucionando a lo largo de la historia (figura 5). ¿Y cuáles han sido estas fases evolutivas? Como se menciona en el concepto **Paleoatmósfera**, las primeras formas de vida debieron ser microorganismos que utilizaban gases de origen volcánico para respirar produciendo como desecho grandes cantidades de metano. En la atmósfera actual, el metano tiene un tiempo de vida de tan solo 10 años, debido a su destrucción en presencia de oxígeno, pero en la atmósfera primitiva debido a la ausencia de este último, su tiempo de vida pudo ser de unos 10 000 años. La ausencia de oxígeno en la atmósfera debió impedir también la presencia de ozono, el cual actúa como protector frente a la letal radiación ultravioleta solar, por lo que los primeros microorganismos de la Tierra debieron haber vivido en ambientes protegidos lejos de la superficie. De estos primeros organismos surgen las cianobacterias fotosintéticas generadoras de oxígeno y, aunque han estado emitiendo este gas desde hace unos 3000 millones de años, no se acumuló en nuestra atmósfera de manera notable hasta unos 600 millones de años después. Gracias a estas cianobacterias, la atmósfera de la Tierra primitiva fue incrementando la cantidad de oxígeno desde un 1 % hasta el 21 % actual.

and unambiguously from biological activity are real biomarkers. The aforementioned components are therefore not pure biomarkers, since we know of abiotic processes that can produce them. Oxygen and methane on Earth are directly associated with the biosphere, although biological activity is not the only mechanism capable of explaining their presence. An atmosphere with a strong spectral fingerprint of oxygen together with water, methane, and carbon dioxide would be very attractive. Future space telescopes will try to identify potential biomarkers into Earth-like exoplanet atmospheres if these were present at concentration levels similar to those of the different evolutionary phases in which life has been present on our planet, since we know that life on Earth - and its impact on our atmosphere - have been evolving throughout history (figure 5). And what have these evolutionary phases been? As mentioned in the **Paleoatmosphere** concept, the first forms of life must have

been microorganisms that used volcanic gases to breathe, producing large amounts of methane as a waste product. In today's atmosphere, methane has a life span of only 10 years, due to its destruction in the presence of oxygen, but in the Early Earth atmosphere, due to the absence of oxygen, its life span could have been about 10,000 years. The absence of oxygen in the atmosphere must have also prevented the presence of ozone, which acts as a natural shield against the lethal solar ultraviolet radiation, so the first microorganisms on Earth must have lived in protected environments far from the surface. From these early organisms emerged the photosynthetic oxygen-generating cyanobacteria and, although they have been releasing this gas for ~3 billion years, it did not noticeably accumulate in the atmosphere until ~600 million years later. Thanks to these cyanobacteria, the Early Earth atmosphere gradually increased the amount of oxygen from 1% up to current 21%.

Lecturas adicionales /Further reading

ZAHNLE K. J., LUPU R., CATLING D. C., WOGAN N., (2020). "Creation and Evolution of Impact-generated Reduced Atmospheres of Early Earth", *The Planetary Science Journal*, 1, 11.

8. ARQUEA

Las arqueas son un gran grupo de microorganismos procariotas unicelulares (ver término **Bacteria**). Inicialmente se las consideró relacionadas con las bacterias (y se las denominó arqueobacterias), porque también son organismos unicelulares y no presentan núcleo ni orgánulos membranosos internos. Sin embargo, en 1977 el microbiólogo norteamericano Carl Woese clasificó a los procariotas en dos dominios distintos, arqueas y bacterias, basándose en su **filogenia**, es decir, en sus secuencias de genes de **ARN** ribosómico (ARNr). Las arqueas tienen una historia evolutiva independiente y muestran muchas diferencias bioquímicas y genéticas con las otras formas de **vida**, por lo que definitivamente se clasificaron en un dominio separado dentro del sistema de tres dominios: **Archaea**, **Bacteria** y **Eukarya** (ver figura 7).

A pesar de la semejanza en tamaño y forma con las bacterias, las arqueas poseen genes y algunas rutas metabólicas (sucesión de reacciones químicas) que son más similares a las de los organismos eucariotas. En especial, comparten

con los eucariotas los mecanismos y las enzimas implicadas en la transcripción y la traducción, es decir, en la transferencia de la información contenida en la secuencia del **ADN** hacia la secuencia de **proteína** utilizando diversos ARN como intermediarios.

El dominio arquea comprende a su vez diversos grupos o filos. Sin embargo, la clasificación de las arqueas todavía es difícil, porque solo se han conseguido cultivar representantes de seis de los 27 filos de arqueas actualmente propuestos. La gran mayoría solo se han detectado mediante el análisis de sus ácidos nucleicos en muestras tomadas de diversos ambientes. Un gran número de arqueas son **extremófilas**, con especies capaces de vivir a alta temperatura, elevada salinidad o con un pH extremo. Por ejemplo, el género *Pyrolobus* es hipertermófilo y puede vivir a temperaturas tan altas como 113 °C, e incluso el metanógeno *Methanopyrus*, un procariota que produce metano, soporta los 122 °C. Aunque las arqueas producen la energía que necesitan para vivir a partir de reacciones químicas de oxidación, algunos

géneros como *Halobacterium* pueden utilizar la luz solar para producir energía. Algunas arqueas utilizan compuestos orgánicos en su **metabolismo** energético, y muchas otras son quimiolitotrofas (obtienen energía a partir de compuestos inorgánicos), especialmente las arqueas hipertermófilas. La capacidad de las arqueas de habitar estos ambientes extremos y de mantener rutas metabólicas activas ha ampliado los escenarios en los que la vida es posible. Por eso su estudio es fundamental en las investigaciones sobre Astrobiología.

Aunque inicialmente, todas las arqueas se consideraron extremófilas, ya que se identificaron en ambientes hostiles tales como aguas termales y lagos salados, actualmente se sabe que están distribuidos globalmente y se encuentran entre los organismos predominantes en el planeta. Las arqueas están presentes en los más diversos hábitats, como el suelo, los océanos, e incluso habitan en el intestino de los mamíferos. Se han encontrado arqueas metanógenas en el colon humano. En algunos animales como los rumiantes, están presentes en grandes cantida-

ARCHAEA

Archaea are a large group of unicellular prokaryotic microorganisms. Initially they were considered to be related to **bacteria** (and were called archaeobacteria), because they are also unicellular organisms and do not have a nucleus or internal membranous organelles. However, in 1977 the American microbiologist Carl Woese classified prokaryotes into two distinct domains, archaea and bacteria, based on their **phylogeny**, i.e., their ribosomal **RNA** (rRNA) gene sequences. Archaea have a separate evolutionary history and show many biochemical and genetic differences from other **life** forms, so they were classified into a separate domain within the three-domain system of **Archaea**, **Bacteria**, and **Eukarya** (see figure 7).

Despite the similarity in size and shape with bacteria, archaea possess genes and some metabolic pathways (succession of chemical reactions) that are more similar to those of eukaryotic organisms. In particular, they share with eukaryotes the mechanisms and enzymes involved in transcription and translation, that is, in the transfer of the

information contained in the **DNA** sequence to the **protein** sequence using various RNAs as intermediaries.

The archaeal domain itself comprises various groups or phyla. However, the

classification of archaea is still difficult, because representatives of only six of the 27 currently proposed archaeal phyla have been successfully cultured. The majority of archaea have only been detected by analysis of their nucleic acids in sam-

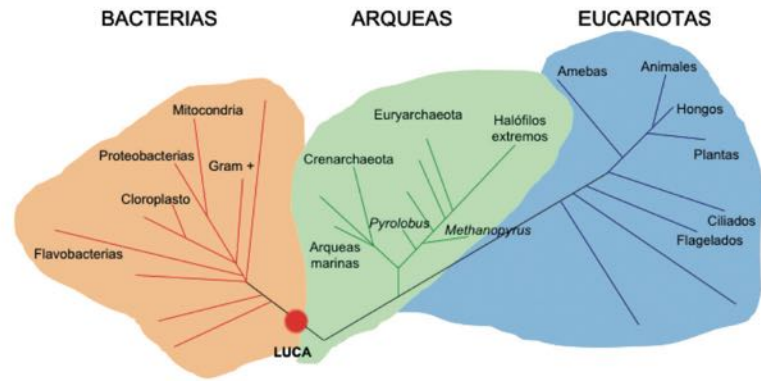


Figura 7: Dominios del árbol de la vida.
Domains of the tree of life.

Los tres dominios del árbol de la vida definido por la secuencia genética. Parten todos de LUCA, el primer ancestro.

The three domains of the tree of life defined by the genetic sequence. They all start from LUCA, the first ancestor.

Créditos: Adaptado del árbol filogenético de Carl Woese. Adapted from Carl Woese's phylogenetic tree.

des y contribuyen a digerir el alimento. Sin embargo, no se conocen ejemplos de arqueas patógenas o parásitas, suelen ser mutualistas, interactuando con otros microorganismos para contribuir a la

digestión de los alimentos, o comensales, beneficiándose de una asociación sin ayudar o dañar al otro organismo. La mayoría de las arqueas viven en los océanos, formando parte del plancton marino, donde se consideran participantes fundamentales en los ciclos del carbono y del nitrógeno.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Ed. Fundación Sicomoro.

MADIGAN, M. T., BENDER, K. S., BUCKLEY, D. H., SATTLEY, W. M., STAHL, D. A. BROCK (2021). *Biology of Microorganisms*, 16th Edition. Pearson Education, Inc.: San Francisco, CA, EE. UU.

Además, las arqueas se han empleado en biorremediación y en biotecnología. La biorremediación utiliza microorganismos, hongos y plantas para recuperar un medio ambiente alterado por contaminantes mientras que la biotecnología utiliza sistemas biológicos y organismos vivos para desarrollar o manipular productos o procesos con fines específicos, como por ejemplo los alimentos transgénicos. Las especies metanógenas se pueden utilizar para la producción de biogás, y para la depuración de suelos y de aguas contaminados. Las enzimas procedentes de arqueas termófilas son capaces de soportar altas temperaturas y elevadas concentraciones de disolventes orgánicos, por lo cual son útiles en procesos biotecnológicos.

ples taken from various environments. A large number are **extremophiles**, with species capable of living at high temperature, high salinity or extreme pH. For example, the genus *Pyrolobus* is hyperthermophilic and can live at 113 °C, and even the methanogenic *Methanopyrus* can withstand 122 °C. Although archaea produce the energy they need to live from chemical oxidation reactions, some genera such as *Halobacterium* can use sunlight to produce energy. Some archaea use organic compounds in their energy **metabolism**, and many others are chemolithotrophs (use only inorganic compounds), especially the hyperthermophilic archaea. The ability of archaea to inhabit these extreme environments and to maintain active metabolic pathways has expanded the scenarios in which life is possible. This is why their study is fundamental to Astrobiology research.

Although all archaea were initially considered to be extremophiles, as they were identified in harsh environments such as hot springs and salt lakes, they are now known to be globally distributed and are among the predominant organisms on the planet. Archaea are present in

the most diverse habitats, including soil and oceans, and even inhabit the gut of mammals. Methanogenic archaea have been found in the human colon. In some animals such as ruminants, they are present in large quantities and contribute to digesting food. However, there are no known examples of pathogenic or parasitic archaea; they are usually mutualistic or commensal. Most archaea live in the oceans, forming part of the marine plankton, where they are considered key participants in the carbon and nitrogen cycles.

In addition, archaea have been used in bioremediation and biotechnology. Bioremediation uses microorganisms, fungi and plants to restore an environment altered by contaminants, while biotechnology uses biological systems and living organisms to develop or manipulate products or processes for specific purposes, such as transgenic foods. Methanogenic species can be used for biogas production, and for the purification of contaminated soils and water. Enzymes from thermophilic archaea can withstand high temperatures and high concentrations of organic solvents, making them useful in biotechnological processes.

9. BACTERIA

Una bacteria es un organismo microscópico (unos pocos micrómetros de tamaño), generalmente unicelular, que se encuentra en todo tipo de ambientes. Las bacterias componen uno de los tres dominios en los que se dividen los seres vivos (bacterias, **arqueas** y **eucariotas**, ver figura 7). Tanto bacterias como arqueas son organismos procariotas, es decir, compuestos por **células** que no tienen un núcleo celular diferenciado ni orgánulos internos, a diferencia de los eucariotas (animales, plantas, hongos, protistas y cromistas). Las bacterias generalmente poseen una pared celular compuesta de un polímero denominado peptidoglicano o mureína muy resistente que las protege de la presión osmótica en ambientes acuáticos y les confiere sus diversas formas: esférica o cocoide, en forma de barras o bacilos, filamentos curvados o vibrios, o forma espiral o helicoidal. Muchas bacterias disponen de elementos que les confieren movilidad y les asisten en los desplazamientos, tales como los flagelos.

Las bacterias son los organismos más abundantes del planeta. Se calcula que puede llegar a haber unas 5×10^{30} , es decir, un quintillón de bacterias en la **Tierra**. Son además organismos muy ubicuos y resistentes, capaces de adaptarse a las condiciones más extremas (alto nivel de **radiación**, niveles extremos de pH, alta concentración de sales, elevada presión, temperaturas extremas, concentración de metales y otros elementos tóxicos, etc.). Se encuentran en todo tipo de ambientes, terrestres y acuáticos, cálidos y polares, habiéndose llegado a encontrar a gran profundidad en el subsuelo, en manantiales hidrotermales subterráneos, en aguas hiperácidas con elevados contenidos en metales pesados, en lagunas alcalinas, chimeneas hidrotermales en fosas oceánicas, depósitos de sal, o incluso en desechos radiactivos. Esta ubicuidad y gran capacidad de adaptación les hace especialmente interesantes en el campo de la Astrobiología (ver término **Extremófilo**).

Por otra parte, tienen un gran valor ecológico ya que son imprescindibles

en el reciclado de la materia y juegan un papel fundamental en la mayoría de los ciclos biogeoquímicos. Además, tienen un importante valor evolutivo, ya que se considera que los primeros organismos en la Tierra (las primeras células) las formaron los antepasados de los procariotas modernos, hace más de 4000 millones de años. Se ha sugerido que el último antepasado común universal de los procariotas (llamado **LUCA** por sus siglas en inglés, Last Universal Common Ancestor, o *Último Antepasado Común Universal*) fue un microorganismo termófilo (capaz de vivir a altas temperaturas) que vivió hace unos 4350 millones de años. Además, se cree que las bacterias pudieron estar implicadas en la gran divergencia evolutiva que separó a arqueas y eucariotas hace unos 2000 millones de años, y a la formación de los cloroplastos (orgánulos celulares de eucariotas donde se realiza la fotosíntesis) de algas y plantas a partir de que un organismo eucariota ingeriera una cianobacteria (un tipo de bacteria capaz de realizar la fotosíntesis oxigénica). La aparición de las cianobac-

BACTERIA

A bacterium is a microscopic organism (a few micrometers in size), generally unicellular, found in all types of environments. Bacteria make up one of the three domains into which living things are divided (bacteria, **archaea** and **eukaryotes**, see figure 7). Both bacteria and archaea are prokaryotic organisms, i.e., composed of cells that do not have a differentiated **cell** nucleus or internal organelles, unlike eukaryotes (animals, plants, fungi, protists and chromists). Bacteria generally have a cell wall composed of a polymer called peptidoglycan or murein, which protects them from osmotic pressure in aquatic environments and gives them their various shapes: spherical or coccoid, rod-shaped or bacilli, curved filaments or vibrios, or spiral or helical shape. Many bacteria have elements that give them mobility and assist them in movement, such as flagella.

Bacteria are the most abundant organisms on the planet. It is estimated that there may be as many as 5×10^{30} bacteria

on **Earth**. They are also very ubiquitous and resistant organisms, capable of adapting to the most extreme conditions (high level of **radiation**, extreme pH levels, high concentration of salts, high pressure, extreme temperatures, concentration of metals and other toxic elements, etc.). They are found in all types of environments, terrestrial and aquatic, warm and polar, having been found at great depths in the subsoil, in subway hydrothermal springs, in hyperacid waters with high heavy metal content, in alkaline lagoons, hydrothermal chimneys in oceanic trenches, salt deposits, or even in radioactive waste. This ubiquity and great adaptability make them particularly interesting in the field of Astrobiology (see term **Extremophile**).

On the other hand, they have a great ecological value as they are essential in the recycling of matter and play a fundamental role in most biogeochemical cycles. In addition, they have an important evolutionary value, since it is

considered that the first organisms on Earth (the first cells) were formed by the ancestors of modern prokaryotes, more than 4 billion years ago. It has been suggested that the last universal common ancestor of prokaryotes (called **LUCA**, Last Universal Common Ancestor) was a thermophilic microorganism (i.e., capable of living at high temperatures) that lived about 4350 million years ago. In addition, it is believed that bacteria may have been involved in the great evolutionary divergence that separated archaea and eukaryotes about 2 billion years ago, and in the formation of chloroplasts (eukaryotic cell organelles where photosynthesis takes place) of algae and plants after a eukaryotic organism ingested a cyanobacterium (a type of bacterium capable of oxygenic photosynthesis). The emergence of cyanobacteria was key in the history of our planet, since their photosynthetic activity allowed oxygen to begin to accumulate in the Earth's **atmosphere** some 2500-2600 million years ago.

terias fue clave en la historia de nuestro planeta, ya que su actividad fotosintética permitió que el oxígeno empezara a acumularse en la **atmósfera** terrestre hace unos 2500-2600 millones de años.

Por su relevancia en el surgimiento de la **vida** en la Tierra, su ubicuidad y conti-

nuidad a lo largo de la historia, así como por la simpleza y resistencia de sus células, los organismos procariotas son uno de los candidatos favoritos a la hora de buscar vida fuera de la Tierra. Ante la adversidad de las condiciones ambientales extremas más allá de un planeta rocoso con atmósfera protectora como la Tierra, cabe

esperar que el tipo de vida con más probabilidades de existir en caso de hacerlo sea de tipo sencillo y resiliente que, no solo haya sido capaz de surgir sino también de persistir a lo largo del tiempo para poder prosperar y colonizar el entorno.

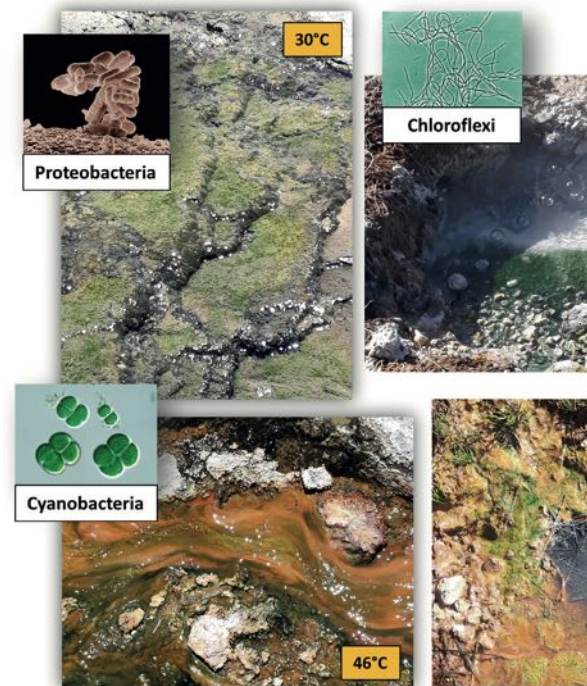
Figura 8:

Tapetes de bacterias en arroyos hidrotermales.

Bacterial mats in hydrothermal streams.

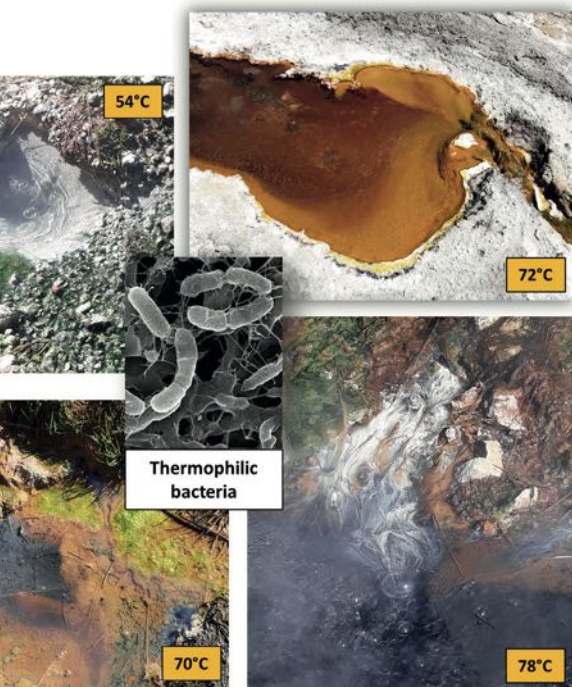
Fluyen a distinta temperatura, con imágenes ejemplo de algunas de las bacterias más características encontradas a cada una de las temperaturas. Las bacterias se citan con nombres científicos a nivel de filo (Proteobacteria, Cyanobacteria o Chloroflexi), o con nombres comunes que se refieren a distintos tipos de bacterias “amantes de la temperatura” (bacterias termófilas).

They flow at different temperatures, with example images of some of the most characteristic bacteria found at each of the temperatures. Bacteria are cited by scientific names at the phylum level (Proteobacteria, Cyanobacteria or Chloroflexi), or by common names referring to different types of “temperature-loving” bacteria (thermophilic bacteria).



Because of their relevance in the emergence of **life** on Earth, their ubiquity and continuity throughout history, as well as the simplicity and resilience of their cells, prokaryotic organisms are one of the favorite candidates when searching for life beyond the Earth. Given the adversity of extreme envi-

ronmental conditions beyond a rocky planet with a protective atmosphere like Earth, it is to be expected that the type of life most likely to exist if it does is of a simple and resilient type that has not only been able to emerge but also to persist over time in order to thrive and colonize the environment.



Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

DODD, M. S., PAPINEAU, D., GRENNÉ, T., SLACK, J. F. R., MARTIN, PIRAJNO, F., O'NEIL, J., LITTLE, C. T. S. (2017). "Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates." *Nature* 543, pp. 60-64

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

MCFADDEN, G. (1999). "Endosymbiosis and evolution of the plant cell." *Curr Opin Plant Biol*, 2 (6), pp. 513-519.

WHITMAN, W., COLEMAN, D., WIEBE, W. (1998). "Prokaryotes: the unseen majority." *Proc Natl Acad Sci USA*, 95 (12), pp. 6578-83.

WOESE, C., KANDLER, O., WHEELIS, M. (1990). "Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya." *Proc Natl Acad Sci USA*, 87 (12), pp. 4576-9.

10. BIODIVERSIDAD

Biodiversidad (βίος o *bíos*, **vida**) es el término que se utiliza para referirse a un conjunto de organismos vivos diferentes que se encuentran en un ambiente o entorno natural concreto. Los grupos de organismos que componen la diversidad biológica o biodiversidad se clasifican científicamente en diferentes categorías o unidades taxonómicas como filo, clase, orden, familia, género y especie. Esta última es la más empleada a la hora de referirnos a la diversidad de un grupo de organismos concreto.

Actualmente es posible encontrar un patrón de biodiversidad de primer orden en el trópico donde se puede observar una gran variedad de especies de plantas y animales. Este patrón está muy relacionado con variaciones en temperatura, así como con otras variables físicas de orden espaciotemporal.

Sin embargo, no solamente existe biodiversidad de plantas y animales, sino que también se encuentra una inmensa diversidad microbiana de organismos mayoritariamente unicelulares que solamente se detectan a través de técnicas microscópicas y moleculares muy sofisticadas. Aunque estos microorganismos no

son detectables a simple vista, su diversidad es mucho mayor que la observada en plantas y animales, pudiéndose clasificar en diferentes especies de hongos, algas, protozoos, **bacterias** y **arqueas**.

Estos microorganismos muestran una gran versatilidad metabólica y algunos han desarrollado mecanismos moleculares para adaptarse a diferentes ambientes extremos (elevada salinidad, **radiación** ultravioleta, concentración de metales, etc.). Estos ambientes naturales despiertan un gran interés en Astrobiología porque se consideran **análogos terrestres** de otros cuerpos planetarios potencialmente habitables (ver término **Zona de habitabilidad galáctica**), proporcionando información muy valiosa sobre los mecanismos generales que podrían generar y mantener la biodiversidad en esos sistemas. Hasta la fecha se han realizado numerosos trabajos científicos para conocer la diversidad de estos microorganismos **extremófilos** en diferentes ambientes extremos como el desierto de Atacama, el Río Tinto, la Antártida, etc.

La biodiversidad es una consecuencia de multitud de interacciones que han tenido lugar entre la vida y su entorno durante

toda la historia geológica de la **Tierra**. Esto permite conocer la evolución de los organismos (ver término **Evolución biológica**) e inferir cómo se habría podido desarrollar en otros sistemas análogos. Por esa razón el estudio de la diversidad no se limita a **muestras** biológicas actuales, sino que también es posible explorar la diversidad pasada a través de los fósiles. Por ejemplo, se han analizado muestras fósiles del Cámbrico, un periodo geológico en el que hubo una auténtica explosión de diversidad de vida compleja o los fósiles de estromatolitos, estructuras minerales formadas a partir de **biopelículas** bacterianas. Para llevar a cabo este tipo de estudios se integran datos paleontológicos, geoquímicos o de **filogenia** molecular.

Lecturas adicionales /Further reading

AGUILERA, A., SOUZA-EGIPSY, V., GONZÁLEZ TORIL, E., (2020). *La vida en Río Tinto*. INTA.

AMILS, R. (2010). *Río Tinto... Viaje a Marte*. Alfar. (español/English).

DE BRUIJN, F. J., (ed.) (2011). *Handbook of Molecular Microbial Ecology II: Metagenomics in Different Habitats*. John Wiley & Sons.

BIODIVERSITY

Biodiversity (βίος or bios, **life**) is the term used to refer to a set of different living organisms found in a particular environment or natural setting. The groups of organisms that make up biological diversity or biodiversity are scientifically classified into different categories or taxonomic units such as phylum, class, order, family, genus and species. The latter is the most commonly used when referring to the diversity of a specific group of organisms.

Currently, it is possible to find a first-order pattern of biodiversity in the tropics where a great variety of plant and animal species can be observed. This pattern is

closely related to variations in temperature, as well as other spatiotemporal physical variables.

However, there is not only biodiversity of plants and animals, but also an immense microbial diversity of mostly unicellular organisms that can only be detected through very sophisticated microscopic and molecular techniques. Although these microorganisms are not detectable with the naked eye, their diversity is much greater than that observed in plants and animals, and can be classified into different species of fungi, algae, protozoa, **bacteria** and **archaea**.

These microorganisms show great metabolic versatility and some have developed molecular mechanisms to adapt to different extreme environments (high salinity, ultraviolet **radiation**, metal concentration, etc.). These natural environments are of great interest in Astrobiology because they are considered **terrestrial analogues** of other potentially habitable planetary bodies (see term **Galactic habitability zone**), providing valuable information on the general mechanisms that could generate

and maintain biodiversity in these systems. To date, numerous scientific works have been carried out to know the diversity of these **extremophile** microorganisms in different extreme environments such as the Atacama Desert, the Tinto River, Antarctica, etc.

Biodiversity is a consequence of a multitude of interactions that have taken place between life and its environment throughout the geological history of the **Earth**. This makes it possible to understand the evolution of organisms (see term **Biological evolution**) and to infer how they might have developed in other similar systems. For this reason, the study of diversity is not limited to current biological samples, but it is also possible to explore past diversity through fossils. For example, fossil **samples** from the Cambrian, a geological period in which there was a veritable explosion of diversity of complex life, or the fossils of stromatolites, mineral structures formed from bacterial biofilms, have been analyzed. Paleontological, geochemical or molecular **phylogeny** data are integrated to carry out this type of studies.

GOULD, S. J. (2006). *La Vida Maravillosa*. Editorial Crítica.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

STAN-LOTTER, H., FENDRIHAN, S. (eds.) (2017). *Adaption of Microbial Life to Environmental Extremes: Novel Research Results and Application*. 2ª Ed. Springer.

11. BIOMARCADOR, FÓSIL QUÍMICO

Se conoce como biomarcador (también denominado fósil químico, marcador molecular, indicador o trazador orgánico) a todo compuesto específico con utilidad para evaluar las fuentes genéticas de la materia orgánica. Se trata en general de compuestos orgánicos cuya estructura química puede relacionarse directa o indirectamente a través de un conjunto de alteraciones de degradación con los compuestos de origen biológico de los que procede (fuentes naturales). Además, los biomarcadores pueden utilizarse como rastreadores de procesos geológicos y medioambientales (por ejemplo, condiciones ambientales de acumulación, **atmósfera** rica o ausente de oxígeno, ambiente terrestre versus acuoso, etc.).

El término original fue el de fósiles químicos, que evolucionó a compuestos

marcadores biológicos y luego se contrajo al término actualmente popular de biomarcador. El requisito principal de cualquier compuesto para ser considerado biomarcador es que haya sido sintetizado única y exclusivamente de forma biológica (criterio de “biogenicidad”), sin que haya ningún proceso abiótico (es decir, en el que no intervenga la **vida**) por el que pueda haberse originado de forma alternativa. El origen biogénico de la materia orgánica suele ir acompañado de una serie de características, tales como la mayor frecuencia de anomalías (ausencia de patrones en el perfil molecular) y una **complejidad** creciente.

Los biomarcadores o fósiles químicos adquieren especial importancia en **muestras** muy antiguas y/o alteradas, donde otros posibles elementos de re-

construcción, tales como fósiles texturales de tamaño micro y macroscópico, se han ido perdiendo a lo largo del tiempo por efecto de la alteración biológica y la diagénesis (proceso geológico de alteración por presión y temperatura). En estos casos, es la estructura química o molecular junto con su composición isotópica (ver término **Firmas isotópicas**), la que permite rastrear el origen biológico, los precursores, y los procesos de alteración sufridos. Cuanto más resistencia química y perdurabilidad en el tiempo, mayor valor como biomarcador en términos geológicos y astrobiológicos, dadas las extremas condiciones ambientales en el espacio.

Hay distintos tipos de biomoléculas que pueden utilizarse con objetivo trazador o biomarcador, tales como los ácidos

BIOMARKER, CHEMICAL FOSSIL

A biomarker (also known as chemical fossil, molecular marker, indicator or organic tracer) is any specific compound useful to evaluate the genetic sources of organic matter. These are generally organic compounds whose chemical structure can be related directly or indirectly through a set of degradation alterations to their biologically generated precursors (natural sources). In addition, biomarkers can be used as tracers of geological and environmental processes (e.g. depositional conditions, oxygen-rich or oxygen-depleted **atmosphere**, terrestrial versus aqueous environment, etc.).

The original term was chemical fossils, which evolved into biomarker compounds and then contracted to the currently popular term biomarker. The main requirement for any compound to

be considered a biomarker is that it must have been synthesized solely and exclusively biologically (biogenicity criterion), with no abiotic (i.e., not involving **life**) process by which it could have alternatively originated. The biogenic origin of organic matter is usually accompanied by a number of characteristics, such as increased frequency of anomalies (absence of patterns in the molecular profile) and increasing **complexity**.

Biomarkers or chemical fossils acquire special importance in very old and/or altered **samples**, where other possible reconstruction elements, such as textural fossils of micro and macroscopic size, have been lost over time due to biological alteration and diagenesis (geological process of alteration by pressure and temperature). In these cases, it is the

chemical or molecular structure together with its isotopic composition (see term **Isotopic signatures**), which allows us to trace the biological origin, the precursors, and the alteration processes undergone. The more chemical resistance and durability over time, the greater the value as a biomarker in geological and astrobiological terms, given the extreme environmental conditions in space.

There are different types of biomolecules that can be used as tracers or biomarkers, such as nucleic acids that make up genetic material (**RNA** and **DNA**) or amino acids that give rise to proteins. These macromolecules are excellent at tracing their biological origin at a very detailed classification level, however, they degrade easily (less than 1 million years in the case of DNA and about 3.8 million

nucleicos que conforman el material genético (**ARN** y **ADN**) o los aminoácidos que dan lugar a las **proteínas**. Estas macromoléculas son excelentes a la hora de rastrear su origen biológico a un nivel de clasificación muy detallado, sin embargo, se degradan fácilmente (menos de 1 millón de años en el caso del ADN y unos 3,8 millones de años en el de las proteínas) y, por tanto, pierden su valor como biomarcador en ambientes muy antiguos. Aminoácidos y otros productos bioquímicos de poca estabilidad química se han utilizado como indicadores o pruebas de la actividad biológica y de la conservación en el registro geológico más reciente y en **meteoritos**. Por otro lado, los pigmentos y las cadenas de hidrocarburos que componen las membranas celulares, tales como ácidos grasos, hidrocarburos cíclicos y ramificados, u otros compuestos (por ejemplo, los

aromáticos), son genéricamente estables durante períodos geológicos más largos y, por tanto, tienen una mayor capacidad de reconstrucción de ambientes pasados (se han encontrado biomarcadores lipídicos de hasta 3000 millones de años), a pesar de su menor nivel de clasificación biológica.

Además, los lípidos son muy ubicuos en la naturaleza (p. ej., componentes de las membranas celulares de todo organismo) por lo que se consideran sólidos biomarcadores para la detección de la vida en todo tipo de entornos, incluidos los más hostiles. Esta universalidad en relación a la biología conocida en la **Tierra**, junto con su gran capacidad de preservación (resistencia química), convierte a los biomarcadores lipídicos en potentes herramientas forenses para la búsqueda de **vida** extraterrestre.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

EGLINTON, G., CALVIN, M. (1967). "Chemical fossils." *Scient. Amer.* 216, 32-43.

EIGENBRODE, J. L. (2008). "Fossil Lipids for Life-Detection: A Case Study from the Early Earth Record", *Space Sci. Rev.* 135, pp. 161-185

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

HUNT, J.M. (1979). *Petroleum Geochemistry and Geology*. W.H. Freeman & Co, San Francisco, p. 617.

SIMONEIT, B. R. T. (1998). "Biomarkers as tracers for life on early Earth and Mars", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 28, pp. 475-483.

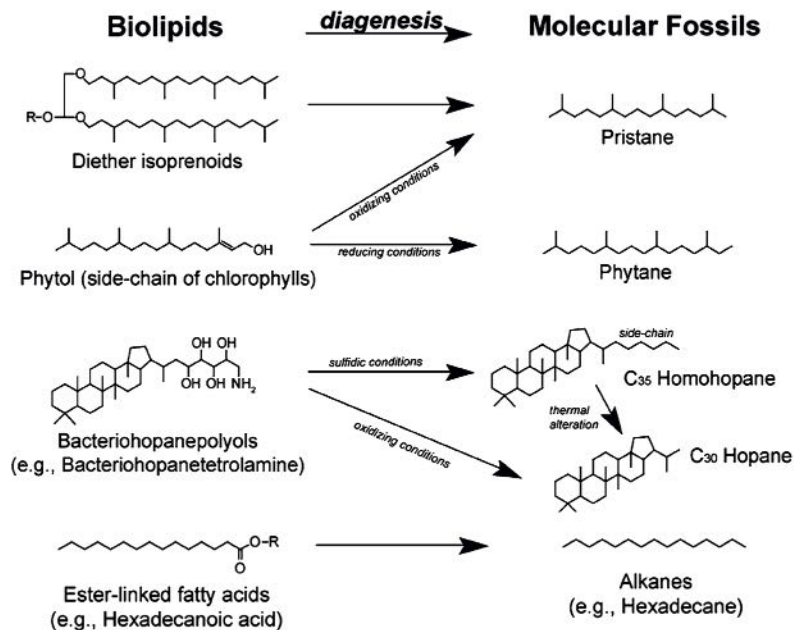


Figura 9:

Ejemplos de fósiles moleculares.

Examples of molecular fossils.

Han sido derivados de compuestos lipídicos, componentes de membranas celulares tras procesos de alteración por presión y temperatura.

They have been derived from lipid compounds, components of cellular membranes after alteration processes by pressure and temperature.

Adaptada de /Adapted from: Eigenbrode (2008). Space Sci Rev 135: 161–185 (10.1007/s11214-007-9252-9).

years in the case of **proteins**) and therefore lose their value as a biomarker in very old environments. Amino acids and other biochemicals of low chemical stability have been used as indicators or evidence of biological activity and preservation in the more recent geological record and in meteorites. On the other hand, pigments and hydrocarbon chains that make up cell membranes, such as fatty acids, cyclic and branched hydrocarbons, or other compounds (e.g., aromatics), are generically stable over longer geological periods and thus have a greater capacity to reconstruct past environments (lipid biomarkers up to 3 billion years old have been found), despite their lower level of biological classification.

Furthermore, lipids are very ubiquitous in nature (i.e. components of the cell membranes of every organism) so they are considered solid biomarkers for the detection of life in all kinds of environments, including the most hostile ones. This universality in relation to known biology on **Earth**, together with their high preservation capacity (chemical resistance), makes lipid biomarkers powerful forensic tools in the search for extraterrestrial life.

12. BIOPOLÍMERO

Son aquellos polímeros (generalmente moléculas de gran tamaño o macromoléculas, formadas por una o varias unidades químicas, monómeros, que se repiten a lo largo de toda su cadena) producidos a partir de fuentes naturales, sintetizados químicamente a partir de un material biológico o bien biosintetizados por un organismo vivo. Los biopolímeros son estructuras de carácter lineal y cuyos enlaces covalentes les confieren cierta dureza, pero a su vez promueven flexibilidad y estabilidad química. Estas características les proporcionan propiedades especiales que los distinguen de otro tipo de polímeros: i) se pliegan y autoensamblan espontáneamente en estructuras tridimensionales complejas; ii) se degradan espontáneamente mediante hidrólisis en ambientes acuosos, típicos de sistemas biológicos; iii) se autoprotegen de la hidrólisis mediante autoplegamiento y con otras estructuras homólogas mediante ensamblaje heterogéneo.

Los seres vivos tienen en común tres de estos tipos de biopolímeros, donde se expresan y utilizan de manera similar, pudiendo diferenciarse: i) polinucleótidos como **ARN** y **ADN**; ii) polipéptidos como **proteínas**; y iii) polisacáridos tales como, celulosa, almidón, etc. Es por tanto un material que juega un papel esencial en el sustento de la **vida** de cualquier organismo, ya que por ejemplo los polipéptidos y polinucleótidos controlan la maquinaria funcional e informacional de la vida, mientras que los polisacáridos son importantes en la estructura física, almacenaje de energía y por último en identificación o reconocimiento.

El origen de la vida está ligado a la aparición de los primeros biopolímeros y de cómo estos han evolucionado desde un punto de vista prebiótico. Aunque existe cierto debate, está formalmente aceptado que las primeras macromoléculas de tipo biopolimérico debieron de poseer

necesariamente funciones catalíticas que permitieran intensificar la autorreplicación de ácidos nucleicos prebióticos. O, dicho de otro modo, en algún punto de la evolución de la vida, estructuras precursoras de las enzimas (coenzimas) debieron de jugar un papel importante no solo en la replicación del material genético primigenio sino en la creación de futuros mecanismos metabólicos complejos, ya que su estructura rígida posiblemente le permitiera mantener los grupos funcionales en una posición y orientación correcta.

Dado que existen diferentes modelos sobre el origen de la vida, la cuestión más importante a tener en cuenta, desde un punto de vista evolutivo, es determinar la probabilidad de que tales secuencias poliméricas con una estructura tridimensional única aparecieran en el sustrato primigenio a partir del cual surgió la actividad biológica. Es fundamental también

BIOPOLYMER

Biopolymers are polymers (typically large-size molecules or macromolecules, comprised of either one or several chemical units or monomers that are subsequently repeated along the chain) produced from natural sources, chemically synthesized from a biological material or biosynthesized by a living organism. Biopolymers are linear structures whose covalent bonds give them a certain strength, but at the same time promote flexibility and chemical stability. These unique characteristics give them special properties that distinguish them from other types of polymers: i) they fold and self-assemble spontaneously into complex three-dimensional structures; ii) they degrade spontaneously by hydrolysis in aqueous environments, typical of biological systems; iii) they protect themselves from hydrolysis by self-folding and with other similar structures by heterogeneous assembly.

Living beings have in common three of these types of biopolymers, where they are expressed and used in a similar way, being able to be differentiated; i) polynucleotides such as **RNA** and **DNA**; ii) polypeptides such as **proteins**; or iii) polysaccharides such as, cellulose, starch, etc. It is therefore a material that plays an essential role in sustaining the **life** of any organism, since for example polypeptides and polynucleotides control the functional and informational machinery of life, while polysaccharides are important in physical structure, energy storage and finally in identification or recognition.

The origin of life is linked to the emergence of the first biopolymers and how they evolved from a prebiotic point of view. Although there is some debate, it is formally accepted that the first biopolymeric-type macromolecules must necessarily have had catalytic functions to

enhance the self-replication of prebiotic nucleic acids. Or, in other words, at some point in the evolution of life, precursor structures of enzymes (coenzymes) must have played an important role not only in the replication of primordial genetic material but also in the creation of future complex metabolic mechanisms, since their rigid structure possibly allowed them to maintain the functional groups in the correct position and orientation.

Since there are different models for the origin of life, the most important question to consider, from an evolutionary point of view, is to determine the probability that such polymeric sequences with a unique three-dimensional structure appeared in the primordial substrate where biological activity arose. It is also essential to understand and explain the biochemical paradox that biopolymers are chemically unstable substances in their natural environ-

DNA: Example of a biopolymeric structure

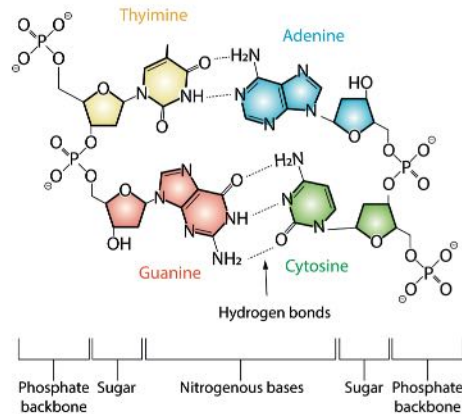
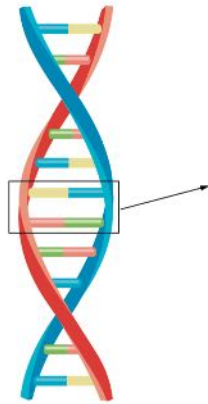


Figura 10:

Segmento de una cadena de ADN y detalle.

Segment of a DNA strand and detail.

comprender y dar explicación a la paradoja bioquímica de que los biopolímeros son sustancias químicamente inestables en su ambiente natural (soluciones acuosas). Es decir, todos ellos, en medio acuoso, espontáneamente hidrolizan hasta niveles monoméricos. Sin embargo, el mutualismo (mutualismo es una interacción persistente y estrecha entre especies que confiere beneficio a ambas) y el pliegue en estructuras tridimensionales les confieren cierta protección. Desde otra perspectiva, biopolímeros con características de mutualismo favorecen la supervivencia y evolución del grupo al generar relaciones en beneficio de dicho conjunto; si por el contrario hubiera algún tipo de competencia, esto derivaría a la más que probable extinción.

Son por tanto unas estructuras interesantes de las que, si bien actualmente se posee un extenso conocimiento químico y bioquímico, desde el punto de vista evolutivo y prebiótico, su origen plantea numerosas cuestiones.

ment (aqueous solutions). That is, all of them, in aqueous media, spontaneously hydrolyze to monomeric levels. However, mutualism (mutualism is a persistent and close interaction between species that confers benefit to both) and folding into three-dimensional structures give them some protection. From another perspective, biopolymers with mutualistic characteristics favor the survival and evolution of the

group by generating relationships that benefit the group; if, on the contrary, there were any type of competition, this would lead to extinction.

They are, therefore, interesting structures. We currently have an extensive knowledge from the chemical and biochemical perspective, however, from an evolutionary and prebiotic point of view, their origin raises many questions.

Lecturas adicionales /Further reading

ABKEVICH, V. I., GUTIN, A. M., SHAKHNOVICH, E. I. (1996). "How the first biopolymers could have evolved", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 93, 839-844.

GARZÓN RUIPÉREZ, L. (1996). *El origen de la vida (un nuevo escenario)*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo. ISBN-13: 978-8474689396

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

IBAÑEZ, J. J. "Suelos, Carbono, Silicio y el Origen de la Vida" [en línea], <<http://www.madridmasd.org/blogs/universo/2014/07/24/144726>>.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

RUNNELS, C. M., LANIER, K. A., WILLIAMS, J. K., BOWMAN, J. C., PETROV, A. S., HUD, N. V., WILLIAMS, L. D., FOLDING (2018). "Folding, Assembly, and Persistence: The Essential Nature and Origins of Biopolymers", *J. Mol. Evol.*, 86, 598-610.

13. BIOSFERA

Biosfera es el estrato de la superficie de la **Tierra** que sustenta la actividad biológica y que se extiende desde unos pocos kilómetros en la **atmósfera** hasta las chimeneas hidrotermales de las profundidades del océano. El término fue acuñado por el geólogo Eduard Suess en 1875, quien lo definió como el lugar de la superficie terrestre donde habita la **vida**. La Tierra consta de cuatro ámbitos diferentes: la biosfera, la atmósfera, la litosfera (geosfera) y la hidrosfera. La biosfera es la parte de la Tierra que incluye todas las comunidades biológicas y su entorno, la atmósfera terrestre es la zona gaseosa que rodea a la litosfera la cual, a su vez, es la parte formada por la corteza terrestre y el manto superior. La hidrosfera se refiere a todas las aguas de la superficie de la Tierra. Algunos

autores consideran que el término biosfera es sinónimo de ecosfera, que, en sentido estricto, se refiere a todos estos ámbitos que interactúan entre sí en un sistema cerrado.

La biosfera es un ecosistema global compuesto por organismos vivos (biota) y los factores abióticos (no vivos) de los que obtienen energía y nutrientes, existe desde hace unos 3500 millones de años y es una de las características que diferencian a la Tierra de los otros planetas conocidos hasta este momento. Las primeras formas de vida, llamadas procariotas, sobrevivieron sin oxígeno e incluían organismos unicelulares como las **bacterias** o las **arqueas**. Algunos de esos microorganismos empezaron a utilizar la luz, el agua y el dióxido de carbono

para crear compuestos químicos ricos en energía y producir moléculas de oxígeno como subproducto. Este proceso de fabricación de su alimento a partir de la energía de la luz se denomina fotosíntesis y los organismos capaces de hacerlo se llaman autótrofos. Estos organismos fotosintéticos eran tan abundantes que cambiaron la composición química de la biosfera, liberando gran cantidad de oxígeno y otros gases, permitiendo la evolución de formas de vida más complejas. Los organismos autótrofos actúan como productores de la cadena alimentaria. Los heterótrofos, que son organismos que no pueden producir alimentos del mismo modo que los autótrofos y, por tanto, tienen que consumir otros organismos, asumen el papel de controles biológicos naturales. Los heterótrofos

BIOSPHERE

Biosphere is the layer of the **Earth's** surface that supports biological activity and extends from a few kilometers in the **atmosphere** to the hydrothermal vents in the ocean depths. The term was coined by the geologist Eduard Suess in 1875, who defined it as the place on the Earth's surface where **life** lives. The Earth consists of four different domains: the biosphere, the atmosphere, the lithosphere (geosphere) and the hydrosphere. The biosphere is the part of the Earth that includes all biological communities and their environment, the Earth's atmosphere is the gaseous zone surrounding the lithosphere which, in turn, is the part formed by the Earth's crust and upper mantle. The hydrosphere refers to all the waters on the Earth's surface. Some authors consider the term biosphere to

be synonymous with ecosphere, which, strictly speaking, refers to all these interacting spheres in a closed system.

The biosphere is a global ecosystem composed of living organisms (biota) and the abiotic (non-living) factors from which they obtain energy and nutrients. It has existed for about 3.5 billion years and is one of the characteristics that differentiate the Earth from the other planets known to date. The first forms of life, called prokaryotes, survived without oxygen and included unicellular organisms such as **bacteria** or **archaea**. Some of these microorganisms began to use light, water and carbon dioxide to create energy-rich chemical compounds and produce oxygen molecules as a by-product.

This process of making their food from light energy is called photosynthesis and organisms capable of doing so are called autotrophs. These photosynthetic organisms were so abundant that they changed the chemical composition of the biosphere, releasing large amounts of oxygen and other gases, allowing the evolution of more complex life forms. Autotrophic organisms act as producers in the food chain. Heterotrophs, which are organisms that cannot produce food in the same way as autotrophs and therefore have to consume other organisms, take on the role of natural biological controls. Heterotrophs that feed only on plants are called herbivores, those that feed only on animal flesh are called carnivores, while those that feed on both plants and animal flesh are called om-

que se alimentan únicamente de plantas se denominan herbívoros, los que se alimentan únicamente de carne animal son los carnívoros, mientras que los que se alimentan tanto de plantas como de carne animal serían los omnívoros. Otro nicho ecológico importante son los descomponedores, encargados de eliminar a los organismos muertos y de convertir la materia orgánica en compuestos más simples que serán usados como nutrientes por otros organismos. El ejemplo más claro es el de los hongos, responsables de descomponer material vegetal o animal muerto. La biosfera se beneficia de esta red alimentaria ya que los restos de plantas y animales muertos liberan nutrientes en el suelo y los océanos, nutrientes que son a su vez reabsorbidos nuevamente por los seres vivos que la habitan. Este intercambio de alimentos y energía hace que la biosfera sea un sistema autosuficiente y autorregulado.

La biosfera es un sistema caracterizado por el ciclo continuo de la materia y un flujo de energía solar que la acompaña, en el que ciertas moléculas y **células** se autorreproducen. El **agua** es un factor predisponente importante, ya que toda la vida depende de ella y algunos elementos químicos (i.e. carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre), cuando se combinan formando **proteínas**, lípidos, carbohidratos y ácidos nucleicos, proporcionan los bloques de construcción, el combustible y la dirección para la creación de la vida. El flujo de energía es necesario para mantener la estructura de los organismos mediante la formación y división de los enlaces de fosfato, de esta manera, los organismos vivos tienen una naturaleza celular y siempre contienen algún tipo de estructura de membrana envolvente, así como ácidos nucleicos que almacenan y transmiten la información genética de una generación a otra.

nivores. Another important ecological niche are the decomposers, responsible for eliminating dead organisms and converting organic matter into simpler compounds that will be used as nutrients by other organisms. The clearest example is that of fungi, responsible for decomposing dead plant or animal material. The biosphere benefits from this food network because the remains of dead plants and animals release nutrients into the soil and oceans, nutrients that are in turn reabsorbed again by the living things that inhabit it. This exchange of food and energy makes the biosphere a self-sufficient and self-regulating system.

The biosphere is a system characterized by a continuous cycle of matter and an

accompanying flow of solar energy, in which certain molecules and **cells** are self-reproducing. **Water** is an important predisposing factor, as all life depends on it and certain chemical elements (i.e. carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen, phosphorus and sulfur), when combined to form **proteins**, lipids, carbohydrates and nucleic acids, provide the building blocks, fuel and direction for the creation of life. The flow of energy is necessary to maintain the structure of organisms through the formation and cleavage of phosphate bonds, thus, living organisms are cellular in nature and always contain some type of enveloping membrane structure, as well as nucleic acids that store and transmit genetic information from one generation to the next.

Lecturas adicionales /Further reading

ARAUJO, J. (2018). *Hombre y Biosfera*. Lunwerg Ed. Barcelona, pp. 159.

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

14. BIOSENSOR

Un biosensor es un dispositivo utilizado para la detección específica de sustancias químicas o analitos, que combina un componente biológico con un transductor fisicoquímico. El elemento biológico sensible puede ser un tejido, microorganismos, orgánulos, receptores celulares, enzimas, anticuerpos, ácidos nucleicos, etc., los cuales se unen de manera más o menos específica al analito que se pretende reconocer. Por otra parte, el transductor mide y cuantifica la interacción del analito con el elemento biológico mediante un sistema óptico, piezoeléctrico, electroquímico, magnético, etc. Finalmente, el biosensor se completa con un sistema electrónico que lee y amplifica la señal del transductor, la procesa y la muestra. En algunos casos el transductor y la electrónica se

pueden combinar, por ejemplo, en sistemas de microsensores basados en tecnologías denominadas CMOS. Un aspecto importante en la construcción de un biosensor es el método de unión de los elementos biológicos a la superficie del sensor. La forma más sencilla consiste en hacer funcional la superficie es la fabricación con un metal, polímero o vidrio, para posteriormente recubrirla mediante la deposición capa por capa con los elementos biológicos.

El primer biosensor fue diseñado por Leland Clark en 1952 para medir la concentración de glucosa en sangre. Este biosensor utilizaba como componente biológico la molécula glucosa oxidasa, la cual en presencia de oxígeno convierte la glucosa en ácido glucó-

nico y agua oxigenada. El dispositivo detectaba la desaparición de oxígeno en sangre, mediante técnicas electroquímicas, ya que dicha disminución es proporcional a la concentración inicial de glucosa.

Las principales ventajas de los biosensores son su capacidad de análisis rápido, masivo e *in situ* mediante sistemas desechables o reutilizables, como sustituto a las técnicas analíticas y ultrasensibles de laboratorio. La alta selectividad del biorreceptor ante el analito a detectar es el requisito clave en el diseño del mismo. Estas ventajas, junto con la investigación en nuevos biorreceptores, ha multiplicado el número de aplicaciones comerciales de los biosensores en sectores como la agricultura, tecnología alimentaria, bio-

BIOSENSOR

A biosensor is a device used for the specific detection of chemical substances or analytes, which combines a biological component with a physicochemical transducer. The sensitive biological element can be a tissue, microorganisms, organelles, cell receptors, enzymes, antibodies, nucleic acids, etc., which bind more or less specifically to the analyte to be recognized. On the other hand, the transducer measures and quantifies the interaction of the analyte with the biological element by means of an optical, piezoelectric, electrochemical or magnetic system. Finally, the biosensor is completed with an electronic system that reads, amplifies, processes and displays the transducer signal. In some cases, the transducer and electronics can be combined, for exam-

ple, in microsensor systems based on so-called CMOS technologies. An important aspect in the construction of a biosensor is the method of attaching the biological elements to the sensor surface. The simplest way is surface functionalization, which can be made of a metal, polymer or glass, and then coat it by layer-by-layer deposition with the biological elements.

The first biosensor was designed by Leland Clark in 1952 to measure blood glucose concentration. This biosensor used as its biological component the molecule glucose oxidase, which in the presence of oxygen converts glucose into gluconic acid and hydrogen peroxide. The device detected the disappearance of oxygen in blood, using electrochemical techniques,

since this decrease is proportional to the initial concentration of glucose.

The main advantages of biosensors are their capacity for rapid, massive and *in situ* analysis by means of disposable or reusable systems, as a substitute for analytical and ultrasensitive laboratory techniques. The high selectivity of the bioreceptor to the analyte to be detected is the key requirement in its design. These advantages, together with research into new bioreceptors, have multiplied the number of commercial applications of biosensors in sectors such as agriculture, food technology, biomedicine and environmental monitoring.

Biosensors also have a very promising field of application in Astrobiology, and

medicina y monitorización ambiental.

Los biosensores tienen también un campo de aplicación muy prometedor en Astrobiología y, más concretamente, en la búsqueda *in situ* de **biomarcadores de vida** presentes o pasados en **Marte**, en las lunas heladas de Júpiter y Saturno o en análogos en la **Tierra**. Históricamente la mayoría de las misiones de NASA a Marte dedicadas a la búsqueda de vida mediante la detección de compuestos orgánicos (Viking, Phoenix, MSL), han utilizado instrumentación basada en métodos de calentamiento de la muestra a alta temperatura para su volatilización y posterior detección de sustancias mediante espectrometría de masas (técnica de análisis que permite determinar la distribución de las moléculas de una sustancia en función de su masa). Estas técnicas tienen el

inconveniente de la posible degradación de las **muestras** biológicas, debido a la alta temperatura, y la aparición de nuevos compuestos como consecuencia de las reacciones químicas generadas. Los biosensores representan una alternativa para resolver estos problemas, mediante técnicas menos agresivas con las muestras y que no alteran su estructura. Además, tienen una alta especificidad analítica y sensibilidad de detección. Sin embargo, su aplicación en la **exploración** planetaria está dando aún los primeros pasos con ejemplos como el Life Marker Chip (LMC) de la misión ExoMars de la ESA, el Life Detector Chip (LDChip) de la misión Icebreaker del programa Discovery de NASA, ambos dos basados en biosensores de afinidad biológica de anticuerpos, y propuestas de instrumentos para detección de compuestos orgánicos en misiones a las lunas heladas de Júpiter y Saturno.

Lecturas adicionales /Further reading

EUROPEAN SPACE AGENCY, “ESA – Life Marker Chip”, [en línea] <<https://www.lionix-international.com/mems/mems-solutions/life-marker-chip/>>.

MCKAY, C. P., et al., (2013). “The Icebreaker Life Mission to Mars: A Search for Biomolecular Evidence for Life”, *Astrobiology* 13 (4), pp. 334–353.

more specifically in the *in situ* search for **biomarkers** of present or past **life** on **Mars**, the icy moons of Jupiter and Saturn or analogues on **Earth**. Historically, most NASA missions to Mars dedicated to the search for life by detecting organic compounds (Viking, Phoenix, MSL), have used instrumentation based on methods of heating the sample at high temperature for its volatilization and subsequent detection of substances by mass spectrometry (analysis technique that allows to

determine the distribution of molecules of a substance according to its mass). These techniques have the disadvantage of the possible degradation of biological **samples**, due to the high temperature, and the appearance of new compounds as a consequence of the chemical reactions generated. Biosensors represent an alternative to solve these problems, using techniques that are less aggressive with the samples and do not alter their structure. In addition, they have high analyti-

cal specificity and detection sensitivity. However, their application in planetary **exploration** is still taking its first steps with examples such as the Life Marker Chip (LMC) of ESA's ExoMars mission, the Life Detector Chip (LDChip) of NASA's Discovery program's Icebreaker mission, both based on biological affinity antibody biosensors, and proposals for new instruments for detection of organic compounds in missions to the icy moons of Jupiter and Saturn.

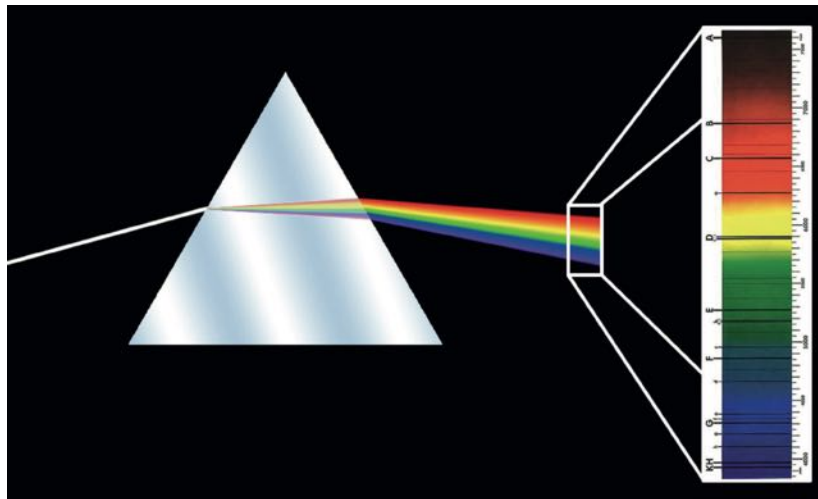


Figura 11:

Espectro.

Spectrum.

En este caso, la luz blanca del Sol se dispersa con un prisma, separándola en sus componentes esenciales. Son visibles, como bandas oscuras, las líneas de Fraunhofer, producidas por distintos elementos químicos.

In this case, the white light from the sun is scattered with a prism, separating it into its essential components. The Fraunhofer lines, produced by different chemical elements, are visible as dark bands.

15. CÁMARAS DE SIMULACIÓN PLANETARIA

Las cámaras de simulación planetaria se definen como infraestructuras desarrolladas en el laboratorio, que constan de un contenedor de acero inoxidable, en el que se pueden reproducir o simular de manera controlada las condiciones encontradas en la atmósfera y superficies de la mayoría de los objetos planetarios, mediante el control de parámetros físico-químicos como son la presión, composición de la atmósfera, temperatura y fuentes de irradiación. Para ello, se aplica la tecnología específica de condiciones de vacío o de alta presión diseñando sistemas versátiles dedicados a la simulación de las condiciones de las **atmósferas** y superficies planetarias o los entornos de alta presión. Las cámaras de simulación planetaria son sistemas versátiles que reproducen las condiciones del ambiente deseado mediante válvulas que regulan la admisión de los gases, un sistema que monitoriza en un ordenador que la composición de la atmósfera sea la correcta (espectrómetro de masas), medidores o sensores que proporcionan el valor de presión de la atmósfera y temperaturas en la muestra, siendo regulado mediante sistemas de enfriamiento o calentamiento.

Estas instalaciones de simulación experimental en el laboratorio son especialmente apropiadas para estudiar los cambios físicos, químicos y biológicos inducidos en una determinada muestra de estudio por la irradiación *in situ* o por parámetros físicos en un entorno controlado. Debido a las evidentes limitaciones técnicas y económicas de la **explora-**

ción planetaria *in situ*, las cámaras de simulación planetaria en el laboratorio son una de las opciones de investigación más factibles para avanzar tanto en diversos entornos de interés astrobiológico como en el desarrollo de una descripción consistente del origen de la **vida**. Las cámaras de simulación planetarias son más económicas, más versátiles y

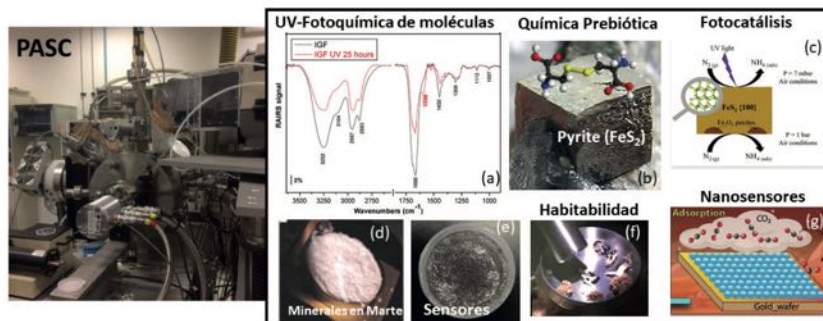


Figura 12:
Cámara de simulación planetaria.

Planetary simulation chamber.

Fotografía de la Cámara de Atmósfera y Superficies Planetarias (PASC), y diferentes aplicaciones astrobiológicas en la cámara de simulación PASC.

Picture of the Cámara de Atmósfera y Superficies Planetarias (PASC, Planetary Atmosphere and Surface Chamber), and different astrobiological applications in the PASC simulation chamber.

PLANETARY SIMULATION CHAMBERS

Planetary simulation chambers are defined as infrastructures developed in the laboratory, consisting of a stainless steel container, in which the conditions found in the atmosphere and surfaces of most planetary objects can be reproduced or simulated in a controlled manner, by controlling physicochemical parameters

such as pressure, atmospheric composition, temperature and irradiation sources. For this purpose, specific technology for vacuum or high-pressure conditions is applied by designing versatile systems dedicated to the simulation of the conditions of planetary **atmospheres** and surfaces or high-pressure environments.

The planetary simulation chambers are versatile systems that reproduce the conditions of the desired environment by means of valves that regulate the admission of gases, a system that monitors in a computer that the composition of the atmosphere is accurate (mass spectrometer), gauges or sensors that provide the pressure value of the atmosphere and temperatures in the sample, being regulated by cooling or heating systems.

Lecturas adicionales /Further reading

MATEO-MARTÍ, E., PRIETO-BALLESTEROS, O., SOBRADO, J. M., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN-GAGO, J. A. (2006). "A chamber for studying planetary environments and its applications to astrobiology". *Meas. Sci. Technol.* 17, 2274–2280.

MATEO-MARTÍ, E. (2016). "Planetary Simulation Chambers bring Mars to laboratory studies. *Física de la Tierra*. Vol. 28, pp. 13-23.

MATEO-MARTI, E., PRIETO-BALLESTEROS, O., MUÑOZ CARO, G., GONZÁLEZ-DÍAZ, C., MUÑOZ-IGLESIAS, V., GÁLVEZ-MARTÍNEZ, S. (2019). "Characterizing Interstellar Medium, Planetary Surface and Deep Environments by Spectroscopic Techniques Using Unique Simulation Chambers at Centro de Astrobiología (CAB)". *Life*, 9, 72.

MATEO-MARTI, E., GALVEZ-MARTINEZ, S., GIL-LOZANO, C., ZORZANO, M. P. (2019). "Pyrite-induced uv-photocatalytic abiotic nitrogen fixation: implications for early atmospheres and Life". *Scientific Reports*, 9:15311-1.

ZORZANO, M. P., MATEO-MARTÍ, E., PRIETO-BALLESTEROS, O., OSUNA, S., RENNO, N. (2009). "Stability of liquid saline water on present day Mars". *Geophys. Res. Lett.*, 36.

These experimental simulation facilities in the laboratory are particularly suitable to study the physical, chemical and biological changes induced in a given study sample by *in situ* irradiation or physical parameters under a controlled environment. Because of the obvious technical and economic limitations of planetary *in situ* **exploration**, planetary simulation chambers in the laboratory are one of the most feasible research options to advance both diverse environments of astrobiological interest and the development of a consistent description of the origin of **life**. Planetary simulation chambers are less expensive, more versatile, and

permiten un mayor número de experimentos que las misiones espaciales (ver el término **Exploración espacial**). El amplio rango de condiciones de presión, temperatura y composición del gas, da una idea de la versatilidad del sistema. Las fuentes de irradiación y las técnicas analíticas *in situ* amplían las potentes características de estas infraestructuras. Además, la implementación de técnicas analíticas acopladas a la estructura de las cámaras de simulación permite estudiar tanto los sólidos (superficies) como la fase gaseosa (atmósfera), proporcionando herramientas específicas para la

caracterización fisicoquímica *in situ* de **muestras** en condiciones análogas al planeta o luna que se requiera estudiar.

Las cámaras de simulación planetaria se posicionan como prometedoras herramientas y plataformas necesarias para la exploración planetaria de entornos habitables, el diseño de futuras misiones espaciales y planetarias, así como para la validación de medidas y observaciones realizadas *in situ* desde orbitadores o robots en superficie contribuyendo a evaluar la potencial **habitabilidad** de diferentes entornos hacia el origen de la vida.

allow a greater number of experiments than space missions (see term **Space exploration**). The wide range of pressure, temperature and gas composition conditions gives an idea of the versatility of the system. Irradiation sources and *in situ* analytical techniques extend the powerful capabilities of these infrastructures. In addition, the implementation of analytical techniques set-up in the simulation chambers allows the study of both phases: solids (surfaces) and the gas phase (atmosphere), providing specific tools for *in situ* physico-

chemical characterization of **samples** under conditions analogous to the planet or moon to be studied.

Planetary simulation chambers are promising tools and platforms necessary for the planetary exploration of habitable environments, the design of future space and planetary missions, as well as for the validation of measurements and observations made *in situ* from orbiters or surface robots contributing to evaluate the potential habitability of different environments towards the origin of life.

16. CÉLULA

Sistema químico abierto y confinado por una membrana con permeabilidad selectiva que depende de fuentes de energía y materia externas para mantener su estructura y controlar sus funciones metabólicas (ver **Metabolismo** y **Entropía**) a través de moléculas catalíticas llamadas enzimas. Las enzimas actúan a través de interacciones intermoleculares no covalentes (como puentes de hidrógeno o enlaces de van der Waals). Además, todas las células son capaces de almacenar en su material genético la información necesaria para reproducir autónomamente su estructura y funciones metabólicas, lo que permite la evolución por selección natural de sus descendientes (ver **Evolución biológica**).

Todas las células son capaces de llevar a cabo una serie de procesos a través de su metabolismo. Se nutren tomando

sustancias del medio que transforman de una forma a otra, liberan energía y eliminan productos de desecho. Crecen y se multiplican, es decir, son capaces de dirigir su propia síntesis. Pueden sufrir cambios de forma o función en un proceso llamado diferenciación celular, formando estructuras especializadas relacionadas con la reproducción, la dispersión o la supervivencia. Responden a estímulos químicos y físicos tanto del medio externo como de su interior por medio de señalización química. Y, por último, evolucionan a través de cambios aleatorios en el material genético, que son hereditarios, ocurren con baja frecuencia y pueden influir en su adaptación global. El resultado es la selección de aquellas células u organismos mejor adaptados a vivir en un medio particular. Existen tres tipos de células en la **Tierra** en función de su estructura y química.

Las células procariotas (figura 13a) son las más simples y primitivas. Existen dos tipos en función de su química estructural, las **bacterias** y las **arqueas**. Las células eucariotas (figura 13b), por otro lado, son más complejas y poseen compartimentación interna y orgánulos, múltiples cromosomas alojados en un núcleo y adoptan modos de **vida** tanto unicelulares como pluricelulares.

La célula es la entidad de vida más sencilla y entender su origen y evolución constituye el paradigma central de la Astrobiología. Es crucial comprender cómo se pudieron formar las primeras células, así como todos los procesos y saltos evolutivos que han permitido, a lo largo de los aproximadamente 4500 millones de años de la Tierra, generar la tremenda diversidad morfológica y funcional celular. La evidencia fósil indiscutible más antigua

CELL

It is an open chemical system confined by a membrane with selective permeability that depends on external sources of energy and matter to maintain its structure and control its metabolic functions (see **Metabolism** and **Entropy**) through catalytic molecules called enzymes. Enzymes act through non-covalent intermolecular interactions (such as hydrogen bonds or van der Waals bonds). In addition, all cells are capable of storing in their genetic material the information necessary to autonomously reproduce their structure and metabolic functions, which allows their descendants to evolve by natural selection (see **Biological evolution**).

All cells are capable of carrying out a series of processes through their metabolism. They feed by taking substances from the environment that transform

from one form to another, release energy and eliminate waste products. They grow and multiply, that is, they are capable of directing their own synthesis. They can undergo changes in form or function in a process called cell differentiation, creating specialized structures related to reproduction, dispersal, or survival. They respond to chemical and physical stimuli from both the external and internal environment through chemical signaling. And finally, they evolve through random changes in genetic material, which are heritable, occur infrequently, and can influence their overall adaptation. The result is the selection of those cells or organisms best adapted to live in a particular environment. There are three types of cells on Earth based on their structure and chemistry. Prokaryotic cells (figure 13a) are the simplest and most primitive. There are two types based on

their structural chemistry, **bacteria** and **archaea**. Eukaryotic cells (figure 13b), on the other hand, are more complex and possess internal compartmentalization and organelles, multiple chromosomes housed in a nucleus, and adopt both unicellular and multicellular lifestyles.

The cell is the simplest life entity and understanding its origin and evolution constitutes the central paradigm of Astrobiology. It is crucial to understand how the first cells were able to form, as well as all the evolutionary processes and gaps that have allowed, throughout the approximately 4.5 billion years of the **Earth**, to generate the tremendous cellular morphological and functional diversity. The oldest indisputable fossil evidence of life on Earth dates to at least 3.5 billion years ago, but using the molecular clock technique, which uses the

de vida en la Tierra data de hace al menos 3500 millones de años, pero mediante la técnica del reloj molecular, que utiliza la tasa de **mutación** del material genético para deducir el tiempo desde que dos o más formas de vida divergieron, se ha podido situar al último ancestro común con entidad celular (**LUCA**, por sus siglas en inglés) hace entre 3500 y 4300 millones de años. Esto parece indicar que la vida surgió bastante rápido en la historia de la Tierra.

Posiblemente las primeras células presentaron metabolismos anaeróbicos, poco después desarrollaron la fotosíntesis oxigénica, que en poco más de 1000 millones de años provocó la acumulación de oxígeno en la **atmósfera** y nuevas formas que dieron lugar a la célula eucariota, mediante un proceso de endosimbiosis (asociación en la cual un organismo habita en el interior de otro) entre procariotas, y las primeras

formas de vida multicelular sencilla. Se necesitaron casi 2000 millones de años adicionales para la aparición de formas más complejas como plantas o animales similares a los actuales (hace 850 y 609 millones de años respectivamente). Fue el preludio de la explosión cámbrica (hace 542-530 millones de años), periodo de gran generación y diversificación de organismos multicelulares complejos.

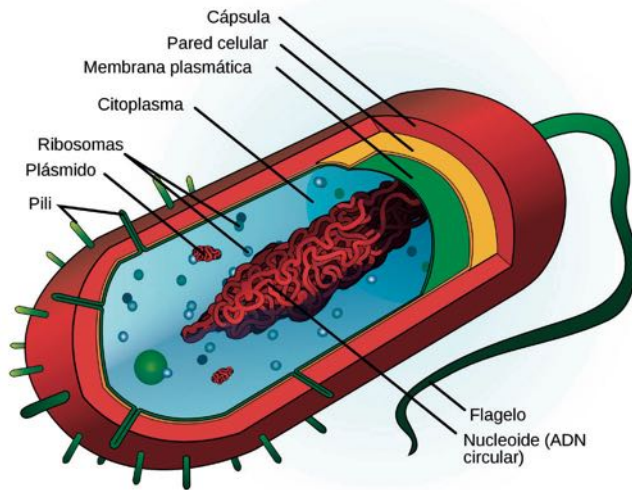
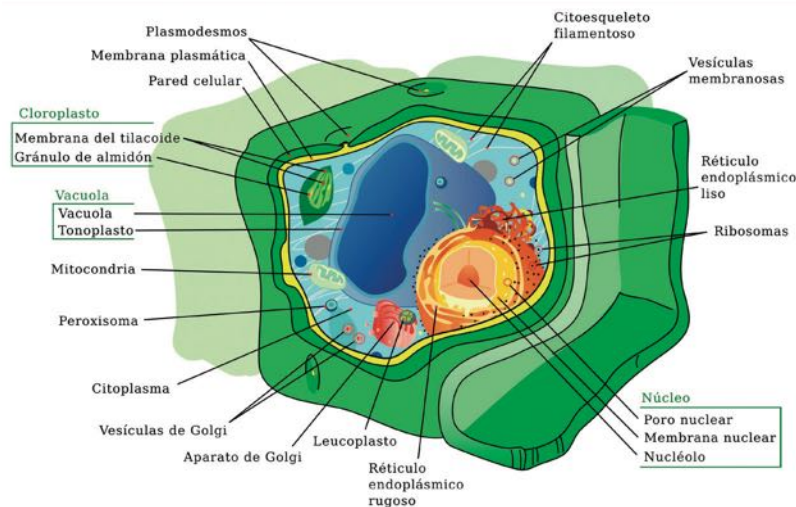


Figura 13a:
Célula procariota.
Prokaryotic cell.

rate of **mutation** of genetic material to deduce the time since two or more forms of life diverged, it has been possible to place the last common ancestor with a cellular entity (**LUCA**, by its acronym) between 3.5 and 4.3 billion years ago. This seems to indicate that life arose quite quickly in Earth's history.

Possibly the first cells presented anaerobic metabolisms, shortly after they developed oxygenic photosynthesis, which in just over 1 billion years caused the accumulation of oxygen in the **atmosphere** and

new forms that gave rise to the eukaryotic cell, through a process of endosymbiosis (association in which one organism lives inside another) between prokaryotes, and the first forms of simple multicellular life. Almost two billion additional years were needed for the appearance of more complex forms such as plants or animals similar to those of today (850 and 609 million years ago, respectively). This was the prelude to the Cambrian explosion (542-530 million years ago), a period of great generation and diversification of complex multicellular organisms.



Lecturas adicionales /Further reading

ALBERTS, B., JOHNSON, A., LEWIS, J., RAFF, M., ROBERTS, K., & WALTER, P. (2016). *Biología Molecular de la Célula*. Omega.

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

Figura 13b:

Célula eucariota.

Eukaryotic cell.

17. CICLO HIDROLÓGICO EN MARTE

El **agua**, y en general los líquidos, y el vacío son dos mundos incompatibles. La presión de vapor es la que determina la presión mínima en la que el líquido se encuentra en equilibrio con su vapor. Es decir, es la presión en la cual el número de moléculas que se evaporan de una superficie es el mismo número de moléculas que se condensan en la misma superficie. En el caso del agua la presión de vapor a temperatura ambiente (25 °C) es de 22 mbar. Por debajo de esa presión el líquido se evapora constantemente.

En **Marte** la presión media es de 8 mbar y el rango de temperatura del planeta hace que la mayor parte del tiempo se encuentre por debajo de los 0 °C. Es decir, en gran parte de su superficie, de haber agua, estaría congelada y habría una mínima fracción en estado líquido (temporalmente) y en vapor. Aun así, es posible que en Marte exista agua en estado líquido en su superficie en ciertos momentos y localizaciones.

En realidad, Marte es un planeta muy parecido a la **Tierra** con estaciones y variaciones de presión debido a su orografía

y temperatura ambiental, lo cual permite que exista un ciclo hidrológico con menos fenomenología climatológica. La composición gaseosa de su **atmósfera** posee un porcentaje mínimo de vapor de agua inferior al 0,5 %, lo cual indica que existe agua en fase vapor, y se sabe que hay agua en forma de **hielo** en los polos del planeta y en algunas áreas del subsuelo.

En la actualidad es difícil que fluya agua en estado líquido en su superficie. A pesar de ello, en verano y debido a la tenue sublimación (transición de una sustancia directamente del estado sólido al

estado gaseoso, sin pasar por el estado líquido) del hielo superficial, parte del vapor de agua que se encuentra en la atmósfera se condensa en las superficies frías y montañosas orientadas al norte. Se detectaron escorrentías (escurrimientos de agua) temporales que han sido caracterizadas desde distintos orbitadores como la Mars Express (sin embargo, ver término **Marte, Torrenteras**).

Este fenómeno y las variaciones de humedad relativa del ambiente en distintas localizaciones permiten afirmar que hubo al menos un ciclo de agua marciano.

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

OROSEI, R., LAURO, S. E., PETTINELLI, E., CICHETTI, et al. (2018). "Radar evidence of subglacial liquid water on Mars". *Science*, 361 (6401), pp. 490-493.

WRAY, J. J. (2021). "Contemporary liquid water on Mars?" *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, pp. 141-171.

HYDROLOGIC CYCLE ON MARS

Water, and liquids in general, and vacuum are two incompatible worlds. Vapor pressure is the pressure that determines the minimum pressure at which the liquid is in equilibrium with its vapor. That is, it is the pressure at which the number of molecules evaporating from a surface is the same number of molecules condensing on the same surface. In the case of water, the vapor pressure at room temperature (25 °C) is 22 mbar. Below that pressure the water evaporates constantly.

On **Mars** the average pressure is 8 mbar and the temperature range of the planet makes most of the time is below 0 °C. That is to say, if there was water on most of its surface, it would be frozen and there would be a minimal fraction in liquid state (temporarily) and in vapor. Even so, it is possible that liquid water exists on the surface of Mars at certain times and locations.

In reality, Mars is a very **Earth**-like planet with seasons and pressure variations due to its orography and ambient temperature, which allows for a hydrological cycle with less climatological phenomenology. The gaseous composition of its

atmosphere has a minimum percentage of water vapor of less than 0.5%, which indicates that there is water in vapor phase and it is known that there is water in the form of **ice** at the poles of the planet and in some areas of the subsoil.

At present it is difficult for water to flow in liquid state on its surface. Despite this, in summer and due to the tenuous sublimation (transition of a substance directly from the solid state to the gaseous state, without passing through the liquid state)

of surface ice, part of the water vapor found in the atmosphere condenses on cold and mountainous surfaces oriented to the north. Temporary runoff (water runoff) was detected and has been characterized from various orbiters such as Mars Express (however, see term **Mars: Gully**).

This phenomenon and the variations of relative humidity of the atmosphere in different locations allow us to affirm that there once was at least a Martian water cycle in the past.

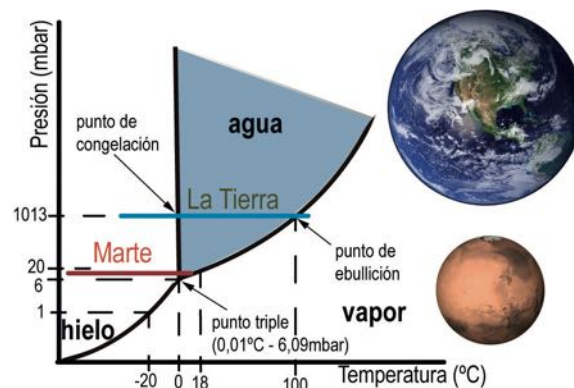


Figura 14:

Diagrama de condiciones atmosféricas.

Atmospheric conditions diagram.

Este diagrama ilustra las muy distintas condiciones atmosféricas de Marte y la Tierra.

This diagram illustrates the very different atmospheric conditions on Mars and Earth.

18. CIVILIZACIONES EXTRATERRESTRES, INICIATIVA SETI, ECUACIÓN DE DRAKE

La Vía Láctea contiene unos 200 000 millones de **estrellas** y probablemente un número superior de planetas, en donde la actividad biológica (ver término **Vida, actividad biológica**) podría aparecer relativamente pronto en aquellos con las condiciones idóneas. En un número indeterminado podría desarrollarse una especie con una civilización tecnológica. La iniciativa SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence o Búsqueda de inteligencia extraterrestre) se originó en los años 70 con un doble objetivo: escrutar los cielos para detectar señales artificiales y enviar mensajes desde la **Tierra**. Las distintas búsquedas han identificado varios candidatos, entre los que destacan los denominados “señal Wow” (¡guau! en su traducción onomatopéyica), en 1977, y “señal BLC1”, cuyo origen podría estar en el planeta más cercano, Próxima Centauri b, en 2019. Nunca ha habido una repetición de ninguna señal candidata y posi-

blemente se trate de fenómenos anecdóticos, de explicaciones complejas y diversas, pero en ningún caso de genuinas señales procedentes de otras civilizaciones.

Frank Drake intentó estimar en 1961 el número de civilizaciones tecnológicas, utilizando cierto número de parámetros cuyos valores, tanto entonces como ahora, son muy inciertos. La denominada “ecuación de Drake” es un argumento probabilístico que tiene en cuenta, en una de las versiones más sencillas: i) el número total de estrellas que contiene nuestra **galaxia**; ii) la fracción de las mismas que poseen planetas, posiblemente casi todas; iii) el número de ellos con condiciones apropiadas para la vida dentro de cada sistema planetario; iv) la fracción de los planetas en los que aparece actividad biológica; v) la fracción en los que se desarrolla vida inteligente; vi) las civilizaciones que poseen la tecnolo-

gía adecuada para comunicarse; vii) la fracción de tiempo de vida del planeta durante la cual perdura la civilización. En realidad, solo tenemos estimaciones realistas para los dos primeros parámetros, como se puede ver, y el resto son puramente especulativos o, para los últimos, por completo desconocidos.

Un examen realista de la posibilidad de encontrar una civilización, y en general vida compleja, requiere un análisis cuidadoso multidisciplinar. Necesita considerar la distribución de las nubes de **polvo** y gas, las regiones de formación estelar y las estrellas calientes y masivas, o las zonas de alta densidad estelar dentro de la Vía Láctea (ver término **zona de habitabilidad**), además de la **evolución estelar**, con la posibilidad de supernovas cercanas y otros eventos catastróficos. Las propiedades estelares también son cruciales: la distribución de

EXTRATERRESTRAL CIVILIZATIONS, SETI INITIATIVE, DRAKE EQUATION

The Milky Way contains some 200 billion **stars** and probably a larger number of planets, where biological activity (see term **Life, biological activity**) could appear relatively soon on those with the right conditions. On an undetermined number of planets, a species with a technological civilization could develop. The SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) initiative originated in the 1970s with a twofold objective: to scan the skies for artificial signals and to send messages from **Earth**. The various searches have identified several candidates, including the so-called “Wow signal”, in 1977, and “BLC1 signal”, whose origin could be on the nearest planet, Proxima Centauri b, in 2019. There has never been a repetition of any candidate signal and possibly these are anecdotal phenomena, of complex and diverse explanations, but in no case of genuine signals coming from other civilizations.

Frank Drake tried to estimate in 1961 the number of technological civilizations, using a number of parameters whose values, then as now, are very uncertain. The so-called “Drake equation” is a probabilistic argument that takes into account, in one of the simplest versions: i) the total number of stars contained in our **Galaxy**; ii) the fraction of them that possess planets, possibly almost all; iii) the number of them with conditions suitable for life within each planetary system; iv) the fraction of planets on which biological activity appears; v) the fraction on which intelligent life develops; vi) civilizations that possess the appropriate technology to communicate; vii) the fraction of planet lifetime during which the civilization endures. In reality, we only have realistic estimates for the first two parameters, as can be seen, and the rest are either purely speculative or, for the latter, completely unknown.

A realistic examination of the possibility of finding civilization, and in general complex life, requires careful multidisciplinary analysis. It involves consideration of the distribution of **dust** and gas clouds, star-forming regions and hot, massive stars, or zones of high stellar density within the Milky Way (see term **habitability zone**), in addition to **stellar evolution**, with the possibility of nearby supernovae and other catastrophic events. Stellar properties are also crucial: the distribution of stars by spectral type (the number and frequency of each type), age, multiplicity and **star/planet interaction** (as with **Sun** and **Earth**). In addition, this improved Drake equation should include factors that determine the properties of planetary systems and planets themselves, especially if they are rocky: statistics on the different types of planets, the architectures of the different planetary systems (the location

estrellas por tipos espectrales (el número frecuencia de cada tipo), de edades, la multiplicidad y la **interacción estrella/planeta** (como ocurre con **Sol** y Tierra). Además, esta ecuación de Drake mejorada debería incluir factores que determinan las propiedades de los sistemas planetarios y de los planetas en sí, en especial si son rocosos: estadísticas sobre los diferentes tipos de planetas, las arquitecturas de los distintos sistemas planetarios (la localización de cada planeta respecto a la estrella central), la evolución dinámica y la estabilidad (la interacción gravitacional entre planetas), información geológica/física (radioactividad y tectónica de placas, con su influencia en la orogénesis (formación de montañas y cordilleras) y climatología, la composición de la corteza planetaria y la disponibilidad de diferentes elementos químicos), el papel de los planetas gigantes en satélites terrestres (como los sistemas compuestos por Júpiter y su satélite Europa o por Saturno y Encélado), o estabilidad debida a satélites (como ejemplo, la interacción Tierra/Luna y la protección que ello supone). Finalmente, hay otro

conjunto de aspectos que implican a la biología y a la evolución. En la Tierra se requirieron menos de 500 millones de años para la aparición de vida (aunque en realidad pudo ser mucho antes, aunque no queden evidencias) y varios miles de millones de años para la aparición de formas de vida compleja.

En 1964 el astrónomo Nikolái Kardashev propuso una métrica para clasificar el grado de desarrollo de una civilización, usando como baremos la energía consumida y su potencia. Por tanto, se definirían tres estadios diferentes. El tipo I correspondería a un nivel de uso en el rango de la energía que recibe el planeta de su estrella. Para la Tierra, ascendería a $1,74 \times 10^{17}$ vatios. El segundo estadio o tipo II permitiría el uso de toda la potencia energética emitida por la estrella central, unos 4×10^{26} vatios. El tipo III implicaría el uso de toda la energía disponible en la galaxia en cada momento, 4×10^{37} vatios. El consumo energético actual de la humanidad asciende a unos 4×10^{12} vatios, muy lejos del tipo I.

of each planet with respect to the central star), dynamical evolution and stability (gravitational interaction between planets), geological/physical information (radioactivity and plate tectonics, with its influence on orogenesis (mountain and range formation) and climatology, the composition of the planetary crust and the availability of different chemical elements, the role of giant planets in terrestrial satellites (such as the systems composed by Jupiter and its satellite Europa or by Saturn and Enceladus), or stability due to satellites (as an example, the Earth/Moon interaction and the protection it entails). Finally, there is another set of aspects involving biology and evolution. On Earth it took less than 500 million years for life to appear (in reality it could have been much earlier, although there is no evidence left) and

about three billion years for the appearance of complex life forms.

In 1964 the astronomer Nikolai Kardashov proposed a metric to classify the degree of development of a civilization, using the energy consumed and its power as yardsticks. Thus, three different stages would be defined. Type I would correspond to a level of use in the range of energy received by the planet from its star. For the Earth, it would amount to 1.74×10^{17} watts. The second stage or type II would allow the use of all the energetic power emitted by the central star, about 4×10^{26} watts. Type III would involve the use of all the energy available in the galaxy at any given moment, 4×10^{37} watts. Humanity's current energy consumption amounts to about 4×10^{12} watts, very far from a type I civilization.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata. ISBN 978-84-1352-190-9.

BARRADO, D. (2021). *Peligros Cósmicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberón, ISBN-10-8441543518.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario* [en línea] <<https://www.sea-astronomia.es/glosario/>>.

19. COMETA, EXOCOMETA

Los cometas, del griego κομήτης, *kometes*, “astro con cabellera”, son cuerpos pequeños, con tamaños que van desde unos 100 metros hasta al menos 30 kilómetros de diámetro. A menudo se les denomina “bolas de **hielo** sucio” aludiendo a su contenido de hielo y **polvo**. Las moléculas más volátiles, como el **agua** (H₂O), el monóxido y el dióxido de carbono (CO y CO₂), el metano (CH₄), el amoníaco (NH₃) o el sulfuro de hidrógeno (H₂S), se integran en el hielo. El polvo está compuesto de silicatos y, en algunos cometas, de materia orgánica que contiene especies simples como el metanol (CH₃OH) y otras más complejas de interés astrobiológico como la glicina (NH₂CH₂COOH, el aminoácido más sencillo, elementos básicos de las **proteínas**) o isómeros de la misma (moléculas que tienen la misma composición química o fórmula molecular pero diferente estructura). Ver también **Quiralidad**.

Sus órbitas, normalmente muy alargadas, los llevan a pasar la mayor parte del tiempo muy alejados del **Sol**, en regiones frías del **sistema solar**, conservando

de ese modo buena parte del material más antiguo que originó su formación. Cuando se acercan al **Sol** se calientan y el hielo, principalmente de agua, se sublima y pasa de estado sólido a gas. Este gas, que escapa del núcleo sólido del cometa, arrastra consigo partículas de polvo y forma extensas nubes alrededor del cometa llamadas cabellera o coma. Los materiales que forman la cabellera son arrastrados en sentido opuesto al Sol por el viento solar (partículas cargadas procedentes del Sol que viajan a gran velocidad) y dan lugar a las colas cometarias. Después de su paso cerca del Sol, las partículas de la cabellera y de la cola de un cometa quedan distribuidas a lo largo de su órbita y cuando la **Tierra**, en su giro alrededor del Sol, cruza una de estas órbitas, se producen las llamadas lluvias de **estrellas**. Este fenómeno se produce cuando minúsculas partículas de polvo procedentes del cometa entran en la **atmósfera** terrestre a gran velocidad y se desintegran por fricción, produciendo el rastro luminoso que llamamos meteoro o estrella fugaz.

Existen al menos tres tipos de cometas:

los de corto periodo o de la familia de Júpiter, objetos con un periodo orbital menor de 20 años y órbitas apenas inclinadas respecto de la eclíptica (plano de la órbita terrestre); los de tipo Halley, con órbitas más alargadas, periodos de decenas de años e inclinaciones que pueden ser muy grandes; y los de largo periodo, con órbitas alargadísimas y periodos que van desde miles de años hasta objetos que han pasado por la cercanía del Sol una única vez desde los orígenes del sistema solar.

Se denomina exocometas, por analogía con los cometas en nuestro sistema solar, a un cuerpo pequeño que contiene hielos y orbita una estrella distinta al Sol. Mientras que la detección de **exoplanetas** se puede considerar ya como algo rutinario, la detección de estos cuerpos, debido a su pequeño tamaño y a las técnicas necesarias, es mucho más complicada.

La primera estrella alrededor de la cual se detectaron este tipo de objetos es β Pictoris, una estrella más caliente que el Sol, de tipo espectral A5 V, con una tem-

COMET, EXOCOMET

Comets (from the Greek κομήτης, *kometes*, “hairy star”) are small bodies, ranging in size from about 100 meters to at least 30 kilometers in diameter. They are often referred to as “dirty **ice** balls” alluding to their ice and **dust** content. The most volatile molecules, such as **water** (H₂O), carbon monoxide and carbon dioxide (CO and CO₂), methane (CH₄), ammonia (NH₃) or hydrogen sulfide (H₂S), are embedded in the ice. The dust is composed of silicates and, in some comets, of organic matter containing simple species such as methanol (CH₃OH) and more complex species of astrobiological interest such as glycine (NH₂CH₂COOH, the simplest amino acid, basic elements of **proteins**) or isomers thereof (molecules having the same chemical composition or molecular formula but different structure). See also **Quirality**.

Their orbits, usually very elongated, lead them to spend most of their time far from the **Sun**, in cold regions of the **solar system**, thus preserving much of the older material that gave rise to their formation. As they approach the Sun, they heat up

and the ice, mainly water ice, sublimates and changes from a solid to a gas state. This gas, which escapes from the comet’s solid nucleus, carries with it dust particles and forms extensive clouds around the comet called the coma. The materials that form the coma are dragged in the opposite direction to the Sun by the solar wind (charged particles from the Sun traveling at high speed) and give rise to cometary tails. After passing close to the Sun, the particles of the coma and tail of a comet are distributed along its orbit and when the **Earth**, in its orbit around the Sun, crosses one of these orbits, the so-called meteor showers are produced. This phenomenon occurs when tiny dust particles from the comet enter the Earth’s **atmosphere** at high speed and disintegrate by friction, producing the luminous trail that we call meteor or shooting **star**.

There are at least three types of comets: short-period or Jupiter family comets, objects with an orbital period of less than 20 years and orbits barely inclined with respect to the ecliptic (plane of the Earth’s orbit); Halley-type comets, with

more elongated orbits, periods of tens of years and inclinations that can be very large; and long-period comets, with very long orbits and periods ranging from thousands of years to objects that have passed close to the Sun only once since the origins of the solar system.

A small body composed of ices orbiting a star other than the Sun is called an exocomet, by analogy with comets in our solar system. While the detection of **exo-planets** can now be considered routine, the detection of these bodies, due to their small size and the techniques required, is much more complicated.

The first star around which such objects were detected is β Pictoris, a star hotter than the Sun, of spectral type A5 V, with a surface temperature of ~8500 °C, young (~20 million years, compared to ~4650 million years for the Sun), surrounded by a *debris* disk (see term **Circumstellar disks**), and orbited by at least two planets, β Pic b and c. This star exhibits intense variability in certain features of its spectrum (in particular, in the circumstellar components super-

peratura superficial de ~ 8500 °C, joven (~ 20 millones de años, comparados con los ~ 4650 millones de años del Sol), rodeada de un disco de *debris* (ver término **Discos circunestelares**), y orbitada por al menos dos planetas, β Pic b y c. Esta estrella presenta una intensa variabilidad en ciertas características de su espectro (en concreto, en las componentes circunestelares superpuestas a algunas líneas de absorción fotosféricas) que no aparecerían en la ausencia de material en torno a la estrella. Esa variabilidad se interpreta dentro de un escenario llamado Falling Evaporating Bodies (FEB) según el cual, cuando estos cuerpos helados se acercan a la estrella, su hielo se evapora o se sublima y el gas residual que expulsan es el que origina la presencia de componentes circunestelares con distintas velocidades con respecto a la región de la estrella de la que proviene la luz (fotosfera estelar) (ver término **Sol**). β Pictoris es, con diferencia, la estrella con mayor actividad exocometaria. Observaciones realizadas con el observatorio espacial Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) han permitido descubrir 30 exocometas en torno a esta estrella, y estimar el tamaño de los núcleos, que varía entre ~ 3 y 14 km.

En la actualidad la lista de objetos con

trazas de material exocometario contiene alrededor de 25 estrellas, prácticamente todas de tipo espectral A (temperaturas mayores que ~ 7800 K), con un déficit claro de estrellas más frías. La gran mayoría de las detecciones se han realizado analizando series temporales de espectros ópticos (y ultravioleta en algunos casos) en alta resolución, y más recientemente algunas observaciones de tránsitos (ver término **Exoplanetas: Métodos de detección**), similares a las que se utilizan para detectar exoplanetas, muestran eclipses con perfiles asimétricos que se interpretan como causados por el núcleo y la cola del



exocometa al transitar enfrente de la estrella. Esta lista de objetos sin embargo debe ser analizada más en detalle para comprobar si la variabilidad observada puede ser explicada por fenómenos completamente distintos.

No se han detectado este tipo de fenómenos en estrellas similares al Sol, pero eso no significa que no existan exocometas en torno a esas estrellas. Los espectros de las estrellas de tipo solar son mucho más complejos que los de las estrellas más calientes, y la detección espectroscópica del tipo de variabilidad que se observa en estrellas de tipo espectral A no ha dado hasta el momento ningún resultado positivo.

Figura 15:

El cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko 1 (1969 R1), observado por la misión europea Rosetta.

Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko 1 (1969 R1), observed by the European mission Rosetta.

Crédito: ESA/Rosetta/NAVCAM – CC BY-SA IGO 3.0.

imposed on some photospheric absorption lines) which would not appear in the absence of material around the star. This variability is interpreted within a scenario called Falling Evaporating Bodies (FEB) according to which, when these icy bodies approach the star, their ice evaporates or sublimates and the residual gas they expel is what causes the presence of circumstellar components with different velocities with respect to the region of the star from which the light comes (stellar photosphere). β Pic toris is by far the star with the highest exocometary activity. Observations with the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) space observatory have led to the

discovery of 30 exocomets around this star, and to estimates of the size of the cores, ranging from ~ 3 to 14 km.

At present the list of objects with traces of exocometary material contains about 25 stars, practically all of them of spectral type A (temperatures higher than ~ 7500 °C), with a clear deficit of cooler stars. The vast majority of detections have been made by analyzing time series of optical -and ultraviolet in some cases- spectra at high resolution, and more recently some observations of transits (see term **Exoplanets: detection methods**), similar to those used to detect exoplanets, show eclipses with

asymmetric profiles that are interpreted as caused by the core and tail of the exocomet as it transits in front of the star. This list of objects, however, needs to be analyzed in more detail to see if the observed variability can be explained by completely different phenomena.

No such phenomena have been detected in Sun-like stars, but that does not mean that there are no exocomets around these stars. The spectra of solar-type stars are much more complex than those of hotter stars, and spectroscopic detection of the type of variability observed in stars of spectral type A has so far not yielded any positive results.

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

20. COMPLEJIDAD

La palabra complejidad procede del latín *complexus*, que significa enlazado. Aunque existen diversas definiciones de complejidad dependiendo del ámbito científico, se puede afirmar que un sistema es complejo si está constituido por varios elementos que interactúan entre sí, o están “enlazados”, de forma que el comportamiento del conjunto no puede ser inferido del análisis aislado de cada uno de sus componentes. A diferentes escalas espaciales y temporales aparecen fenómenos colectivos llamados procesos emergentes y, como consecuencia, el todo es mucho más que la suma de sus partes. Algunos términos asociados con la complejidad son la no linealidad, las redes complejas, la autoorganización, la estructura jerárquica, el caos y la emergencia.

La física tradicional es reduccionista: para describir y comprender un sistema lo descompone en sus componentes fundamentales. M.J.G. Veltman, nobel de física en 1999, afirmó que “hoy creemos que todo está hecho de partículas elementales. Conocer sus propiedades significaría conocer todo sobre todo”, pero esta premisa es falsa en multitud de casos. El reduccionismo ha funcionado durante siglos por la simplicidad de los sistemas abordados, pero campos como la Astrobiología se enfrentan a la inmensa complejidad asociada a los seres vivos. La **vida** se fundamenta en la interacción a diferentes escalas de millones de elementos organizados en redes complejas. Por eso es necesario pasar de una visión reduccionista a una perspectiva de conjunto e interaccionista para describir la

vida y sus procesos asociados tales como los mecanismos adaptativos y evolutivos.

En resumen, el enfoque clásico de la física es insuficiente para abordar las ciencias de la vida. En la década de 1980 emerge en la física una disciplina que intenta acercar ambos mundos: la teoría de la complejidad. Esta es profundamente multidisciplinar, y toma prestadas herramientas de campos del saber tan diversos como la teoría de grafos, el estudio de comportamientos colectivos, la teoría de juegos, la dinámica no lineal, la teoría de la información, la formación de patrones o la modelización de procesos evolutivos.

Desde su aparición, la teoría de la complejidad se ha aplicado exitosamente

COMPLEXITY

The word complexity comes from the Latin *complexus*, which means embraced. Although there are different definitions of complexity depending on the scientific field, it can be said that a system is complex if it is made up of several elements that interact with each other, or are linked, so that the behavior of the whole cannot be inferred from the isolated analysis of each of its components. At different spatial and temporal scales, collective phenomena called emergent processes appear, and as a consequence the whole is much more than the sum of its parts. Some terms associated with complexity are nonlinearity, complex networks, self-organization, hierarchical structure, chaos and emergence.

Traditional physics is reductionist: to describe and understand a system it

breaks it down into its fundamental components. M.J.G. Veltman, Nobel laureate in physics in 1999, stated that “Today we believe that everything is made up from elementary particles. Knowing all about them in principle implies knowing all about everything”, but this premise is false in many cases. Reductionism has worked for centuries because of the simplicity of the systems involved, but fields such as Astrobiology are confronted with the immense complexity associated with living things. **Life** is based on the interaction at different scales of millions of elements organized in complex networks. Therefore, it is necessary to move from a reductionist view to a comprehensive and interactionist perspective to describe life and its associated processes such as adaptive and evolutionary mechanisms.

In short, the classical approach of physics is insufficient to deal with the life sciences. In the 1980s, a discipline emerged in physics that attempts to bring the two worlds closer together: complexity theory. It is profoundly multidisciplinary, borrowing tools from such diverse fields of knowledge as graph theory, the study of collective behavior, game theory, nonlinear dynamics, information theory, pattern formation and the modeling of evolutionary processes.

Since its emergence, complexity theory has been successfully applied to physics, biology, chemistry, economics or sociology: complexity is found in the behavior of biomolecules and in the human brain, but also in the organization of cities. Astrobiology is no exception. In particular,

a la física, la biología, la química, la economía o la sociología: se encuentra complejidad en el comportamiento de las biomoléculas y en el cerebro humano, pero también en la organización de las ciudades. La Astrobiología no es una excepción. En particular, desde hace varias décadas se enfoca el origen de la vida como un proceso emergente que acaeció en el momento en que todos los elementos necesarios estuvieron en el entorno fisicoquímico adecuado para su interacción eficiente. Además, aunque no es fácil cuantificar la complejidad de un sistema dado, mucho esfuerzo se ha dedicado a estudiar la variación de la complejidad de los organismos vivos desde el origen de la vida hasta hoy. J. Maynard Smith y E. Szathmáry describen ocho transiciones principales donde dicha complejidad creció drásticamente, destacando la aparición de las primeras moléculas replicantes, el origen de las

células, la reproducción sexual, los organismos pluricelulares, y finalmente la emergencia de la cooperación y las sociedades animales y humanas. En estas transiciones, los elementos independientes de la etapa anterior pasan a formar parte de un conjunto a mayor escala que se comporta como una unidad, y donde el nuevo ente ha crecido en número de elementos constituyentes, así como en estructura y jerarquía internas (ver figura 51 en **Proteína**).

Finalmente, cabe destacar que el largo camino desde la creación de los compuestos prebióticos básicos en el medio interestelar (ver término **Química en el medio interestelar y circunestelar**) hasta la actual **biosfera** muestra patrones universales y fenomenologías comunes en todas las escalas y en todas las etapas, donde la aplicación de la teoría de la complejidad está aún en sus primeros pasos.

for several decades the origin of life has been approached as an emergent process that occurred at the moment when all the necessary elements were in the right physicochemical environment for their efficient interaction. Moreover, although it is not easy to quantify the complexity of a given system, much effort has been devoted to studying the variation in the complexity of living organisms from the origin of life to the present day. J. Maynard Smith and E. Szathmáry describe eight major transitions where such complexity grew dramatically, highlighting the appearance of the first replicating molecules, the origin of **cells**, sexual reproduction, multicellular organisms, and finally the emergence of cooperation and animal

and human societies. In these transitions, the independent elements of the previous stage become part of a larger-scale whole that behaves as a unit, and where the new entity has grown in number of constituent elements, as well as in internal structure and hierarchy (see figure 51 in **Protein**).

Finally, it should be noted that the long path from the creation of basic prebiotic compounds in the interstellar medium (see term **Chemistry in the interstellar and circumstellar environment**) to the present **biosphere** shows universal patterns and common phenomenologies at all scales and at all stages, where the application of complexity theory is still in its infancy.

Lecturas adicionales / Further reading

LÁZARO, E. (2019). *La Vida. Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editorial Fundación Sicomoro. Madrid.

MAYNARD SMITH, J., SZATHMÁRY, E. (2001). *Ocho hitos de la evolución. Del origen de la vida a la aparición del lenguaje*. Tusquets Editores, Colección Metatemáticas.

21. CORONA: SOLAR Y ESTELAR

La corona es la capa más exterior de las estrellas de tipo solar o más frías (temperaturas menores de ~7800 kelvin (K), en nomenclatura algo más técnica, estrellas de los últimos tipos espectrales, F G K M, ver término **Estrella**). Esta parte de la **atmósfera** estelar puede alcanzar temperaturas de 1 millón de grados en el caso del **Sol**, en contraste con los ~5800 K de su fotosfera. Su elevada temperatura hace que emita fotones en las bandas de rayos X y extremo ultravioleta, invisibles al ojo humano y muy energéticos, con la capacidad no solo de romper moléculas, sino de ionizar átomos de hidrógeno y helio. La energía que transmite a los átomos provoca la evaporación de la atmósfera, y los átomos ionizados quedan a merced del viento estelar (partículas cargadas emitidas desde la parte más externa).

La corona es, posiblemente, el primer agente responsable de la pérdida de atmósfera (fotoerosión) en **exoplanetas** cercanos a su estrella (de periodo orbital corto), que orbitan en torno a astros similares al Sol o más fríos. La corona está relacionada con los fenómenos de actividad estelar que se generan por efecto del campo magnético de la estrella; este es más fuerte cuanto más rápida es la rotación estelar. Las estrellas más jóvenes conservan la rotación elevada procedente de su formación; eso provoca que tengan coronas donde se alcanzan los 10 millones de grados. El aumento de **radiación** de altas energías en hasta tres órdenes de magnitud con respecto a una estrella de la edad del Sol, hace que los efectos más importantes de esta radiación se den en las atmósferas de exoplanetas jóvenes. Por tanto, los planetas de

periodo corto se ven muy amenazados por la fuerte radiación coronal en sus primeros millones de años, para luego sufrir efectos mucho más moderados. La fotoerosión se ha detectado en algunos exoplanetas, donde el material evaporado ha quedado en las cercanías del planeta formando una especie de velo parecido a la cabellera de un **cometa**.

En el caso solar, los efectos actuales de la radiación coronal sobre la atmósfera son mucho más moderados. No se produce fotoerosión, pero sí un aumento del tamaño de la exosfera terrestre (zona de tránsito entre la atmósfera terrestre y el espacio interplanetario) cuando se aproxima el máximo del ciclo de actividad magnética. Los patrones climáticos en algunos lugares de la **Tierra** se han relacionado con el ciclo de actividad del Sol,

SOLAR AND STELLAR CORONA

The corona is the outermost layer of solar-type or cooler stars (temperatures below ~7800 kelvin (K), in somewhat more technical nomenclature, stars of the later spectral types, F G K M, see term **Star**). This part of the stellar **atmosphere** can reach temperatures of 1 million degrees in the case of the **Sun**, in contrast to the ~5800 K of its photosphere. Its high temperature causes it to emit photons in the X-ray and extreme ultraviolet bands, invisible to the human eye and very energetic, with the ability not only to break molecules, but also to ionize hydrogen and helium atoms. The energy absorbed by the atoms causes the atmosphere to evaporate, and the ionized atoms are at the mercy of the stellar wind (charged particles emitted from the outermost part of the star).

The corona could be the primary agent responsible for the loss of atmosphere (photoerosion) in **exoplanets** that are close to their star (with a short orbital

period) orbiting around Sun-like or cooler stars. The corona is related to the stellar activity phenomena generated by the effect of the star's magnetic field, which is stronger the faster the stellar rotation is. Younger stars retain the high rotation from their formation; this causes them to have coronae that can reach up to 10 million degrees. The increase of high-energy **radiation** by up to three orders of magnitude with respect to a star the age of the Sun means that the most important effects of this radiation are in the atmospheres of young exoplanets. Short-period planets are therefore greatly threatened by strong coronal radiation in their first few million years, and then suffer less harmful effects. Photoerosion has been detected on some exoplanets, where evaporated material has been left in the vicinity of the planet forming a kind of veil resembling a **comet's** scalp.

In the solar case, the current effects of coronal radiation on the atmosphere are

much more moderate. Photoerosion does not occur, but there is an increase in the size of the Earth's exosphere (the transit layer between the Earth's atmosphere and interplanetary space) as the maximum of the magnetic activity cycle approaches. Weather patterns at some locations on **Earth** have been linked to the Sun's activity cycle, but no direct connection has been demonstrated so far. In addition to possible weather effects, communication disruptions, and even overloads and disruptions in power plants and power lines occur when a coronal mass ejection is triggered: This consists of a mass of ionized material, which, if directed towards the Earth, interacts with its magnetic field. Finally, the most impressive effect of coronal radiation is the phenomenon of polar auroras, which color the night skies as these charged particles reach the Earth. Some of these events have been seen at latitudes as low as Panama coinciding with very intense solar storms, although this situation is not common (see **Star-planet interaction**).

sin llegarse a demostrar hasta ahora una conexión directa. Además de los posibles efectos climáticos, se producen trastornos en las comunicaciones, y hasta sobrecargas y disrupciones en centrales eléctricas y líneas de alta tensión cuando se desata una eyección de masa coronal: esta consiste en una masa de material ionizado, que en caso de dirigirse hacia la Tierra interacciona con su campo mag-

nético. Por último, el efecto más evidente de la radiación coronal es el fenómeno de las auroras polares, que tiñen de colores los cielos nocturnos al llegar estas partículas cargadas a la Tierra. Algunos de estos eventos han llegado a verse en latitudes tan bajas como Panamá coincidiendo con tormentas solares muy intensas, aunque esta situación no es habitual. (Ver **Interacción estrella-planeta**).

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Peligros Cósmicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberón.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SANZ FORCADA, J. (2013). "El enigmático ciclo de actividad del Sol", *Revista Astronomía*. http://astromadrid.cab.inta-csic.es/wp-content/uploads/2013/10/Revista_Astronom%c3%ada_ciclo-sol-r.pdf

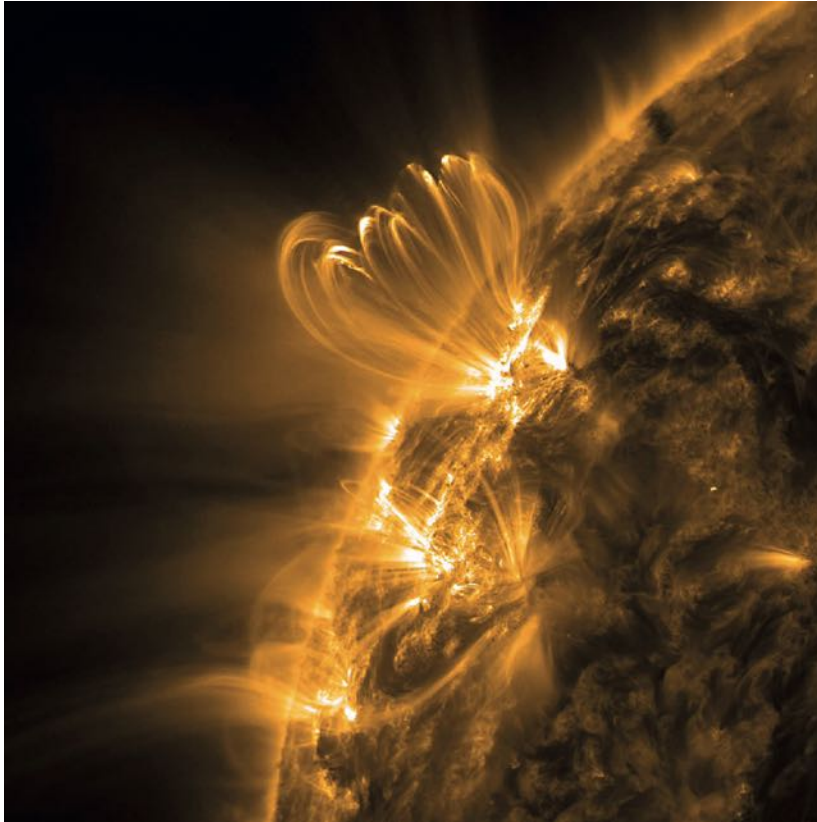


Figura 16:

Bucles coronales.

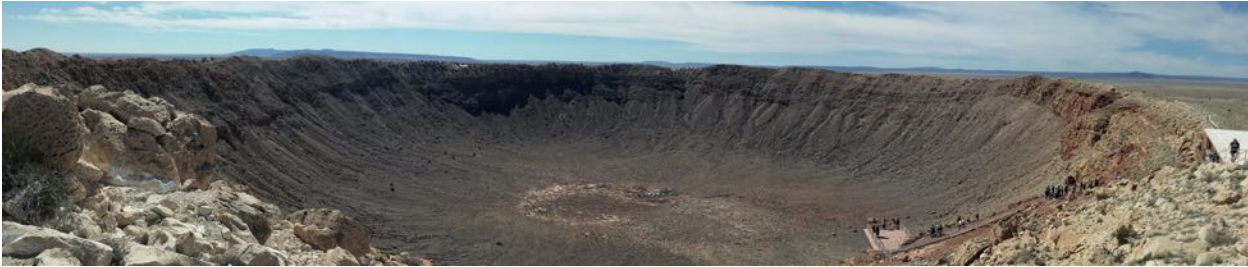
Coronal loops.

Bucles de material confinado magnéticamente en la corona del Sol, observados con la misión SDO de la NASA, en la línea de Fe IX de 171 angstroms. La corona es una capa muy dinámica de la estrella, formada principalmente por este tipo de bucles. La convección fotosférica genera una especie de “tubos” magnéticos por los que emergen estos bucles. Al reconectarse las líneas de campo magnético se libera mucha energía, lo que explicaría el aumento de temperatura de 5000 kelvin a 1 millón de kelvin.

Loops composed by magnetically confined material, on the solar Corona, as they are observed by the NASA mission SDO in the Fe IX line at 171 angstroms. The corona is a highly dynamical layer of the star, mainly consisting on a number of loops like these. Photospheric convection is behind the magnetic “tubes” in which these loops are created. When magnetic field lines reconnect an important amount of energy is freed, which would explain the fast increase in temperature from 5000 kelvin to 1 million kelvin.

Créditos: NASA.

22. CRÁTERES DE IMPACTO: FORMACIÓN Y TIPOS



Los cráteres de impacto juegan un papel clave en la evolución de los planetas, en la formación de superficies de aquellos que poseen cortezas y cuerpos rocosos más pequeños e incluso en la evolución de la **vida** (ver término **Evolución biológica**). Esto se hizo evidente con la conexión entre la extinción masiva del límite Cretácico-Paleógeno y el cráter de impacto Chicxulub, de 200 km en México. Este cráter es una referencia para los estudios del cambio climático global debido a la rápida entrada de contaminantes a la **atmósfera**, como productos químicos de los sedimentos marinos (p. ej., sulfatos, CO₂). Sin embargo, los impactos cósmicos pueden hacer más que extinguir vidas. Pueden crear ambientes donde diferentes formas de vida pueden encontrar refugio, como serían las grietas, y fuentes de energía, como nutrientes

en sistemas hidrotermales. Por lo tanto, son de gran interés en la **exploración astrobiológica**.

Cuando un objeto cósmico viaja por el espacio contiene una enorme cantidad de energía cinética. La velocidad de impacto más habitual de los objetos que consiguen atravesar la atmósfera terrestre con una velocidad sostenida es de unos 18 km/s. El evento continuo y completo de formación de cráteres se ha dividido en tres etapas diferenciadas: contacto y compresión; de excavación; y de modificación, descritas a continuación:

- La etapa de contacto y compresión comienza cuando el proyectil alcanza la superficie del cuerpo celeste. El proyectil empuja el material del mismo, lo comprime y lo acelera en una gran

Figura 17:

Cráter Barringer, Arizona.

Meteor Crater, Arizona.

El cráter Meteor (también conocido como cráter Barringer), en Arizona, es, debido a su corta edad (unos 50 000 años) y al clima seco, uno de los cráteres de impacto mejor conservados de la Tierra.

Meteor Crater (a.k.a. Barringer Crater) in Arizona is, due to its young age (approx. 50 000 years) and the dry climate one of the best preserved impact craters on Earth.

Crédito: Foto de / Photo by Jens Ormö.

IMPACT CRATERS: FORMATION AND TYPES

Impact craters play a key role in the evolution of planets, in the formation of surfaces of planets with crusts and smaller rocky bodies, and even in the evolution of **life** (see term **Biologic evolution**). This became evident with the connection between the Cretaceous-Paleogene boundary mass extinction and the 200 km Chicxulub impact crater in Mexico. This crater is a reference for studies of global climate change due to the rapid input of pollutants into the **atmosphere**, such as chemicals from marine sediments (e.g., sulfates, CO₂). However, cosmic impacts can do more than extinguish life. They can create environments where different life forms can find refuge, such as crevices, and energy sources, such as nutrients in hydrothermal systems. They are therefore of great interest in astrobiological **exploration**.

When a cosmic object travels through space it contains an enormous amount of kinetic energy. The most common impact velocity of objects that manage

to pass through the Earth's atmosphere with a sustained velocity is about 18 km/s. The entire continuous cratering event has been divided into three distinct stages: contact and compression; excavation; and modification, described below:

- The contact and compression stage begins when the projectile contacts the surface of the celestial body. The projectile pushes the material of the target, compresses it and accelerates it by a large fraction of the impact velocity. Immediately thereafter, a higher pressure builds up than that of any other geological process in the Earth's crust. After the compression produced by the shock front, a decompression of the projectile and part of the target follows, leading to melting and vaporization. The contact and compression stage ends when the kinetic energy is completely discharged, a process with a short duration, fractions of a second even for large impacts.
- During the excavation stage the shock waves that traveled upward encounter the free surface of the impacted body and are reflected as rarefaction waves (the opposite of compression waves) that propagate downward through the target. This complex interaction between the accelerated material and the rarefaction wave generates an outward and upward flow field. Some of the material is expelled as ballistic ejecta, while other material is only displaced downward and outward. The crater grows until the combined shock waves and rarefaction waves are no longer strong enough to eject or displace material from the developing crater. Momentarily the transient crater forms. This stage can take up to one minute for the largest known craters on **Earth**, e.g. the 180 km diameter Chicxulub crater.
- In the modification stage the transient crater is immediately modified as a consequence of the following

fracción de la velocidad del impacto. Inmediatamente después, se acumula una presión más alta que la de cualquier otro proceso geológico en la corteza terrestre. Después de la compresión producida por el frente de choque, sigue una descompresión del proyectil y el cuerpo impactado, lo que conduce a la fusión y vaporización. La etapa de contacto y compresión termina cuando la energía cinética se descarga por completo, proceso con una escasa duración, de fracciones de segundo incluso para grandes impactos.

- Durante la etapa de excavación las ondas de choque que viajaron hacia arriba se encuentran con la superficie libre del cuerpo que ha sido impactado y se reflejan como ondas de rarefacción (lo opuesto a las ondas de compresión) que se propagan hacia abajo a través del objetivo. Esta interacción compleja entre el material acelerado

y la onda de rarefacción genera un campo de flujo hacia afuera y hacia arriba. Parte del material se expulsa como eyección balística, mientras que otro solo se desplaza hacia abajo y hacia afuera. El cráter crece hasta que las ondas de choque y las ondas de rarefacción combinadas ya no son lo suficientemente fuertes como para expulsar o desplazar material del cráter en desarrollo. Momentáneamente se forma el cráter transitorio. Esta etapa puede tomar hasta un minuto para los cráteres más grandes conocidos en la **Tierra**, p. ej. el cráter Chicxulub, de 180 km de diámetro.

- En la etapa de modificación el cráter transitorio se modifica inmediatamente como consecuencia de los siguientes factores: la gravedad, la mecánica de rocas y la erosión y sedimentación. Para cráteres más pequeños de 2-4 km en la Tierra, un colapso menor de las

paredes produce un aumento del diámetro del cráter, mientras se mantiene la profundidad original del cráter transitorio. El cráter final resultante mantiene así su forma de un cráter simple. Para los cráteres transitorios más grandes, las fuerzas gravitatorias superan la fuerza de la roca, y junto con los movimientos del material hacia abajo y hacia adentro, provocan el hundimiento en las terrazas de la pared y la formación de un pico central, es decir, un cráter complejo. En impactos aún mayores, el pico central colapsa y se forman cuencas de anillos múltiples. Sin embargo, la etapa de modificación no tiene un final claramente marcado. Los procesos activos en la Tierra, como los producidos por la tectónica de placas, además de los procesos de erosión y sedimentación, han borrado las huellas de la mayoría de los impactos. Hoy en día, se conocen alrededor de 200 cráteres de impacto en la Tierra.

factors: gravity, rock mechanics, and erosion and sedimentation. For craters smaller than 2-4 km on Earth, minor wall collapse results in an increase in crater diameter, while maintaining the original depth of the transient crater. The resulting final crater thus retains its simple crater shape. For larger transient craters, gravitational forces overcome the strength of the rock, and together with the downward and inward movements of the material,

cause subsidence in the wall terraces and the formation of a central peak, i.e., a complex crater. In even larger impacts, the central peak collapses and multiple ring basins are formed. However, the modification stage does not have a clearly marked end. Active processes on Earth, such as those produced by plate tectonics, as well as erosion and sedimentation processes, have erased the traces of most impacts. Today, about 200 impact craters are known on Earth.

Lecturas adicionales /Further reading

ARTEMIEVA N. et al. (2017). "Quantifying the release of climate active gases by large meteorite impacts with a case study of Chicxulub", *Geophys. Res. Lett.* 44, 10–180.

BARRADO, D. (2021). Peligros Cósmicos. *El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberón.

BRUGGER J. et al. (2017). "Baby, it's cold outside: Climate model simulations of the effects of the asteroid impact at the end of the Cretaceous", *Geophys. Res. Lett.* 44, 419–427.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LOWERY M. et al. (2018). "Rapid recovery of life at ground zero of the end-Cretaceous mass extinction", *Nature* 558, 288–291.

23. CRONOESTRATIGRAFÍA

Dentro de la rama de la geología que estudia los estratos geológicos, conocida como estratigrafía, la parte que se centra en el estudio de las relaciones temporales entre las diferentes rocas se denomina cronoestratigrafía. Esta disciplina pretende establecer la historia de las rocas utilizando características y eventos geológicos registrados en las mismas. Para ello, se asocian a diferentes divisiones dentro de la escala de tiempo geológico, correlacionando sus fósiles o variaciones fisicoquímicas. En la **Tierra**, estos datos pueden obtenerse mediante trabajo detallado de campo y laboratorio. Para otros cuerpos planetarios, los datos obtenidos mediante sondas nos proporcionan información del tiempo relativo y absoluto a lo largo de todo el **sistema solar**. Esto no solo permite entender mejor la evolución de cada cuerpo planetario, sino comparar unos con otros.

Es importante no confundir geocronología con cronoestratigrafía. Mientras que la primera estudia los periodos de tiempo geológicos, la segunda se centra en los materiales y las relaciones entre ellos. Así, las unidades geocronológicas serán de tiempo (eras, épocas o edades) mientras que las cronoestratigráficas se refieren a las rocas asociadas a unos límites temporales (eratemas, series o pisos, respectivamente). En la Tierra, estas unidades se encuentran estandarizadas en una escala o tabla de tiempo geológico internacional (regulada por la Comisión Internacional de Estratigrafía o ICS, por sus siglas en inglés), pero cada cuerpo planetario tiene periodos y unidades geocronológicas propias. A veces se definen con carácter regional o local, dada la dificultad de poder definir una unidad a escala planetaria.

Las primeras dataciones geológicas se realizaron correlacionando los registros de depósitos glaciares y arrecifes de coral con las variaciones en **radiación** solar producidas por los cambios orbitales de la Tierra. Estas dataciones relativas solo permiten conocer que materiales son más o menos modernos sin poder asignarles una antigüedad concreta. Sin embargo, otras técnicas permiten saber la edad de un material de forma absoluta y con gran precisión, como la datación radiométrica (analizando la tasa constante de desintegración conocida de un isótopo radiactivo, como el conocido carbono-14 o ^{14}C). Pero para llevar a cabo estos análisis se necesita equipamiento complejo que de momento no está disponible en el estudio de otros cuerpos planetarios.

Mientras que la superficie terrestre se renueva mediante la dinámica de placas

CHRONOSTRATIGRAPHY

Within the branch of geology that studies geological strata, known as stratigraphy, the part that focuses on the study of the temporal relationships between different rocks is called chronostratigraphy. This discipline aims to establish the history of rocks using geological features and events recorded in them. To do so, they are associated to different divisions within the geological time scale, correlating their fossils or physicochemical variations. On **Earth**, these data can be obtained through detailed field and laboratory work. For other planetary bodies, data obtained by probes provide us with relative and absolute time information throughout the **solar system**. This not only allows us to better understand the evolution of each planetary body, but also to compare one with another.

It is important not to confuse geochronology with chronostratigraphy. While the former studies geological time periods, the latter focuses on materials and the relationships between them. Thus, geochronological units will be

of time (eras, epochs or ages) while chronostratigraphic units refer to rocks associated with time limits (erathems, series or stages, respectively). On Earth, these units are standardized in an international geologic time scale or table (regulated by the International Commission on Stratigraphy or ICS), but each planetary body has its own periods and geochronologic units. Sometimes they are defined regionally or locally, given the difficulty of defining a unit on a planetary scale.

The first geological dating was done by correlating the records of glacial deposits and coral reefs with the variations in solar **radiation** produced by the Earth's orbital changes. These relative dates only allow us to know which materials are more or less modern without being able to assign them a specific age. However, other techniques allow us to know the age of a material absolutely and with great precision, such as radiometric dating (analyzing the known constant rate of disintegration of a radioactive

isotope, such as the well-known carbon-14 or ^{14}C). But to carry out these analyses requires complex equipment that is not currently available for the study of other planetary bodies.

While the Earth's surface is renewed by plate dynamics and is continuously altered by the activity of its **atmosphere**, hydrosphere and **biosphere**, other planetary bodies have surfaces that have remained unchanged for billions of years. To date these surfaces, the density of craters on them, observable from satellites, is studied, and those that are more densely cratered are considered to be older. By correlating the radiometric analysis of the **samples** brought back from the moon with the **crater** densities of their collection areas and comparing it with other areas, the age of the entire lunar surface has been determined and extrapolated to other bodies such as **Mars**. Sample return missions (see term **Planetary samples, return**) from Mars will allow to confirm and adjust all of these dating.

y se ve alterada continuamente por la actividad de su **atmósfera**, hidrosfera y **biosfera**, en otros cuerpos planetarios hay superficies que han permanecido inalteradas durante miles de millones de años. Para datar estas superficies se estudia la densidad de **cráteres** de la misma, observables desde satélite, considerándose más antiguas aquellas que se encuentran más densamente craterizadas. Correlacionando los aná-

lisis radiométricos de las **muestras** traídas desde la luna con las densidades de cráteres de sus zonas de obtención y comparándolo con otras zonas, se ha determinado la antigüedad de toda la superficie lunar y extrapolado a otros cuerpos como **Marte**. Las misiones de retorno de muestras de Marte (ver término **Muestras planetarias**, retorno) permitirán confirmar y ajustar todas estas dataciones.

Lecturas adicionales /Further reading

IUGS, *International Commission on Stratigraphy* (ICS), [en línea] <<https://www.iugs.org/ics>>

PILLANS, B. (2007). "Chronostratigraphy". In *Encyclopedia of Quaternary science*. Elsevier.

VAN GASSELT, S., & NEUKUM, G. (2015). "Chronostratigraphy", *Encyclopedia of Astrobiology*, 514.

HIESINGER, H., & TANAKA, K. (2020). "The Planetary Time Scale", In *Geologic Time Scale 2020*. Elsevier. pp. 443-480.

CORRELATION OF MAP UNITS

[Cumulative crater-densities for epoch boundaries at 1, 5, or 16 km diameters are from Werner and Tanaka (2011); see table 1 for model absolute-ages for the epoch boundaries. Map unit ages are resolved to nearest epoch; hachured box edges indicate possible, extended durations. The determinations rely on both stratigraphic relations as documented in the Description of Map Units and crater size-frequency distributions provided in tables 2, 3, and D1 and by other workers as referenced in the Geologic History section. See Age Determinations section of text for methodology discussion. Determination of ages from crater densities is complicated by the geologic history of the unit of interest, including size-dependent degradation and resurfacing, such that different crater diameter ranges (and the associated N(1), N(5), and N(16) values) may provide different age estimates for a given geologic unit; see tables 2 and D1 for examples of formation and resurfacing ages for some localities]

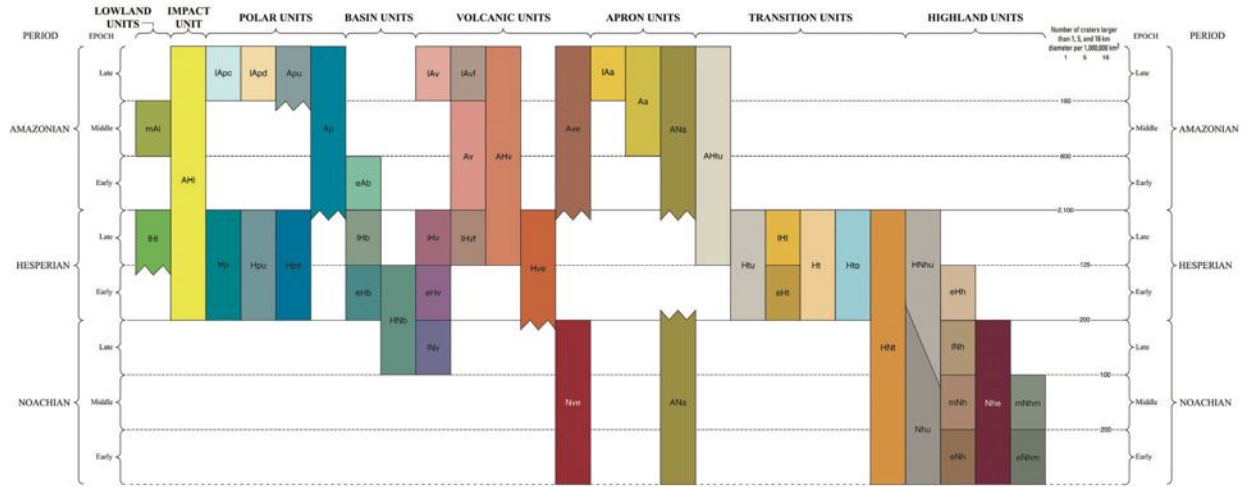


Figura 18:

Unidades cronoestratigráficas.

Chronostratigraphic units.

Diagrama que relaciona todas las unidades cronoestratigráficas descritas en un mapa global de Marte.

Diagram relating all the chronostratigraphic units described in a global map of Mars.

Crédito: Tanaka, K. L. et al. (2014). Geologic map of Mars: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292, scale 1:20 000 000, pamphlet 43 p., <https://doi.org/10.3133/sim3292>

24. CUASIESPECIE

El concepto de cuasiespecies tiene su origen en una teoría desarrollada para explicar la autoorganización y evolución de las moléculas con capacidad replicativa y portadoras de información genética (moléculas de **ARN** según la hipótesis del mundo del ARN) que probablemente poblaron la **Tierra** primitiva en fases previas al origen de la **vida**. Representa el primer intento de integrar conceptos de la teoría de la información con la selección natural darwiniana (ver término **Evolución biológica**).

Una cuasiespecie puede definirse como el estado estacionario alcanzado por una población infinita de replicadores que son copiados con alta tasa de error y sobre los cuales actúa la selección natural, favoreciendo a los que se replican de forma más eficiente. Es importante destacar que los errores de copia (o **mutaciones**) pueden alterar la capacidad de copia de cada replicador, lo que convierte a las cua-

siespecies en estructuras altamente dinámicas. La secuencia con mayor capacidad replicativa dentro de una cuasiespecie se denomina secuencia maestra. A pesar de su superioridad sobre el resto de replicadores, nunca llega a dominar la población, ya que las altas tasas de error siempre producirán secuencias que difieren de la maestra. Estas secuencias son lo que se denomina el espectro de mutantes.

La teoría de cuasiespecies también introdujo el concepto de “hiperciclos” como un principio de autoorganización natural que permite integrar diferentes cuasiespecies en organizaciones de orden superior que facilitan la evolución hacia formas más complejas, combinando idealmente la capacidad de codificación de los ácidos nucleicos con las funciones realizadas por las **proteínas**.

El primer experimento demostrando la capacidad evolutiva de las moléculas de ARN

fue llevado a cabo por Sol Spiegelman en 1965, utilizando el genoma del bacteriófago Q β . En él demostró que, cuando la presión selectiva es solo la de ser copiado lo más rápidamente posible, gran parte del genoma viral es prescindible y puede ser eliminado. Aunque es difícil pensar que un proceso de reducción genómica como el descrito pueda conducir a la aparición de las funciones necesarias para la emergencia de la vida, este experimento fue crucial para demostrar que la selección natural puede operar directamente sobre las moléculas, estableciéndose así un nexo entre los estudios teóricos y la realidad biológica. Posteriormente se demostró que las moléculas de ARN son capaces de evolucionar de forma concertada con el medio, al igual que sucede en los seres vivos.

La teoría de las cuasiespecies establece un límite en la tasa de error, el denominado umbral de error, que garantiza la conservación estable de la información genética.

QUASISPECIES

The concept of quasispecies has its origin in a theory developed to explain the self-organization and evolution of molecules with replicative capacity and carrying genetic information (**RNA** molecules according to the RNA world hypothesis) that probably populated the primitive **Earth** prior to the origin of **life**. It represents the first attempt to integrate concepts of information theory with Darwinian natural selection (see term **Biological evolution**).

A quasispecies can be defined as the steady state reached by an infinite population of replicators that are copied with high error rate and on which natural selection acts, favoring those that replicate more efficiently. Importantly, copying errors (or **mutations**) can alter the replicative capacity of each replicator, making quasispecies highly dynamic structures. The sequence with the highest replicative capacity within a quasispecies

is called the master sequence. Despite its superiority over the other replicators, it never comes to dominate the population, since high error rates will always produce sequences that differ from the master. These sequences constitute the mutant spectrum.

Quasispecies theory also introduced the concept of “hypercycles” as a principle of natural self-organization that allows the integration of different quasispecies into higher-order organizations that facilitate evolution into more complex forms, ideally combining the coding capacity of nucleic acids with the function of **proteins**.

The first experiment demonstrating the evolutionary capacity of RNA molecules was carried out by Sol Spiegelman in 1965, using the genome of bacteriophage Q β . In it, he demonstrated that, when the selective pressure is only to be copied as quickly as possible, much of the

viral genome is dispensable and can be eliminated. Although it is difficult to think that a process of genomic reduction could lead to the generation of the functions necessary for the emergence of life, this experiment was crucial in demonstrating that natural selection can operate directly on molecules, thus establishing a link between theoretical studies and biological reality. Subsequently, it was shown that RNA molecules are able to evolve in concert with the environment, just as happens in living beings.

Quasispecies theory establishes a limit on the error rate, the so-called error threshold, which guarantees the stable conservation of genetic information. The value of this limit depends on the precision of replication and the superiority of the master sequence with respect to the rest. When the error threshold is crossed, all sequences become equally probable, which would prevent the

El valor de este límite depende de la precisión de la replicación y de la superioridad de la secuencia maestra respecto al resto. Cuando se cruza el umbral de error, todas las secuencias se hacen igualmente probables, lo que impediría el mantenimiento de la información y podría llevar a la extinción de la población.

En estudios posteriores, realizados también con el bacteriófago Q β , Charles Weissmann, Martin Billeter y Esteban Domingo observaron que una población de fagos (o bacteriófagos, los **virus** que parasitan a las **bacterias**), aparentemente homogénea desde el punto

de vista fenotípico, contenía múltiples variantes genéticas, algo que cambió radicalmente la comprensión del comportamiento de las poblaciones virales. En virología, el término cuasiespecies se refiere a una distribución de genomas no idénticos pero relacionados entre sí, los cuales están sometidos a un proceso continuo de variación genética, competición y selección, además de interacciones no triviales entre variantes. Entender las poblaciones virales como conjuntos de genomas diferentes ha sido crucial para definir mejores estrategias para el tratamiento y la prevención de las enfermedades causadas por estos patógenos.

maintenance of information and could lead to the extinction of the population.

In later studies, also performed with bacteriophage Q β , Charles Weissmann, Martin Billeter and Esteban Domingo observed that a population of phages (or bacteriophages, the **viruses** that parasitize **bacteria**), apparently homogeneous from the phenotypic point of view, contained multiple genetic variants, something that radically changed

the understanding of the behavior of viral populations. In virology, the term quasispecies refers to a distribution of non-identical but related genomes, which are subject to a continuous process of genetic variation, competition and selection, as well as non-trivial interactions between variants. Understanding viral populations as sets of distinct genomes has been crucial for defining better strategies for the treatment and prevention of diseases caused by these pathogens.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica

DOMINGO, E., SHELDON, J., PERALES, C. (2012). "VIRAL quasispecies evolution". *Microbiol Mol Biol Rev*, 76(2), 159-216.

LÁZARO, E., (2014). "RNA virus evolution at increased error rate." *Future Virology*, [en línea] <<https://doi.org/10.2217/fvl.14.47>>.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

25. DIAGRAMA HERTZSPRUNG-RUSSELL (H-R)

El diagrama de Hertzsprung-Russell (o simplemente diagrama HR) es una gráfica que representa la luminosidad de las **estrellas** en función de su temperatura efectiva. Lleva ese nombre por haber sido usado por primera vez y de manera independiente por dos astrofísicos, Ejnar Hertzsprung y Henry Russell, a principios del siglo XX. Desde entonces sigue siendo muy usado en los estudios de Astrofísica estelar.

El color predominante de la luz emitida por una estrella permite deducir su temperatura. Las estrellas más calientes emiten luz muy blanca o incluso azulada, mientras que a temperaturas menores la luz pasa a ser amarilla, anaranjada o rojiza. Sin embargo, la luminosidad de una estrella puede calcularse solamente si conocemos su distancia, dado que el brillo puede igualmente representar una

estrella tenue cercana o una muy luminosa pero más lejana.

Ubicar una estrella en el diagrama HR proporciona información sobre la etapa de su **evolución estelar**. La mayoría de las estrellas se agrupan formando una línea diagonal en la parte central de la gráfica (ver figura 19), llamada secuencia principal, y corresponde a la etapa en que las estrellas producen energía por fusión de hidrógeno y en la que pasan gran parte de su existencia. Las estrellas azules son las de mayor luminosidad y de más alta temperatura, es decir, son muy brillantes y calientes. Al otro extremo de la secuencia están las estrellas menos luminosas y de menor temperatura, estrellas rojas, más tenues y frías. La masa de la estrella es el factor que determinará su posición en la franja diagonal de la secuencia principal. Por ejemplo, los cuer-

pos de mayor masa son los más calientes que se ubican en el extremo superior a la izquierda. El **Sol**, estrella amarilla y de menor masa, se halla en la parte central de la secuencia principal.

En la parte superior derecha del diagrama HR se posicionan estrellas muy brillantes, pero de más baja temperatura (de superficie más fría). Son las gigantes rojas: una fase distinta de la evolución de las estrellas, tras agotarse el hidrógeno en su centro. En la parte inferior izquierda, se encuentran las enanas blancas: estrellas evolucionadas de pequeño tamaño y poco luminosas que pueden tener muy alta temperatura. Dentro de unos ocho mil millones de años, el Sol será una enana blanca. Su núcleo quedará expuesto al espacio, tras expulsar las capas superiores en forma de nebulosa planetaria.

HERTZSPRUNG-RUSSELL (H-R) DIAGRAM

The Hertzsprung-Russell diagram (or simply HR diagram) is a graph that represents the luminosity of **stars** as a function of their effective temperature. It received that name because it was first used independently by two astrophysicists, Ejnar Hertzsprung and Henry Russell, at the beginning of the 20th century. Since then, it continues to be widely used in studies of Stellar Astrophysics.

The predominant color of the light emitted by a star allows us to deduce its temperature. The hottest stars emit mostly white or even bluish light, while at lower temperatures the light turns yellow, orange or reddish. However, the luminosity of a star can only be calculated if we know its distance, since the

brightness can equally well represent a dim nearby star or a very luminous but more distant one.

Locating a star on the HR diagram provides information about the stage of its **stellar evolution**. Most stars are grouped together forming a diagonal line in the central part of the graph (see figure 19), called the main sequence, and it corresponds to the stage in which stars produce energy by hydrogen fusion and in which they spend a great part of their existence. Blue stars are the ones with the highest luminosities and temperatures, that is, they are very bright and hot. At the other end of the sequence are the less luminous and lower temperature stars, red stars, dimmer

and cooler. The mass of the star is the factor that will determine its position in the diagonal strip of the main sequence. For example, the bodies of greatest mass are the hottest ones that are located in the upper left end. The **Sun**, a yellow star with a lower mass, is in the central part of the main sequence.

In the upper right part of the HR diagram, there are stars that are very bright but with a lower temperature (colder surface). They are red giants: a different phase of the evolution of a star, after the hydrogen in their center is exhausted. At the bottom left are white dwarfs: small, dim, evolved stars that can be very hot. In about eight billion years, the Sun will be a white dwarf. Its core will be exposed

Este diagrama es muy útil en el estudio de cúmulos estelares, ya que sus estrellas se encuentran a distancias similares y tienen edades parecidas, pues se formaron a partir de una misma nebulosa inicial. Como las estrellas más masivas consumen su hidrógeno más rápido, al avanzar los millones de años las estrellas de la

parte izquierda de la secuencia principal se van desplazando hacia arriba y a la derecha en el diagrama, al convertirse en supergigantes o gigantes rojas antes de llegar al final de su evolución. El diagrama HR permite de esta forma estimar su edad, y también estudiar cómo evolucionan las estrellas con el tiempo.

Figura 19:

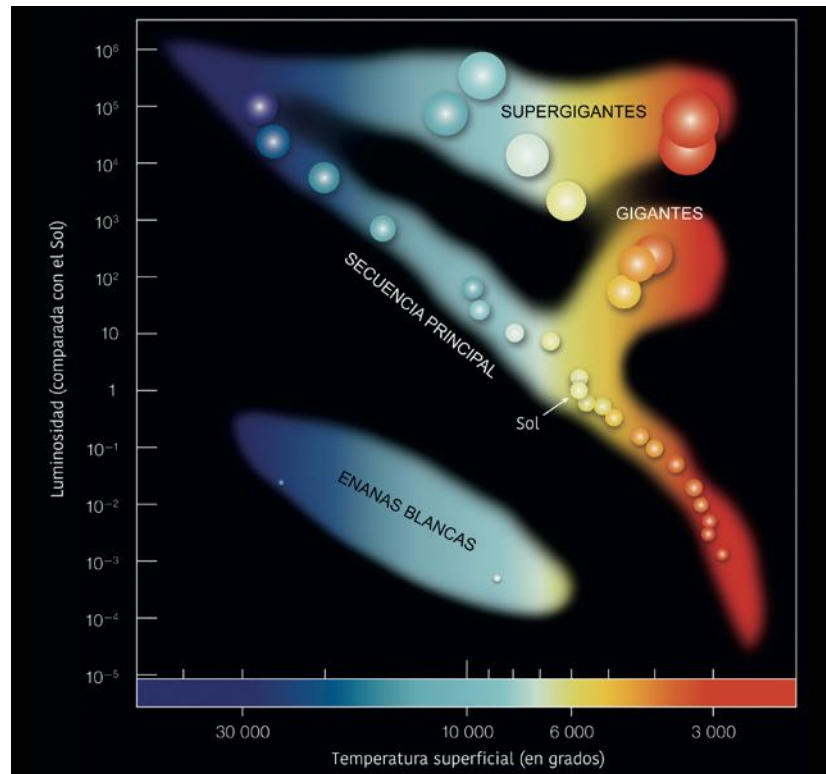
Diagrama de Hertzsprung-Russell.

Hertzsprung-Russell diagram.

Compara la luminosidad de una estrella con su temperatura superficial y permite de manera directa estimar la masa y el estado evolutivo.

It compares the luminosity of a star with its surface temperature and allows direct estimation of its mass and evolutionary state.

Crédito: European Southern Observatory.



to space, after expelling its outer layers in the form of a planetary nebula.

This diagram is very useful for the study of stellar clusters, since their stars are at similar distances and have similar ages, as they have been formed from the same initial nebula. Because more massive stars exhaust their hydrogen faster, stars on the left side of the main sequence move up and to the right in the diagram, becoming supergiants or red giants before reaching the end of their evolution. The HR diagram thus allows us to estimate their age, and also to study how stars evolve over time.

Lecturas adicionales /Further reading

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY,
The Hertzsprung-Russell diagram, [en línea]
<<https://www.eso.org/public/spain/images/eso0728c/>>.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

26. DINÁMICA QUÍMICA

La dinámica química es una rama de la quimicofísica (también llamada fisico-química) que se ocupa del estudio de, primero, la probabilidad de que una reacción química tenga lugar, a partir de los requerimientos energéticos y, segundo, la manera en la que la reacción transcurre, considerando la velocidad a la que se producen los procesos. Estos estarán definidos por factores tanto microscópicos como macroscópicos, es decir, desde el movimiento de los núcleos y los electrones, la distribución de energía entre los modos de rotación, vibración y traslación entre reactivos y productos, hasta la difusión de partículas en un sistema, como puede ser la disolución de una sustancia sólida en un líquido, por ejemplo.

En la figura 20 se muestra un ejemplo de moléculas diatómicas (reactivos) que reaccionan cuando se orientan adecuadamente tras difundir por el medio hasta distancias muy próximas. Si la co-

lisión es eficaz, se superará la energía de activación del complejo intermedio que se forma durante el choque, los enlaces se reordenarán y se formarán las nuevas moléculas (productos).

Así, la comprensión del proceso a nivel microscópico implica el estudio del mecanismo de reacción, es decir, el camino que los reactivos siguen hasta convertirse en los productos. Para que la reacción ocurra, las moléculas tienen que estar orientadas de manera específica y poseer una energía térmica suficiente (suma de los movimientos de rotación, vibración y traslación), conocida como energía de activación (E_a), que sea capaz de vencer la repulsión de las nubes electrónicas de las moléculas y aproximarse lo necesario para que se reordenen los enlaces entre átomos.

Desde el punto de vista macroscópico, la difusión molecular es el proceso mediante el cual las moléculas, átomos

o iones se mueven a través de un material. Los elementos son empujados por gradientes de potenciales químicos (es decir, su tendencia a escapar del medio en el que se encuentran), temperatura (el aumento de energía térmica tiende a desordenar un sistema, ver **Entropía**) o concentración (las partículas que se encuentran concentradas en un punto se esparcen a través del medio). Así, tanto el estado físico de los reactivos como su capacidad de difundirse por el medio son factores que determinarán la cinética de una reacción.

Relacionando ambos enfoques, el microscópico y el macroscópico, en un sistema con alta concentración de partículas en movimiento, a alta temperatura, o a alta presión, la probabilidad de que choquen e interactúen unas con otras aumenta. La alta energía cinética propiciará que las reacciones químicas ocurran, y que lo hagan además de manera más rápida.

CHEMICAL DYNAMICS

Chemical dynamics is a branch of chemical-physics (also called physicochemistry) that deals with the study of, first, the probability of a chemical reaction taking place, based on the energy requirements and, second, the way in which the reaction takes place, considering the rate at which the processes occur. These will be defined by both microscopic and macroscopic factors, i.e., from the motion of nuclei and electrons, the distribution of energy between modes of rotation, vibration and translation between reactants and products, to the diffusion of particles in a system, such as the dissolution of a solid substance in a liquid, for example.

Thus, understanding the process at the microscopic level involves the study of the reaction mechanism, i.e., the path that the reactants follow until they become the products. For the reaction to occur, the molecules must be oriented in a specific way and possess sufficient thermal energy (sum of rotational, vibrational and translational motions), known as activation energy (E_a), to overcome the repulsion of the molecules' electronic

clouds and come close enough for the bonds between atoms to be rearranged.

Figure 20 shows an example of diatomic molecules (reactants) reacting when properly oriented after diffusing through the medium to very close distances. If the collision is effective, the activation energy of the intermediate complex formed during the collision will be exceeded, the bonds will be rearranged and the new molecules (products) will be formed.

From the macroscopic point of view, molecular diffusion is the process by which molecules, atoms or ions move through a material. These particles are pushed by gradients of chemical potentials (i.e., their tendency to escape from the medium in which they are found), temperature (increased thermal energy tends to disorder a system, see **Entropy**) or concentration (particles that are concentrated at one point spread through the medium). Thus, both the physical state of the reactants and their ability to diffuse through the medium are factors that will determine the kinetics of a reaction.

Relating both microscopic and macroscopic approaches, in a system with a high concentration of moving particles, at high temperature, or at high pressure, the probability that they will collide and interact with each other increases. The high kinetic energy will cause chemical reactions to occur, and to do so more rapidly.

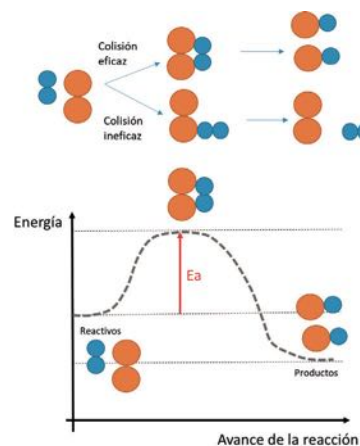


Figura 20:

Evolución de una reacción química con el tiempo.

Evolution of a chemical reaction over time.

27. DISCOS CIRCUNESTELARES: PROTOPLANETARIOS Y DE DEBRIS

Se denominan así a las estructuras de gas y **polvo** que rodean a las **estrellas**. Los discos circunestelares se originan en fases muy tempranas de la formación estelar como consecuencia de un fenómeno conocido como conservación del momento angular. Básicamente ese mecanismo lleva a una gran nube de gas y polvo en contracción bajo el efecto de la gravedad, y con una pequeña velocidad inicial de rotación, a una estructura aplanada que gira en torno a la protoestrella. Los sistemas planetarios se forman en estos discos y por eso, en las fases en las que contienen una gran cantidad de gas y polvo, se los denomina discos protoplanetarios. Se ha estimado que se disipan en torno a los 5 millones de años, de modo que esa edad fija la escala de tiempo en la cual deben formarse los **planetas**.

Los discos de *debris* son discos circunestelares evolucionados que se detectan en torno a las estrellas de la secuencia principal (ver **Diagrama H-R**). Se considera que son los restos de la formación planetaria, ya que son discos que han

perdido la mayor parte de su contenido en gas y están formados principalmente por planetesimales, pequeños cuerpos rocosos, y polvo proveniente de las colisiones de esos cuerpos. De hecho, *debris* es un término que proviene del francés y significa literalmente escombros.

El **sistema solar** tiene dos estructuras que pueden considerarse discos de

debris: una de ellas es el cinturón de asteroides, situado fundamentalmente entre **Marte** y Júpiter, y otro es el cinturón de Kuiper, también llamado cinturón de Edgeworth-Kuiper, que se localiza más allá de la órbita de Neptuno, entre 30 y 50 unidades astronómicas del **Sol** (una unidad astronómica, ua, es la distancia promedio entre la **Tierra** y el Sol).



Figura 21:

Discos circunestelares: disco protoplanetario alrededor de HL Tau, y disco debris alrededor de Fomalhaut.

Circumstellar disks: Protoplanetary disk around HL Tau, and debris disk surrounding Fomalhaut.

Créditos: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), L. Matrà/M. A. MacGregor.

CIRCUMSTELLAR DISKS: PROTOPLANETARY AND DEBRIS DISKS

This is the name given to the gas and **dust** structures that surround stars. Circumstellar disks originate at very early stages of the **star** formation process, as a consequence of a phenomenon known as conservation of angular momentum. Basically, this mechanism leads to a large cloud of gas and dust contracting under the effect of gravity, and with a small initial rotational velocity, to a flattened structure that rotates around the proto-star. Planetary systems form in these disks and therefore, in the phases in which they contain a large amount of gas and dust, they are called protoplanetary disks. It has been estimated that they dissipate at around 5 million years, so this age sets the time scale on which **planets** must form.

Debris disks are evolved circumstellar disks that are detected around main sequence stars (see **H-R Diagram**). They are considered to be the remnants of planetary formation, since they are disks that have lost most of their gas content and consist mainly of planetesimals, small rocky bodies, and dust from the collisions of those bodies. In fact, *debris* is a term that comes from the French language, and literally means detritus.

The **solar system** has two structures that can be considered *debris* disks: one is the asteroid belt, located mainly between **Mars** and Jupiter, and the other is the Kuiper belt, also called the Edgeworth-Kuiper belt, which is located beyond the orbit of Neptune, between 30 and 50 astronomical units from the **Sun** (one astronomical unit –au– is the average distance between the **Earth** and the Sun).

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

28. ECOLOGÍA MICROBIANA

La ecología (del griego οἶκος, *oikos*, “casa”, y λόγος, *logos*, “conocimiento”) es la ciencia que estudia los seres vivos, el ambiente en que se desarrollan, su distribución y su abundancia y cómo estas propiedades se ven afectadas por la interacción entre los organismos y el ambiente. Circunscritos a los microorganismos, se ha desarrollado una nueva disciplina denominada ecología microbiana que estudia los microorganismos en su ambiente natural, cómo se relacionan entre sí y como interactúan con el ambiente.

La ecología microbiana ha dado lugar a un campo diferenciado dentro de la ecología debido, en buena medida, a que para identificar los microorganismos que forman parte de un ecosistema se requieren metodologías muy específicas. La ciencia de la ecología microbiana se centra en cómo las poblaciones microbianas se reúnen para formar comunidades y cómo estas comunidades interactúan entre sí y con su entorno. Los principales componentes de la ecología microbiana son la **bio-**

diversidad y la actividad microbiana. Para estudiar la biodiversidad, los ecólogos microbianos deben identificar y cuantificar los microorganismos en sus hábitats. Los microorganismos, además, están en la base de las interacciones que tienen lugar en los ecosistemas, siendo los responsables de muchas de las actividades que mantienen la **vida** en la **Tierra**. Así, por ejemplo, los ciclos de los elementos esenciales para la vida, como el carbono, nitrógeno, oxígeno o fósforo (ver **Tabla periódica**), se explican en buena medida por las actividades e interacciones microbianas. Esto hace de la ecología microbiana es una parte esencial de la Astrobiología, ya que el estudio de microorganismos y sus aportes resultan básicos para entender tanto la vida en la Tierra, como los límites de esta. De este modo, un conocimiento amplio de los ecosistemas terrestres, especialmente de los ecosistemas extremos, ayudan a abarcar diferentes objetivos de la Astrobiología, como el origen, los límites y búsqueda de vida en otros **planetas**.

Hace dos décadas los ecólogos microbianos supieron ver las limitaciones que suponían sus metodologías, basadas en métodos de cultivo y aislamiento, para el estudio de los ecosistemas. De forma progresiva, se introdujeron metodologías moleculares para la identificación de microorganismos y de sus rutas metabólicas (ver **Metabolismo**). Esto ha dado lugar al desarrollo de una disciplina más, la ecología microbiana molecular, que ha supuesto una revolución dentro del campo de la ecología microbiana ya que ha proporcionado en unos pocos años, una gran cantidad de datos y explicaciones nuevas. Esto ha sido especialmente revolucionario en el estudio de ecosistemas extremos, donde las metodologías tradicionales eran muy poco aplicables. Dado el interés que los ecosistemas extremos suscitan en Astrobiología, la ecología molecular se ha convertido en pocos años en un campo troncal de la Astrobiología. Además, las metodologías moleculares pueden ser monitorizadas, usadas a distancia o *in silico* (por simulación en computadores), con mayor facilidad.

MICROBIAN ECOLOGY

Ecology (from the Greek οίκος, *oikos*, “house”, and λόγος, *logos*, “knowledge”) is the science that studies living things, the environment in which they develop, their distribution and abundance, and how these properties are affected by the interaction between organisms and environment. Circumscribed to microorganisms, a new discipline called microbial ecology has been developed that studies microorganisms in their natural environment, how they relate to each other and how they interact with the environment.

Microbial ecology has given rise to a distinct field within ecology largely because identifying the microorganisms that are part of an ecosystem requires very specific methodologies. The science of microbial ecology focuses on how microbial populations assemble to form communities and how these communities interact with each other and with their environment. The main components of microbial ecology are **biodiversity** and microbial activity. To study biodiversity, microbial ecologists must identify and quantify microorganisms in their habitats. Microorganisms, moreover, are at the

basis of the interactions that take place in ecosystems, being responsible for many of the activities that maintain **life on Earth**. Thus, for example, the cycles of elements essential for life, such as carbon, nitrogen, oxygen or phosphorus (see **Periodic table**), are largely explained by microbial activities and interactions. This makes microbial ecology an essential part of Astrobiology, since the study of microorganisms and their contributions are essential for understanding both life on Earth and its limits. Thus, a broad knowledge of terrestrial ecosystems, especially extreme ecosystems, helps to cover different objectives of Astrobiology, such as the origin, limits and search for life on other **planets**.

Two decades ago, microbial ecologists were able to see the limitations of their methodologies, based on culture and isolation methods, for the study of ecosystems. Progressively, molecular methodologies were introduced for the identification of microorganisms and their metabolic pathways (see **Metabolism**). This has led to the development of yet another discipline, molecular microbial ecology, which has been a revolution in the field of microbial ecology, providing

in a few years a wealth of new data and explanations. This has been especially revolutionary in the study of extreme ecosystems, where traditional methodologies were hardly applicable. Given the interest in extreme ecosystems in Astrobiology, molecular ecology has become a core field of Astrobiology in just a few years. Moreover, molecular methodologies can be monitored, used remotely or *in silico* (by computer simulation), more easily than traditional ones, which raises the astrobiological interest of molecular ecology.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

MADIGAN, M., AIYER, J., BUCKLEY, D., SATTLEY, W., STAHL, D. (2021). *Brock Biology of Microorganisms*. Pearson-Prentice Hall, ISBN 978-1-292-40523-0.

29. ECOSISTEMA ENDOLÍTICO

El ecosistema endolítico es aquel que se desarrolla en el interior de las rocas. Hace referencia al ecosistema donde se desarrollan los microorganismos endolíticos que son aquellos que son capaces de colonizar y desarrollarse dentro de aquellas. Estos microorganismos endolitos se clasifican en tres categorías según el espacio interior que ocupen: i) los microorganismos chasmaendolitos (del lat. *chasma*, “hendidura”) que colonizan fisuras y grietas de la roca; ii) criptoendolitos (del gr. *kryptós*, “escondido”) que colonizan cavidades en el interior de las rocas porosas, incluidos espacios producidos por los euendolitos; iii) por último, los microorganismos euendolitos (del gr. *eu*, “verdadero”) que son aquellos que penetran activamente en el interior de la roca formando túneles que recogen la forma de su estructura biológica. Estos últimos son aquellos que taladran y penetran la roca realmente.

Estos organismos son de gran interés astrobiológico porque el interior de un **meteorito** podría ser el reducto protegido por el que se podrían distribuir microorganismos en el universo, concepto conocido como litopanspermia. Esta idea hace referencia a la posibilidad de la distribución y propagación de la **vida** en diferentes cuerpos celestes partiendo de un planeta donde se haya originado. Los meteoritos serían los vehículos que llevarían a cabo esta distribución entre planetas (ver término **Panspermia**).

Desde el punto de vista astrobiológico los organismos endolitos que mayor protección presentarían y por tanto serían de mayor interés serían los criptoendolitos y los euendolitos, por estar incluidos en los espacios más profundos y protegidos de la roca. Estos reductos protegidos les permitirían sobrevivir a condiciones ex-

tremas en ambientes adversos o incluso en el espacio exterior. Estos organismos podrían sobrevivir a partir de los metabolitos inorgánicos presentes en el espacio intersticial de la roca, por tanto, estos microorganismos son fundamentalmente litótrofos (del gr. *lithos*, “roca” y *trophos*, “**metabolismo**, que se alimentan a partir de”), es decir, se desarrollan utilizando metabolitos rocosos.

En la década de los 90 del siglo pasado se publicaron varios trabajos geológicos y microbiológicos que describieron las evidencias moleculares, químicas y texturales de comunidades microbianas capaces de disgregar o descomponer los suelos basálticos del fondo oceánico. Fue en 1995 cuando los autores Stevens y McKinley publicaron la presencia de crecimiento microbiano en un microcosmo en el interior de unas rocas de

ENDOLITHIC ECOSYSTEM

An endolithic ecosystem is one that develops inside rocks. It refers to the ecosystem where endolytic microorganisms develop, which are those that are able to colonize and develop inside rocks. These endolithic microorganisms are classified into three categories according to the interior space they occupy: i) chasmaendolite microorganisms (from the Latin *chasma*, “cleft”) that colonize fissures and cracks in the rock; ii) cryptoendolites (from the Greek *crypto*, “hidden”) that colonize cavities inside porous rocks, including spaces produced by euendolites; iii) finally, euendolite microorganisms (from the Greek *eu*, “true”) that are those that actively penetrate inside the rock forming tunnels that take the form of their biological structure. The latter are those that actually drill and penetrate the rock. These organisms are of great astrobiological interest because the interior

of a **meteorite** could be the protected redoubt through which microorganisms could be distributed in the Universe, a concept known as lithopanspermia. This idea refers to the possibility of the distribution and propagation of **life** on different celestial bodies starting from a planet where it originated. Meteorites would be the vehicles that would carry out this distribution between planets (see term **Panspermia**).

From the astrobiological point of view, the endolithic organisms that would be most protected and therefore of greatest interest would be the cryptoendolites and euendolites, because they would be included in the deepest and most protected spaces of the rock. These protected redoubts would allow them to survive extreme conditions in adverse environments or even in outer space.

These organisms could survive from the inorganic metabolites present in the interstitial space of the rock, therefore, these microorganisms are fundamentally lithotrophic (from the Greek *lithos*, “rock”, and *trophos*, “**metabolism**, feeding from”), i.e., they develop using rock metabolites.

In the 1990s, several geological and microbiological papers were published describing molecular, chemical and textural evidence of microbial communities capable of breaking up or decomposing basaltic soils on the ocean floor. It was in 1995 that authors Stevens and McKinley published the presence of microbial growth in a microcosm within basalt rocks in the Columbia River. These authors, apart from reporting the presence of the microorganisms, stated that they were sustained by energy from igneous

basalto en el río Columbia. Estos autores, aparte de informar sobre la presencia de los microorganismos, afirmaron que estos se sustentaban a partir de la energía procedente de las rocas ígneas. Además, se propuso que los microorganismos litotótrofos (microorganismos que tiene la capacidad de generar energía a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos y fijar el carbono que necesitan para su metabolismo a partir del CO₂ atmosférico) serían los productores primarios en este tipo de ecosistemas subterráneos. Estas publicaciones fueron las primeras en dar a conocer información sobre comunidades microbianas (ver **Ecología microbiana**) y sobre sus requerimientos en carbono y fuentes de energía como parte fundamental en el desarrollo y comprensión de los procesos biogeoquímicos del subsuelo.

En una publicación de 1997, Stevens informó que el hierro reducido, el manganeso, el azufre y el hidrógeno, bien fuera este producido mediante serpen-

tinización (proceso exotérmico por el que masas de roca ferromagnéticas sometidas a las altas presiones ascienden hacia la corteza y entran en contacto con masas de **agua** que se infiltran en ellas, generando grandes cantidades de hidrógeno) o por oxidación de silicatos ferromagnéticos, podrían ser la fuente de electrones para el metabolismo de estos microorganismos, aunque en 1998 Anderson y colaboradores publicaron que la interacción entre el basalto y el agua no produciría hidrógeno. Por otro lado, hierro y manganeso oxidados podrían ser los aceptores de electrones necesarios para completar el ciclo metabólico en el subsuelo. Algunos cristales de basalto contienen pequeñas cantidades de fósforo y metales que pueden ser usados por los microorganismos como micronutrientes necesarios. De esta forma, se demostró que en el subsuelo y en el interior de las rocas podían desarrollarse ecosistemas microbianos con un metabolismo sustentado por los nutrientes inorgánicos presentes en las mismas rocas.

rocks. Furthermore, it was proposed that lithoautotrophic microorganisms (microorganisms that have the ability to generate energy from the oxidation of inorganic compounds and fix the carbon they need for their metabolism from atmospheric CO₂) would be the primary producers in this type of subterranean ecosystem. These publications were the first to provide information on microbial communities (see **Microbial ecology**) and on their carbon requirements and energy sources as a fundamental part in the development and understanding of subsurface biogeochemical processes.

In a 1997 publication, Stevens reported that reduced iron, manganese, sulfur, and hydrogen, whether produced by serpentinization (exothermic process by which masses of ferromagnetic rock subjected to high pressures rise towards the

crust and come into contact with masses of **water** that infiltrate them, generating large quantities of hydrogen) or by oxidation of ferromagnetic silicates, could be the source of electrons for the metabolism of these microorganisms, although in 1998 Anderson and collaborators published that the interaction between basalt and water would not produce hydrogen. On the other hand, oxidized iron and manganese could be the electron acceptors needed to complete the metabolic cycle in the subsurface. Some basalt crystals contain small amounts of phosphorus and metals that can be used by microorganisms as necessary micronutrients. In this way, it was demonstrated that microbial ecosystems with a metabolism supported by the inorganic nutrients present in the rocks themselves could develop in the subsoil and within the rocks.

Lecturas adicionales /Further reading

LYSNES, K., TORSVIK, T., THORSETH, I. H., AND PEDERSEN, R. B., (2004). "Microbial populations in ocean floor basalt: results from ODP Leg 187." *En Pedersen, R. B., Christie, D. M., and Miller, D. J. (eds.), Proc. ODP, Sci. Results, 187, 1–27.*

http://www-odp.tamu.edu/publications/187_SR/VOLUME/CHAPTERS/203.PDF

30. ENTROPÍA

El término entropía (del griego *ἐν* o *en*, “en”, y *τροπή*, *tropē*, “transformación”) es un concepto físico introducido por Rudolf Clausius en 1865 asimilable hasta cierto punto a la energía y su uso. Se fundamenta en el segundo principio de la termodinámica, que establece que en un sistema aislado el valor de este parámetro tiende a aumentar. Se trata por tanto de la irreversibilidad de la evolución de los fenómenos físicos, ya enunciado por Sadi Carnot en 1824. Por tanto, la entropía establece la denominada “flecha del tiempo”, una dirección preferencial, que permite distinguir el pasado y el futuro, marca la evolución hacia el futuro, junto con la imposibilidad de viajar hacia atrás en el tiempo.

La entropía mide la organización de un sistema. De manera específica, mide el número de microestados compatibles con el macroestado que se observa en el estado de equilibrio de un sistema. Es decir, de cuántas formas posibles se pueden colocar los elementos para que

el observador pueda medir macroscópicamente lo mismo. De manera más sencilla y como ejemplo, determina el estado de un sistema como pudiera ser un gas dentro de un recipiente. Así, dos habitaciones aisladas pueden contener dos tipos de partículas, como pueden ser dos gases con diferente composición, nitrógeno y oxígeno moleculares (los principales componentes del aire, 78 % de N_2 y 21 % de O_2). En la de la izquierda hay más nitrógeno que oxígeno, en una proporción similar al aire, mientras que en la derecha es a la inversa, siendo la mezcla muy rica en oxígeno. Si se abriera una comunicación entre ambas los gases se mezclarían por igual debido a los movimientos aleatorios de todo gas (las velocidades del movimiento están relacionadas con la temperatura promedio, que es el verdadero significado de esta magnitud) y la distribución final sería uniforme (misma composición en ambas habitaciones). Este proceso representa la evolución según la segunda ley de la termodinámica: el orden (máximo cuando

cada gas se encuentra en su habitación respectiva) decrece, hay una tendencia estadística hacia la uniformidad, hacia una distribución homogénea. Si además la temperatura inicial de cada habitación era distinta, al final también se alcanzaría el mismo valor en ambas y no sería posible extraer energía, presumiblemente en forma de calor, solo de este sistema.

Desde un punto de vista biológico, el uso de energía es necesario para cualquier reacción química. Los seres vivos (ver término **Vida**) son sistemas abiertos, complejos y altamente organizados, que intercambian materia y energía con su medio y en donde se producen disminuciones locales de entropía. Así, un organismo puede entenderse como un sistema de intercambio de energía que se desarrolla en un gradiente de entropía (variación de la entropía en dos puntos próximos), dentro de un flujo energético. De hecho, la entropía del ser vivo decrece, pero la del entorno aumenta en mayor medida.

ENTROPY, ENERGY AND LIFE

The term entropy (*ἔν* or *en*, “in”, and τροπή, *tropē*, “transformation”) is a physical concept introduced by Rudolf Clausius in 1865 assimilable to some extent to energy and its use. It is based on the second principle of thermodynamics, which states that in an isolated system the value of this parameter has to increase. It shows the irreversibility of the evolution of physical phenomena, already enunciated by Sadi Carnot in 1824. Entropy therefore establishes the so-called “arrow of time” a preferential direction, which allows to distinguish the past and the future, marks the evolution towards the future and its irreversibility, together with the impossibility to travel backwards in time.

Entropy measures the organization of a system. Specifically, it measures the number of microstates compatible with the macrostate observed in the equilibrium state of a system. That is, how many possible ways the elements can be placed so

that the observer can measure macroscopically the same thing. In a simpler way and as an example, it determines the state of a system such as a gas inside a container. Thus, two isolated rooms may contain two types of particles, such as two different gases with different composition, e.g. molecular nitrogen and molecular oxygen, the main components in air, being 78% N₂ and 21% O₂). In the room on the left there is more nitrogen than oxygen, in a proportion similar to air, while on the right it is the other way around, the mixture being very rich in O₂. If a communication were opened between the two, the gases would mix equally due to the random movements of all gases (the velocities of movement are related to the average temperature, which is the true meaning of this magnitude) and the final distribution would be uniform (same composition in both rooms). This process represents the evolution according to the second law of thermodynamics: the

order (maximum when each gas is in its respective room) decreases, there is a statistical tendency towards uniformity, towards a homogeneous distribution. If, in addition, the initial temperature of each room was different, at the end the same value is also reached in both, and it would not be possible to extract energy, presumably in the form of heat, from this system alone.

From a biological point of view, the use of energy is necessary for any chemical reaction. Living beings (see term **Life**) are open, complex and highly organized systems, which exchange matter and energy with their environment and where local decreases in entropy occur. Thus, an organism can be understood as an energy exchange system that develops in a gradient of entropy, within an energy flow. In fact, the entropy of the living being decreases, whereas the entropy of the environment increases to a greater extent.

31. ESPECTROSCOPIA

La espectroscopía es el estudio de los espectros que resultan de la interacción entre la **radiación** electromagnética (de la que la luz visible es solo una parte) y la materia. Un espectro representa la distribución de energía de la radiación en función de su longitud de onda o frecuencia. En el ámbito de la Astrofísica, la espectroscopía constituye una técnica observacional orientada al análisis de la composición espectral de la luz emitida por los cuerpos, permitiendo así determinar muchas de sus propiedades.

El rango de longitudes de onda del espectro visible se extiende desde ~380 a 750 nanómetros. Un nanómetro equivale a la milmillonésima parte de un metro. Por ejemplo, un cabello humano promedio tiene aproximadamente 60 000 nanómetros de espesor.

Los nanómetros se usan para medir las longitudes de onda de la luz y las distancias entre los átomos de las moléculas.

El origen de la espectroscopía se remonta al s. XVII. Los experimentos ópticos de Isaac Newton para dispersar la luz del **Sol** en sus diferentes colores utilizando un prisma constituyen los primeros trabajos espectroscópicos de los que se tiene constancia. Sin embargo, los primeros espectroscopios propiamente dichos no fueron desarrollados hasta el s. XIX, destacando los avances pioneros de Joseph von Fraunhofer, Robert Bunsen y Gustav Kirchoff. Sus trabajos condujeron a la identificación de las primeras líneas de absorción en el espectro solar (las denominadas líneas de Fraunhofer),

que, al aparecer a longitudes de onda específicas, representan la firma espectroscópica de los distintos elementos químicos presentes en la **atmósfera** del Sol. De forma general, el análisis espectral permite determinar la composición química de un cuerpo mediante la identificación de las líneas de emisión y/o absorción presentes en su espectro. Además, el análisis espectral proporciona información sobre abundancias elementales, temperaturas y densidades, e incluso patrones de movimiento (gracias al efecto Doppler, que causa un desplazamiento de las líneas respecto de su longitud de onda de reposo cuando el cuerpo emisor se mueve respecto al observador).

Al igual que los elementos químicos, las moléculas también tienen una firma es-

SPECTROSCOPY

Spectroscopy is the study of the spectra resulting from the interaction between electromagnetic **radiation** (of which visible light is just a part) and matter. A spectrum represents the energy distribution of radiation as a function of its wavelength. In the field of astrophysics, spectroscopy is an observational technique aimed at analyzing the spectral composition of the light emitted by bodies, thus making it possible to determine many of their properties.

The visible spectrum wavelength range extends from ~380 to 750 nanometers. A nanometer is equivalent to one billionth of a meter. For example, an average human hair is approximately 60,000 nanometers thick. Nanometers are used to measure wavelengths of light and distances between atoms in molecules.

The origin of spectroscopy dates back to the 17th century. Isaac Newton's optical experiments to disperse sunlight into its different colors using a prism are the earliest spectroscopic works on record. However, the first spectrographs were not developed until the 19th century, with pioneering advances by Joseph von Fraunhofer, Robert Bunsen and Gustav Kirchoff. Their work led to the identification of the first absorption lines in the solar spectrum (the so-called Fraunhofer lines), which, appearing at specific wavelengths, represent the spectroscopic signature of the different chemical elements present in the **Sun's atmosphere**. In general, spectral analysis makes it possible to determine the chemical composition of a body by identifying the emission and/or absorption lines present in its spectrum.

In addition, spectral analysis provides information on elemental abundances, temperatures and densities, and even motion patterns (thanks to the Doppler effect, which causes a shift of the lines with respect to their rest wavelength when the emitting body moves with respect to the observer).

Like chemical elements, molecules also have a characteristic spectroscopic signature. Molecular spectroscopy is the study of the energy changes that molecules undergo due to their interaction with matter or radiation. This interaction can alter the electronic configuration of molecules, their vibrational state and also their rotation. Each of these changes involves energies of different orders of magnitude, that produce spectral lines in different regions

pectroscópica característica. La espectroscopía molecular es el estudio de los cambios de energía que las moléculas experimentan debido a su interacción con materia o radiación. Esta interacción puede alterar la configuración electrónica de las moléculas, su estado vibracional y también su rotación. Cada uno de estos cambios implica energías de diferente orden de magnitud, y por tanto se manifiestan como líneas espectrales en diversas regiones del espectro electromagnético: las transiciones electrónicas, más energéticas, en el ultravioleta y el óptico; las transiciones vibracionales, en el infrarrojo; y las transiciones rotacionales, menos energéticas, en el infrarrojo lejano y bandas (sub) milimétricas.

A día de hoy se han descubierto cerca de 200 moléculas en el espacio, desde especies relativamente simples como el hidrógeno molecular (H_2), el monóxido de carbono (CO) o el **agua** (H_2O), hasta compuestos orgánicos mucho más complejos. Esta gran riqueza molecular se encuentra distribuida en nubes moleculares, en envolturas circunestelares en torno a **estrellas** evolucionadas, en discos protoplanetarios, e incluso en las atmósferas de los **exoplanetas** (ver **Discos circunestelares**). La espectroscopía molecular es pues una herramienta fundamental para la Astrobiología, permitiendo estudiar la formación y distribución de moléculas prebióticas claves para el desarrollo de la **vida** en estos lugares.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

of the electromagnetic spectrum: electronic transitions, more energetic, in the ultraviolet and optical; vibrational transitions, in the infrared; and rotational transitions, less energetic, in the far infrared and (sub) millimeter bands.

To date, nearly 200 molecules have been discovered in space, ranging from relatively simple species such as molecular hydrogen (H_2), carbon monoxide (CO) or **water** (H_2O), to much more complex

organic compounds. This great molecular diversity is distributed in molecular clouds, in circumstellar envelopes around evolved **stars**, in protoplanetary disks, and even in the atmospheres of **exoplanets** (see **Circumstellar discs**). Molecular spectroscopy is thus a fundamental tool for Astrobiology, making it possible to study the formation and distribution of prebiotic molecules that are key to the development of **life** in these places.

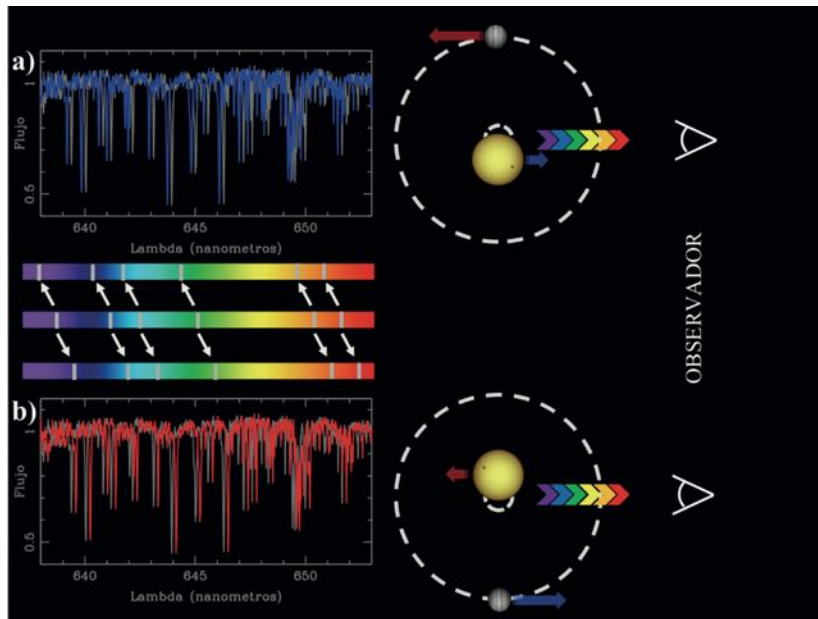


Figura 22:

El efecto Doppler.

The Doppler effect.

Las líneas espectrales, marcadas con bandas grises en los espectros centrales, aparecen desplazadas respecto a su posición determinada en reposo cuando el objeto que las emite se acerca o se aleja. En este caso, se muestra la detección de un planeta tipo Júpiter que orbita alrededor de una estrella de tipo solar, que se desplaza levemente alrededor del centro de masas común.

The spectral lines, marked with gray bands in the central spectra, appear displaced with respect to their position determined at rest when the emitting object approaches or moves away. In this case, the detection of a Jupiter-type planet orbiting a solar-type star is shown, which is shifted slightly around the common center of mass.

Crédito: D. Barrado

32. ESTRELLA

Una estrella es una esfera de gas (principalmente hidrógeno) que durante la mayor parte de su **vida** transmuta unos elementos químicos en otros a un ritmo estable, generando energía, y se encuentra en un estado de equilibrio (llamado equilibrio hidrostático) entre la gravedad, que tiende a comprimirla, y la presión del gas, que tiende a que se expanda.

Tomando como patrón la masa del **Sol** ($M_{\text{sol}}=2 \times 10^{30}$ kg), las estrellas menos masivas tienen aproximadamente $0,08 M_{\text{sol}}$ y las más masivas unas $120 M_{\text{sol}}$. En cuanto a la temperatura de sus capas exteriores (el disco en el caso del Sol, técnicamente denominado fotosfera) las estrellas más frías tienen temperaturas de ~ 2500 kelvin (K) mientras que las más calientes pueden llegar a $\sim 50\,000$ K, aunque algunas estrellas en estados de su vida muy avanzados pueden ser aún más

calientes: una de ellas es WR 102, muy evolucionada y luminosa, cuya temperatura se estima en $210\,000$ K. El Sol tiene una temperatura en su superficie (este término es un abuso de lenguaje usado de manera rutinaria en astronomía, ya que las estrellas no la tienen) de ~ 5780 K y en su núcleo se alcanzan los 15 millones de grados. El tamaño de las estrellas depende de su masa inicial y de su estado de evolución: por ejemplo, el Sol, una estrella enana amarilla que se encuentra ahora en un periodo estable de su vida, tiene un radio de $\sim 700\,000$ km (esa distancia es unas 109 veces el tamaño del radio de la **Tierra**), pero evolucionará hasta la fase de gigante roja cuando agote el hidrógeno de su núcleo, multiplicando su tamaño por un factor ~ 250 , es decir, su **atmósfera** se extenderá más allá de la distancia Sol-Tierra, engullendo la órbita de esta (ver **Evolución estelar**).

Las estrellas generan energía en sus regiones más internas mediante reacciones termonucleares de fusión. Esa energía alcanza la parte externa de la estrella por medio de distintos mecanismos y se emite al espacio en forma de **radiación** electromagnética (esto es, luz), neutrinos (partículas muy pequeñas sin carga), y viento estelar (protones, electrones y átomos de elementos más pesados). En un esquema muy simplificado, las estrellas quemán hidrógeno (H) produciendo helio (He) y energía en la fase más importante y estable de su evolución llamada la secuencia principal. Los núcleos atómicos de muchos de los elementos químicos que conocemos (O, C, S, P, Ni, Co, Fe, ver **Tabla periódica**), todos ellos fundamentales para la vida, se han creado en el interior de las estrellas a partir de la fusión de núcleos más simples. En esos procesos, llamados

STAR

A star is a sphere of gas—mainly hydrogen—that during most of its life transmutes some chemical elements into others at a stable rate, generating energy, and is in a state of equilibrium—called hydrostatic equilibrium—between gravity, which tends to compress it, and the pressure of the gas, which tends to expand it.

Taking as a standard the mass of the **Sun** ($M_{\text{Sun}} = 2 \times 10^{30}$ kg), the least massive stars have about $0.08 M_{\text{Sun}}$ and the most massive ones about $120 M_{\text{Sun}}$. As for the temperature of their outer layers—the disk in the case of the Sun, technically called photosphere—the coldest stars have temperatures of ~ 2500 kelvin (K) while the hottest ones can reach $\sim 50,000$ K, although some stars in very advanced stages of their life can be even hotter: one of them is WR 102, very evolved and luminous, whose temperature is estimated to be around

$210,000$ K. The Sun has a surface temperature—this term is an abuse of terminology routinely used in astronomy, since stars do not have a “surface”—of ~ 5780 K and its core reaches 15 million degrees. The size of stars depends on their initial mass and their state of evolution: for example, the Sun, a yellow dwarf star now in a stable period of its life, has a radius of $\sim 700,000$ km (that distance is about 109 times the size of **Earth’s** radius), but will evolve to the red giant phase when it exhausts the hydrogen in its core, multiplying its size by a factor ~ 250 , i.e., its **atmosphere** will extend beyond the Sun–Earth distance, engulfing the orbit of the latter (see **Stellar evolution**).

Stars generate energy in their innermost regions by thermonuclear fusion reactions. This energy reaches the outer part of the star by various mechanisms

and is emitted into space in the form of electromagnetic **radiation** (light), neutrinos (very small uncharged particles), and stellar wind (protons, electrons and atoms of heavier elements). In a very simplified scheme, stars burn hydrogen (H) producing helium (He) and energy in the most important and stable phase of their evolution called the main sequence. The atomic nuclei of many of the chemical elements we know (O, C, S, P, Ni, Co, Fe, see **Periodic table**), all of them fundamental for life, have been created inside stars from the fusion of simpler nuclei. In these processes, generically called nucleosynthesis, the formation of elements lighter than iron releases energy because the mass of the initial fusion products is greater than the mass of the final products; the difference is transformed into energy according to one of the most famous equations of Physics, $E=mc^2$.

genéricamente nucleosíntesis, la formación de los elementos más ligeros que el hierro libera energía ya que la masa de los productos iniciales de la fusión es mayor que la masa de los productos finales; la diferencia se transforma en energía de acuerdo a una de las ecuaciones más famosas de la Física, $E=mc^2$.

Una clasificación genérica de las estrellas, antes de que al final de su vida den lugar a objetos exóticos (enanas blancas, estrellas de neutrones, o agujeros negros), se hace en virtud de su temperatura y estado evolutivo, que también informa de la luminosidad intrínseca, de modo que un código sencillo de dos letras y un número (aunque con complicaciones si se incide en detalles más concretos, como

la **metalicidad** o la presencia de campos magnéticos) da una idea de esas dos propiedades. La temperatura está asociada al tipo espectral de la estrella: de más caliente a más fría, se les asignan tipos espectrales O, B, A, F, G, K, M y L (también existen los tipos T, Y para objetos más fríos, como las enanas marrones y los objetos de masa planetaria), divididos en subtipos. El otro indicador es la clase de luminosidad, etiquetada como V (enana), IV (subgigante), III (gigante), y II, I (supergigante) (ver **Diagrama H-R**). Como ejemplos, el Sol es una estrella G2 V, Arturo (α Bootis) es K1.5 III, Rigel (β Orionis) es B8 I, y Próxima Centauri, la estrella más cercana al **sistema solar**, a solo 4,2 años luz, orbitada al menos por dos planetas, es de tipo M5.5 V.

A generic classification of stars, before they give rise to exotic objects (white dwarfs, neutron stars, or black holes) at the end of their lives, is made according to their temperature and evolutionary state, which also informs on the intrinsic luminosity, so that a simple code of two letters and a number -although with complications if more specific details, such as **metallicity** or the presence of magnetic fields, are considered- gives us an idea of these two properties. The temperature is associated with the spectral type of the star: from the hottest to

the coldest, spectral types O, B, A, F, G, K, M and L are assigned (there are also T, Y types for cooler objects, such as brown dwarfs and planetary-mass objects), divided into subtypes. The other indicator is the luminosity class, labeled V (dwarf), IV (subgiant), III (giant), and II, I (supergiant) (see **H-R diagram**). As examples, the Sun is a G2 V star, Arthur (α Bootis) is K1.5 III, Rigel (β Orionis) is B8 I, and Proxima Centauri, the closest star to our **solar system**, only 4.2 light-years away, orbited by at least two planets, is of type M5.5 V.

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea], <<https://www.sea-astronomia.es/glosario/>>.

33. ESTRELLAS BINARIAS EN INTERACCIÓN

Se denomina estrella binaria, o sistema binario, a un sistema estelar compuesto por dos **estrellas** ligadas gravitacionalmente de modo que ambas orbitan en torno a un centro de masas común. A diferencia del **Sol**, una gran proporción de estrellas, más del 50 %, forman sistemas binarios o múltiples (de más de un par de objetos) que se forjaron simultáneamente en la misma nube parental y se han mantenido ligadas dinámicamente durante las diferentes etapas de la **evolución estelar**.

Las estrellas binarias pueden clasificarse siguiendo diferentes criterios, por ejemplo, según los métodos empleados para su detección pueden ser visuales, eclipsantes, astrométricas y espectroscópicas, pero también hay clasificaciones basadas en los tipos y estado de evolución de los objetos que componen la binaria, y en ese caso la diversidad es enorme.

En los sistemas binarios se denomina estrella primaria a la estrella que tiene mayor masa y secundaria a la compañera más ligera. La distancia entre las dos estrellas, o separación orbital, determina

la intensidad de la relación gravitatoria mutua. En sistemas binarios muy próximos, la presencia de una estrella compañera puede alterar, acelerando, frenando o incluso truncando, la evolución individual de la otra estrella. Cuando las estrellas del sistema están muy cerca se puede producir transferencia de material de una a otra. Este proceso puede ocurrir de diversas maneras y producir efectos muy variados dependiendo de las propiedades orbitales del sistema y de las masas y tamaños de las estrellas individuales y, en general, determina la evolución posterior del sistema.

En etapas de la evolución estelar tardía, como la fase de gigante, hipergigante o de nebulosa planetaria (final de las estrellas de masa como el Sol), la presencia de compañeras binarias tiene un papel determinante alterando drásticamente el movimiento, morfología y ritmo de transferencia de material de la estrella donante, por ejemplo, rompiendo su simetría esférica y acelerándolo a altas velocidades.

Existen sistemas de binarias próximas que terminan colapsando y evolucionando

como un todo, orbitando juntas dentro de una envoltura conjunta o incluso fundiéndose en un único objeto. Es común que durante los procesos de transferencia de masa en sistemas binarios se formen estructuras tipo disco, bien alrededor de la estrella que recibe la masa (disco de **acrecimiento** o de acreción) y/o alrededor del sistema binario (disco circumbinario). En algunos sistemas, cuando parte del material del disco de acrecimiento cae sobre la estrella receptora se pueden producir explosiones nucleares en la superficie estelar debido a las altas temperaturas y densidades alcanzadas por el gas tras el impacto y la acumulación continuada de material. Son los fenómenos conocidos como novae o ciertos tipos de supernovas. En estos y otros sistemas con procesos de acrecimiento similares, parte del material del disco se expulsa del sistema en forma de eyecciones altamente colimadas y rápidas, es decir, en forma de chorro o “jet”, a lo largo del eje de rotación del disco. Estos procesos contribuyen al enriquecimiento del medio interestelar con materiales más pesados (ver **Metalicidad**).

INTERACTING BINARY STARS

A binary star, or binary system, is a stellar system composed of two **stars** gravitationally bound so that both orbit around a common center of mass. Unlike the **Sun**, a large fraction of stars, more than 50%, form binary or multiple systems (of more than one pair of objects) that were formed simultaneously in the same parent cloud and have remained dynamically bound during the different stages of **stellar evolution**.

Binary stars can be classified according to different criteria, for example, according to the methods used for their detection they can be visual, eclipsing, astrometric and spectroscopic, but there are also classifications based on the types and state of evolution of the objects that compose the binary, and in that case the diversity is enormous.

In binary systems, the star with the greater mass is called the primary star and the lighter companion is called the secondary star. The distance between the two stars, or orbital separation,

determines the intensity of the mutual gravitational relationship. In very close binary systems, the presence of a companion star can alter, accelerating, slowing or even truncating, the individual evolution of the other star. When the stars in the system are very close, mass transfer from one to the other can occur. This process can occur in a variety of ways and produce widely varying effects depending on the orbital properties of the system and the masses and sizes of the individual stars and, in general, determines the subsequent evolution of the system.

In late stages of stellar evolution, such as the giant, hypergiant or planetary nebula phase (end of Sun-like stars), the presence of binary companions plays a determining role by drastically altering the motion, morphology and rate of material transfer of the donor star, for example, by breaking its spherical symmetry and accelerating it to high velocities.

There are systems of close binaries that end up collapsing and evolving as a whole, orbiting together within a common envelope or even merging into a single object. It is common for disk-like structures to form during mass transfer processes in binary systems, either around the mass-receiving star (**accretion disk**) and/or around the binary system (circumbinary disk). In some systems, when part of the material from the accretion disk falls on the receiving star, nuclear explosions can occur on the stellar surface due to the high temperatures and densities reached by the gas after the impact and the continued accumulation of material, phenomena known as novae or certain types of supernovae. In these and other systems with similar accretion processes, part of the disk material is ejected from the system in the form of highly collimated fast ejections (i.e. jet-like), along the disk axis. These processes contribute to the enrichment of the interstellar medium with heavier materials (see **Metallicity**).

34. ESTROMATOLITOS

Los estromatolitos son estructuras sedimentarias formadas por láminas superpuestas de carbonatos (mayoritariamente carbonato cálcico, CaCO_3) que emergen verticalmente capa tras capa, y microorganismos que provocan la precipitación y deposición de estos carbonatos a partir de los sedimentos de zonas acuosas poco profundas o de humedales.

La formación de los estromatolitos ocurre por medio de dos procesos que se conocen con el nombre de litificación y acreción, mediados por la presencia y actividad de microorganismos que se asocian entre sí formando biopelículas, como si fueran una red de **células**. Estas biopelículas colonizan los sedimentos de manera que a medida que proliferan excretan al exterior una sustancia mucilaginosa con propiedades adherentes formada por diferentes compuestos como polisacáridos y aminoácidos, entre otros, que se denominan sustancias

poliméricas extracelulares (EPS, por sus siglas en inglés). Los microorganismos embebidos en estas EPS, que están formando las biopelículas sobre los sedimentos, provocan la precipitación de carbonatos, quedando estos atrapados en la red mucilaginosa y depositándose, sobre los que también pueden establecerse nuevas biopelículas. Así, los sedimentos se van compactando unos encima de otros a lo largo del tiempo a medida que se repite este proceso, hasta transformarse en rocas sedimentarias formadas por láminas de materia orgánica y carbonatos que acabarán fosilizando. Esta materia orgánica es típicamente bacteriana, y principalmente compuesta por cianobacterias, en el caso de los estromatolitos antiguos que se encuentran fosilizados, pero puede componerse también de algas, hongos, crustáceos, insectos, esporas o polen, en los estromatolitos que hoy en día están activos. La **biodiversidad** que poseen

los estromatolitos, no está limitada a las **bacterias**, sino que, también, abarca a los reinos de las **arqueas** y **eucariotas** (ver **Eukaria**) y en cada grupo de estromatolitos dependerá de las condiciones ambientales (pH, salinidad, temperatura, **radiación**, etc.) e hidrológicas del ambiente en el que se encuentren.

Se pueden clasificar atendiendo a su escala de observación en función de su microestructura (minerales que lo forman), mesoestructura (tipo de laminación interna) o macroestructura (morfología). Dentro de esta última los estromatolitos presentan gran variedad morfológica: columnares, domales, hemisféricos, alveolados, estratiformes y, a veces, combinando varias de estas formas. Pueden aparecer en parches o en áreas extensas, y las aguas en las que se forman pueden ser salinas o dulces.

Como formaciones fosilizadas, se han podido datar y llegar a saber que de la

STROMATOLITES

Stromatolites are sedimentary structures formed by overlying sheets of carbonates (mostly calcium carbonate, CaCO_3) that emerge vertically layer after layer, and microorganisms that cause the precipitation and deposition of these carbonates from shallow aqueous or wetland sediments.

The formation of stromatolites occurs through two processes known as lithification and accretion, mediated by the presence and activity of microorganisms that associate with each other to form biofilms, like a network of **cells**. These biofilms colonize the sediments so that as they proliferate they excrete a mucilaginous substance with adherent properties formed by different compounds such as polysaccharides and amino acids, among others, which are called extracellular polymeric substances (EPS). The microorganisms embedded in these EPS, which are forming the biofilms on the sediments, cause the precipitation of carbonates, which are trapped in the mucilaginous

network and deposited, on which new biofilms can also be established. Thus, the sediments become compacted on top of each other over time as this process is repeated, until they become sedimentary rocks formed by sheets of organic matter and carbonates that will eventually fossilize. This organic matter is typically bacterial, and mainly composed of cyanobacteria, in the case of ancient stromatolites that are fossilized, but can also be composed of algae, fungi, crustaceans, insects, spores or pollen, in stromatolites that are active today. The **biodiversity** of stromatolites is not limited to **bacteria**, but also includes the **archaeal** and **eukaryotic** kingdoms (see **Eukaria**), and each group of stromatolites will depend on the environmental (pH, salinity, temperature, **radiation**, etc.) and hydrological conditions of the environment in which they are found.

They can be classified according to their scale of observation based on their mi-

crostructure (minerals that form them), mesostructure (type of internal lamination) or macrostructure (morphology). Within the latter, stromatolites present a great morphological variety: columnar, domal, hemispherical, honeycombed, stratiform and, sometimes, combining several of these forms. They can occur in patches or in large areas, and the waters in which they form can be saline or fresh.

As fossilized formations, they have been dated and have been known to appear in all geological eras, being the oldest known evidence of **life**. Specifically, the oldest fossil stromatolites are located in Australia, in the Warrawoona region (Pilbara) and are estimated to be between 3500 and 3700 million years old. This is a very important milestone in the field of Astrobiology. Thus, these Australian stromatolites represent the most important record of early microbial life. These microorganisms, mainly cyanobacteria, which are photosynthetic

aparecen en todas las eras geológicas, siendo la evidencia de vida más antigua que se conoce. Concretamente los estromatolitos fósiles más antiguos se localizan en Australia, en la región de Warrawoona (Pilbara) y se estima que tienen entre 3500 y 3700 millones de años. Este es un hito muy importante en el campo de la Astrobiología. Así, estos estromatolitos australianos suponen el registro de vida microbiana temprana más importante. Se cree que estos microorganismos, principalmente cianobacterias, que son organismos fotosintéticos, son los responsables de los inicios de oxigenación biológica de la atmósfera de nuestro planeta, en peque-

ñas zonas localizadas (ver término **Atmósferas reductoras y oxidantes**).

Su amplia distribución por todo el planeta se vio reducida hace unos 600 millones de años (final del Proterozoico). Actualmente permanecen de forma residual y los estromatolitos que se denominan vivos o actuales, que están en formación, se pueden encontrar en zonas como: Shark Bay y Thetis Lake (Australia), en las fuentes hidrotermales del Parque Natural de Yellowstone (Estados Unidos), Lagoa Salgada (Brasil), Salar de Llamará (Chile), Laguna Socompa (Argentina) o Solar Lake (Israel).

organisms, are believed to be responsible for the beginnings of biological oxygenation of the atmosphere of our planet, in small localized areas (see term **Reducing and Oxidizing Atmospheres**).

Their wide distribution throughout the planet was reduced about 600 million years ago (end of the Proterozoic). At present they remain in residual form and the so-called living or present-day stromatolites, which are in formation, can be found in areas such as: Shark Bay and Thetis Lake (Australia), in the hydrothermal springs of Yellowstone Natural Park (USA), Lagoa Salgada (Brazil), Salar de Llamará (Chile), Laguna Socompa (Argentina) or Solar Lake (Israel).

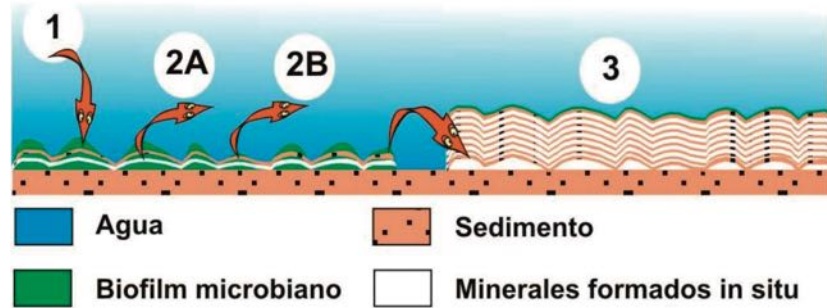


Figura 23:

Mecanismos de formación de un estromatolito.

Mechanisms of stromatolite formation.

Los procesos metabólicos de la biopelícula (1) implican reacciones químicas que provocan la precipitación de fases minerales (2) de modo que los propios microorganismos y las sustancias producidas pueden atrapar y fijar el sedimento. Si esto ocurre repetidas veces, en capas, se produce la acreción y litificación del estromatolito (3).

The metabolic processes of the biofilm (1) involve chemical reactions that cause precipitation of mineral phases (2) so that microorganisms themselves and the substances produced can trap and fix the sediment. If this occurs multiple times, in layers, accretion and lithification of the stromatolite results (3).

Créditos: Rodríguez-Martínez, Marta (Rodríguez Martínez) y Menéndez, Silvia y Moreno-Eiris, Elena y Calonge, Amelia y Perejón, Antonio y Reitner, Joachim (2010) Estromatolitos: las rocas construidas por microorganismos. *Reduca. Geología*, 2 (5). pp. 1-25.

35. EUKARYA

Eukarya, o eukaryota, es uno de los tres dominios del sistema de clasificación biológica introducido por Carl Woese en 1990, siendo los otros dos denominados **Archaea** y **Bacteria**. Este dominio está compuesto por los eucariotas u organismos cuyas **células** contienen un verdadero núcleo, claramente definido por una membrana que lo rodea y en el que se encuentran los cromosomas que contienen el material genético. La evolución de los eucariotas es bastante singular porque es sustancialmente no darwiniana. Mientras que la evolución darwiniana se ocupa en gran medida de los genes beneficiosos que surgen por **mutación** y que luego se extienden a través del éxito reproductivo diferencial (es decir, algunas de las variaciones hereditarias tornan a sus portadores más eficaces en la competencia por sobrevivir y estos tienden a transmitir esas características

a la próxima generación en un grado mayor que otros miembros de la misma especie, ver **Evolución biológica**), la historia de los eucariotas es una historia de flujo genético horizontal, es decir, de intercambio de genes entre especies y de organismos distintos que se fusionan formando organismos completamente nuevos. Estos organismos contienen una serie de estructuras que los distinguen de los procariotas (arqueas y bacterias), sobre todo el núcleo y una serie de orgánulos (retículo endoplásmico, cuerpos de Golgi, peroxisomas, mitocondrias, cloroplastos, etc.). También poseen estructuras citoesqueléticas, el soporte interno de las células formado por **proteínas** organizadas en microtúbulos y microfilamentos, ninguno de los cuales se encuentra en las procariotas. Organizan su **ADN** en torno a las histonas, proteínas que actúan como carretes y lo

empaquetan en cromosomas. Algunos eucariotas también participan en alguna forma de reproducción sexual, aunque muchos conservan la capacidad de reproducirse asexualmente.

El momento de la aparición de los primeros eucariotas es todavía un debate abierto. Las primeras pruebas de la existencia de eucariotas sitúan su origen hace unos 2300-1600 millones de años. Este rango se deriva principalmente de los análisis filogenéticos (ver **Filogenia**), de relaciones entre especies. Los fósiles de algas multicelulares se han datado en 1200 millones de años, lo que proporciona un límite inferior indiscutible, mientras que los fósiles de organismos unicelulares parecidos a las algas se surgen en torno a los 2200 millones de años, aunque se sigue discutiendo sobre si estos son eucariotas o son simplemen-

EUKARYA

Eukarya, or eukaryota, is one of the three domains of the biological classification system introduced by Carl Woese in 1990, the other two being the domains **Archaea** and **Bacteria**. This domain is composed of eukaryotes, or organisms whose **cells** contain a true nucleus, clearly defined by a membrane surrounding it and in which the chromosomes containing the genetic material are located. The evolution of eukaryotes is quite unique because it is substantially non-Darwinian. Whereas Darwinian evolution is largely concerned with beneficial genes that arise by **mutation** and then spread through differential reproductive success (i.e., some of the heritable variations make their carriers more effective in the competition for survival and they tend to pass those characteristics on to the next generation to a greater degree than other members of the same species, see

Biological evolution), the history of eukaryotes is a history of horizontal gene flow, i.e. of gene exchange between species and of distinct organisms merging to form entirely new organisms. These organisms contain a number of structures that distinguish them from prokaryotes (archaea and bacteria), especially the nucleus and a number of organelles (endoplasmic reticulum, Golgi bodies, peroxisomes, mitochondria, chloroplasts, etc.). They also possess cytoskeletal structures, the internal support of cells formed by **proteins** organized into microtubules and microfilaments, none of which are found in prokaryotes. They organize their **DNA** around histones, proteins that act as reels, and package it into chromosomes. Some eukaryotes also engage in some form of sexual reproduction, although many retain the ability to reproduce asexually.

The timing of the emergence of the first eukaryotes is still an open debate. The earliest evidence for the existence of eukaryotes places their origin at about 2300-1600 million years ago. This range is derived mainly from phylogenetic analyses (see **Phylogeny**) of relationships between species. Fossils of multicellular algae have been dated at 1200 million years, providing an undisputed lower limit, while fossils of unicellular algae-like organisms arise at around 2200 million years, although debate continues as to whether these are eukaryotes or are merely similar in appearance. Most estimates place the oldest eukaryotes around the time of the first global glaciation, approximately 2.3 billion years ago. It is believed that the increase in the number of photosynthetic prokaryotes led to an increase in atmospheric oxygen, causing

te similares en apariencia. La mayoría de los cálculos sitúan a los eucariotas más antiguos cerca de la primera glaciación global, hace aproximadamente 2300 millones de años. Se cree que el aumento del número de procariontes fotosintéticos (que obtienen su energía por captación de luz) condujo a un incremento del oxígeno atmosférico, que provocó a su vez un enfriamiento global. Este aumento del oxígeno diezmoó las poblaciones de procariontes anaeróbicos (que no necesitan oxígeno para vivir). Otra hipótesis es que los eucariotas ya existían en baja abundancia antes del aumento del oxígeno, mientras que otros autores creen que se originaron poco después. En lo que sí se está de acuerdo es en que el aumento del oxígeno es probablemente el responsable del incremento de su abundancia y del surgimiento de la multicelularidad.

Los eucariotas son quiméricos ya que su ADN es la fusión de más de un genoma. Los análisis filogenéticos indican que mientras algunos genes eucariotas parecen derivar más recientemente de las arqueas, otros lo harían de las bacterias, sugiriendo la existencia de procesos de transferencia genética horizontal entre organismos. Parece ser que los genes que intervienen en el mantenimiento y la manipulación del código genético son los que se adquirieron más recientemente y tienen su origen en las arqueas, mientras que los genes que intervienen en los procesos metabólicos son más similares a los de las bacterias. Así, se cree que al menos dos organismos son responsables de las principales contribuciones al genoma eucariota.

global cooling. This increase in oxygen decimated populations of anaerobic prokaryotes. Another hypothesis is that eukaryotes already existed in low abundance before the increase in oxygen, while other authors believe that they originated shortly after. What is agreed upon is that the increase in oxygen is probably responsible for the increase in their abundance and the emergence of multicellularity.

Eukaryotes are chiral, since their DNA is the fusion of more than one genome. Phylogenetic analyses indicate that while

some eukaryotic genes seem to derive more recently from archaea, others would derive from bacteria, suggesting the existence of horizontal gene transfer processes between organisms. Genes involved in the maintenance and manipulation of the genetic code seem to be the most recently acquired and with their origin in archaea, while genes involved in metabolic processes are more similar to those of bacteria. Thus, it appears that at least two organisms are responsible for the main contributions to the eukaryotic genome.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sícomoro.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

MARGULIS, L., SCHWARTZ, C. (1987). *Cinco reinos*. Editorial Labor, S. A. Barcelona.

36. EVOLUCIÓN BIOLÓGICA

La evolución consiste en el cambio o la transformación gradual de una entidad o propiedad. La evolución biológica corresponde a la transformación gradual de la **vida**, algo que ha sucedido desde su origen.

La causa primera de la evolución reside en las modificaciones heredables que surgen en los organismos, cuya consecuencia más inmediata es que las poblaciones presentan cierto grado de variabilidad en los individuos que las componen. Esta diversidad es el sustrato sobre el que actúa la selección natural, un proceso que favorece que los organismos que producen más descendientes en un ambiente concreto incrementen su representación, debido a su mejor capacidad para competir por los recursos

disponibles. La competición puede ocurrir entre individuos de la misma especie o de especies distintas. En el último caso, el proceso puede dar lugar a extinciones, algo que ha sido especialmente notable en momentos de la historia en que los cambios ambientales han sido de gran magnitud. El proceso contrario, la creación de nuevas especies, suele requerir que un subconjunto de una población se reproduzca durante cierto número de generaciones en un ambiente en el que operan presiones selectivas distintas de las que actúan sobre el resto.

La teoría de la evolución fue magistralmente expuesta por Charles Darwin en su obra *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, publicada en 1859. Sin embargo, la idea de que las especies,

al igual que el mundo físico, no eran fijas e inmutables era algo que ya estaba muy asentado entre los pensadores de la época (por ejemplo, el español Félix de Azara a comienzos del s. XIX, de una manera vaga) y aún mucho antes (el filósofo al-Jahiz, s. IX). La genialidad de Darwin fue reunir las pruebas zoológicas, botánicas, geológicas y paleontológicas (muchas de ellas recogidas por él mismo en sus viajes) que mostraban ese cambio y proponer un mecanismo, la selección natural antes mencionada, que lo hiciera posible. Las ideas de Thomas Malthus, quien propugnaba que el crecimiento más rápido de las poblaciones frente al de los recursos impone un límite al número de individuos que pueden sobrevivir, fueron una gran fuente de inspiración en la obra de Darwin.

BIOLOGICAL EVOLUTION

Evolution is the gradual change or transformation of an entity or property. Biological evolution corresponds to the gradual transformation of **life**, something that has been happening since its origin.

The primary cause of evolution lies in the heritable modifications that arise in organisms, the most immediate consequence of which is that populations present a certain degree of variability in the individuals that compose them. This diversity is the substrate on which natural selection acts, favoring that organisms that produce more offspring in a particular environment increase their representation, due to their better ability to compete for available resources. Competition can occur between individuals of the same species or of different

species. In the latter case, the process can lead to extinctions, something that has been especially notable at times in history when environmental changes have been of great magnitude. The opposite process, the creation of new species, usually requires that a subset of a population reproduce for a number of generations in an environment in which selective pressures differ from those acting on the rest of individuals.

The theory of evolution was masterfully exposed by Charles Darwin in his book *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, published in 1859. However, the idea that species, like the physical world, were not fixed and immutable was something that was already well established among the thinkers of the time

(for example, the Spanish Félix de Azara at the beginning of the 19th century, in a vague way) and even much earlier (the philosopher al-Jahiz, 9th century). Darwin's genius was to gather the zoological, botanical, geological and paleontological evidence (much of it collected by himself in his travels) that showed this change and to propose a mechanism, the aforementioned natural selection, that would make it possible. The ideas of Thomas Malthus, who advocated that the faster growth of populations than resources imposes a limit on the number of individuals that can survive, were a great source of inspiration in Darwin's work.

According to Darwin, populations evolve due to the accumulation of small changes, but he did not know the ori-

Según Darwin las poblaciones evolucionan debido a la acumulación de cambios de pequeño tamaño, pero el origen de la variación heredable era desconocido en su época. Su intuición le llevó a afirmar que esta se generaba por azar, independientemente de su efecto. Cuando se descubrió que el **ADN** era el material hereditario, quedó claro que los cambios en esa molécula eran los responsables de las diferencias observadas entre los distintos individuos de las poblaciones. Actualmente se sabe que algunos de esos cambios implican grandes eventos de transferencia de material genético de unas especies a otras, normalmente mediados por **virus** o microorganismos. Aproximadamente el 8 % del ADN humano es de origen viral y está implicado en importantes funciones, lo que nos demuestra la relevancia de ese intercambio en la historia de la vida.

Además de la selección natural, la deriva génica es otra importante fuerza que contribuye a moldear la evolución. Esta consiste en que, por diferentes circunstancias no exentas de azar, algunos individuos tienen más éxito reproductivo que otros, por lo que tienen más probabilidad de transmitir sus genes a su descendencia.

Por último, otro hecho que ha contribuido enormemente a algunas grandes transiciones evolutivas (entre ellas, la reunión de replicadores en compartimentos, el origen de la **célula** eucariótica -ver **Eukarya**- o la formación de sociedades) es la cooperación. Como conclusión, puede afirmarse que la evolución es una mezcla compleja de azar y determinismo, competición y cooperación, así como de gradualismo y bruscas transformaciones.

gin of heritable variation. His intuition led him to affirm that it was generated by chance, independently of its effect. When it was discovered that DNA was the hereditary material, it became clear that changes in this molecule were responsible for the differences observed between individuals in populations. It is now known that some of these changes involve large events of transfer of genetic material from one species to another, usually mediated by **viruses** or microorganisms. Approximately 8% of human DNA is of viral origin and is involved in important functions, demonstrating the relevance of this exchange in the history of life.

In addition to natural selection, genetic drift is another important force that

contributes to shaping evolution. This consists in the fact that, due to different circumstances that are not free of chance, some individuals reproduce more successfully than others, and are therefore more likely to transmit their genes to their offspring.

Finally, another fact that has contributed greatly to some major evolutionary transitions (including the assembly of replicators into compartments, the origin of the eukaryotic **cell** -see **Eukarya**- or the formation of societies) is cooperation. In conclusion, it can be stated that evolution is a complex mixture of chance and determinism, competition and cooperation, as well as gradualism and abrupt transformations.

Lecturas adicionales /Further reading

— (2022). “Darwin. Silenciando supersticiones”. *Muy Interesante* (Edición coleccionista).

LÁZARO, E., (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro (ISBN: 978484651441), 2019.

37. EVOLUCIÓN ESTELAR

Es el proceso de cambio que experimentan las **estrellas** desde el momento en que se forman, a partir de la contracción debido a la gravedad (colapso gravitatorio) de densas nubes de gas y **polvo** existentes en el medio interestelar, hasta que las fuentes de energía existentes en su interior se agotan y su luz se extingue (este último proceso se conoce como muerte estelar).

Las estrellas obtienen energía a partir de reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en su interior, resultando en la formación progresiva de elementos químicos más pesados que el hidrógeno (ver término **Tabla periódica**) y la producción de grandes cantidades de energía. La presión térmica resultante de las reacciones nucleares actúa compensando la fuerza gravitatoria debida a la propia masa estelar que, en ausencia de las mencionadas reacciones, llevaría a la estrella a contraerse gradualmente y colapsar.

La secuencia de cambios que experimentan las estrellas a lo largo de su existencia puede, por tanto, entenderse

como una competición entre dos fuerzas: la gravitatoria y la presión térmica. A lo largo de sus vidas, las estrellas deben adaptarse a los cambios de temperatura, densidad y composición interna que se producen a medida que el combustible nuclear se va agotando en su interior. La evolución de las estrellas depende principalmente de su masa, aunque también afectan otros factores tanto intrínsecos, como su **metalicidad** (en este contexto, la fracción de elementos distintos de los más sencillos, el hidrógeno y el helio) y velocidad de rotación, como extrínsecos, como la presencia de una o más estrellas compañeras (ver **Metalicidad** y **Diagrama H-R**).

La evolución estelar tiene lugar en escalas temporales que van desde varios millones a centenares de millones de años dependiendo de la masa estelar. La fase de la evolución estelar más larga es la llamada secuencia principal, en la que las estrellas pasan aproximadamente el 90 % de sus vidas quemando hidrógeno mediante fusión nuclear para producir helio. La fase llamada de presecuencia principal comienza con el colapso gra-

vitatorio de grandes nubes moleculares y termina cuando la condensación protoestelar (la estrella en sus fases más tempranas) alcanza las condiciones de densidad y temperatura necesarias para iniciar la combustión del hidrógeno (ver **Acrecimiento**).

La postsecuencia principal se inicia con el agotamiento del hidrógeno en el núcleo, después de lo cual las estrellas experimentan una serie de cambios adaptativos y pasan por varias etapas en las que se van quemando progresivamente elementos más y más pesados. Algunas de estas últimas etapas incluyen las fases de gigante, supergigante, hipergigante, de Wolf-Rayet o de variable luminosa azul, caracterizadas por la expulsión del material procesado en el interior estelar al medio interestelar. Este material se observa en forma de nebulosa planetaria, supernova, hipernova, etc., alrededor de un resto o remanente estelar que puede ser una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro. El material generado de esta manera enriquece el medio interestelar y a las sucesivas generaciones de estrellas.

STELLAR EVOLUTION

It is the process of change that **stars** undergo from the moment they are formed, from the contraction due to the gravity (gravitational collapse) of dense clouds of gas and **dust** existing in the interstellar medium, until the existing sources of energy in their interior are exhausted and their light is extinguished (this last process is known as stellar death).

Stars obtain energy from nuclear fusion reactions that take place in their interiors resulting in the progressive formation of chemical elements heavier than hydrogen (see term **Periodic table**) and the production of large amounts of energy. The thermal pressure resulting from the nuclear reactions acts to compensate for the gravitational force due to the stellar mass itself which, in the absence of the aforementioned reactions, would lead the star to gradually contract and collapse.

The sequence of changes that stars undergo during their existence can therefore be understood as a competition between two forces: gravitational and thermal pressure. Throughout their lives, stars must adapt to the changes in temperature, density and internal

composition that occur as nuclear fuel is depleted within them. The evolution of stars depends mainly on their mass, although other factors, both intrinsic, such as their **metallicity** (in this context, the fraction of elements other than the simplest, hydrogen and helium) and rotational velocity, and extrinsic, such as the presence of one or more companion stars, also have an impact. (See **Metallicity** and **H-R Diagram**).

Stellar evolution takes place on time scales ranging from several million to hundreds of millions of years depending on the stellar mass. The longest phase of stellar evolution is the so-called main sequence, in which stars spend about 90% of their lives burning hydrogen by nuclear fusion to produce helium. The so-called pre-main-sequence phase begins with the gravitational collapse of large molecular clouds and ends when the protostellar condensation (the star in its earliest phases) reaches the density and temperature conditions necessary to initiate hydrogen burning (see term **Accretion**).

The main post-sequence starts with the depletion of hydrogen in the core,

after which the stars undergo a series of adaptive changes and go through several stages in which elements heavier than hydrogen are progressively burned. Some of these latter stages include the giant, supergiant, hypergiant, Wolf-Rayet or blue light variable phases, characterized by the ejection of the processed material in the stellar interior into the interstellar medium. This material is observed in the form of a planetary nebula, supernova, hypernova, etc., surrounding a stellar remnant, which may be a white dwarf, a neutron star or a black hole. The material generated in this way enriches the interstellar medium and successive generations of stars.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

38. EXOPLANETA / EXOPLANETAS, TIPOS:

SUPERTIERRA, MININEPTUNO, JÚPITER CALIENTE, PLANETA ROCOSO / [EXOTIERRA]

La definición oficial de la Unión Astronómica Internacional (UAI) establece que un planeta es un cuerpo celeste que: i) orbita alrededor del **Sol**; ii) posee suficiente masa como para que su propia gravedad domine las fuerzas presentes como cuerpo rígido, lo que implica una forma aproximadamente esférica determinada por el equilibrio hidrostático (ver término **Estrella**); iii) es el objeto claramente dominante en su vecindad, habiendo limpiado su órbita de cuerpos similares a él. Por tanto, nuestro sistema planetario contiene ocho planetas. Por su proximidad al Sol: Mercurio, Venus, la **Tierra, Marte**, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Etimológicamente, el término proviene del griego *πλανήτης*, *planētēs*, “errante, vagabundo”. La primera referencia en la literatura helena podría corresponder al tercer cuarto de siglo VII a. e. c., aunque Venus ya aparece en las tablillas cuneiformes mesopotámicas del siglo XVII a. e. c., con registros de sus posiciones cambiantes.

Esta nueva definición eliminó de la lista a Plutón, descubierto en 1930 y cuyas

características orbitales y propiedades físicas le sitúan en una nueva categoría, la de los planetas enanos. Un problema adicional surgió en los años 90 con el descubrimiento de los exoplanetas, que orbitan alrededor de otras estrellas, y de las enanas marrones.

La Unión Astronómica Internacional definió de manera provisional el concepto de exoplaneta en el año 2003. Así, los planetas fuera del **sistema solar** deben orbitar alrededor de una estrella o remanente de estrella (enana blanca o estrella de neutrones, ver término **Evolución estelar**) y tener una masa inferior a 14 masas de Júpiter. Debido a su reducida masa, no alcanzan temperaturas y densidades en sus interiores lo suficientemente altas como para fusionar deuterio, un isótopo del hidrógeno compuesto por un protón y un neutrón, o cualquier otro elemento químico (ver **Tabla periódica**). Por tanto, no producen energía a partir de este tipo de fuente (de las reacciones nucleares). Según la misma resolución de la UAI, los objetos subestelares, con masas superiores a los anterio-

res, pero que no fusionan hidrógeno, se deben denominar enanas marrones. Por otra parte, los objetos aislados de masa planetaria, con masa por debajo del límite de las 14 masas de Júpiter, se deben denominar sub-enanas marrones o cualquier otro nombre que sea apropiado, salvo planeta. Esta definición ha sido actualizada en 2018, según la cual, un exoplaneta debe: i) tener una masa inferior al límite para la fusión termonuclear del deuterio, un isótopo del hidrógeno (actualmente calculada en 13 masas de Júpiter para objetos de **metalicidad** solar); ii) orbitar alrededor de estrellas, enanas marrones o restos estelares; y iii) tener una relación de masas con el objeto central inferior a la denominada inestabilidad L4/L5 ($M/M_{\text{central}} < 2/(25 + \sqrt{621}) \approx 1/25$), independientemente del mecanismo de formación. En cualquier caso, la masa o el tamaño mínimo requerido para que un objeto celeste fuera del sistema solar sea considerado planeta debería ser el mismo que el utilizado para aquellos pertenecientes a él. El concepto de planeta está en constante revisión como consecuencia del emer-

EXOPLANET / EXOPLANETS, TYPES:

SUPER-EARTH, MININEPTUNE, WARM JUPITER, ROCKY PLANET / [EXOTERRA]

The official definition of the International Astronomical Union (IAU) states that a planet is a celestial body that: i) orbits the Sun; ii) possesses sufficient mass for its own gravity to dominate the forces present as a rigid body, which implies an approximately spherical shape determined by hydrostatic equilibrium (see term **Star**); iii) is the clearly dominant object in its neighborhood, having cleared its orbit of bodies similar to it. Therefore, our planetary system contains eight planets. By their proximity to the Sun: Mercury, Venus, **Earth**, **Mars**, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune.

Etymologically, the term comes from the Greek *πλανήτης*, *planētēs*, “wanderer, wandering”. The earliest reference in Hellenic literature may correspond to the third quarter of the 7th century b. c. e., although Venus already appears in Mesopotamian cuneiform tablets of the 17th century b. c. e., with records of its changing positions.

This new definition eliminated from the list Pluto, discovered in 1930 and whose orbital characteristics and physical prop-

erties place it in a new category, that of the dwarf planets. An additional problem arose in the 1990s with the discovery of exoplanets, which orbit other stars, and brown dwarfs.

The International Astronomical Union tentatively defined the concept of an exoplanet in 2003. Thus, planets outside the **solar system** must orbit a star or remnant of a star (white dwarf or neutron star - see the term **Stellar evolution**) and have a mass of less than 14 Jupiter masses. Because of their low mass, they do not reach temperatures and densities in their interiors high enough to fuse deuterium, an isotope of hydrogen composed of a proton and a neutron, or any other chemical element (see **Periodic table**). Therefore, they do not produce energy from this type of source (from nuclear reactions). According to the same IAU resolution, substellar objects, with masses greater than the above, but which do not fuse hydrogen, should be called brown dwarfs. On the other hand, isolated planetary-mass objects, with mass below the limit of Jupiter’s 14 mass-

es, should be called sub-brown dwarfs or any other name that is appropriate, except planet. This definition has been updated in 2018, according to which, an exoplanet must: i) have a mass less than the limit for thermonuclear fusion of deuterium, an isotope of hydrogen (currently calculated at 13 Jupiter masses for solar **metallicity** objects); ii) orbit stars, brown dwarfs or stellar remnants; and iii) have a mass ratio to the central object less than the so-called L4/L5 instability ($M/M_{\text{central}} < 2/(25 + \sqrt{621}) \approx 1/25$), regardless of the formation mechanism. In any case, the minimum mass or size required for a celestial object outside the solar system to be considered a planet should be the same as that used for those belonging to it. The concept of planet is under constant revision as a consequence of the emerging and progressive study of the planets of the Milky Way (see **Galaxy**).

Several thousand planets beyond the limits of our planetary system have now been identified. There is a great diversity in their physical properties (masses, radii, densities, temperatures, composi-

gente y progresivo estudio de los planetas de la Vía Láctea (ver **Galaxia**).

En la actualidad se han identificado varios miles de planetas más allá de los límites de nuestro sistema planetario. Existe una gran diversidad en sus propiedades físicas (masas, radios, densidades, temperaturas, composiciones), dinámicas (distancias a su estrella, excentricidad de la órbita) y en las configuraciones de los sistemas planetarios (número de planetas, ordenación por masas, inclinaciones relativas de las órbitas).

Dentro del sistema solar y teniendo en cuenta la composición, que también está relacionada con la masa total, existen tres categorías: gigantes de gas (Júpiter y Saturno), compuestos esencialmente por hidrógeno y helio, en diferentes estados; gigantes de **hielo** (Urano y Neptuno), en donde existe una fracción significativa de moléculas sencillas como el metano y el amoníaco, junto con elementos tales como oxígeno, carbono, nitrógeno y azufre; y terrestres (la Tierra, Venus, Marte y Mercurio), donde los silicatos, que incluyen silicio y oxígeno, y otros elementos pesados, dominan. Estos bloques aparecen, *grosso modo*, en los exoplanetas, aunque condicionados por otros factores.

En lo que respecta a las propiedades genéricas, en la actualidad se han clasificado en ocho grandes grupos (primordialmente por el tamaño pero también según su masa). Semejantes a Marte (la mitad que la Tierra), terrestres, supertierras (al menos un 20 % más grandes que la Tierra y con un límite superior que alcanza el doble de tamaño), subneptunianos (gigantes

de hielo hasta cuatro veces el tamaño de la Tierra), neptunianos (entre 4 y hasta 8-10 veces el tamaño de la Tierra, con masas en torno a 15 veces), subjovianos (similares a los anteriores, pero gaseosos y en los que domina el hidrógeno), jovianos y superjovianos (en general, de tamaño algo superior a Júpiter pero de masa considerablemente superior).

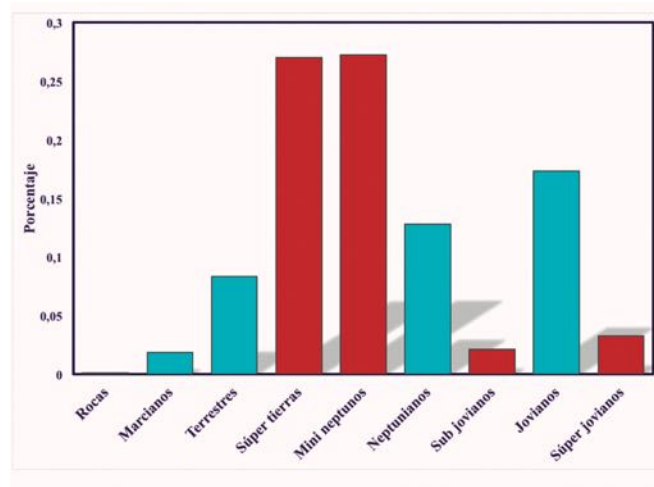


Figura 24: Familias de planetas según el tamaño.
Families of planets according to its size.

Actualmente se han identificado ocho familias, aunque en el sistema solar solo aparecen representadas cuatro de ellas (en azul en el diagrama).

At present, eight families have been identified, although only four of them are represented in the solar system (shown in blue in the diagram).

Crédito: D. Barrado

tions), dynamics (distances to their star, eccentricity of the orbit) and in the configurations of planetary systems (number of planets, arrangement by masses, relative inclinations of the orbits).

Within the solar system and taking into account the composition, which is also related to the total mass, there are three categories: gas giants (Jupiter and Saturn), composed essentially of hydrogen and helium, in different states; **ice** giants (Uranus and Neptune), where there is a signif-

icant fraction of simple molecules such as methane and ammonia, together with elements such as oxygen, carbon, nitrogen and sulfur; and terrestrials (Earth, Venus, Mars and Mercury), where silicates, which include silicon and oxygen, and other heavy elements, dominate. These building blocks appear, roughly speaking, on exoplanets, although conditioned by other factors.

In terms of generic properties, they are currently classified into eight major

groups (primarily by size but also by mass). Mars-like (half the size of Earth), terrestrial, super-Earths (at least 20% larger than Earth and with an upper limit up to twice the size), sub-Neptunians (ice giants up to four times the size of Earth), Neptunians (between 4 and up to 8-10 times the size of Earth, with masses around 15 times), sub-Jovians (similar to the above, but gaseous and dominated by hydrogen), Jovians and super-Jovians (generally slightly larger than Jupiter but considerably more massive).



Figura 25:

Recreación artística de un objeto de masa planetaria joven.

Artistic recreation of a young planetary mass object.

Se encuentra dentro de una nube de polvo y gas en donde se forman nuevas generaciones de estrellas.

It is located within a cloud of dust and gas where new generations of stars are formed.

Crédito: H. Bouy

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata. ISBN 978-84-1352-190-9.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

UNIÓN ASTRONÓMICA INTERNACIONAL, Commission F2 Exoplanets and the Solar System. 2018. Definición oficial del término exoplaneta.

https://www.iau.org/science/scientific_bodies/commissions/F2/info/documents/.

39. EXOPLANETAS: MÉTODOS DE DETECCIÓN

A fecha de publicación de este libro se han confirmado más de 5000 candidatas a planetas (ver término **Exoplaneta**) orbitando otras **estrellas** distintas al **Sol**. De entre ellos, solamente unas pocas docenas se han observado directamente. Para todos los demás se han utilizado métodos indirectos. Hay dos técnicas de detección principales: tránsito y velocidad radial. Solamente a ellas se les atribuye el descubrimiento del 95 % de los exoplanetas.

Con el método de tránsito se observan las variaciones periódicas en el brillo de la estrella cuando el planeta pasa por delante de ella y bloquea su luz. Si además se estudia la variación del tiempo de tránsito (al comparar diferentes eventos y las variaciones de su regularidad) es posible descubrir otros planetas o causas que perturben la órbita de la estrella. Si lo que se analiza son las minúsculas variaciones de la luz durante el tránsito cuando el planeta refleja la luz de su estrella, se está empleando el método de modulación orbital del brillo.

Con la técnica de velocidad radial se estudia, mediante el denominado efecto

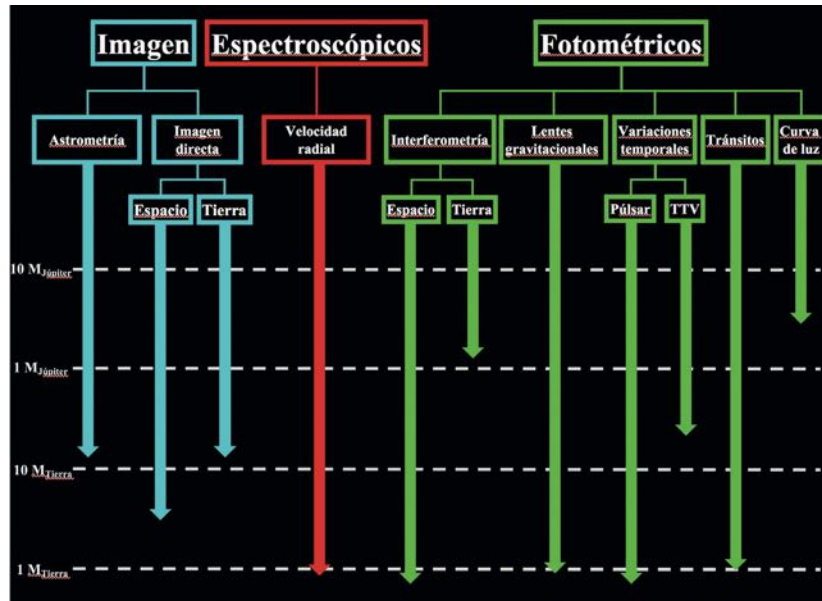


Figura 26: Métodos de detección de exoplanetas.

Exoplanet detection methods.

Las distintas técnicas están agrupadas por distintas familias. Cada una es efectiva en un rango distinto de masas. Basado en Perryman 2014, 2019.

The various techniques are grouped into different families. Each is effective in a different mass range. Based on Perryman 2014, 2019.

Crédito: D. Barrado

EXOPLANETS: DETECTION METHODS

As of the date of publication of this book, more than 5000 planet candidates have been confirmed orbiting **stars** other than the **Sun** (see term **Exoplanets**). Among them, only a few dozens have been observed directly. For all the others, indirect methods have been used. There are two main detection techniques: transit and radial velocity. They alone are credited with the discovery of 95% of exoplanets.

With the transit method, the periodic variations in the brightness of the star are observed when the planet passes in front of it and blocks its light. If we also study the variation of the transit time (by comparing different events and the variations of their regularity) it is possible to discover other planets or causes that disturb the orbit of the star. If what is being analyzed are the tiny variations of light during transit when the planet reflects the light from its star, the orbital brightness modulation method is being used.

With the radial velocity technique, the periodic wobbling of the star caused by the attraction of the orbiting planet is studied by means of the so-called Dop-

pler effect. The Doppler effect is known as the change in the frequency of a wave as a consequence of the relative motion between emitter and receiver. When a light-emitting object, such as a star or

a **galaxy**, approaches us, we see its light waves at a higher frequency than they were emitted: they are blueshifted. If it moves away, its light is seen to be redshifted. The radial velocity technique was the

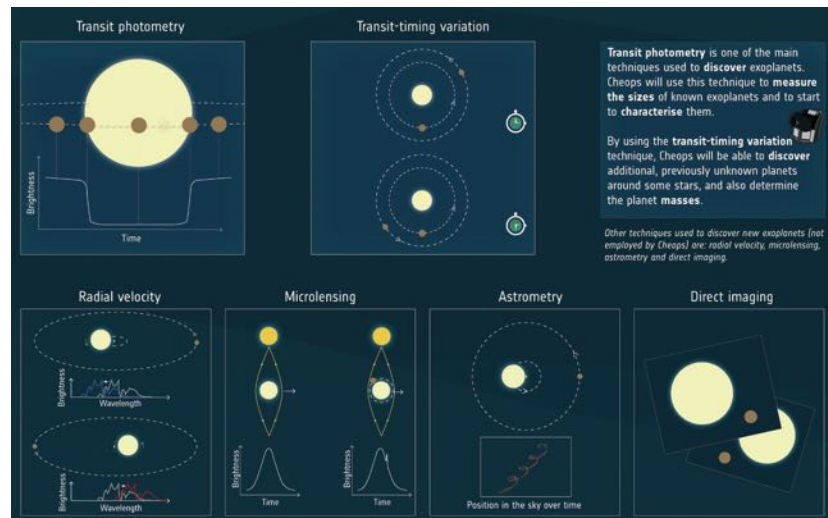


Figura 27: Técnicas de detección de exoplanetas.

Exoplanet detection techniques.

Crédito: European Space Agency.

Doppler, el bamboleo periódico de la estrella causado por la atracción del planeta que la orbita. Se conoce por efecto Doppler al cambio en la frecuencia de una onda como consecuencia del movimiento relativo entre emisor y receptor. Cuando un objeto que emite luz, como una estrella o una **galaxia**, se acerca a nosotros, vemos sus ondas de luz con mayor frecuencia de la que fueron emitidas: se ven desplazadas al azul. Si se aleja, se observa que su luz se desplaza al rojo. La técnica de velocidad radial fue el método empleado por Aleksander Wolszczan y Dale Frail en 1992 para detectar el primer planeta fuera del **sistema solar** (denominado PSR B1257+12 c), orbitando alrededor de un púlsar o estrella de neutrones, y por Michel Mayor y Didier

Queloz en 1995 para descubrir el primer exoplaneta alrededor una estrella de tipo solar, conocido como 51 Pegasi b.

Existen métodos más sofisticados, como la polarimetría, las variaciones elipsoidales o la microlente gravitatoria.

Este último se vale del efecto relativista predicho por Einstein mediante el cual el campo gravitatorio de la estrella y su planeta es capaz de es capaz de curvar y magnificar como una lupa la luz procedente de un objeto de fondo, haciendo que parezca más brillante.

Lecturas adicionales /Further reading

- BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata. ISBN 978-84-1352-190-9.
- GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.
- PERRYMAN, M. (2011, 2018). *The Exoplanet Handbook*, Cambridge University Press, segunda edición.
- SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

method used by Aleksander Wolszczan and Dale Frail in 1992 to detect the first planet outside the **solar system** (named PSR B1257+12 c), orbiting a pulsar or neutron star, and by Michel Mayor and Didier Queloz in 1995 to discover the first exoplanet around a solar-type star, known as 51 Pegasi b.

More sophisticated methods exist, such as polarimetry, ellipsoidal variations or gravitational microlensing. The latter makes use of the relativistic effect predicted by Einstein whereby the gravitational field of the star and its planet is able to bend and magnify the light coming from a background object like a magnifying glass.

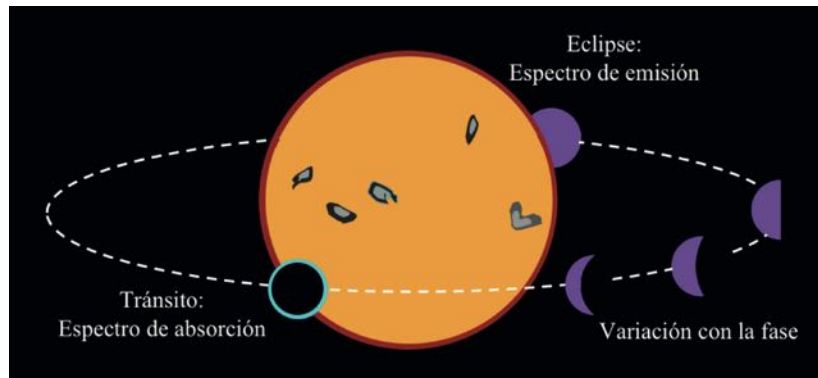


Figura 28:

Método del tránsito.

Transit method.

Las atmósferas exoplanetarias se pueden estudiar con observaciones realizadas durante los tránsitos del planeta por delante de la estrella. Otras configuraciones orbitales aportan información crucial sobre otras propiedades.

Exoplanetary atmospheres can be studied with observations made during transits of the planet in front of the star. Other phases provide crucial information about other properties.

Crédito: D. Barrado.

40. EXPLORACIÓN ESPACIAL: PREPARACIÓN PARA LA EXPLORACIÓN HUMANA

La exploración forma parte de nuestra idiosincrasia como especie. La exploración remota de otros mundos se inició en el siglo XVII con la invención de los telescopios, aunque la exploración física de objetos planetarios como la Luna solo ha sido posible desde finales del siglo XX, con la llegada a la Luna en 1969.

Los planetas rocosos del **sistema solar**, Mercurio, Venus y **Marte**, son los mejores candidatos. Sin embargo, los dos primeros poseen **atmósferas** que hacen que la **vida** tal y como se conoce sea prácticamente imposible. Altísima temperatura y una combina-

ción de gases tóxicos, con presiones en el caso de Venus 90 veces superior a la de la **Tierra**, lo convierten en un lugar inhóspito.

Marte presenta unas propiedades idóneas para la exploración humana. A partir de las primeras misiones de Estados Unidos (Mariner 9) y luego de Europa y de China e India, se ha podido caracterizar el planeta a través de satélites, sondas y róveres. Su superficie es, después de la de la Tierra, la mejor conocida y fotografiada, aunque sigue siendo necesario explorar el subsuelo y caracterizar *in situ* distintas localizaciones potencialmente

habitables, lo que podría requerir presencia de tripulaciones humanas. Sin embargo, desde un punto de vista fisiológico, la gravedad y la **radiación** son las mayores restricciones.

La exploración humana de Marte y, en general, de cualquier otro cuerpo celeste, presenta unos formidables desafíos tecnológicos, además de ser una actividad extraordinariamente peligrosa. El transporte y/o producción de oxígeno, alimentos, **agua**, energía y combustible para poder realizar el camino de vuelta a la Tierra supondrá resolver numerosos problemas técnicos, además de psicológicos.

SPACE EXPLORATION: PREPARING FOR HUMAN EXPLORATION

Exploration is part of our idiosyncrasy as a species. The remote exploration of other worlds began in the 17th century with the invention of telescopes, although the physical exploration of planetary objects such as the Moon has only been possible since the end of the 20th century, with the landing on the Moon in 1969.

The rocky planets of the **solar system**, Mercury, Venus and **Mars**, are the best candidates for human exploration. However, the first two possess **atmospheres** that make **life** as we know it practically impossible. Very high temperatures and a combination of toxic gases, with pressures in the case of Venus 90 times higher than on **Earth**, make it an inhospitable place.

Mars has ideal properties for human exploration. Since the first missions of the United States (Mariner 9) and then

of Europe, China and India, it has been possible to characterize the planet by means of satellites, probes and rovers. Its surface is, after that of the Earth, the best known and best photographed, although it is still necessary to explore the subsoil and characterize *in situ* various potentially habitable locations, which could require the presence of human crews. However, from a physiological point of view, gravity and **radiation** are the major constraints.

Human exploration of Mars and, in general, of any other celestial body, presents formidable technological challenges, in addition to being an extraordinarily dangerous activity. The transportation and/or production of oxygen, food, **water**, energy and fuel to make the return journey to Earth will involve solving numerous technical as well as psychological problems.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SPARROW, G. (2007). *Spaceflight: The Complete Story from Sputnik to Shuttle--and Beyond*. Dorling Kindersley Limited.

WILLIAMSON, J. (2015). *The Planets: A Definitive Visual Guide to Our Solar System*. Dorling Kindersley Limited.

41. EXTREMÓFILO / AMBIENTES EXTREMOS

La **vida** está influida por los parámetros físicos y químicos de un ambiente, estos es, la temperatura, pH, presión, etc. Los extremófilos son aquellos organismos que viven en ecosistemas donde al menos uno de estos parámetros está próximo a limitar la presencia de vida. Estos limitan el rango en el que, o bien el **agua** puede estar en forma líquida, o bien, presenta alguna característica química o soluto que impide el desarrollo de la misma. Mientras que algunos organismos se ven obligados a desarrollar formas de resistencia o utilizar mecanismos de supervivencia ante parámetros extremos (presencia de pH extremo o de metales pesados, por ejemplo), los organismos extremófilos necesitan estas condiciones para establecerse y desarrollarse. En función de las características fisicoquímicas que necesitan para su desarrollo, estos microorganismos pueden ser clasificados en acidófilos (necesidad de condiciones ácidas de bajo pH para su crecimiento), alcalófilos (requieren condiciones alcalinas para crecer), halófilos (necesitan cierta concentración de sal

en su medio de crecimiento), termófilos (requieren altas temperaturas), psicrófilos (necesitan bajas temperaturas para crecer) o barófilos (requieren altas presiones para su desarrollo).

Para que un microorganismo extremófilo crezca en un ambiente natural, este debe tener las condiciones extremas necesarias para el organismo. Así, en este caso, se habla de ambientes extremos. Un ambiente extremo es un hábitat caracterizado por unas condiciones ambientales adversas más allá de las condiciones óptimas para el desarrollo del ser humano, esto es por ejemplo pH extremo, temperaturas extremas, altas concentraciones salinas, alta **radiación** o alta presión entre otros.

No hace mucho tiempo se pensaba que la vida no podía ocurrir bajo condiciones extremas. En la década de los años 60 del siglo pasado, el profesor Thomas D. Brock aisló y describió el primer organismo extremófilo en el parque nacional de Yellowstone en Estados Unidos. Este

organismo, *Thermus aquaticus* era capaz de crecer a temperaturas superiores a 70 °C. Fue el comienzo de la extremofilia como ciencia, y de todas las aplicaciones industriales a las que dio lugar como, por ejemplo, el uso de enzimas aisladas a partir de estos microorganismos que permitieron el desarrollo de procesos industriales a alta temperatura, o de protocolos científicos usando enzimas o productos con actividades biológicas de interés, aislados de ambientes extremos.

En la actualidad se han descrito tantos ambientes extremos y microorganismos que los habitan en condiciones óptimas que el concepto de vida y sus límites ha sido ampliado hasta rangos fisicoquímicos antes impensables. Básicamente, en la actualidad se admite que la vida puede estar presente siempre que el agua se encuentre en estado líquido en un ambiente determinado, sin importar la temperatura, presión o pH que tenga ese medio líquido, con algunas excepciones si determinados compuestos caotrópicos están presentes en disolución.

EXTREMOPHILE / EXTREME ENVIRONMENTS

Life is influenced by the physical and chemical parameters of an environment, i.e. temperature, pH, pressure, among others. Extremophiles are those organisms that live in ecosystems where at least one of these parameters is close to limiting the presence of life. These parameters limit the range in which either **water** can be in liquid form or has some chemical or solute characteristic that prevents its development. While some organisms are forced to develop forms of resistance or use survival mechanisms in the presence of extreme parameters (e.g. extreme pH or heavy metals), extremophiles need these conditions to establish and develop. Depending on the physicochemical characteristics they need for their development, these micro-organisms can be classified as: acidophilic (need acidic conditions of low pH for growth), alkalophilic (need alkaline conditions of high pH for growth), halophilic (need a certain concentration of salt in their growth medium), thermophilic (need high temperatures), psychrophilic (need low temperatures for growth) or barophilic (need high pressures for growth).

For an extremophile microorganism to grow in a natural environment, it must

have the extreme conditions necessary for the organism. Thus, in this case, we speak of extreme environments. An extreme environment is a habitat characterized by adverse environmental conditions beyond the optimal conditions for human development, such as extreme pH, extreme temperatures, high salt concentrations, high **radiation** or high pressure, among others.

Not so long ago it was thought that life could not occur under extreme conditions. In the 1960s, Professor Thomas D. Brock isolated and described the first extremophile from Yellowstone National Park in the United States. This organism, *Thermus aquaticus*, was capable of growing at temperatures above 70 °C. This was the beginning of extremophilia as a science and all the industrial applications to which it gave rise, such as the use of enzymes isolated from these microorganisms that allowed the development of industrial processes at high temperatures, or scientific protocols using enzymes or products with biological activities of interest, isolated from extreme environments.

Nowadays, so many extreme environments and microorganisms that inhabit

them in optimal conditions have been described that the concept of life and its limits have been extended to previously unthinkable physicochemical ranges. Basically, it is now accepted that life can exist as long as water is in a liquid state in a given environment, regardless of the temperature, pressure or pH of that liquid medium, with some exceptions if certain chaotropic compounds (molecules that can break the network of hydrogen bonds among water molecules) are present in solution.

Lecturas adicionales / Further reading

AGUILERA, A., SOUZA-EGIPSY, V., GONZÁLEZ TORIL, E., (2020). *La vida en Río Tinto*. INTA.

AMILS, R. (2010). *Río Tinto... Viaje a Marte*. Alfar. (español/English).

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

42. FILOGENIA

Se denomina filogenia a la historia evolutiva de un organismo o grupo de organismos. No existe un conocimiento directo del camino seguido por la evolución microbiana (con la excepción de poblaciones experimentales de laboratorio) por ello, la filogenia se deduce de forma indirecta a partir de la secuencia de nucleótidos del genoma de los microorganismos (ver término **Gen**). Las premisas básicas son: i) los microorganismos (en realidad todos los organismos) están relacionadas evolutivamente por su herencia; ii) la herencia se transmite de generación en generación por a través del genoma; iii) dichos genomas van cambiando con el tiempo debido a mutaciones exitosas, es decir, evolucionan; iv) la secuencia de un genoma es un registro explícito, aunque algo difuso, de los ancestros de un microorganismo (o un organismo), es decir de su **evolución**, de modo que analizar las diferencias en la secuencia de **ADN** (DNA en inglés) de distintos microorganismos debe permitir reconstruir su historia evolutiva, es decir su filogenia.

Parte de la información contenida en el ADN se va a transcribir en forma de

ARN (RNA en inglés) o a traducir en forma de **proteínas**. Por tanto, para llevar a cabo estudios filogenéticos, no solo se utiliza la secuencia ADN (aunque es lo más común) también las secuencias de ARN o de proteínas.

Es muy importante en filogenia saber qué fragmentos de ADN se deben usar para llevar a cabo el estudio evolutivo. El uso del ADN completo, que contiene el registro total de la evolución del microorganismo, tiene varios inconvenientes. Por un lado, el análisis de secuencias de genomas completos implica un gran desarrollo computacional, que es aún mayor si se comparan varios genomas entre sí. Por otro lado, no todos los genes cambian al mismo ritmo y esta consonancia no tiene por qué ser constante. Hay genes en los que una **mutación** tiene más posibilidades de ser letal, con lo cual estos genes han cambiado poco a lo largo del tiempo (los cambios no sobrevivieron y, por lo tanto, no se detectan en ningún microorganismo). Otros genes en cambio, permiten muchos cambios en su secuencia, ya que no alterarían funcionalmente la proteína resultante. Estos genes, por lo tanto, tie-

nen una mayor velocidad evolutiva. Por último, existen procesos que rompen el ritmo evolutivo de los organismos acelerándolo o desacelerándolo. Uno de estos fenómenos es la transferencia horizontal de material genético. Estos factores hacen que, en vez de un análisis completo del genoma, a la hora de estudiar la filogenia de los microorganismos, se haga con unos pocos genes cuidadosamente seleccionados. A menudo, estos genes se han denominado relojes moleculares, puesto que marcan tiempo evolutivo transcurrido. Los relojes moleculares ideales deben cumplir varias características: i) los cambios nucleotídicos se acumulan en la secuencia de ADN de forma proporcional al tiempo transcurrido; ii) dichos cambios son por lo general neutrales y no afectan a la función génica; iii) los cambios suceden al azar.

Para estudiar la filogenia molecular de microorganismos son varios los genes que se utilizan. Todos ellos se acercan a las premisas del método de reloj molecular y por lo tanto pueden definirse como tales. El más utilizado de todos ellos es el gen que codifica para el 16S

PHYLOGENY

Phylogeny is the evolutionary history of an organism or group of organisms. We lack direct knowledge of the path followed by microbial evolution (with the exception of experimental laboratory populations); therefore, phylogeny is deduced indirectly from the nucleotide sequence of the genome of microorganisms (see term **Gen**). The premises on which we are based are: i) microorganisms (actually all organisms) are evolutionarily related by their inheritance; ii) inheritance is transmitted from generation to generation through the genome; iii) these genomes change over time due to successful mutations, i.e. they evolve; iv) the sequence of a genome is an explicit, although somewhat diffuse, record of the ancestors of a microorganism (or an organism), i.e. of its **evolution**, thus, analyzing the differences in the **DNA** sequence of different microorganisms should allow us to reconstruct their evolutionary history, i.e. their phylogeny.

Part of the information contained in DNA will be transcribed in the form of RNA or translated into **proteins**. Therefore, to carry out phylogenetic studies,

not only the DNA sequence is used (although this is the most common), but also the **RNA** or protein sequences.

It is very important in phylogeny to know which DNA fragments should be used to carry out the evolutionary study. The use of the complete DNA, which contains the total record of the evolution of the microorganism, has several drawbacks. On the one hand, the analysis of whole genome sequences implies a great computational development, which is even greater if we try to compare several genomes with each other. On the other hand, not all genes change at the same rate and this consonance need not be constant. There are genes in which a **mutation** is more likely to be lethal, so these genes have changed little over time (the changes did not survive and therefore we did not detect them in any microorganism). Other genes, on the other hand, allow many changes in their sequence, since they would not functionally alter the resulting protein. These genes, therefore, have a higher evolutionary speed. Finally, there are processes that break the evolutionary rhythm of organisms, ac-

celerating or decelerating it; one of these phenomena is the horizontal transfer of genetic material. These factors mean that instead of a complete genome analysis, when studying the phylogeny of microorganisms, we do so with a few carefully selected genes. These genes have often been called molecular clocks because they mark the evolutionary time that has elapsed. Ideal molecular clocks should have several characteristics: i) nucleotide changes accumulate in the DNA sequence proportional to the elapsed time; ii) these changes are usually neutral and do not affect gene function; iii) the changes occur randomly.

Several genes are used to study the molecular phylogeny of microorganisms. All of them are close to the premises of the molecular clock method and can therefore be defined as such. The most widely used of these is the gene coding for 16S rRNA in the case of prokaryotes and 18S rRNA in the case of eukaryotes (although in eukaryotes the interspace regions between the genes coding for the different rRNAs, the ITS, are also widely used). The 16/18S are part of the small

rRNA en el caso de procariotas y 18S rRNA en el caso de eucariotas (aunque en eucariotas son también muy utilizadas las regiones interesaciales entre los genes que codifican los distintos rRNA, los ITS). Los 16/18S forman parte de la subunidad pequeña del ribosoma de cualquier microorganismo. Este gen y la molécula que codifica cumplen una serie de condiciones que lo convierten en el mejor reloj molecular del que disponemos. Carl Woese, en 1970, fue el primero que usó esta molécula para un estudio filogenético y desde entonces se ha establecido como principal herramienta filogenética. El estudio de Woese presentó por primera vez la clasificación en tres dominios filogenéticos que hasta ahora se mantiene: dominio **Bacteria**, dominio **Archaea** y dominio **Eukarya**. Woese presentó el resultado de su estudio filogenético en forma de dendograma o árbol filogenético, que a menudo, también se ha denominado árbol de la **vida**. En este árbol puede verse como los tres dominios tienen un origen común aún desconocido, **LUCA** (Last Universal Common Ancestor) y cómo la evolu-

ción siguió dos caminos para formar los dominios Bacteria y Archaea. En algún momento posterior, el dominio Archaea divergió para distinguir los Eukarya de las Archaea (ver figura 29). Desde que Woese publicó su estudio, el árbol de la vida ha seguido creciendo en ramas secundarias, sin embargo, la estructura básica que explica la evolución en tres dominios no ha variado.

La filogenia es una disciplina básica en Astrobiología, ya que nos proporciona el árbol filogenético universal de la vida que representa la genealogía de toda la vida en la **Tierra**. Es, por tanto, una herramienta básica para representar y explicar la evolución de la vida en la Tierra, objetivo fundamental en Astrobiología.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

MADIGAN, M., AIYER, J., BUCKLEY, D., SATTLEY, W., STAHL, D. (2021). *Brock Biology of Microorganisms*. PEARSON-PRENTICE HALL Ed. 21Ed. ISBN 978-1-292-40523-0.

WOESE, C. R., FOX, G. E., (1977). "Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: the primary kingdoms". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 74 (11), pp. 5088-5090.

subunit of the ribosome of any microorganism. This gene and the molecule it encodes fulfill a series of conditions that

make it the best molecular clock available. Carl Woese, in 1970, was the first to use this molecule for a phylogenetic

study and since then it has been established as the main phylogenetic tool. Woese's study presented for the first time the classification into three phylogenetic domains that is still maintained today: **Bacteria**, **Archaea** and **Eukarya** domains. Woese presented the result of his phylogenetic study in the form of a dendrogram or phylogenetic tree, which has often also been called the tree of **life**. In this tree it can be seen how the three domains have an as yet unknown common origin, **LUCA** (Last Universal Common Ancestor) and how evolution followed two paths to form the domains Bacteria and Archaea. At some later time, the Archaea domain diverged to distinguish the Eukarya from the Archaea (figure 29). Since Woese published his study, the tree of life has continued to grow into secondary branches, yet the basic structure that explains evolution in three domains has not changed.

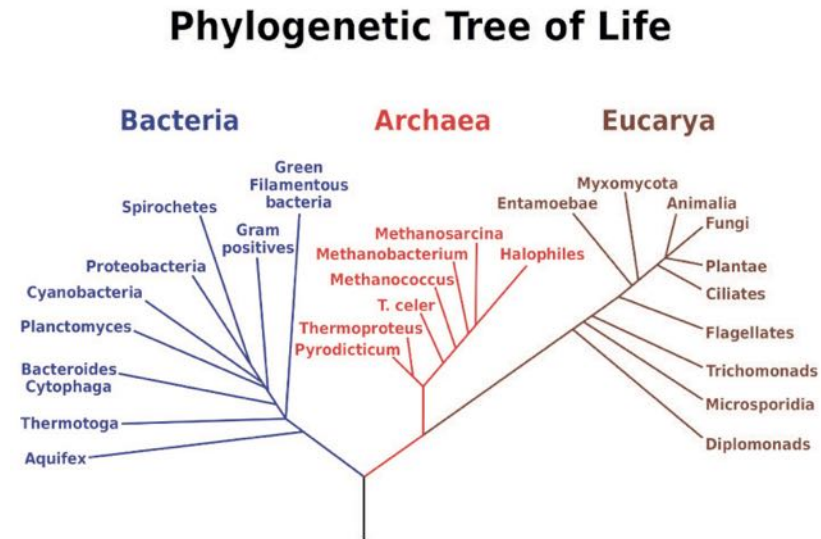


Figura 29:

Árbol filogenético.

Phylogenetic tree.

Incluye los distintos dominios de los seres vivos (Bacterias, Arqueas y Eucariotas) y sus subdivisiones.

It includes the different domains of living beings (Bacteria, Archaea and Eukaryotes) and their subdivisions.

Crédito: Michael Madigan, Jennifer Aiyer, Daniel Buckley, W. Sattley, David Stahl. (2021) "Brock Biology of Microorganisms". PEARSON-PRENTICE HALL Ed. 21Ed. ISBN 978-1-292-40523-0

Phylogeny is a basic discipline in Astrobiology, as it provides us with the universal phylogenetic tree of life that represents the genealogy of all life on **Earth**. It is therefore a basic tool to represent and explain the evolution of life on Earth, a fundamental objective in Astrobiology.

43. FIRMAS ISOTÓPICAS

Se denomina isótopos a los átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones y, por lo tanto, difieren en número másico. La palabra isótopo se usa para indicar que todos los tipos de átomos de un mismo elemento químico se encuentran en el mismo sitio de la tabla periódica (ver término **Tabla periódica**). Las firmas isotópicas son la caracterización de la distribución de los diferentes isótopos estables (por ejemplo, ^{12}C y ^{13}C del carbono) de un determinado átomo. Estas variaciones en las proporciones de los diferentes isótopos se miden utilizando espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS). La composición isotópica (total o específica de compuestos) de elementos ligeros (p. ej., carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno o azufre) revela información relevante sobre procesos biológicos, adaptaciones de la **vida** a cambios ambientales (p. ej., ambientes oxidantes/reductores o humedad), así como también de ciclos biogeoquímicos a lo largo de la escala geológica. Por ejemplo, la composición isotópica del carbono orgánico ($\delta^{13}\text{C}$) junto con la información obtenida de **biomarcadores** lipídicos pueden dar pistas sobre la

actividad biológica (tipo de fijación de carbono) en un lugar determinado. La actividad biológica ejerce un fraccionamiento isotópico (es decir, enriquecimiento en el isótopo liviano ^{12}C en la biomasa en comparación con el sustrato de CO_2 o carbono disuelto), dependiente del tipo de fijación de carbono utilizada. Los mayores fraccionamientos, es decir mayor diferencia entre el sustrato utilizado (CO_2) y la biomasa del organismo ($\Delta^{13}\text{C}$) los producen los microorganismos que utilizan la vía de acetil-coenzima A (CoA) durante la fijación del CO_2 atmosférico ($\Delta^{13}\text{C}$ entre 15 y 36 ‰), así como los que utilizan el ciclo de Calvin ($\Delta^{13}\text{C}$ entre 11 y 26 ‰). Fraccionamientos menores ocurren con otras vías de fijación más primitivas como la vía reductiva del ácido cítrico, rTCA ($\Delta^{13}\text{C}$ entre 3 y 13 ‰) o la del hidroxipropionato, 3-HP ($\Delta^{13}\text{C}$ entre 2 y 13 ‰).

Las reacciones biológicas mediadas dentro del ciclo del nitrógeno (p. ej., asimilación, nitrificación o desnitrificación) suelen constar de varios pasos y controlan la dinámica del nitrógeno en el suelo. Estos procesos generalmente producen un fraccionamiento isotópico entre el

ISOTOPIC SIGNATURES

Atoms of the same element whose nuclei have a different number of neutrons and therefore differ in mass number are called isotopes. The word isotope is used to indicate that all types of atoms of the same chemical element are found at the same place in the periodic table (see term **Periodic table of the chemical elements**). Isotopic signatures are the characterization of the distribution of the different stable isotopes (e.g. ^{12}C and ^{13}C of carbon) of a given atom. These variations in the ratios of the different isotopes are measured using isotope ratio mass spectrometry (IRMS). The isotopic composition (total or compound-specific) of light elements (e.g., carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen or sulfur) reveals relevant information about biological processes, adaptations of **life** to environmental changes (e.g., oxic/reducing environments or humidity), as well as biogeochemical cycles along the geological scale. For example, the isotopic composition of organic carbon ($\delta^{13}\text{C}$) together with information obtained from lipid **biomarkers** can provide clues to biological activity (type of carbon fixation) at a given site. Biological activity exerts isotopic fractionation

(i.e., enrichment in the light isotope ^{12}C in biomass compared to the CO_2 or dissolved carbon substrate), dependent on the type of carbon fixation used. The greatest fractionations, i.e. greater difference between the substrate used (CO_2) and the biomass of the organism ($\Delta^{13}\text{C}$) are produced by microorganisms using the acetyl-coenzyme A (CoA) pathway during atmospheric CO_2 fixation ($\Delta^{13}\text{C}$ between 15 to 36‰), as well as those using the Calvin cycle ($\Delta^{13}\text{C}$ between 11 and 26‰). Minor fractionations occur with other more primitive binding pathways such as the reductive citric acid pathway, rTCA ($\Delta^{13}\text{C}$ between 3 and 13‰) or the hydroxypropionate pathway, 3-HP ($\Delta^{13}\text{C}$ between 2 and 13‰).

Biological reactions mediated within the nitrogen cycle (e.g., assimilation, nitrification or denitrification) usually consist of several steps and control nitrogen dynamics in the soil. These processes generally produce an isotopic fractionation between substrate (increasing $\delta^{15}\text{N}$) and product (decreasing $\delta^{15}\text{N}$). This fractionation depends on many factors such as the number of steps involved, the size of the reservoirs, the

sustrato (aumenta el $\delta^{15}\text{N}$) y el producto (disminuye el $\delta^{15}\text{N}$). Este fraccionamiento depende de muchos factores tales como el número de pasos involucrados, el tamaño de los reservorios, el pH del suelo, los microorganismos presentes, etc. También en el hidrógeno existe un fraccionamiento ($^2\text{H}/^1\text{H}$, deuterio frente a protio) entre los lípidos bacterianos y el **agua** y se han relacionado con las vías metabólicas, como por ejemplo en los quimio-autótrofos que muestran el mayor fraccionamiento (aprox. -200 a -400 ‰).

Las firmas isotópicas permiten distinguir fuentes naturales de fuentes antropogénicas (es decir, humanas)

en sustancias químicas, entre distintos tipos de **metabolismos** microbianos o procesos de paleorreconstrucción ambiental. El análisis conjunto de biomarcadores moleculares lipídicos e isótopos estables asociados al medio de estudio y la aplicación del análisis isotópico específico de compuestos (CSIA, en inglés) permite identificar una huella única que revela la fuente dominante del compuesto. De esta manera, el análisis de isótopos estables en conjunto con los biomarcadores asociados son una herramienta biogeoquímica potente para descifrar las fuentes y la diagénesis de la materia orgánica, con implicaciones para la búsqueda de vida extraterrestre.

soil pH, the microorganisms present, etc. Also in hydrogen, fractionation ($^2\text{H}/^1\text{H}$, deuterium vs. protium) exists between bacterial lipids and **water** and have been related to metabolic pathways, as for example in chemoautotrophs which show the highest fractionation (approx. -200 to -400‰).

Isotopic signatures allow distinguishing natural sources from anthropogenic (i.e., human) sources in chemicals, between different types of microbial **metabolisms** or environmental pa-

leo-reconstruction processes. The joint analysis of lipid molecular biomarkers and stable isotopes associated with the study medium and the application of compound-specific isotope analysis (CSIA) allows the identification of a unique fingerprint that reveals the dominant source of the compound. Thus, stable isotope analysis in conjunction with associated biomarkers is a powerful biogeochemical tool for deciphering the sources and diagenesis of organic matter, with implications for the search for extraterrestrial life.

44. FUERZAS DE MAREA

Se conoce como fuerzas de marea a la diferencia de fuerza de gravedad experimentada a lo largo del diámetro de un cuerpo. La fuerza de marea, en la **Tierra**, explica el cambio periódico del nivel del mar que se percibe en las costas, de ahí su nombre. Es un efecto directo de la influencia gravitatoria de la Luna y en menor medida del **Sol**, sobre la superficie terrestre. Este mecanismo de deformación es fundamental a escala planetaria. Es responsable, entre otras cosas, del calentamiento de las lunas de Júpiter. El vulcanismo extremo de Ío, por ejemplo, está provocado directamente por la deformación de kilómetros de altura que sufre el satélite en su órbita alrededor del planeta gigante. En el caso de la luna Europa (ver **Mundos oceánicos**) la fricción generada en una superficie que está continuamente deformándose proporciona el calor necesario para mantener el océano líquido debajo de la superficie helada del satélite, convirtiéndola en uno de los objetos más interesantes en la búsqueda de **vida** en el **sistema solar**.

El mecanismo de funcionamiento es sencillo. En el caso del sistema Tierra-Luna, la parte de la Tierra más cercana a la Luna sufre una gravedad más intensa que la parte que está alejada, provocando una deformación de la corteza terrestre de casi treinta centímetros. La cuarta parte de la superficie de la Tierra se deforma y a medida que nuestro satélite se desplaza por su órbita la alteración que produce se traslada por la superficie del planeta. El efecto es más obvio en las grandes masas móviles como los océanos que se levantan en dirección a la Luna y el Sol. Cuando los tres cuerpos (la Tierra, la Luna y el Sol) están alineados en sus órbitas (luna nueva y luna llena) se alcanza el efecto máximo: las mareas vivas.

Estas fuerzas, además, son responsables de determinar la duración de los días en la Tierra y de provocar tanto el alejamiento de la Luna como que siempre le veamos la misma cara. Esto se debe a que las fuerzas de marea generan cambios en la velocidad de rotación de los cuerpos involucrados. En la Tierra, la dura-

ción de los días ha cambiado en escalas de millones de años. En la época de los dinosaurios, el día terrestre duraba solo veintidós horas, frente a las veinticuatro actuales. El efecto también se siente en la Luna que ha acabado rotando acoplada a la Tierra por fuerzas de marea y tarda los mismos días en girar una vez sobre su eje que en orbitar una vez alrededor de la Tierra. Siempre se ve la misma cara a la Luna porque, con el tiempo, la velocidad de rotación del satélite se ha sincronizado con su velocidad orbital.

La Luna juega un papel astrobiológico primordial: actúa como un escudo frente al impacto de asteroides; contribuye al calentamiento de la corteza por la disipación de energía; las mareas generan ecosistemas específicos en las áreas costeras; puede inducir mezclas en las corrientes oceánicas; y estabiliza el movimiento de la Tierra. Sin ella, el tirón gravitatorio de otros planetas habría causado bruscos cambios de la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano de la órbita, como en el pasado ha ocurrido, por ejemplo, en

TIDAL FORCES

We know as tidal forces the difference in the force of gravity experienced along the diameter of a body. The tidal force, on our planet, explains the periodic change in sea level that is felt along the coast, hence its name. It is a direct effect of the gravitational influence of the Moon (and the **Sun**) on the **Earth's** surface. This deformation mechanism is fundamental on a planetary scale. It is responsible, among other things, for the heating of Jupiter's moons. The extreme volcanism of Io, for example, is directly caused by the kilometer-high deformation that the moon undergoes in its orbit around the giant planet. In the case of the moon Europa (see **Ocean worlds**), the friction generated on a surface that is continuously being deformed provides the heat necessary to maintain the liquid ocean beneath the icy surface of the satellite, making it one of the most interesting objects in the search for **life** in the **solar system**.

The mechanism of operation is simple. In the case of the Earth-Moon system,

the part of the Earth closer to the Moon undergoes a more intense gravity than the part that is far away, causing a deformation of the Earth's crust of almost thirty centimeters. A quarter of the Earth's surface is deformed and as our satellite moves through its orbit the alteration it produces is transferred across the surface of the planet. The effect is most obvious in large mobile masses such as the oceans that rise in the direction of the Moon and the Sun. When the three bodies Earth, Moon and Sun are aligned in their orbits (new moon and full moon) the maximum effect is reached: the spring tides.

These forces are also responsible of the duration length of the days on Earth, for causing the Moon to move away from us, and for the fact that we are always seeing the same face. This is because tidal forces generate changes in the rotational speed of the bodies involved. On Earth, the length of the day has changed on scales of millions of years. At the time of the dinosaurs, the terrestrial day was only twenty-two hours long, compared to the

current twenty-four hours. The effect is also felt in the Moon, which has ended up tidally locked to the Earth: it takes the Moon the same number of days to rotate on its axis and to orbit the Earth once. We always see the same face of the Moon because, over time, the rotational speed of the satellite has synchronized with its orbital speed.

The Moon plays a primordial astrobiological role: it acts as a shield against asteroid impacts; it contributes to crustal heating by dissipating energy; tides generate specific ecosystems in coastal areas; it can induce mixing in ocean currents; and it stabilizes the Earth's motion. Without it, the gravitational pull of other planets would have caused abrupt changes in the inclination of the rotation axis with respect to the plane of the orbit, as has occurred in the past, for example, on Mars. Thus, the Earth's climate is balanced and its secular variations are much slower, making the emergence and maintenance of complex life forms possible.

Marte. Así, el clima terrestre se encuentra equilibrado y sus variaciones seculares son mucho más lentas, por lo que ha sido posible la aparición y mantenimiento de complejas formas de vida.

La sincronización de la velocidad orbital con la velocidad de rotación es extrapolable a cualquier sistema planeta-satélite, o planeta-estrella (ver **Interacción estrella-planeta**). Muchos de los **exoplanetas** descubiertos con órbitas cercanas a sus estrellas acaban mostrándonos siempre la misma cara por efecto de las fuerzas de marea. Son mundos donde siempre es de

día a un lado del planeta y de noche en el otro. Si los dos cuerpos están lo suficientemente cerca para que actúen las fuerzas de marea, con el tiempo, el planeta tarda exactamente el mismo tiempo en girar alrededor de su propio eje que en girar alrededor de su estrella anfitriona o compañera gravitacional. Estos exoplanetas plantean problemas de **habitabilidad** ya que estarían sometidos a climas extremos, aunque no podemos excluir que tengan una **atmósfera** con vientos que soplen por toda la superficie mitigando estos efectos y permitiendo una meteorología más moderada.

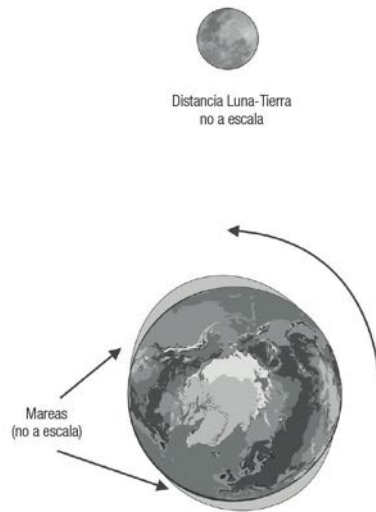


Figura 30:

Fuerzas de marea.

Tidal forces.

El sistema Tierra-Luna y la generación de mareas.

The Earth-Moon system and the generation of tides.

Crédito: D. Barrado.

The tidal locking effect is extrapolable to any planet-satellite, or planet-star system (see **Star-planet interaction**). Many of the **exoplanets** discovered with orbits close to their stars end up showing them always the same face due to the effect of tidal forces. If the two bodies are close enough for tidal forces to act, it eventually takes exactly the same time for the planet to rotate around its own axis as it takes to rotate around its host star or gravitational companion. These exoplanets pose **habitability** problems as they would experience extreme climates, although we cannot exclude the possibility that they may have an **atmosphere** with winds blowing across the surface mitigating these effects and allowing a more moderate meteorology.

Lecturas adicionales /Further reading

VILLAVÉR, E. (2019). *Las mil caras de la Luna*, Ed. Harper Collins

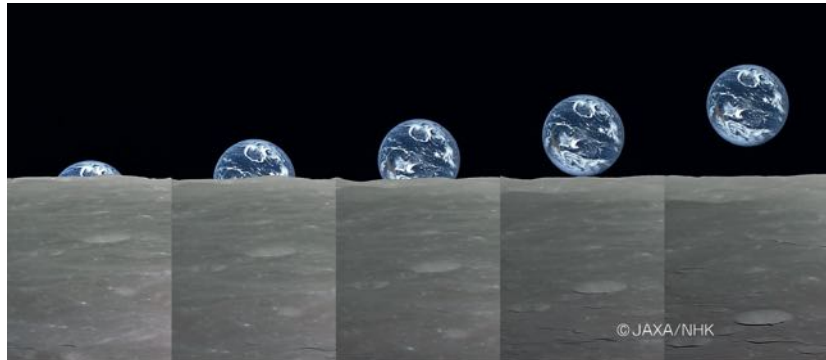


Figura 31:

Secuencia de imágenes que muestra la Tierra saliendo tras el horizonte lunar.

Sequence of images showing the Earth rising behind the lunar horizon.

El proceso fue observado por la sonda japonesa Kaguya (Selene).

The process was observed by the Japanese probe Kaguya (Selene).

Crédito: Agencia Espacial Japonesa JAXA/NHK.

45. GALAXIA, VÍA LÁCTEA

Una galaxia (término procedente del griego *γαλαξίας*, “lácteo”) es una enorme aglomeración de **estrellas**, gas, **polvo** y materia oscura que se mantiene unida por el efecto de la gravedad. Las galaxias son diversas en formas y tamaños. En base a ellos se clasifican en diferentes tipos como las galaxias elípticas, las espirales o las irregulares. Muchas contienen en sus centros agujeros negros denominados supermasivos por su elevada masa. Existen más de cien mil millones de galaxias en el universo visible. Raramente están aisladas, sino que la mayoría forman parte de agrupaciones mantenidas por la gravedad. Las más numerosas, los cúmulos, pueden albergar miles de miembros. Se trata de las mayores estructuras del universo ligadas por la gravedad.

Cada galaxia puede contener desde unos pocos millones hasta cientos de miles de millones de estrellas. Muchas de ellas probablemente están acompañadas de **planetas** en los que se dan las condi-

ciones adecuadas para albergar **vida**. Es posible que en una galaxia dada existan regiones donde esta tenga una probabilidad más alta de surgir y prosperar (ver término **Zona de habitabilidad galáctica**).

La Vía Láctea es la galaxia que contiene al **Sol**. Tiene forma aplanada y una estructura con brazos espirales y una barra central. Su extensión es de unos 100 000 años luz. Si se redujera al tamaño de un campo de fútbol, la distancia que nos separa de la estrella más cercana sería similar a la longitud de una hormiga. Todas las estrellas que identificamos a simple vista (varios miles) en una noche clara pertenecen a la Vía Láctea, si bien en total se estima que alberga entre 100 000 y 400 000 millones. El Sol se halla muy lejos del centro, a unos 27 000 años luz.

Los descubrimientos de varios miles de **exoplanetas** en las últimas décadas sugieren que en la Vía Láctea existen

unos 100 000 millones de planetas. En un porcentaje incierto es posible que la vida haya surgido y prosperado en algún momento. La Vía Láctea contiene en su centro un agujero negro supermasivo con una masa equivalente a unos 4 millones de masas solares. Si en algún momento fuera activado por la aportación de material (gas, estrellas), se dispararían fenómenos extremadamente energéticos que podrían tener consecuencias fatales para la vida, al menos en planetas localizados en zonas próximas al centro.

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

GALAXY, MILKY WAY

A galaxy (a term from the Greek *γαλαξίας*, “milky”) is a huge agglomeration of **stars**, gas, **dust** and dark matter held together by the effect of gravity. Galaxies are diverse in shapes and sizes. Based on these they are classified into different types such as elliptical galaxies, spiral galaxies or irregular galaxies. Many of them contain in their centers black holes called supermassive because of their large mass. There are more than one hundred billion galaxies in the visible universe. They are rarely isolated and most are part of groups held together by gravity. The most numerous, the clusters, can have thousands of members. They are the largest gravitationally bound structures in the universe.

Each galaxy may contain from a few million to hundreds of billions of stars. Many of them are probably accompanied by **planets** with the right conditions for **life**. It is possible that in a given galaxy there are regions where life has a higher probability to emerge and thrive (see term **Galactic habitability zone**).

The Milky Way is the galaxy that contains the **Sun**. It has a flattened

shape and a structure with spiral arms and a central bar. It is about 100,000 light-years across. If it were reduced to the size of a soccer field, the distance separating us from the nearest star would be similar to the length of an ant. All the stars that we identify with the naked eye (several thousand) on a clear night belong to the Milky Way, although in total it is estimated that there are between 100,000 and 400,000 million of them. The Sun is far from the center, about 27,000 light-years away.

The discovery of several thousand **exo-planets** in recent decades suggests that there are about 100 billion planets in the Milky Way. In an uncertain percentage it is possible that life has arisen and thrived at some point. The Milky Way contains at its center a supermassive black hole with a mass of equivalent to 4 million solar masses approximately. If at some point it were to be activated by the supply of material (gas, stars), extremely energetic phenomena would be triggered that could have fatal consequences for life, at least on planets located in areas close to the center.



Figura 32:

La galaxia espiral M81.

The spiral galaxy M81.

M81 está localizada a unos 12 millones de años luz, muy similar a la Vía Láctea. La imagen fue tomada por el telescopio espacial Spitzer en varios filtros.

M81 is located about 12 million light-years away, very similar to the Milky Way. The image was taken by the special Spitzer telescope in several filters.

Crédito: NASA/JPL-Caltech.

46. GEN

Es la unidad de información contenida en el **ADN** de un ser vivo. Cada gen codifica un producto funcional, como puede ser una **proteína**. Al mismo tiempo, es responsable de transmitir dicha información a la descendencia del organismo. Cada gen ocupa una posición en la secuencia de ADN, denominada *locus*.

El genoma es el conjunto de genes de un organismo, el conjunto de instrucciones con las que se construyen todas sus **células**. El estudio de los genomas se denomina genómica, y se encarga de identificar la estructura, función y **evolución** del material genético.

El genotipo es únicamente la información genética que posee un organismo en particular, en forma de ADN. Normalmente el genoma de una especie incluye numerosas variaciones o polimorfismos en muchos de sus genes. El genotipado se usa para determinar qué variaciones específicas existen en un individuo.

Fenotipo son las características físicas observables en un organismo, producto de la expresión de la información genética contenida en el genotipo, y que

dependen del ambiente en el que vive el organismo.

El conjunto de genomas de una población celular se denomina metagenoma. Su estudio ha sido fundamental para el estudio de la **biodiversidad**, supervivencia y funcionamiento de las comunidades celulares, y en especial en la investigación de los microorganismos ambientales.

Secuenciación genética es el procedimiento mediante el cual se descifra el genoma de los organismos. En los últimos años estas técnicas han evolucionado enormemente. Entre los años 1975 y 2005, la mayoría de las secuencias de ADN se estudiaban mediante la técnica de Sanger, gracias a la cual se diseñaron los primeros secuenciadores automáticos. Este proceso se llevaba a cabo por amplificación de genes mediante técnicas de PCR (técnica para replicar un fragmento de material genético) y posterior secuenciación por electroforesis capilar (que separa moléculas en una disolución usando las diferencias de carga o masa). La secuenciación de Sanger de genomas completos era enormemente costosa y

lenta. Las **plataformas de segunda generación** (Next-generation sequencing, NGS) permiten identificar simultáneamente millones de fragmentos de ADN. El principal inconveniente de estas plataformas es que generan fragmentos cortos y para producir genomas de referencia se requieren lecturas más largas. Posteriormente, se han desarrollado plataformas de secuenciación de tercera generación que se dirigen directamente a moléculas de ADN individuales sin necesidad de amplificación por PCR y permiten obtener fragmentos extremadamente largos (figura 33).

La **filogenia** estudia las relaciones evolutivas entre los organismos. Estas relaciones se pueden deducir comparando la información contenida en su secuencia de nucleótidos (las moléculas que constituyen el ADN o el **ARN**), si se comparan los genes, o en su secuencia de aminoácidos (las moléculas que se combinan para formar las proteínas). En general, la comparación suele hacerse a partir de la información que codifica el ARN ribosómico (ARNr). Los ribosomas son orgánulos celulares fundamen-

GENE

A gene is the unit of information contained in the **DNA** of a living being. Each gene encodes a functional product, such as a **protein**. At the same time, it is responsible for transmitting this information to the offspring of the organism. Each gene occupies a position in the DNA sequence, called a locus.

The genome is the set of genes of an organism, the set of instructions with which all its **cells** are built. The study of genomes is called genomics and is responsible for identifying the structure, function and **evolution** of the genetic material.

The genotype is only the genetic information that a particular organism possesses, in the form of DNA. Typically, the genome of a species includes numerous variations or polymorphisms in many of its genes. Genotyping is used to determine what specific variations exist in an individual.

The phenotype includes the observable physical characteristics of an organism, which are the product of the expression of the genetic information contained in

the genotype, and which depend on the environment in which the organism lives.

The set of genomes of a cell population is called the metagenome. Its study has been fundamental for the study of **biodiversity**, survival and functioning of cellular communities, and especially in the investigation of environmental microorganisms.

Genetic sequencing is the procedure by which the genome of organisms is deciphered. In recent years, these techniques have evolved enormously. Between 1975 and 2005, most DNA sequences were studied using the Sanger technique, thanks to which the first automatic sequencers were designed. This process was carried out by gene amplification using PCR (a technique to replicate a fragment of genetic material) and subsequent sequencing by capillary electrophoresis (which separates molecules in a solution using charge or mass differences). Sanger sequencing of whole genomes was enormously expensive and time-consuming. Next-generation sequencing (NGS) platforms allow simultaneous identification of millions of DNA fragments. The main drawback of

these platforms is that they generate short fragments and longer reads are required to produce reference genomes. Subsequently, third-generation sequencing platforms have been developed that directly target individual DNA molecules without the need for PCR amplification and allow extremely long fragments to be obtained (figure 33).

The evolutionary relationships between organisms are studied by **phylogeny**. These relationships can be deduced by comparing the information contained in their nucleotide sequence (if their genes are compared) or in their amino acid sequence (if their proteins are compared). In general, the comparison is usually based on the information encoded by ribosomal **RNA** (rRNA). Ribosomes are fundamental cellular organelles in which cell proteins (the cellular machinery that works) are synthesized. Therefore, they are present in all organisms and their structure has changed little throughout evolution. Since all cells contain ribosomes, which are evolutionarily highly conserved molecules, these are often used for the construction of phylogenetic trees. This technique, pioneered by the

tales en los que se sintetizan las proteínas de las células (la maquinaria celular que verdaderamente funciona). Por ello, están presentes en todos los organismos y su estructura ha variado poco a lo largo de la evolución. Así, puesto que todas las células contienen ribosomas, que son moléculas muy conservadas evolutivamente, estas se suelen utilizar para la construcción de árboles filogenéticos. Esta técnica, iniciada por el microbiólogo estadounidense Carl Woese, revolucionó la comprensión de la evolución celular. También se han determinado las filogenias virales, aunque como estos organismos carecen de ribosomas, se han utilizado otras moléculas para sus comparaciones evolutivas.

La resurrección de genes ancestrales ofrece una nueva y poderosa forma de probar empíricamente hipótesis sobre la función de los genes del pasado. Existen pocos fósiles moleculares, pero algunos fragmentos de ADN se han conservado

incluidos en materiales como el ámbar o el **hielo**. Estos genes antiguos ahora pueden reconstruirse, expresarse y caracterizarse funcionalmente, gracias a nuevas técnicas para inferir y sintetizar secuencias ancestrales.

Lecturas adicionales /Further reading

- BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.
- GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.
- HUERTAS, O., Ruiz Hueso, P., Porcel, R., et al. (2021). *GENES. Escribiendo el guion de la vida*. Almuzara Libros.
- KOONIN, E. V., MAKAROVA, K. S., WOLF, Y. I. (2021). "Evolution of Microbial Genomics: Conceptual Shifts over a Quarter Century". *Trends Microbiol.* 29:582-592.
- LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.
- THORNTON, J. (2004). "Resurrecting ancient genes: experimental analysis of extinct molecules". *Nat Rev Genet* 5, pp. 366–375.

American microbiologist Carl Woese, revolutionized the understanding of cellular evolution. Viral phylogenies have been determined, but given that these, although since these organisms lack ribosomes, other molecules have been used for their evolutionary comparisons.

Ancestral gene resurrection offers a powerful new way to empirically test hypotheses about the function of past genes. Few molecular fossils exist, but some DNA fragments have been preserved embedded in materials such as amber or **ice**. These ancient genes can now be reconstructed, expressed and functionally characterized, thanks to new techniques for inferring and synthesizing ancestral sequences.

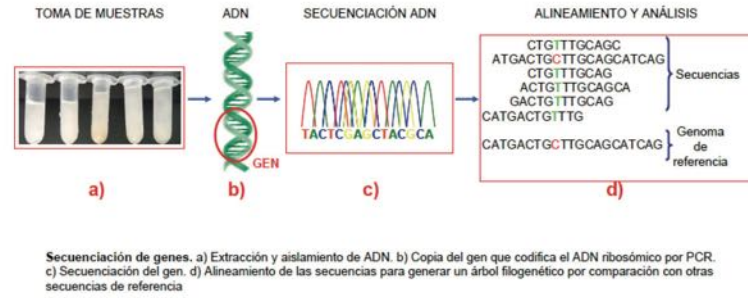


Figura 33:
Secuenciación de genes.
Gene sequencing.

47. HABITABILIDAD: EN MARTE, EN OTROS PLANETAS

Se define como el potencial de un ambiente para soportar la presencia de **vida**. Por extrapolación, el concepto en sí depende claramente de las condiciones que la vida necesita para desarrollarse, esto es, un sistema líquido basado en un solvente donde se puedan desarrollar las reacciones químicas necesarias para la vida. Además, un elemento importante para que en sistema vivo pueda desarrollarse es el aporte de energía. Por tanto, en la definición se debe incluir la presencia de una fuente energética tanto en el ambiente como en la disolución acuosa descrita. Aparte del requerimiento energético y de la presencia de un solvente líquido también es necesario un aporte de compuestos de elementos que componen las bases de la orgánica conocida hasta el momento, esto es, los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre (conocidos como CHONPS), (ver **Tabla periódica**). Además de estos requerimientos mínimos necesarios se debe tener en cuenta

que la vida puede establecer únicamente bajo unos patrones fisicoquímicos que no causen una destrucción de la orgánica que la soporte, esto es, unas condiciones de pH, **radiación**, temperatura, etc., que permitan una estabilización de la materia orgánica necesaria.

El concepto se puede extender a ambientes planetarios. Existe una amplia discusión sobre las posibilidades de vida fuera del planeta **Tierra**. Así, se está llevando a cabo una intensa búsqueda de rastros de vida en **Marte**. Para que un planeta pueda albergar vida debe poseer una serie de características que se resumen en la presencia estable de un solvente (como podría ser el **agua** como solvente universal). Para ello debe estar situado en la zona de habitabilidad planetaria, la zona anular alrededor de una **estrella** de la secuencia principal (ver **Diagrama H-R**) donde un planeta rocoso similar a la Tierra tanto en composición como masa con la presencia de una **at-**

mósfera puede albergar agua líquida en su superficie.

En el amplio conjunto de planetas descubiertos hasta la fecha fuera del **sistema solar** existe un determinado número que cumple las condiciones necesarias para la habitabilidad y, por tanto, potencial presencia de vida. Un concepto importante para la habitabilidad planetaria es el de excentricidad de la órbita de dicho planeta y la inclinación de su eje de rotación frente al plano de aquella. Este hecho puede suponer la presencia de variaciones estacionales que impliquen el cambio de fase del agua en su superficie. También puede suponer cambios en la incidencia de radiación procedente de la estrella entorno a la cual orbita dicho planeta. Todos estos factores tendrán incidencia directa y fundamental en la presencia de agua líquida en su superficie, uno de los elementos necesarios para el desarrollo de la vida y, por tanto, del potencial de habitabilidad de dicho planeta.

HABITABILITY OF MARS. PLANETARY HABITABILITY

It is defined as the potential of an environment to support the presence of **life**. By extrapolation, the concept itself clearly depends on the conditions that life needs to develop, i.e., a liquid system based on a solvent where the chemical reactions necessary for life can develop. In addition, an important element for a living system to develop is the supply of energy. Therefore, the definition must include the presence of an energy source both in the environment and in the aqueous solution described. Apart from the energy requirement and the presence of a liquid solvent, it is also necessary a contribution of compounds of elements that compose the bases of the organic known so far, that is, the elements carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, phosphorus and sulfur (known as CHONPS), (see **Periodic table**). In addition to these minimum necessary requirements, it must be taken into account that life can only establish itself under physicochemical patterns that do not cause a destruction of the organic

matter that supports it, i.e., conditions of pH, **radiation**, temperature, etc., that allow a stabilization of the necessary organic matter.

The concept can be extended to planetary environments. There is a wide discussion about the possibilities of life outside the planet **Earth**. Thus, an intensive search for traces of life on **Mars** is underway. For a planet to harbor life, it must possess a number of characteristics that can be summarized in the stable presence of a solvent (such as **water** as a universal solvent). To do so, it must be located in the planetary habitability zone, the annular zone around a main sequence star (see **H-R Diagram**) where a rocky planet similar to Earth in both composition and mass with the presence of an **atmosphere** can harbor liquid water on its surface.

In the large set of planets discovered to date outside the **solar system** there are a certain number that meet the conditions

necessary for habitability and, therefore, the potential presence of life. An important concept for planetary habitability is the eccentricity of the planet's orbit and the inclination of its axis of rotation with respect to its plane. This fact may imply the presence of seasonal variations that imply the change of phase of the water on its surface. It may also involve changes in the incidence of radiation from the star around which the planet orbits. All these factors will have a direct and fundamental impact on the presence of liquid water on its surface, one of the elements necessary for the development of life and, therefore, of the habitability potential of such a planet.

Lecturas adicionales /Further reading

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

48. HIDROTHERMAL, SISTEMA

Proceso en que los fluidos derivados del **agua** líquida, gaseosa, o en un estado híbrido (el denominado supercrítico, debido a condiciones de temperatura y presión extremadamente elevadas) redistribuyen materia y energía en las cortezas de los cuerpos planetarios. La circulación de estos fluidos produce importantes cambios fisicoquímicos, a veces a temperaturas relativamente bajas. Estos no solo condicionan la formación de materiales característicos, que permiten identificar sistemas hidrotermales fósiles y entender la historia geológica y ambiental, sino que también producen condiciones favorables para la actividad biológica.

Los sistemas hidrotermales pueden darse por diversos tipos de perturbaciones térmicas. Las más típicas son las inducidas por magmas, que van desde dorsales oceánicas a las relacionadas con cámaras magmáticas. También existen otros procesos, como en los que los movimientos de la corteza terrestre producen condiciones de alta presión y temperatura (procesos metamórficos) que además de modificar las rocas expulsan fluidos calientes. El agua de los acuíferos sub-

terráneos también puede provenir de precipitaciones, que debido al gradiente geotérmico (cuanto más profundizamos bajo la superficie, más presión ejerce el material que queda por encima) ve aumentada su temperatura.

Aunque la actividad hidrotermal tiene lugar mayoritariamente bajo la superficie, hay diversas expresiones superficiales como géiseres, fumarolas submarinas, manantiales de aguas termales, “ollas” de barro burbujeantes

o suelos calientes. El hidrotermalismo puede ocasionar la deposición de nuevos materiales por precipitación o alterar la composición de los materiales a los que afecta. Uno de los procesos destacables es la serpentinitización, donde la corteza oceánica incorpora agua en su estructura generando hidrógeno e hidrocarburos, como el metano.

La actividad hidrotermal es universal. En la **Tierra** ha existido tan pronto como la primera agua líquida, con

Lecturas adicionales /Further reading

- GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.
- GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.
- MARTIN, W., BAROSS, J., KELLEY, D., & RUSSELL, M. J. (2008). “Hydrothermal vents and the origin of life.” *Nature Reviews Microbiology*, 6(11), pp. 805-814.
- NORTON, D. L. (1984). “Theory of hydrothermal systems”. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 12(1), pp. 155-177.
- VAN KRANENDONK, M., BAUMGARTNER, R., CADY, S., et al. (2021). “Terrestrial Hydrothermal Fields and the Search for Life in the Solar System.” *Bulletin of the American Astronomical Society*, 53(4), p. 272.
- VANCE, S., HARNMEIJER, J., KIMURA, J., HUSSMANN, H., DEMARTIN, B., & BROWN, J. M. (2007). “Hydrothermal systems in small ocean planets.” *Astrobiology*, 7(6), pp.987-1005.

HYDROTHERMAL, SYSTEM

A process in which fluids derived from liquid or gaseous **water**, or in a hybrid state (the so-called supercritical, due to extremely high temperature and pressure conditions) redistribute matter and energy in the crust of planetary bodies. The circulation of these fluids produces important physicochemical

changes, sometimes at relatively low temperatures. These not only condition the formation of characteristic materials, which allow us to identify fossil hydrothermal systems and understand the geological and environmental history, but also produce favorable conditions for biological activity.



Figura 34:

Sistema hidrotermal.

Hydrothermal system.

Zona hidrotermal en Islandia, con “ollas” de barro gris burbujeante y suelos calientes altamente alterados.

Hydrothermal zone in Iceland, with bubbling gray mudpots and highly altered hot soils.

Crédito: A. Molina.

Hydrothermal systems can be triggered by various types of thermal perturbations. The most typical are those induced by magmas, ranging from oceanic ridges to those related to magmatic chambers. There are also other processes, such as those corresponding to materials subjected to high pressures through metamorphic processes and expelled fluids; to buried aquifers, with water that may come from precipitation, subject to temperature increases due to the geothermal gradient (the deeper we go below the surface, the more pressure is exerted by the material above).

Although hydrothermal activity takes place mostly below the surface, there are various surface expressions such as geysers, submarine fumaroles, hot springs, bubbling mudpots or hot soils. Hydrothermalism can cause the deposition of new materials by precipitation or alter the composition of the materials it affects. One of the most notable processes is serpentinization, where the oceanic crust incorporates water into its structure, generating hydrogen and hydrocarbons, such as methane.

campos hidrotermales fosilizados de más de 3480 millones de años de antigüedad. Se cree que también hubo abundancia de esta actividad en el pasado de planetas como **Marte**, las lunas heladas de Júpiter y Saturno, e incluso en otros cuerpos planetarios menores. En el caso de las lunas heladas, se ha propuesto que estos procesos se pueden desencadenar por “calentamientos de marea”, originados por los cambios de fuerzas gravitatorias a lo largo de sus orbitas.

Los sistemas hidrotermales tienen una gran importancia desde el punto de vista astrobiológico. En la Tierra, estos

ambientes son el hábitat de abundantes y diversas comunidades microbianas que viven sin necesidad de fotosíntesis. Además, han sido señalados como uno de los ambientes donde pudo originarse la vida. Las fuentes hidrotermales submarinas, como chimeneas que expulsan fluidos alcalinos, proveen de una fuente de energía que facilita la formación de compuestos orgánicos complejos precursores de los primeros organismos. En los mares de las lunas heladas podrían darse fenómenos análogos, que al igual que las zonas con signos de actividad hidrotermal en Marte, son claros objetivos para la búsqueda de **vida** fuera de nuestro planeta.

Hydrothermal activity is universal. It has existed on **Earth** as early as the first liquid water, with fossilized hydrothermal fields more than 3480 million years old. It is believed that there was also an abundance of such activity in the past on planets such as **Mars**, the icy moons of Jupiter and Saturn, and even on other minor planetary bodies. In the case of icy moons, it has been proposed that these processes may be triggered by “tidal heating,” caused by changes in gravitational forces along their orbits.

Hydrothermal systems are of great importance from an astrobiological point

of view. On Earth, these environments are the habitat of abundant and diverse microbial communities that live without photosynthesis. In addition, they have been pointed out as one of the environments where life could have originated. Submarine hydrothermal vents, such as chimneys that expel alkaline fluids, provide a source of energy that facilitates the formation of complex organic compounds that are precursors of the first organisms. Analogous phenomena could occur in the seas of the icy moons, which, like the areas with signs of hydrothermal activity on Mars, are clear targets for the search for **life** outside our planet.

49. HIELOS

Las partículas de **polvo** situadas en las regiones más frías de las nubes interestelares y los discos protoplanetarios (ver el término **Discos circunestelares**) pueden estar recubiertas de mantos de hielo. Esto se conoce gracias a las observaciones en longitudes de onda del infrarrojo medio, entre ~1300 y 3000 nanómetros. Los granos de polvo son muy pequeños, con un diámetro en torno a una décima de micrómetro (equivalente a una diezmillonésima parte del metro), y los mantos de hielo que los envuelven son extremadamente finos, con un espesor típico de unos pocos nanómetros.

La detección de hielos se realiza a través de la **espectroscopía**, una técnica usada en astronomía y otras disciplinas para determinar la composición química de

compuestos complejos. La luz infrarroja procedente de una fuente (como, por ejemplo, una **estrella**) situada detrás de la nube que se analiza, pasa a través de los mantos de hielo de los granos de polvo y la fracción de luz que estos absorben permite determinar la composición molecular del hielo. La mayor proporción es **agua** y en menor cantidad otras moléculas simples como el monóxido o el dióxido de carbono (CO, CO₂), el amoníaco (NH₃) o el metano (CH₄). También se han encontrado algunas moléculas de cierta **complejidad**, tales como CH₃OH, OCN, OCS, H₂CO o HCOOH. La fuente emisora de luz infrarroja suele ser una estrella aislada o una estrella embebida en una nube con polvo caliente a su alrededor. En el **sistema solar** existen numerosos cuerpos helados en los que

se realiza espectroscopía en el infrarrojo cercano. Los hielos cometarios tienen una composición bastante parecida a la del hielo interestelar.

La estructura precisa de los mantos de hielo no se conoce bien y probablemente exista una capa rica en agua y otra depositada encima con moléculas como el CO y el nitrógeno molecular, N₂, que requieren unas bajas temperaturas para depositarse en el polvo. La manera en que las diferentes moléculas se mezclan en el hielo determina las reacciones químicas que pueden darse en presencia de luz ultravioleta, o posteriormente durante el calentamiento que experimentan en los llamados *hot cores* y *hot corinos*. En efecto, la proximidad de las moléculas en el hielo puede generar reacciones

ICE

Dust particles located in the cooler regions of interstellar clouds and protoplanetary disks (see term **Circumstellar disks**) may be coated with ice mantles. This is known from observations at mid-infrared wavelengths between ~1300 and 3000 nanometers. Dust grains are very small, with a diameter around one tenth of a micrometer (equivalent to one ten-millionth of a meter), and the ice mantles that surround them are extremely thin, typically a few nanometers thick.

The detection of ices is done through **spectroscopy**, a technique used in astronomy and other disciplines to determine the chemical composition of complex compounds. Infrared light from a source (e.g., a **star**) behind the cloud

being analyzed passes through the ice mantles of dust grains and the fraction of light absorbed by them allows the molecular composition of the ice to be determined. The largest proportion is **water** and to a lesser extent other simple molecules such as carbon monoxide or carbon dioxide (CO, CO₂), ammonia (NH₃) or methane (CH₄). Some molecules of some **complexity** have also been found, such as CH₃OH, OCN⁻, OCS, H₂CO or HCOOH. The source emitting infrared light is usually an isolated star or a star embedded in a cloud with hot dust around it. In the **solar system** there are numerous icy bodies on which near-infrared spectroscopy is performed; cometary ices have a composition quite similar to that of interstellar ice.

The precise structure of the ice sheets is not well known and there is probably a water-rich layer and a layer deposited on top with molecules such as CO and molecular nitrogen, N₂, which require low temperatures to deposit in the dust. The way in which the different molecules mix in the ice determines the chemical reactions that can occur in the presence of ultraviolet light, or later during the heating they undergo in the so-called hot cores and hot corinos. Indeed, the proximity of molecules in the ice can generate photochemical reactions that are not allowed in the gas phase. Some polar ices, such as water or ammonia whose molecules act as strong dipoles, form hydrogen bonds and remain at very high temperatures compared to heavier molecules, such as

fotoquímicas que no están permitidas en la fase gaseosa. Algunos hielos de tipo polar, como el agua o el amoníaco cuyas moléculas actúan como fuertes dipolos, forman enlaces de hidrógeno y permanecen a temperaturas muy altas en comparación con otras moléculas más pesadas, como el monóxido de carbono cuyos hielos están cohesionados por enlaces moleculares débiles de tipo van der Waals, más débiles que los enlaces más comunes. Dichos enlaces entre diferentes moléculas en el hielo y otros parámetros como la porosidad o una estructura del hielo más o menos ordenada, condicionan la química de los hielos en el espacio. En la superficie del polvo desnudo, o del hielo cuando

está cubierto, se dan reacciones con el hidrógeno. En presencia de **radiación** ultravioleta, rayos X y rayos cósmicos, las moléculas se rompen, los radicales así formados reaccionan, algunas moléculas adquieren movilidad, y se producen moléculas más complejas que pueden ser de interés astrobiológico.

Gracias a las simulaciones experimentales del procesamiento de hielos en condiciones del medio interestelar, se conoce que varios aminoácidos, azúcares y otras especies se generan en el hielo. Este hielo procesado podría haber llegado a la **Tierra** primitiva durante el bombardeo masivo de **cometas** y quizás pudiera haber contribuido a la aparición de la **vida**.

carbon monoxide whose ices are held together by weak van der Waals-type molecular bonds, weaker than the most common bonds. These bonds between different molecules in the ice and other parameters such as porosity or a more or less ordered ice structure, condition the chemistry of ices in space. On the surface of bare dust, or ice when it is covered, reactions with hydrogen occur. In the presence of ultraviolet **radiation**, X-rays and cosmic rays, molecules break apart, the radicals thus formed react,

some molecules acquire mobility, and more complex molecules are produced that may be of astrobiological interest.

Thanks to experimental simulations of ice processing under interstellar medium conditions, it is known that various amino acids, sugars, and other species are generated in the ice. This processed ice could have reached the early **Earth** during the massive bombardment of **comets** and may have contributed to the emergence of **life**.

Lecturas adicionales/Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

50. INSTRUMENTO ESPACIAL

Un instrumento espacial es un dispositivo de medida que se envía al espacio con el fin de estudiar un cuerpo celeste, bien sea un planeta, satélite, asteroide, **cometa**, **estrella**, **galaxia** o agrupaciones de estas últimas.

Los instrumentos espaciales, también denominados como carga útil, son los elementos esenciales de cualquier misión espacial, ya que permiten alcanzar los objetivos para los que la misión ha sido concebida y diseñada, mediante la recolección de información de carácter científico que posteriormente se envía a la **Tierra** para su análisis.

Estos instrumentos se instalan en las sondas o vehículos espaciales, los cuales pueden ser de distinto tipo: orbitadores o satélites artificiales, aterrizadores,

o róveres. Las sondas espaciales proporcionan a los instrumentos una estructura soporte para albergarlos y desplazarlos hasta el lugar de análisis. Además, proveen la electricidad o energía mediante paneles solares y baterías, aunque también pueden incorporar fuentes radioactivas, y los sistemas de comunicación consistentes en diversos tipos de antenas para transmitir la información recogida de vuelta a la Tierra.

El primer instrumento espacial, un detector de rayos cósmicos diseñado para medir el entorno de **radiación** en la órbita terrestre, fue lanzado al espacio como carga útil de la misión estadounidense Explorer 1, el 31 de enero de 1958. El experimento, proporcionado por el Dr. James Van Allen de la Universidad Esta-

tal de Iowa, midió un número de rayos cósmicos (partículas subatómicas procedentes del espacio exterior cuya energía es muy elevada debido a su gran velocidad) mucho más bajo de lo esperado ya que se encontraba saturado debido a la fuerte radiación proveniente del cinturón de partículas cargadas y atrapadas por el campo magnético de la Tierra. A estos cinturones de radiación, cuya existencia fue confirmada posteriormente por otro satélite, se les conoce como los cinturones de Van Allen en honor a su descubridor.

Los instrumentos espaciales se clasifican en aquellos diseñados para llevar a cabo la **exploración *in situ*** de planetas, satélites o asteroides, y los de análisis remoto, normalmente operados desde una órbita alrededor de estos. Los ejemplos de instrumentos más utilizados son: cámaras

SPACE INSTRUMENT

A space instrument is a measuring device that is sent into space in order to study a celestial body, be it a planet, satellite, asteroid, **comet**, **star**, **galaxy** or group of the latter.

Space instruments, also known as payloads, are the essential elements of any space mission, since they make it possible to achieve the objectives for which the mission has been conceived and designed, by collecting scientific information that is subsequently sent to **Earth** for analysis.

These instruments are installed on probes or space vehicles, which can be of different types: orbiters or artificial satellites, landers, or rovers. The space probes provide the instruments with a support structure to house them and move them

to the analysis site. In addition, they provide electricity or power through solar panels and batteries, although they can also incorporate radioactive sources, and communication systems consisting of various types of antennas to transmit the collected information back to Earth.

The first space instrument, a cosmic ray detector designed to measure the **radiation** environment in Earth orbit, was launched into space as a payload of the U.S. Explorer 1 mission on January 31, 1958. The experiment, provided by Dr. James Van Allen of Iowa State University, measured a much lower number of cosmic rays (subatomic particles from outer space whose energy is very high due to their high speed) than expected because it was saturated by strong radiation from the belt of charged particles

trapped by the Earth's magnetic field. These radiation belts, whose existence was later confirmed by another satellite, are known as the Van Allen belts in honor of their discoverer.

Space instruments are classified into those designed to carry out *in situ* **exploration** of planets, satellites or asteroids, and those for remote analysis, usually operated from orbit around them. Examples of the most commonly used instruments are: photographic cameras, radiometers, spectrometers, all in different bands of the electromagnetic spectrum and with different technologies, surface radars, ionizing radiation detectors, meteorological stations, etc.

The key parameter in the design of a space instrument is the fulfillment of the

fotográficas, radiómetros, espectrómetros, todos ellos en distintas bandas del espectro electromagnético y con distintas tecnologías, radares de superficie, detectores de radiación ionizante, estaciones meteorológicas, etc.

El parámetro clave en el diseño de un instrumento espacial es el cumplimiento de los requerimientos científicos de medida definidos por la misión. Otros aspectos relevantes son el tamaño, masa y con-

sumo de energía, variables a minimizar dada la escasez de estos recursos en una sonda espacial y el coste por kilogramo y volumen desplazado por los sistemas de lanzamiento. Habitualmente, el diseño de nuevos instrumentos espaciales se encuentra en la vanguardia de las tecnologías de instrumentación, haciendo uso de novedosos sistemas sensoriales, circuitos electrónicos de un alto grado de integración, complejos sistemas ópticos y diseños termomecánicos avanzados.

Lecturas adicionales /Further reading

NASA, *Explorer 1*, [en línea] <<https://explorer1.jpl.nasa.gov/>>.

scientific measurement requirements defined by the mission. Other relevant aspects are size, mass and energy consumption, variables to be minimized given the scarcity of these resources in a space probe and the cost per kilogram and volume displaced by the launch sys-

tems. Typically, the design of new space instruments is at the cutting edge of instrumentation technologies, making use of novel sensory systems, highly integrated electronic circuits, complex optical systems and advanced thermo-mechanical designs.



Figura 35:

Explorer 1, primer satélite estadounidense dotado de un instrumento espacial.

Explorer 1, the first U.S. satellite equipped with a space instrument.

51. INTERACCIÓN ESTRELLA-PLANETA: CLIMA ESPACIAL

La dinámica de los sistemas planetarios supone que se produzcan procesos interactivos entre la **estrella** central y los planetas (ver término **Exoplaneta**) que orbitan a su alrededor. En general, estos fenómenos implican la presencia de los denominados vientos estelares, partículas emitidas desde la parte más externa del astro dominante, y los campos magnéticos de los planetas, de existir. Ello se traduce, en varios cuerpos del **sistema solar**, en la generación de auroras polares.

El **Sol** produce cada segundo $3,828 \times 10^{28}$ julios de energía, consecuencia de la fusión de 600 millones de toneladas de hidrógeno en helio. La fracción que llega a la **Tierra**, situada a unos 150 millones de kilómetros, asciende a 173 petajulios ($1,73 \times 10^{17}$ julios o 173 miles de billones), con variaciones de alrededor de 0,1 % dependiendo de la actividad solar. El espectro electromagnético o conjunto de frecuencias de luz emitidas por el Sol está dominado por

el rango visible, que es el que perciben los seres humanos, con contribuciones significativas de **radiación** ultravioleta e infrarroja, pero también rayos X y radioondas, especialmente durante los eventos de gran actividad estelar.

La región más externa del Sol es la **corona**, una estructura variable que se extiende a distancias de varios millones de kilómetros, con una temperatura entre uno y tres millones de kelvin y bajísimas densidades, equivalentes a una parte en un billón de la correspondiente a la fotosfera, la región en la que se emiten la mayor parte de los fotones (partículas de luz) que vemos. El nombre fue acuñado por el astrónomo español José Joaquín de Ferrer, a raíz de las observaciones solares que realizó en 1806. Los fuertes campos magnéticos del Sol pueden inducir la expulsión súbita de grandes cantidades de partículas cargadas, las denominadas eyecciones de masa coronal (CME, por sus siglas en inglés). Superpuesta a las CME se encuentra el viento solar, formado por partículas atómicas con carga eléctrica: protones e iones más pesados, con carga positiva, y electrones, con carga negati-

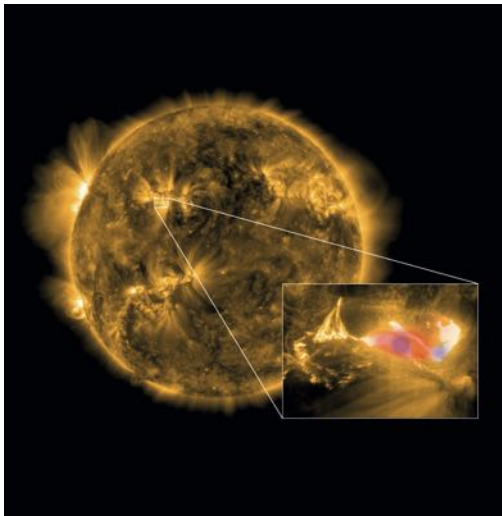


Figura 36:

Erupción solar.

Solar flare.

Detectada por los instrumentos Extreme Ultraviolet Imager (EUI) y X-ray Spectrometer/Telescope (STIX) a bordo de la nave espacial Solar Orbiter.

It was detected by the Extreme Ultraviolet Imager (EUI) and X-ray Spectrometer/Telescope (STIX) instruments aboard the Solar Orbiter spacecraft.

Crédito: ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI & STIX Teams.

STAR-PLANET INTERACTION: SPACE WEATHER

The dynamics of planetary systems involves interactive processes between the central **star** and the planets (see term **Exoplanet**) orbiting around it. In general, these phenomena comprise the presence of the so-called stellar winds, particles

emitted from the outermost part of the dominant star, and the magnetic fields of the planets, if any. This translates, in several bodies of the **solar system**, into the generation of polar auroras.

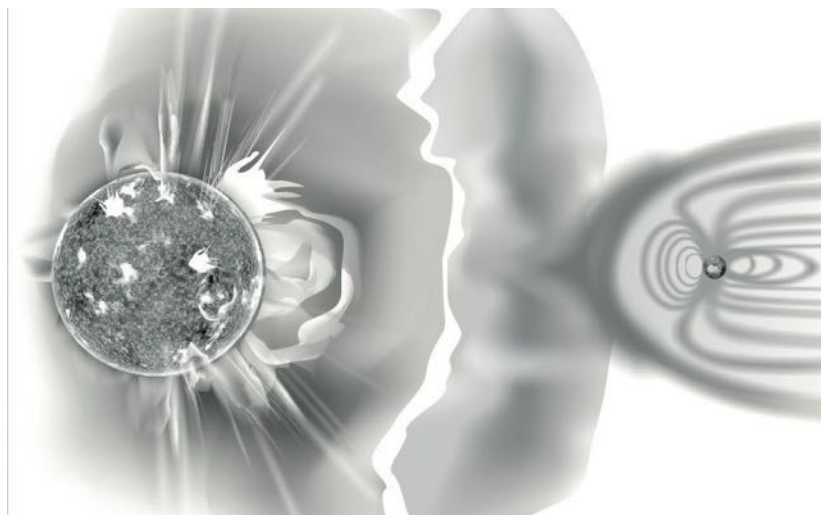


Figura 37:

Interacción estrella-planeta.

Star-planet interaction.

Representación idealizada de la interacción entre una estrella y un planeta, mediante eyecciones de material coronal y el campo magnético. No a escala.

Idealized representation of the interaction between a star and a planet, through ejections of coronal material and the magnetic field. Not to scale.

Crédito D. Barrado.

The **Sun** produces every second 3.828×10^{28} joules of energy, consequence of the fusion of 600 million tons of hydrogen into helium. The fraction that reaches the **Earth**, located about 150 million kilometers away, amounts to 173 petajoules (1.73×10^{17} joules or 173 billion), with variations of about 0.1% depending on solar activity. The electromagnetic spectrum or set of light frequencies emitted by the Sun is dominated by the visible range, which is the range perceived by humans, with significant contributions from ultraviolet and infrared **radiation**, but also X-rays and radio waves, especially during events of high stellar activity.

The outermost region of the Sun is the **corona**, a variable structure extending over distances of several million kilometers, with a temperature between one and three million kelvin and very low densities, equivalent to one part in a tril-

va. Este flujo, inicialmente acelerado por el campo magnético solar, recorre el espacio interplanetario a velocidades entre 100 y 300 km/s.

Los flujos de ondas electromagnéticas y de materia interactúan con un planeta tanto directamente, al incidir sobre la superficie o la **atmósfera** planetaria, de existir, como indirectamente, si hay un campo magnético. En este último caso, las partículas emitidas por el Sol pueden ser deflectadas o atrapadas, gene-

rando estructuras como los cinturones de Van Allen, dos anillos toroidales con límites entre los 500 y 5000 km y 15 000 y 58 000 km, respectivamente. Así, la interacción entre el Sol y la Tierra puede producir perturbaciones de la magnetosfera del planeta (el escudo que nos protege del viento solar), denominadas tormentas geomagnéticas, modificar la estructura y la energía de los cinturones de Van Allen, perturbar la ionosfera o inducir corrientes eléctricas en la superficie de la Tierra.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata. ISBN 978-84-1352-190-9.

BARRADO, D. (2021). *Peligros Cósmicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberón, ISBN-10-8441543518.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

lion of that of the photosphere, the region where most of the photons (particles of light) we see are emitted. The name was coined by the Spanish astronomer José Joaquín de Ferrer, following solar observations he made in 1806. The strong magnetic fields of the Sun can induce the sudden ejection of large quantities of charged particles, the so-called coronal mass ejections (CMEs). Superimposed on CMEs is the solar wind, made up of electrically charged atomic particles: positively charged protons and heavier ions, and negatively charged electrons. This flow, initially accelerated by the solar magnetic field, travels through interplanetary space at speeds between 100 and 300 km/s.

The flows of electromagnetic waves and matter interact with a planet both directly, by impinging on the planetary surface or **atmosphere**, if there is one, and indirectly, if there is a magnetic field. In the latter case, the particles emitted by the Sun can be deflected or trapped, generating structures such as the Van Allen belts, two toroidal rings with limits between 500 and 5000 km and 15,000 and 58,000 km, respectively. Thus, the interaction between the Sun and the Earth can produce disturbances of the planet's magnetosphere (the shield that protects us from the solar wind), called geomagnetic storms, modify the structure and energy of the Van Allen belts, disturb the ionosphere or induce electric currents on the Earth's surface.

52. INTERACCIONES MINERAL-AGUA

El **agua** es esencial para la **vida** tal y como la conocemos, y su función principal es la de hacer de medio donde llevar a cabo todas las reacciones bióticas (es decir, relaciones ambientales entre los organismos vivos) que permiten la existencia de la vida. Además del agua, la energía es necesaria para los seres vivos, que la pueden obtener de otros compuestos o directamente de la luz solar. A nivel de interés astrobiológico, uno de los procesos más interesantes es la **quimiolitotrofia**, o la capacidad de extraer energía directamente de compuestos inorgánicos del ambiente. Esto es así porque estos procesos eliminan los requerimientos más complejos de conseguir, a nivel astrobiológico, como pueden ser la luz directa, la presencia de una **biosfera** (conjunto de formas de vida) desarrollada o la necesidad de estructuras biológicas complejas. Los quimiolitótrofos pueden subsistir en una amplia variedad de ambientes, necesitando solamente agua, una fuente de

carbono, una fuente mineral de energía y otra donde depositar electrones. Las interfases o regiones de intersección mineral-agua surgen entonces como unos de los candidatos astrobiológicos de mayor interés, principalmente por su relativa abundancia.

Estas interfases pueden encontrarse en varios puntos del **sistema solar**. Probablemente fueron abundantes en algunas zonas del **Marte** temprano, donde formaron flujos de agua y lagunas ácidas favorables a la emergencia de vida. Actualmente, estas interfases pueden encontrarse en el fondo de los océanos subsuperficiales de satélites de los planetas gigantes, como Titán, Encélado y Europa (ver **Mundos oceánicos**). Además, es posible que se den también más cerca de las superficies de estos, si hay minerales congelados en la parte inferior de la capa de **hielo**.

Otra área de interés astrobiológico de las interfases mineral-agua es en

la formación de fósiles microbianos, o **estromatolitos**. Estas estructuras se generan a través de la deposición de minerales por parte de organismos quimiolitótrofos, y fueron abundantes en los comienzos de la vida en la **Tierra**. Hoy en día se pueden aun encontrar en algunos ambientes extremos del planeta. La búsqueda de estas estructuras en ambientes favorables fuera de la Tierra, en particular en algunas áreas de Marte, es una de las mejores estrategias a la hora de encontrar evidencia de vida en este planeta. Esto es así porque los estromatolitos, al ser estructuras minerales, son capaces de resistir mucho mejor tanto el paso del tiempo como ataques de otras moléculas o la **radiación**. Muy pocas estructuras biológicas pueden aguantar períodos de tiempo tan largos sin degradarse, por lo que estos fósiles microbianos son de las pocas formas directas de las que se dispone para observar microorganismos ancestrales.

MINERAL-WATER INTERACTIONS

Water is essential for **life** as we know it, and its main function is to act as a medium for all the biotic reactions (i.e., environmental relationships between living organisms) that allow life to exist. In addition to water, energy is necessary for living beings, which can obtain it from other compounds or directly from sunlight. At the level of astrobiological interest, one of the most interesting processes is **chemolithotrophy**, or the ability to extract energy directly from inorganic compounds in the environment. This is because these processes eliminate the most complex requirements to achieve, at the astrobiological level, such as direct light, the presence of a developed **biosphere** (set of life forms) or the need for complex biological structures. Chemolithotrophs can subsist in a wide variety of environments, needing only water, a carbon source, a mineral source of energy, and a source for electron deposition. The interfaces or regions of mineral-water intersection then emerge

as one of the astrobiological candidates of greatest interest, mainly because of their relative abundance.

These interfaces can be found at various points in the **solar system**. They were probably abundant in some areas of early **Mars**, where they formed water flows and acidic lagoons favorable to the emergence of life. Today, these interfaces can be found at the bottom of the subsurface oceans of satellites of the giant planets, such as Titan, Enceladus and Europa (see **Ocean worlds**). In addition, it is possible that they may also occur closer to the surfaces of these, if there are frozen minerals on the underside of the **ice** sheet.

Another area of astrobiological interest of mineral-water interfaces is in the formation of microbial fossils, or **stromatolites**. These structures are generated through the deposition of minerals by chemolithotrophic organisms, and

were abundant in the early days of life on **Earth**. Today they can still be found in some extreme environments on the planet. The search for these structures in favorable off-Earth environments, particularly in some areas of Mars, is one of the best strategies for finding evidence of life on this planet. This is because stromatolites, being mineral structures, are able to resist much better both the passage of time and attacks from other molecules or **radiation**. Very few biological structures can withstand such long periods of time without degrading, so these microbial fossils are among the few direct ways available to observe ancestral microorganisms.

Lecturas adicionales /Further reading

HINMAN, N. W. (2013). "Water-Rock Interaction and Life", *Procedia. Earth and Planetary Science*, Volume 7, pp. 354-359, ISSN 1878-5220,

53. INTERACCIÓN SUELO-ATMÓSFERA

La superficie de un planeta o satélite puede interactuar con su **atmósfera**, de existir, de diversas maneras. En el caso de nuestro planeta, compuesto por cuatro esferas (atmósfera, litosfera, hidrosfera y **biosfera**), se producen diferentes intercambios e interacciones entre ellas que permiten la **vida** en la **Tierra**. La atmósfera es la encargada de devolver el **agua** de lluvia a las zonas con agua líquida (hidrosfera) y proporcionar el calor y la energía necesarios para la descomposición y erosión de las rocas del suelo (litosfera). Durante este proceso, los gases, el calor y la luz solar se utilizan para distintas actividades biológicas (biosfera). A su vez, la superficie refleja la energía del **Sol** de vuelta a la atmósfera. Y, nuevamente, el agua acumulada en lagos, pantanos y pozos se filtra, convirtiéndose en agua subterránea o evaporándose y pasando de

nuevo a la atmósfera, completando así un ciclo en continuo movimiento.

Otro de los planetas más estudiados debido a su cercanía y parecido con la Tierra es **Marte**. La presencia de una atmósfera en Marte ha inducido a una variedad de interacciones suelo-atmósfera en el planeta y ha creado diversas características morfológicas superficiales como remolinos de **polvo** (conocidos por *dust-devils*), dunas o afloramientos estratificados de materiales ricos en arcilla. Estas interacciones están provocadas por diferentes agentes responsables de la **evolución** superficial: el agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y el viento. Su estudio es esencial para evaluar las fuentes potenciales de aerosoles, su cantidad y los flujos de transferencia vertical y latitudinal de gases y aerosoles atmosféricos para mejorar el conocimiento sobre el clima pasado y actual de Marte.

Tras más de 50 años de estudios, se sabe que los ciclos de CO_2 , polvo y H_2O acoplados a los procesos radiativos y dinámicos regulan el clima moderno del planeta. La atmósfera transporta grandes cantidades de polvo que interaccionan con la **radiación** solar e infrarroja, regulando las tasas de calentamiento superficial y atmosférico. Por otro lado, el CO_2 se transporta hacia los polos, donde, debido a las temperaturas mínimas que rondan los 100 grados bajo cero, termina solidificándose y cubriendo los extremos norte y sur del planeta de **hielos** de este compuesto químico. Además, los levantamientos de polvo producidos por procesos eólicos pueden tener grandes implicaciones en la **habitabilidad** del planeta debido al transporte de minerales y al intercambio de nutrientes y fuentes de energía entre la atmósfera y la subsuperficie salina.

SOIL-ATMOSPHERE INTERACTION

The surface of a planet or satellite can interact with its **atmosphere**, if it exists, in different ways. In the case of our planet, composed of four spheres (atmosphere, lithosphere, hydrosphere and **biosphere**), there are different exchanges and interactions between them that allow **life** on **Earth**. The atmosphere is responsible for returning rainwater to areas with liquid **water** (hydrosphere) and providing the heat and energy necessary for the decomposition and erosion of soil rocks (lithosphere). During this process, gases, heat and sunlight are used for various biological activities (biosphere). In turn, the surface reflects the **Sun's** energy back into the atmosphere. And, again, water accumulated in lakes, swamps and wells is filtered, becoming groundwater or evaporating and passing back into the atmosphere, thus completing a continuously moving cycle.

Another of the most studied planets due to its proximity and resemblance to Earth is **Mars**. The presence of an atmosphere on Mars has induced a variety of soil-atmosphere interactions on the planet and has created various surface morphological features such as **dust** devils, dunes or stratified outcrops of clay-rich materials. These interactions are caused by different agents responsible for surface **evolution**: water (H₂O), carbon dioxide (CO₂) and wind. Their study is essential to assess the potential sources of aerosols, their quantity, and the vertical and latitudinal transfer fluxes of atmospheric gases and aerosols to improve knowledge about the past and present climate of Mars.

After more than 50 years of studies, CO₂, dust and H₂O cycles coupled to radiative and dynamical processes are known to regulate the modern climate of the planet. The atmosphere transports large amounts

of dust that interact with solar and infrared **radiation**, controlling surface and atmospheric heating rates. On the other hand, CO₂ is transported towards the poles, where, due to minimum temperatures of around 100 degrees below zero, it ends up solidifying and covering the northern and southern ends of the planet with **ices** of this chemical compound. In addition, the dust lifting produced by wind processes can have major implications for the **habitability** of the planet due to the transport of minerals and the exchange of nutrients and energy sources between the atmosphere and the saline subsurface.

Lecturas adicionales /Further reading

MARTÍNEZ, G. M., NEWMAN, C. N., DE VICENTE-RETORTILLO, A. et al. (2017). "The Modern Near-Surface Martian Climate: A Review of in situ Meteorological Data from Viking to Curiosity". *Space Sci Rev* 212, pp. 295–338.

54. LUCA

LUCA es el acrónimo de Last Universal Common Ancestor, el último antepasado común de todos los seres vivos (los dominios **Bacteria**, **Archaea** y **Eukarya**). Utilizando la metáfora del árbol de la **vida**, LUCA ocuparía la parte más alta de su tronco común antes de la separación en las tres grandes ramas que originaron las bacterias, las arqueas y (posteriormente, por combinación de ambas) los eucariotas (ver figura 38, otras versiones en figuras 7 y 29).

La existencia de un ancestro común de toda la **biodiversidad** fue propuesta inicialmente por Charles R. Darwin cuando, en el último párrafo de su libro *El origen de las especies* (publicado en 1859) sugirió que todas las formas de vida podrían haberse derivado “de un corto número de formas o de una sola”. El propio Darwin retomó esta idea revolucionaria en su libro *La variación de los animales y plantas domesticados*

(de 1868), donde apoyaba “la visión de que pocas formas, o una única forma, hubiera sido creada originalmente, en lugar de en innumerables creaciones milagrosas”.

Gracias a los avances en genética, biología molecular y biotecnología producidos durante el siglo XX, la existencia de LUCA (también llamado cenancestro o progenote en algunos contextos) fue demostrada por Carl R. Woese y sus colaboradores a partir de la década de 1970, analizando comparativamente la secuencia de determinados **genes** en todas las especies conocidas. Desde entonces, algunos autores han propuesto que tal vez se no se debería hablar de un único LUCA sino de varios, ya que el contenido genético basal que dio origen a toda la biodiversidad podría haber estado distribuido entre una comunidad de especies celulares complementarias que intercambiaban genes entre ellas.

En cualquier caso, se asume que LUCA vivió en la **Tierra** en un período acotado entre los 3800 y los 3500 millones de años (Ma), puesto que en rocas de hace unos 3500 Ma ya se han hallado fósiles de microorganismos y también formaciones biomineralizadas (los denominados **estromatolitos**) que sugieren la existencia de cierta biodiversidad. Evidentemente, LUCA se extinguió y no es posible estudiarlo de forma directa. Pero se pueden proponer varias de sus propiedades comparando los organismos actuales a nivel molecular (sus genomas y **metabolismos**) y aplicando la lógica evolutiva, ya que las características que compartimos todas las especies que forman el árbol universal de la vida debieron de estar presentes en LUCA.

Así, se considera que en LUCA ya se habían combinado con éxito las tres características básicas para la vida tal como se conoce: un material genético

LUCA

LUCA is the acronym for Last Universal Common Ancestor, the last ancestor of all living beings (the domains **Bacteria**, **Archaea** and **Eukarya**). Using the metaphor of the tree of **life**, LUCA would be placed at the highest point of their common trunk before the separation into the three branches that gave rise to bacteria, archaea and (later on, by combination of both) eukaryotes (figure 38, other version in figures 7 and 29).

The existence of a common ancestor of all **biodiversity** was first proposed by Charles R. Darwin when, in the last paragraph of his book *On the Origin of Species* (published in 1859), he suggested that all forms of life could have “been originally breathed into a few forms or into one”. Darwin himself took up this revolutionary idea in his book *The Variation of Animals and Plants Under Domestication* (1868), where he supported “the view of a few forms, or of only one form,

having been originally created, instead of innumerable miraculous creations”.

Thanks to the advances in genetics, molecular biology and biotechnology during the 20th century, the existence of LUCA (also called cenancestor or progenote in some contexts) was demonstrated by Carl R. Woese and his collaborators starting in the 1970s, by comparatively analyzing the sequence of certain **genes** in all known species. Since then, some authors have proposed that perhaps one should not speak of a single LUCA but of several ones, since the genetic content that gave rise to all biodiversity could have been distributed among a community of complementary cellular species that exchanged genes among them.

In any case, it is assumed that LUCA lived on **Earth** in a period between 3800 and 3500 million years (Ma) ago, because fossils of microorganisms and also

biomineralized formations (the so-called **stromatolites**) that suggest the existence of a certain degree of biodiversity have already been found in rocks from about 3500 Ma ago. Obviously, LUCA became extinct and it is not possible to study it directly. But we can postulate several of its basic features by comparing current organisms at the molecular level (their genomes and **metabolisms**) and applying evolutionary logic, since the features shared by all the species that form the universal tree of life must have been present in LUCA.

Thus, it is considered that LUCA had already successfully combined the three basic characteristics for life as we know it: a genetic material capable of producing copies of itself, a compartment defined by a lipid membrane, and a metabolism that captures and transforms matter and energy from its environment. LUCA was unicellular and lacked a cell nucleus (i.e.,

para producir copias de sí mismo, un compartimento definido por una membrana lipídica, y un metabolismo para captar y transformar la materia y energía de su entorno. LUCA era unicelular y no tenía núcleo (es decir, mostraba organización procariótica) y su genoma era de **ADN**, a partir del cual se producía el flujo de información genética característico de toda la vida posterior: **ADN**→**ARN**→**proteínas**.

Empleando diversos modelos computacionales de **filogenia** molecular, y también analizando los genomas bacterianos más cortos conocidos, se ha propuesto que el genoma de LUCA contendría entre 200 y 1000 genes. En paralelo, desde los ámbitos de la **química prebiótica** de sistemas y de la biología sintética se está tratando de construir sistemas muy sencillos capaces de autorreproducirse y evolucionar, lo que podría sugerirnos mecanismos tal vez explorados por la naturaleza en su camino desde la química prebiótica hasta LUCA.

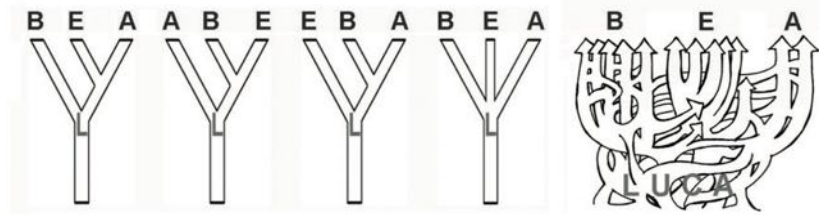


Figura 38:

LUCA y el árbol de la vida.

LUCA and the tree of life.

Representaciones esquemáticas de las posibles topologías del árbol universal de la vida, mostrando las ramas de bacterias (B), arqueas (A) y eucariotas (E) surgidas a partir de LUCA.

En el último panel, basado en las ideas de William F. Doolittle y colaboradores, se muestra una visión de LUCA como una comunidad de especies que comparten genes, dentro de una visión más compleja y a la vez realista del árbol (o, mejor, arbusto) de la vida.

Adaptado de Briones et al. (2015).

Schematic representations of the possible topologies of the universal tree of life, showing the branches of bacteria (B), archaea (A) and eukaryotes (E) diversified from LUCA.

The last panel, based on the ideas of William F. Doolittle and collaborators, shows a view of LUCA as a community of species sharing genes, within a more complex yet realistic view of the tree (or, better, bush) of life. Adapted from Briones et al. (2015).

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C., FERNÁNDEZ SOTO, A., BERMÚDEZ DE CASTRO, J. M. (2015). *Orígenes. El universo, la vida, los humanos*. Ed. Crítica, Barcelona.

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

POOLE, A. M. (2022). *Reconstructing the Last Universal Common Ancestor. In Prebiotic Chemistry and the Origin of Life*, Ed. Springer, pp 205–226.

RUIZ-MIRAZO, K., BRIONES, C., DE LA ESCOSURA, A. (2014). “Prebiotic systems chemistry: new perspectives for the origins of life”. *Chemical Reviews* 114: 285-366.

XAVIER, J. C., GERHARDS, R. E., WIMMER, J. L. E., BRUECKNER, J., TRIA, F., MARTIN, D. K., WILLIAM F. (2021). “The metabolic network of the last bacterial common ancestor”. *Communications Biology* 4: article 413.

WOESE, C. (1998). “The universal ancestor”. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95: 6854-6859.

it showed prokaryotic organization). It had a **DNA** genome, from which the flow of genetic information was the same than in all subsequent life: DNA→**RNA**→**proteins**.

Using various computational models of molecular **phylogeny**, and also analyzing the shortest known bacterial genomes, it has been proposed that the genome of LUCA would contain between 200 and 1000 genes. In parallel, researchers in the fields of prebiotic systems chemistry and synthetic biology are trying to build very simple systems capable of self-replication and evolution, which could suggest mechanisms perhaps explored by nature on its way from prebiotic chemistry to LUCA.

55. MARS 2020, MISIÓN DE EXPLORACIÓN DE MARTE

El 18 de febrero de 2021 aterrizó en el **cráter** marciano Jezero el vehículo robótico Perseverance. Este róver es el elemento explorador de la misión Mars 2020 de NASA, cuyo objetivo principal es la búsqueda de signos de **vida** antigua microbiana y la recolección de muestras de roca y **regolito**, para un posible traslado a la **Tierra** (ver término **Muestras planetarias**); todo ello constituye la primera etapa del ambicioso programa Mars Sample Return (MSR, Retorno de muestras de **Marte**).

Tras el estudio del entorno de **habitabilidad** llevado a cabo por las misiones anteriores, la NASA persigue con este robot dar un paso más en la búsqueda de vida fuera de la Tierra, además de allanar el camino para las futuras expediciones humanas a Marte.

En línea con los objetivos del Programa de **Exploración** de Marte (MEP), el vehículo explorador Perseverance tiene entre sus objetivos científicos principales: la identificación de los entornos

pasados capaces de soportar la vida microbiana; la búsqueda de signos de una posible vida microbiana pasada en esos entornos habitables, particularmente en rocas singulares con alta capacidad de preservación a lo largo del tiempo; recogida y almacenamiento de muestras de roca y regolito, que más tarde depositará sobre la superficie para que alguna misión futura las recupere y las traiga a la Tierra para su estudio; y la prueba de tecnología esencial de apoyo y soporte de las futuras misiones tripuladas (como la producción de oxígeno a partir del CO₂ atmosférico, la identificación de recursos necesarios como el **agua** subterránea, la mejora de técnicas de aterrizaje, o la caracterización del clima y el **polvo** que podrían afectar a los futuros astronautas que vivan y trabajen en Marte).

Para cubrir esos objetivos, el vehículo robótico explorador cuenta con siete instrumentos científicos de última generación para adquirir información sobre la geología, la **atmósfera**, las condiciones ambientales y las posibles biofirmas:

- MastCam-Z, desarrollado por la Universidad Estatal de Arizona en EE. UU., un sistema de cámaras avanzado con capacidad de imagen panorámica, estereoscópica y de zoom. Con este instrumento, Perseverance podrá estudiar y determinar la mineralogía de la superficie, contribuyendo a las operaciones diarias del vehículo.
- **MEDA** (Mars Environmental Dynamics Analyzer), desarrollado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, en España, consistente en un conjunto de sensores que proporcionan medidas regulares de la temperatura a distintas alturas, velocidad y dirección del viento, presión, humedad relativa, entorno de **radiación** ultravioleta (UV), visible e Infrarroja (IR), y tamaño y forma del polvo.
- MOXIE (Mars Oxygen ISRU Experiment), desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, en EE. UU. Se trata de un demostrador

MARS 2020, MARS EXPLORATION MISSION

On February 18, 2021, the robotic rover Perseverance landed in the Martian **crater** Jezero. This rover is the explorer element of NASA's Mars 2020 mission, whose main objective is to search for signs of ancient microbial **life** and to collect rock and **regolith** samples for possible transfer to **Earth** (see **Planetary samples**); this is the first stage of the ambitious **Mars** Sample Return (MSR) program.

Following the study of the **habitability** environment carried out by the previous missions, NASA aims with this robot to take a further step in the search for life beyond Earth, as well as to pave the way for future human expeditions to Mars.

In line with the objectives of the Mars **Exploration** Program (MEP), the Perseverance rover has among its main scientific goals: the identification of past environments capable of supporting microbial life; the search for signs of possible past microbial life in those habitable environments, particularly in unique

rocks with high capacity for preservation over time; collection and storage of rock and regolith samples, which will later deposit on the surface for some future mission to retrieve and bring back to Earth for study; and testing of essential technology to support and support future manned missions (such as producing oxygen from atmospheric CO₂, identifying necessary resources such as ground **water**, improving landing techniques, or characterizing weather and **dust** that could affect future astronauts living and working on Mars).

To meet these objectives, the robotic rover is equipped with seven state-of-the-art scientific instruments to acquire information about the geology, **atmosphere**, environmental conditions and potential bio-signatures:

- MastCam-Z, developed by Arizona State University in the USA, an advanced camera system with panoramic, stereoscopic and zoom imaging capabilities. With this instrument,

Perseverance will be able to study and determine the mineralogy of the surface, contributing to the daily operations of the rover.

- **MEDA** (Mars Environmental Dynamics Analyzer), developed by the Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, at the Centro de Astrobiología, in Spain, consisting of a set of sensors that provide regular measurements of temperature at different altitudes, wind speed and direction, pressure, relative humidity, ultraviolet (UV), visible and infrared (IR) **radiation** environment, and dust size and shape.
- **MOXIE** (Mars Oxygen ISRU Experiment), developed by the Massachusetts Institute of Technology in the USA. This is a technology demonstrator for producing oxygen from Martian atmospheric carbon dioxide.
- **PIXL** (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry), developed by the Jet Propulsion Laboratory in the USA,

tecnológico para producir oxígeno a partir del dióxido de carbono atmosférico marciano.

- PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry), desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory en EE. UU., consistente en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X y una cámara de alta resolución para estudiar la composición elemental a escala milimétrica y submilimétrica de los materiales superficiales.
- RIMFAX (Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment), desarrollado por el Instituto de Investigación de la Defensa noruego. Consiste en un radar de penetración en el subsuelo para estudiar la estructura geológica bajo la superficie a escalas centimétricas.
- SHERLOC (Scanning Habitable Environments with Raman and

Luminescence for Organics and Chemicals), desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory en EE. UU., consistente en espectrómetro UV Raman que estudia la mineralogía y los compuestos orgánicos a escala milimétrica y submilimétrica.

- SUPERCAM, desarrollado por el Laboratorio Nacional de Los Álamos en EE. UU. y el Centro Nacional de Estudios Espaciales francés, y que proporciona imágenes y análisis espectrométricos para estudiar la composición química y mineralógica, permitiendo detectar la presencia de compuestos orgánicos en las rocas y regolito, a distancia.

Además de estos instrumentos, la misión cuenta con el pequeño helicóptero marciano Ingenuity, un dron autónomo diseñado para probar, por primera vez en la historia, el vuelo motorizado en la delgada atmósfera marciana.

consisting of an X-ray fluorescence spectrometer and a high-resolution camera to study the elemental composition at millimeter and submillimeter scales of surface materials.

- RIMFAX (Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment), developed by the Norwegian Defense Research Institute. It consists of a subsurface penetrating radar to study the geological structure beneath the surface at centimeter scales.
- SHERLOC (Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals), developed by the Jet Propulsion Laboratory in the USA, consisting of a

UV Raman spectrometer that studies mineralogy and organic compounds at millimeter and submillimeter scales.

- SUPERCAM, developed by the Los Alamos National Laboratory in the USA and the French Centre National d'Etudes Spatiales, which provides images and spectrometric analysis to study the chemical and mineralogical composition, allowing to detect the presence of organic compounds in rocks and regolith, at a distance.

In addition to these instruments, the mission includes the small Martian helicopter Ingenuity, an autonomous drone designed to test, for the first time in history, powered flight in the thin Martian atmosphere.

56. MARTE

Marte es el cuarto planeta del **sistema solar** por su cercanía al **Sol**, y el último de los planetas interiores, con la mitad de tamaño que la **Tierra**, y aproximadamente 1/3 de su gravedad. Es un planeta rocoso que tiene una estructura interna bien diferenciada: una superficie sólida alterada por volcanes, impactos de **meteoritos**, viento, reacciones químicas y movimientos de la corteza durante millones de años; y una tenue pero existente **atmósfera**. El aspecto de su superficie es rojizo, debido fundamentalmente a la oxidación de los minerales de hierro presentes en el suelo. Posee dos pequeños satélites, denominados Fobos y Deimos.

Orbita alrededor del Sol a una distancia media de 228 millones de kilómetros, tardando aproximadamente 687 días terrestres en completar un año marciano (1,88 años terrestres). Su día, es decir, una rotación completa alrededor de sí mismo, dura 24 horas, 39 minutos y 35 segundos, lo que facilita la operación de los vehículos que actualmente se encuentran explorando el planeta. Los días marcianos se denominan *soles*, para así

poder distinguirlos de los análogos terrestres.

El ángulo de rotación de su eje es de 25 grados (similar a los 23,5 grados del eje terrestre), lo que propicia la consecución de estaciones hasta cierto punto parecidas a las terrestres. El planeta también posee casquetes polares, volcanes (la montaña más alta del sistema solar se encuentra en Marte: el Monte Olimpo, que tiene una altura de unos 22 km y una base de 600 km de diámetro), cañones y un clima muy activo.

Actualmente, su delgada atmósfera está compuesta en un 96 % por dióxido de carbono (CO₂) y, bastante minoritariamente, por argón (Ar), nitrógeno molecular (N₂) y marginalmente por oxígeno y vapor de **agua**.

Aunque anteriormente el planeta rojo fue muy observado desde la Tierra con telescopios (también en la actualidad), desde 1960 se han sucedido 48 misiones (de las cuales solo 25 han resultado exitosas) para estudiar su superficie,

atmósfera e interior con sobrevuelos, orbitadores y elementos exploradores de superficie.

Marte es un mundo desértico, frío y polvoriento, con una atmósfera equivalente en densidad a la de la Tierra a 40 km de altura. No obstante, se han encontrado evidencias de que hace varios miles de millones de años el planeta fue mucho más cálido, estuvo cubierto parcialmente por agua líquida que fluía por su superficie y disponía de una atmósfera más densa. Por tanto, si bien en la actualidad la superficie de Marte no puede soportar **vida** similar a la terrestre, a través de las últimas misiones se ha podido constatar que el Marte de hace unos 4000-3700 millones de años albergó unas condiciones propicias para que la vida pudiera haber surgido. Las misiones de **exploración** actuales se plantean como objetivo principal determinar el potencial de **habitabilidad** del planeta y si la vida pudo haber emergido en ese entorno, de forma similar a como ya había surgido en la Tierra en ese momento.

MARS

Mars is the fourth planet in the **solar system** in terms of its proximity to the **Sun**, and the last of the inner planets, with half the size of the **Earth**, and approximately 1/3 of its gravity. It is a rocky planet with a distinct internal structure: a solid surface altered by volcanoes, **meteorite** impacts, wind, chemical reactions and crustal movements over millions of years; and a tenuous but existing **atmosphere**. The appearance of its surface is reddish, mainly due to the oxidation of iron minerals present in the soil. It has two small satellites, named Phobos and Deimos.

It orbits the Sun at an average distance of 228 million kilometers, taking approximately 687 Earth days to complete a Martian year (1.88 Earth years). Its day, that is, a complete rotation around itself, lasts 24 hours, 39 minutes and 35 seconds, which facilitates the operation of the vehicles that are currently exploring the planet. Martian days are called sols, in order to distinguish them from their terrestrial analogues.

The angle of rotation of its axis is 25 degrees (similar to the 23.5 degrees of

the terrestrial axis), which favors the achievement of seasons to some extent similar to the terrestrial ones. The planet also has polar ice caps, volcanoes (the highest mountain in the solar system is on Mars: Mount Olympus, which has a height of about 22 km and a base of 600 km in diameter), canyons and a very active climate.

At present, its thin atmosphere is composed of 96% carbon dioxide (CO₂) and, rather sparsely, argon (Ar), molecular nitrogen (N₂) and marginally oxygen and **water** vapor.

Although the red planet was previously observed from Earth with telescopes (also today), since 1960 there have been 48 missions (of which only 25 have been successful) to study its surface, atmosphere and interior with flybys, orbiters and surface explorer elements.

Mars is a desert world, cold and dusty, with an atmosphere equivalent in density to that of Earth at 40 km altitude. However, evidence has been found that several billion years ago the planet was

much warmer, was partially covered by liquid water flowing across its surface, and had a denser atmosphere. Therefore, although today the surface of Mars cannot support **life** similar to that on Earth, recent missions have shown that the Mars of about 4000-3700 million years ago had conditions conducive to the emergence of life. The main objective of current **exploration** missions is to determine the **habitability** potential of the planet and whether life could have emerged in that environment, similar to the way it had already emerged on Earth at that time.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2008). "La Terra y Mart: besons o germanastres", *Omnis Cellula*, Revista Societat Catalana de Biologia, diciembre.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

57. MARTE, REGIONES ESPECIALES DE MARTE

Es necesario evitar tanto que se afecte a la posible **vida** nativa de otros planetas como contaminarlos con especies externas que las desplace y cambien sus condiciones geológicas originales y que aún están por estudiar. Las zonas de **Marte** que reúnan las condiciones para que la vida terrestre pueda proliferar, así como con alto potencial para que se pueda encontrar organismos vivos de origen marciano, deben tratarse por tanto con especial cuidado. Para esto existen las medidas de **protección planetaria**, que velan por evitar que se envíen sondas con contaminación biológica, pero también durante las operaciones de estas misiones se toman especiales precauciones cuando sus actividades (como el calor que desprenden sus baterías) generen estas condiciones de manera artificial. Cuando próximas **misiones planetarias** destinadas a otros cuerpos planetarios puedan suponer riesgos

similares se definirán en ellos también regiones de especial protección.

Dentro de las medidas de protección planetaria definidas por el Comité de Investigación Espacial (COSPAR, Committee on Space Research) del Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU, International Council for Science) se han definido las Regiones Especiales. Se definen como tales aquellas en las que las temperaturas puedan exceder los $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ y que presenten una actividad del **agua** de al menos 0,5 (escala de 0 a 1 con valor mínimo en 0 y máximo en 1). Debido a que el estudio de los posibles ecosistemas marcianos está en continuo desarrollo, esta definición se revisa cada pocos años, habiendo añadido después de su definición la restricción de presencia de metano, ya que este puede facilitar la actividad biológica e incluso tener su origen en ella.

Las misiones de la NASA y la ESA tienen restringida el aterrizaje y la entrada a estas regiones, al igual que deben evitar crearlas como consecuencia de sus actividades. Existe cierta controversia con estas regiones protegidas, dado que precisamente son las zonas que tienen más interés para su estudio. Sin embargo, su definición no prohíbe su entrada, sino que pretende que se tenga especial cuidado, tomando las medidas necesarias para asegurar que permanezcan libres de contaminación.

Ha habido múltiples candidatos sin confirmar a Regiones Especiales, denominadas Regiones Inciertas (*uncertain*). Están los *gullies* o torrenteras (ver término **Marte, torrenteras**), las líneas recurrentes en pendiente, cuevas y zonas por debajo de 5 metros de profundidad, así como sitios con posible actividad hidrotermal, sísmica o hídrica de cualquier

MARS, SPECIAL REGIONS OF MARS

It is necessary to avoid both affecting possible native **life** on other planets and contaminating them with external species that displace them and change their original geological conditions, which have yet to be studied. The areas of **Mars** that meet the conditions for terrestrial life to proliferate, as well as with a high potential for finding living organisms of Martian origin, must therefore be treated with special care. **Planetary protection** measures are in place to prevent probes with biological contamination from being sent out, but also during the operations of these missions special precautions are taken when their activities (such as the heat given off by their batteries) artificially generate these conditions. When future planetary missions to other planetary bodies may pose similar risks, special protection regions will also be defined there.

Within the planetary protection measures defined by the Committee on Space Research (COSPAR) of the International Council for Science (ICSU), Special Regions have been defined. Special Regions are defined as those where temperatures may exceed $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ and have a **water** activity of at least 0.5 (scale from 0 to 1 with a minimum value of 0 and a maximum of 1). Because the study of possible Martian ecosystems is in continuous development, this definition is revised every few years, having added after its definition the restriction of the presence of methane, since this can facilitate biological activity and even have its origin in it.

NASA and ESA missions are restricted from landing in and entering these regions, and must avoid creating them as a result of their activities. There is some controversy with these protect-

ed regions, since they are precisely the areas that are of most interest for study. However, their definition does not prohibit their entry, but rather intends that special care be taken to ensure that they remain free of contamination.

There have been multiple unconfirmed candidates for Special Regions, called Uncertain Regions. These include gullies (see term **Mars, gullies**), recurrent slope lines, caves and areas below 5 meters-depth, as well as sites with possible hydrothermal, seismic or hydrologic activity of any kind. Due to the limited amount of data available for most of these regions it has not yet been possible to define if any of them meet the characteristics to be catalogued as Special Regions, but they should be treated as such until their characteristics are confirmed.

tipo. Debido a la escasa cantidad de datos disponibles para la mayoría de estas regiones no se ha podido definir aún ninguna que cumpla las características para ser catalogada como Región Especial, pero deben ser tratadas como tales hasta que se confirmen sus características.

A día de hoy no ha sido posible confirmar la existencia de ningún lugar en la superficie de Marte que sea habitable (ver **Habitabilidad**) para la vida terrestre. Aun se cree que puede haber agua

líquida en la subsuperficie, pero algunas de las formas que anteriormente se consideraban húmedas han sido explicadas por procesos secos. También se ha discutido que aquellas regiones provocadas por las actividades de una misión (Regiones Especiales inducidas) serán temporales y estarán suficientemente aisladas para que no puedan suponer un peligro efectivo, incluso en el caso de las misiones humanas. Sigue siendo un tema polémico que se irá redefiniendo en los próximos años.



Figura 39:

Regiones especiales de Marte.

Special Regions of Mars.

Diagrama conceptual para explicar las posibles regiones especiales tanto inducidas como naturales.

Conceptual diagram to explain the possible special regions, both induced and natural.

Crédito: Adaptado de Rummel et al 2014.

To date it has not been possible to confirm the existence of any place on the surface of Mars that is habitable (see **Habitability**) for terrestrial life. It is still believed that there may be liquid water in the subsurface, but some of the forms that were previously considered wet have been explained by dry processes. It

has also been argued that those regions triggered by mission activities (Induced Special Regions) will be temporary and sufficiently isolated so that they cannot pose an effective hazard, even in the case of human missions. This remains a contentious issue that will be redefined in the coming years.

Lecturas adicionales /Further reading

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

RUMMEL, J. D., BEATY, D. W., JONES, M. A., et al. (2014). *A new analysis of Mars "special regions": findings of the second MEPAG Special Regions Science Analysis Group (SR-SAG2)*.

RETTBERG, P., ANESIO, A. M., BAKER, V. R., et al. (2016). "Planetary protection and Mars special regions—a suggestion for updating the definition". *Astrobiology*, 16(2), pp. 119-125.

SHOTWELL, R. F., HAYS, L. E., BEATY, D. W., et al. (2019). "Can an Off-Nominal Landing by an MMRTG-Powered Spacecraft Induce a Special Region on Mars When No Ice Is Present?". *Astrobiology*, 19(11), pp. 1315-1338.

58. MARTE, TORRETERAS O CÁRCAVAS

Desde que se observaron estos pequeños canales en las paredes de algunos **cráteres de Marte**, han sido unas de las imágenes más utilizadas para ilustrar la posibilidad de **agua** líquida en la superficie actual del planeta. Estas formaciones son muy parecidas a las cárcavas o torrenteras terrestres, de las que toman su nombre en inglés, y que en efecto son causadas por la circulación de agua líquida. Sin embargo, según ha evolucionado su estudio, la comunidad científica ha ido decantándose con un origen más relacionado con el **hielo**, posiblemente compuesto por dióxido de carbono (CO₂).

Las primeras imágenes con suficiente resolución para observar estas morfologías fueron tomadas por la misión de la NASA Mars Global Surveyor. En ellas se observaban canales excavados en las

paredes de una gran cantidad de cráteres, con una ramificación de canales en su parte superior y depósitos en su base, otorgándoles forma de reloj de arena. Al mostrarse relativamente frescos y no afectados por cráteres, se los consideró muy modernos. Su orientación sistemática apuntando hacia los polos sugería que estaban relacionarlos con la solana (la ladera que recibe mayor insolación) y procesos recientes que implicarían el fundido de hielo en agua líquida.

Conforme se han ido estudiando nuevos datos y técnicas, se ha descubierto que muchos estaban en pendientes demasiado suaves para lo que se esperaría de un material que fluye arrastrado por agua de deshielo, incluso aunque se tratase de dióxido de carbono en estado líquido. También se ha propuesto la posibilidad de que su formación estuviera

relacionara con agua de acuífero. Pero, aunque muchos parecen surgir de una altura similar y cumplir las condiciones para ello, otros tantos desafían esta explicación. El deshielo de cúmulos de nieve también parece una explicación para muchos casos, apoyada por las condiciones glaciares que se originarían en los cambios en el eje de rotación que ha sufrido el planeta a lo largo de su historia.

Los nuevos datos han permitido detectar cambios en estas formaciones y se sabe que algunas de ellas se están creando actualmente, sin cumplirse las condiciones en las superficies compatibles con que fluya el agua líquida. La hipótesis actual es que el mecanismo de formación se basa en ciclos de congelación-sublimación de dióxido de carbono, que pasaría de estado sólido a gaseoso directamente.

MARS: GULLY, GULLIES

Ever since these small channels were observed on the walls of some **craters** on **Mars**, they have been one of the most widely used images to illustrate the possibility of liquid **water** on the present-day surface of the planet. These formations are very similar to terrestrial gullies or torrents, from which they take their name, and which are indeed caused by the circulation of liquid water. However, as their study has evolved, the scientific community has come to believe that their origin is more related to **ice**, possibly composed of carbon dioxide (CO₂).

The first images with sufficient resolution to observe these morphologies were taken by the NASA Mars Global Surveyor mission. They showed channels carved into the walls of a large number of craters, with channel branching at the top and deposits at the

base, giving them an hourglass shape. Being relatively fresh and not affected by craters, they were considered very modern. Their systematic orientation towards the poles suggested that they were related to the sunnier slope (the slope that receives the most sunshine) and recent processes involving the melting of ice into liquid water.

As they have been studied with new data and techniques, it has been found that many were on slopes too gentle for what would be expected for a material transported by meltwater, even if it was liquid carbon dioxide. The possibility that their formation was related to springs has also been proposed. But, although many seem to arise from a similar height and meet the conditions for this, many others defy this explanation. The melting of snow clusters also seems to be an explanation for many cases,

Lecturas adicionales /Further reading

DICKSON, J. L., HEAD, J. W., & KRESLAWSKY, M. (2007). "Martian gullies in the southern mid-latitudes of Mars: Evidence for climate-controlled formation of young fluvial features based upon local and global topography". *Icarus*, 188(2), 315-323.

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

HELDMANN, J. L., & MELLON, M. T. (2004).

"Observations of Martian gullies and constraints on potential formation mechanisms". *Icarus*, 168(2), 285-304.

PELLETIER, J. D., KOLB, K. J., MCEWEN, A. S., & Kirk, R. L. (2008). "Recent bright gully deposits on Mars: Wet or dry flow?". *Geology*, 36(3), 211-214.

PILORGET, C., & FORGET, F. (2016). "Formation of gullies on Mars by debris flows triggered by CO₂ sublimation". *Nature Geoscience*, 9(1), 65-69.

La mezcla del sustrato con el gas haría que temporalmente esta se comportara como un fluido.

Aunque la descongelación estacional de hielo seco (CO_2 en estado sólido) parece explicar las observaciones de los *gullies* más recientes, puede que otras formacio-

nes sí tengan su origen en el flujo de agua líquida en el pasado por alguno de los mecanismos previamente propuestos, ya que algunas de ellas no cumplen tampoco las condiciones compatibles con esa explicación seca. De ser así, podrían ser zonas de interés para la búsqueda de signos de **vida** pasada.

Figura 40:

Imagen de varios *gullies* (torreteras o cárcavas).

Image of several *gullies*.

Estos se encuentran en la pared de un pequeño cráter al norte de Argyre, Marte. Imagen en color y alta resolución proveniente de HiRISE (ESP_011727_1490).

These are found in the wall of a small crater north of Argyre, Mars. High-resolution color image from HiRISE (ESP_011727_1490).

Crédito: NASA/JPL-Caltech/UArizona.



supported by the glacial conditions that would originate in the changes in the rotation axis that the planet has undergone throughout its history.

New data have made it possible to detect changes in these formations and it is known that some of them are currently being created, without meeting the conditions on the surface compatible with the flow of liquid water. The current hypothesis is that the formation mechanism is based on freeze-sublimation cycles of carbon dioxide, which would change from solid to gaseous state direct-

ly. The mixing of the substrate with the gas would temporarily cause the mixture to behave as a fluid.

Although the seasonal thawing of dry ice (CO₂ in solid state) seems to explain the observations of the most recent gullies, it may be that other formations do have their origin in the flow of liquid water in the past by one of the previously proposed mechanisms, since some of them do not meet the conditions compatible with this dry explanation. If so, they could be areas of interest for the search of signs of past **life**.

59. MEDA, INSTRUMENTO EN MARS 2020

El rover Perseverance aterrizó en febrero de 2021 en la superficie de **Marte**. A bordo se encuentra el instrumento MEDA (Mars Environmental Dynamics Analyzer), una estación medioambiental cuyo diseño e implementación se ha desarrollado y coordinado en el Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA.

MEDA consiste en un conjunto de sensores que proporcionan medidas regulares de un conjunto de variables ambientales con la finalidad de ayudar a entender las condiciones existentes en la superficie y en la capa de la **atmósfera** justo por encima de la superficie, conocida como capa límite marciana.

El instrumento tiene como objetivos científicos principales:

- caracterizar las propiedades físicas y ópticas de los aerosoles atmosféricos, así como la abundancia de partículas, su distribución de tamaños, su forma y su relación con los ciclos meteorológicos;

- entender la suspensión del **polvo** marciano y su relación con el viento local;
- investigar los flujos de energía y **agua** entre la superficie y las capas bajas de la atmósfera en el entorno del rover;
- caracterizar los ciclos anuales de **radiación** solar;
- correlacionar los datos obtenidos con la estación con los resultados simulados con modelos meteorológicos.

Estos objetivos se alcanzan gracias al funcionamiento de los sensores que integran el instrumento MEDA:

- cinco sensores de temperatura del aire (Air Temperature Sensor, ATS), que nos proporcionan medidas de temperatura a distintas alturas del rover;
- un sensor de humedad (Humidity Sensor, HS) que proporciona la humedad relativa del ambiente;

- un sensor de presión (Pressure Sensor, PS) insertado en la carcasa del rover;
- un sensor de radiación ultravioleta-visible formado por varios fotodiodos y una cámara (SkyCam) que nos indica el tamaño y la forma del polvo (Radiation and Dust Sensor, RDS), siendo este el sensor más innovador de la estación con respecto a las misiones anteriores;
- un sensor de radiación térmica infrarroja y temperatura del suelo (Thermal Infrared Radiation Sensor, TIRS), compuesto por un conjunto de termopilas;
- un sensor de Viento (Wind Sensor, WS) que mide velocidad y dirección del viento en 360 grados.

Desde su aterrizaje en la superficie de Marte, un equipo de científicos e ingenieros de distintas disciplinas preparan la planificación de las actividades a dia-

MEDA, MARS 2020 INSTRUMENT

The rover Perseverance landed in February 2021 on the surface of **Mars**. On board is the MEDA (Mars Environmental Dynamics Analyzer) instrument, an environmental station whose design and implementation has been developed and coordinated at the Center for Astrobiology (CAB), CSIC-INTA.

MEDA consists of a set of sensors that provide regular measurements of a set of environmental variables in order to help understand the conditions existing on the surface and in the layer of the **atmosphere** just above the surface, known as the Martian boundary layer.

The instrument has as its main scientific objectives:

- characterize the physical and optical properties of atmospheric aerosols, as well as the abundance of particles, their size distribution, their shape and their relationship to meteorological cycles;
- to understand the suspension of Martian **dust** and its relation to the local wind;
- investigate the energy and **water** fluxes between the surface and lower atmospheric layers in the rover environment;
- characterize the annual solar **radiation** cycles;
- correlate the data obtained with the station with the results simulated with meteorological models.

These objectives are achieved thanks to the performance of the devices that make up the MEDA instrument:

- five air temperature sensors (Air Temperature Sensor, ATS), which provide temperature measurements at different heights of the rover;
- a Humidity Sensor (HS), which provides the relative humidity of the environment;
- a Pressure Sensor (PS) inserted in the rover housing;
- a ultraviolet-visible radiation sensor consisting of several photodiodes and a camera (SkyCam) that indicates the size and shape of the dust (Radiation

rio en el marco de las operaciones de la misión Perseverance. Los sensores del instrumento MEDA registran medidas constantes cada segundo y a lo largo de cada sol marciano (cada rotación completa del planeta sobre sí mismo). Con la cámara Skycam se toman distintas imágenes tanto para caracterizar la radiación y el polvo como para la calibración de la cámara. Así mismo, este equipo también revisa a diario los datos recibidos para evaluar el estado del instrumento y realizar el procesamiento de estos para convertirlos en medidas ambientales para su uso en la actividad científica. La correcta coordinación de este equipo multidisciplinar para realizar estas actividades es clave para que la información que proporciona el instrumento ayude a toda la misión Mars 2020 a lograr sus objetivos.

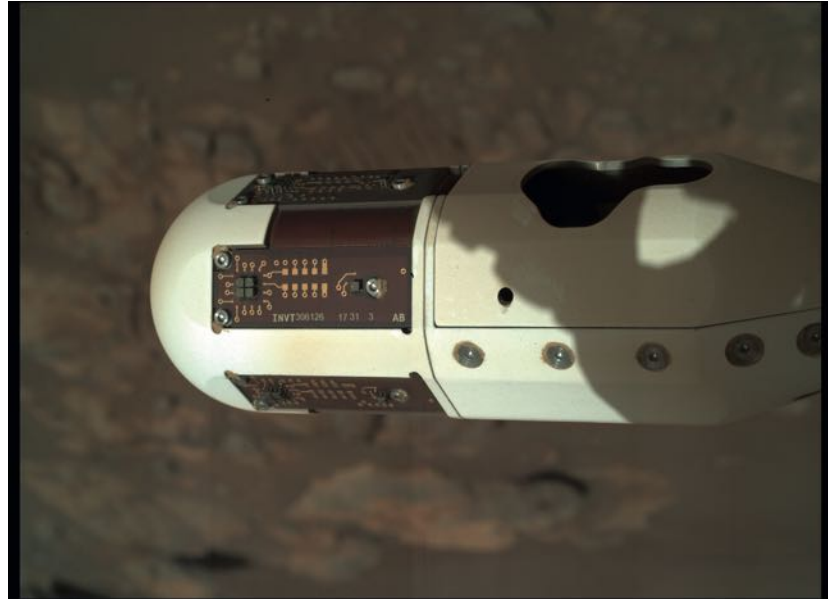


Figura 41:

MEDA en Marte.

MEDA on Mars

La imagen, tomada por la SHERLOC WHATSON camera, muestra uno de los WS.

The image, taken by the SHERLOC WHATSON camera, shows one of the WS.

Crédito: NASA/JPL-Caltech.

and Dust Sensor, RDS), this being the most innovative sensor of the station with respect to previous missions;

- a Thermal Infrared Radiation and Ground Temperature Sensor (TIRS), composed of a set of thermopiles;
- a Wind Sensor (WS) that measures wind speed and direction in 360 degrees.

Since landing on the surface of Mars, a team of scientists and engineers from different disciplines has been preparing the daily schedule of activities as part of the Perseverance mission operations. The

sensors of the MEDA instrument record constant measurements every second and throughout each Martian sol (each complete rotation of the planet on itself). With the Skycam camera, different images are taken both for radiation and dust characterization and for camera calibration. Likewise, this team also reviews daily the data received to evaluate the status of the instrument and process them to convert them into environmental measurements for its scientific use. The correct coordination of this multidisciplinary team to carry out these activities is the key to help the entire Mars 2020 mission to achieve its objectives.

60. METABOLISMO

Conjunto de reacciones químicas que ocurren dentro de una **célula**. El **metabolismo** consta de dos partes: catabolismo, proceso en el que se produce energía debido a la degradación de moléculas complejas en otras más simples, y anabolismo, opuesto al anterior, en el que se sintetizan moléculas complejas a partir de otras más sencillas, empleando la energía almacenada en la célula.

El metabolismo requiere una fuente de energía, poder reductor (capacidad de ciertas moléculas de actuar como donadoras de electrones, con carga eléctrica negativa, o receptoras de protones, con carga eléctrica positiva) y una fuente de carbono. Los seres vivos obtienen la energía a partir de dos tipos de fuentes: la **radiación** electromagnética procedente del **Sol** (organismos fotótrofos) o la energía química almacenada en los compuestos orgánicos e inorgánicos (quimiótrofos). Además, los seres vivos se pueden clasificar, en función de la forma en la que el organismo utiliza el

carbono para la síntesis de biomasa, en autótrofos, heterótrofos o mixótrofos. Los primeros son aquellos que obtienen carbono fijando CO_2 , los segundos lo hacen a partir de compuestos orgánicos, y los terceros pueden conseguirlo de ambas formas. Asimismo, al estudiar el metabolismo es esencial tener en cuenta la fuente de poder reductor en reacciones de oxidación-reducción (redox) imprescindibles para la obtención de energía. Los organismos capaces de utilizar compuestos químicos inorgánicos reducidos (por ejemplo, sulfuro de hidrógeno H_2S , hidrógeno molecular H_2 , ion ferroso Fe^{2+} y amoníaco NH_3) como donadores de electrones se denominan litótrofos, mientras que aquellos que emplean compuestos orgánicos (tales como glucosa o acetato) se conocen como organótrofos.

Como resultado de la integración de la fuente de energía, la fuente de carbono y el poder reductor se obtienen cinco tipos principales de metabolismos: fotolitoautótrofos (como las **bacterias**

verdes del azufre, cianobacterias, algas y plantas), fotoorganoheterótrofos (entre ellos, las bacterias púrpura no sulfurosas), quimiolitoautótrofos (por ejemplo, las bacterias oxidadoras del hierro o del azufre y la mayor parte de las **arqueas** hipertermófilas, que habitan a altas temperaturas), quimiolitoheterótrofos (como bacterias oxidantes del hidrógeno o bacterias del género *Nitrobacter*) y quimioorganoheterótrofos (la mayor parte de bacterias y arqueas conocidas, hongos y animales).

En el campo de la Astrobiología, el estudio del metabolismo en los microorganismos actuales nos ha permitido extraer conclusiones sobre su origen y sus trayectorias evolutivas, teorizar sobre las condiciones mínimas necesarias para la aparición de **vida** y conocer los límites metabólicos para el desarrollo de la vida en la **Tierra**, con el objetivo de explorar otros lugares potencialmente habitables en nuestro **sistema solar** o fuera de él (ver término **Zona de habitabilidad galáctica**).

METABOLISM

Set of chemical reactions that occur within a **cell**. **Metabolism** is divided in two categories: catabolism, a process in which energy is produced due to the degradation of complex molecules into simpler ones, and anabolism, the opposite of the former, in which complex molecules are synthesized from simpler ones, using the energy stored in the cell.

Metabolism requires a source of energy, reducing power (the ability of certain molecules to act as electron donors, with a negative electrical charge, or proton acceptors, with a positive electrical charge) and a source of carbon. Living organisms obtain energy from two types of sources: electromagnetic **radiation** from the **Sun** (phototrophic organisms) or chemical energy stored in organic and inorganic compounds (chemotrophs). Furthermore, living beings can be classified, depending on the way in which the organism uses carbon for the synthesis of biomass, into autotrophs, heterotrophs or mixotrophs. The first are those that obtain carbon by fixing CO₂, the second obtain it from organic compounds, and the third can obtain it in both ways. Likewise, when studying metabolism, it is essential

to consider the source of reducing power in oxidation-reduction (redox) reactions, which are essential for obtaining energy. Organisms capable of using reduced inorganic chemical compounds (e.g. H₂S, H₂, Fe²⁺ and NH₃) as electron donors are called lithotrophs, while those that use organic compounds (such as glucose or acetate) are referred to as organotrophs.

As a result of the integration of energy and carbon sources, and reducing power, five main types of metabolisms result: photolithoautotrophs (such as green sulfur **bacteria**, cyanobacteria, algae and plants), photoorganoheterotrophs (among them, purple non-sulfur bacteria), chemolithoautotrophs (for example, iron- or sulfur-oxidizing bacteria and most of the hyperthermophilic **archaea**), chemolithoheterotrophs (such as hydrogen-oxidizing bacteria or bacteria of the genus *Nitrobacter*) and chemoorganoheterotrophs (most known bacteria and archaea, fungi and animals).

In the field of Astrobiology, the study of metabolism in present-day microorganisms has allowed us to draw conclusions about their origin and evolutionary trajectories,

to theorize about the minimum conditions necessary for the emergence of **life** and to know the metabolic limits for the development of life on **Earth**, with the aim of exploring other potentially habitable places in our **solar system** or outside it (see term **Galactic habitability zone**).

Lecturas adicionales / Further reading

BRIONES, C., FERNÁNDEZ SOTO, A., BERMÚDEZ DE CASTRO, J. M. (2015). *Orígenes. El universo, la vida, los humanos*. Ed. Crítica, Barcelona.

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Ed. Crítica, Barcelona.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

MADIGAN, M.T., BENDER, K.S., BUCKLEY, D.H., SATTLEY, W.M., STAHL, D.A. (2020) *Brock Biology of Microorganisms*, 16th Edition. Pearson Education Inc. (CA, EE. UU.).

WILLEY, J., SANDMAN, K., WOOD, D. (2020). *Prescott's Microbiology*. 11th Ed. McGraw-Hill (NY, EE. UU.).

61. METALICIDAD

El hidrógeno (H) y el helio (He) son los elementos más simples y ligeros de la **tabla periódica**. Estos son, con mucho, los más abundantes en el universo y en el interior de las **estrellas**; al resto de elementos, tales como oxígeno (O), carbono (C), neón (Ne), hierro (Fe), nitrógeno (N), silicio (Si), etc., se les denomina en astrofísica metales.

La metalicidad de un cuerpo celeste es una medida de su abundancia de metales, es decir, de la proporción de masa de estrella que no es ni hidrógeno ni helio. Para determinar la metalicidad es necesario descomponer la luz que nos llega de los astros mediante espectrógrafos (ver **Espectroscopía**) instalados en grandes telescopios terrestres y espaciales. En el origen del universo, solo hidrógeno, helio

y mínimas cantidades de litio (Li) y berilio (Be) estaban disponibles, de manera que algunos elementos más pesados surgieron en el interior de las primeras generaciones de estrellas. Estas precursoras pertenecerían a la llamada Población III (conjunto de estrellas de generación anterior aún no detectadas), donde la metalicidad sería muy baja, prácticamente cero. Las estrellas de Población II incorporaron los primeros metales al nacer de las anteriores generaciones. Finalmente, las estrellas de Población I son las generaciones más recientes y con mayor metalicidad. A esta categoría pertenece nuestro Sol, con un 1,3 % de su masa formada por metales.

El proceso global de enriquecimiento de metales ha sido esencial para la aparición de la **vida**.

Lecturas adicionales /Further reading

GARCÍA GARCÍA, M., HERRERO DAVÓ, A. (2021). "Estrellas masivas de baja metalicidad: mucho más que la conexión con el universo primitivo". *Boletín SEA*, [en línea] <<https://www.sea-astronomia.es/boletin/estrellas-masivas-de-baja-metalicidad-mucho-mas-que-la-conexion-con-el-universo-primitivo>>.

RODRÍGUEZ, H. (2021). "Las estrellas que el tiempo olvidó". *National Geographic*, [en línea] <https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/estrellas-que-tiempo-olvido_15780>.

METALLICITY

Hydrogen (H) and helium (He) are the simplest and lightest elements in the **periodic table**. They are by far the most abundant in the universe and in the interior of **stars**; the rest of the elements, such as oxygen (O), carbon (C), neon (Ne), iron (Fe), nitrogen (N), silicon (Si), etc., are called metals in astrophysics.

The metallicity of a celestial body is a measure of its metal abundance, i.e. the proportion of star mass that is neither hydrogen nor helium. To determine the metallicity, it is necessary to decompose the light that reaches us from the stars by means of spectrographs (see **Spectroscopy**) installed in large telescopes on the ground and in space. At the origin of the universe, only hydrogen,

helium and tiny amounts of lithium (Li) and beryllium (Be) were available, so that some heavier elements arose in the interior of the first generations of stars. These precursors would belong to the so-called Population III and, although they have yet to be observed, it is assumed that their metallicity would be very low, virtually zero. Population II stars incorporated the first metals at birth from previous generations. Finally, Population I stars are the most recent generations with the highest metallicity. Our Sun belongs to this category, with 1.3% of its mass made up of metals.

The global process of metal enrichment has been essential for the emergence of **life**.

62. METANO MARCIANO: DETECCIÓN Y CONTROVERSIAS

La observación de metano en **Marte** ha generado gran debate en la comunidad científica. El metano fue descubierto en la **atmósfera** marciana en la primera

década de los años 2000. Observaciones desde la **Tierra** y desde la órbita de Marte han mostrado gran variabilidad espacial y temporal, lo que implicaría emisiones

activas desde la superficie. En la Tierra, la mayor parte del metano emitido se debe a origen biológico, de ahí la relevancia de la detección realizada en Marte.

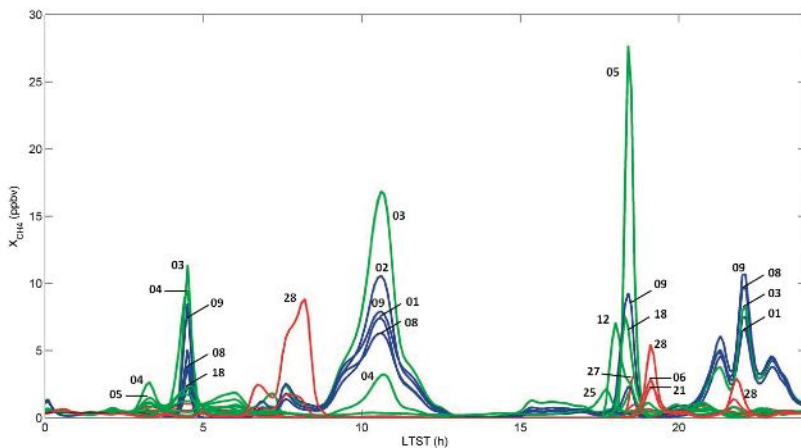


Figura 42:

Aumentos repentinos de metano en el lugar de aterrizaje del Curiosity.

Sudden increases in methane at the Curiosity landing site.

Estos fueron predichos por el modelo numérico DISVERMAR.

These were predicted by the DISVERMAR numerical model.

Adaptado de Viúdez-Moreiras et al., 2021a.

El rover Curiosity (ver **REMS**) ha detectado en los últimos años, en el **cráter** Gale de Marte, tanto metano de fondo como aumentos repentinos en su abundancia. Se pensaba que estos aumentos repentinos podían tener origen en una fuente de metano local o regional. Por otra parte, se afirmaba que las medidas de metano de fondo detectadas por Curiosity se correspondían con un nivel promedio o de *background* en Marte. Sin embargo, observaciones recientes desde órbita por el ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) no han detectado metano en la atmósfera del planeta, aparentemente contradiciendo las medidas del rover Curiosity.

Simulaciones numéricas recientemente publicadas en prestigiosas revistas científicas indican por primera vez que tanto los aumentos repentinos de metano como las medidas de metano de fondo llevadas a cabo por Curiosity tendrían el

MARTIAN METHANE: DETECTION AND CONTROVERSY

The observation of methane on **Mars** has generated much debate in the scientific community. Methane was discovered in

the Martian **atmosphere** in the first decade of the 2000s. Observations from **Earth** and from Mars orbit have shown

great spatial and temporal variability, which would imply active emissions from the surface. On Earth, most of the methane emitted is due to biological origin, hence the relevance of the Mars detection.

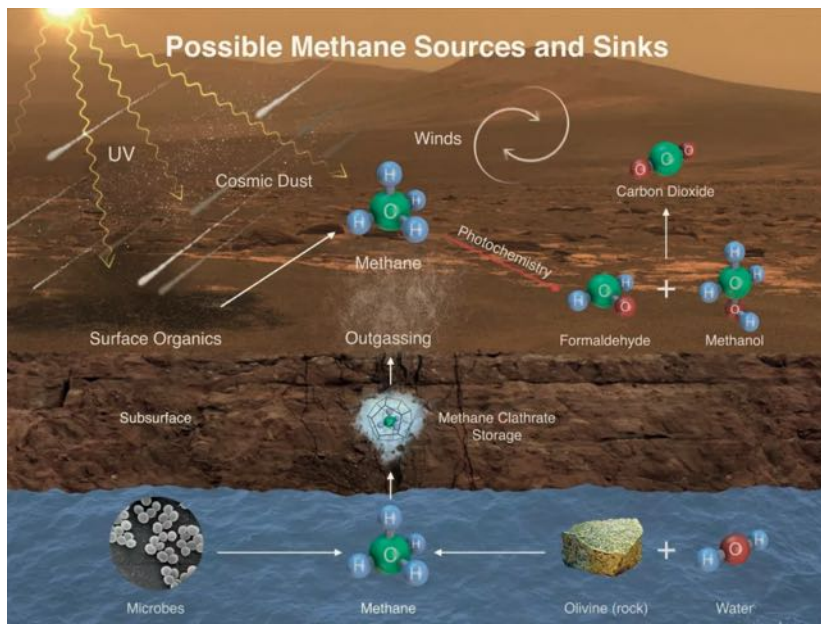


Figura 43:

Posibles vías de generación del metano en Marte.

Possible pathways for methane generation on Mars.

Crédito: NASA/JPL-Caltech/SAM-GSFC/University of Michigan.

The Curiosity rover (see **REMS**) has detected in recent years, in the Gale **Cra-****ter** on Mars, both background methane and sudden increases in its abundance. It was thought that these methane spikes could originate from a local or regional methane source. On the other hand, it was claimed that the background methane measurements detected by Curiosity corresponded to an average or background level on Mars. However, recent observations from orbit by the ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) have detected no methane in the planet's atmosphere, apparently contradicting Curiosity's measurements.

Numerical simulations recently published in prestigious scientific journals indicate for the first time that both the methane spikes and the background methane measurements made by Cu-

mismo origen en emisiones localizadas cercanas al rover. Estos resultados satisfacen simultáneamente las restricciones impuestas por las observaciones de Curiosity y por las de ExoMars.

Los resultados numéricos son compatibles con las conclusiones de un estudio previo publicado por el equipo de ciencia de Curiosity, donde se sugirió que el metano debería ser emitido desde las primeras capas de **regolito** (**polvo** fino y rocas pulverizadas sobre la superficie del planeta), o transportado rápidamente a esta capa desde reservorios a más profundidad, a través de un medio fracturado, de grietas en la superficie.

Los resultados presentados en estos estudios permiten reconciliar las observacio-

nes de Curiosity y de ExoMars TGO y abren la posibilidad a que el rover pueda explorar la región hipotética donde se estaría emitiendo el metano y, por tanto, investigar su posible origen.

Recientes estudios apuntan también a un escenario improbable o problemático: o existe un mecanismo de destrucción de metano ignorado pero muy eficiente en la atmósfera de Marte, capaz de destruirlo órdenes de magnitud más rápido que cualquier mecanismo conocido hasta la fecha, o las emisiones de metano son extremadamente poco comunes en Marte y Curiosity habría aterrizado fortuitamente junto a una de ellas. Por tanto, se necesitarán más datos desde el rover y desde los orbitadores para entender los procesos que están involucrados en el metano marciano.

riosity would have the same origin in localized emissions close to the rover. These results simultaneously satisfy the constraints imposed by both Curiosity and ExoMars observations.

The numerical results are compatible with the conclusions of a previous study published by the Curiosity science team, where it was suggested that methane should be emitted from the first layers of **regolith** (fine **dust** and pulverized rocks on the surface of the planet), or rapidly transported to this layer from reservoirs at greater depth, through a fractured medium in the surface.

The results presented in these studies reconcile the Curiosity and ExoMars TGO observations and open the possibility that the rover could explore the hypothetical region where the methane would be emitted and thus investigate its possible origin.

Recent studies also point to an unlikely or problematic scenario: either there is an unknown but very efficient methane destruction mechanism in the Mars atmosphere, capable of destroying methane orders of magnitude faster

than any mechanism known to date, or methane emissions are extremely rare on Mars and Curiosity would have landed fortuitously next to one of them. Thus, more data from the rover and from the orbiters, as well as further modelling efforts, will be needed to understand the processes involved in Martian methane.

Lecturas adicionales /Further reading

-- “El metano detectado por el rover Curiosity se emitiría desde una fuente cercana localizada en el cráter Gale de Marte”, [en línea] <<https://cab.inta-csic.es/noticias/el-metano-detectado-por-el-rover-curiosity-se-emitiria-desde-una-fuente-cercana-localizada-en-el-crater-gale-de-marte/52/>>.

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

MUMMA, M. J., VILLANUEVA, G. L., NOVAK, R. E., HEWAGAMA, T., BONEV, B. P., DISANTI, M. A., et al. (2009). “Strong release of methane on Mars in northern summer 2003.” *Science*, 323(5917), pp.1041–1045.

WEBSTER, C. R., MAHAFFY, P. R., ATREYA, S. K., MOORES, J. E., FLESCHE, G. J., MALESPIN, C., et al. (2018). “Background levels of methane in Mars’ atmosphere show strong seasonal variations.” *Science*, 360(6393), pp. 1093–1096.

63. METEORITOS

Un meteorito es un cuerpo que se encuentra en la superficie de un planeta como la **Tierra** cuando impacta un objeto celeste conocido como meteoroides, debido a que este no se desintegra por completo en la **atmósfera**. El efecto luminoso que deja al entrar en la atmósfera se denomina un meteorito. Debido a la interacción con la atmósfera, los meteoritos están recubiertos de una costra de fusión de color más oscuro. La mayoría de los meteoritos son pequeños, los menores de 2 mm se conocen como micrometeoritos. Muy raramente alcanzan un tamaño de metros, por dicho motivo son escasos los **cráteres** asociados a grandes meteoritos en la Tierra, como el famoso de Barringer en Arizona, de modo que los episodios de destrucción masiva causados por meteoritos son poco comunes. Además de en nuestro planeta, se han encontrado meteoritos en la Luna y **Marte**, estos se bautizan con el nombre del lugar donde fueron hallados.

Los meteoritos se han clasificado como:

- i) pedregosos, compuestos de silicatos,

- ii) metálicos, compuestos de hierro-níquel, un 5 %; o
- iii) pedregoso-metálicos, un 1 %.

Se cree que los meteoritos metálicos se originaron en el núcleo de los asteroides de mayor tamaño donde hubo una diferenciación del material en capas, como ocurre en el interior de la Tierra.

La mayoría de los meteoritos son condritas, es decir, rocosos y sin metales, y contienen partículas redondeadas llamadas cóndrulos que están compuestas de silicatos fundidos. Junto a los **cometas**, las condritas conservan la materia más antigua del **sistema solar**. También contienen una pequeña cantidad de material orgánico de interés astrobiológico. El meteorito Murchison, caído en Australia en 1969, es una de las condritas más famosas y la mejor estudiada, contiene cerca de 100 aminoácidos diferentes. Se ha demostrado que dichos aminoácidos no han llegado por contaminación terrestre, ya que su contenido en isótopos pesados como el deuterio es superior a los valores

terrestres. Además, muchos aminoácidos meteoríticos no se encuentran en los seres vivos, como los diaminoácidos con dos grupos amino (NH_2 , grupo funcional derivado del amoníaco) en vez de uno.

Una propiedad verdaderamente intrigante de esos aminoácidos está relacionada con la **quiralidad**. La mayoría de los aminoácidos son quirales, es decir, tienen dos configuraciones de sus átomos distintas, como cuando un objeto y su imagen en un espejo son diferentes y ningún giro permite superponerlas (al igual que ocurre con las manos). En una síntesis química convencional siempre se forma el mismo número de aminoácidos del tipo mano izquierda y mano derecha. Sin embargo, los aminoácidos biológicos son todos del tipo mano izquierda y se desconoce el porqué. Los aminoácidos meteoríticos apenas tienen preferencia por una de las dos manos, pero algunos sí presentan un leve exceso en el número de moléculas del tipo mano izquierda.

METEORITES

A meteorite is a body that is found on the surface of a planet like the **Earth** when it hits a celestial object known as a meteoroid, because it does not disintegrate completely in the **atmosphere**. The luminous effect it leaves behind when it enters the atmosphere is called a meteor. Due to the interaction with the atmosphere, meteors are coated with a darker colored fusion crust. Most meteorites are small, those smaller than 2 mm are known as micrometeorites. For this reason, **craters** associated with large meteorites on Earth, such as the famous Barringer crater in Arizona, are rare, so that episodes of massive destruction caused by meteorites are uncommon. In addition to our planet, meteorites have been found on the Moon and **Mars**, these are named after the place where they were found.

Meteorites have been classified as: i) stony, composed of silicates, making up 94% of the total; ii) metallic, composed of iron-nickel, 5%; or iii) stony-metallic, 1%. Metallic meteorites are believed to have originated in the core of larger asteroids where there was a differentiation

of the material into layers, as occurs in the Earth's interior.

Most meteorites are chondrites, i.e., rocky and metal-free, and contain rounded particles called chondrules that are composed of molten silicates. Along with **comets**, chondrites preserve the oldest matter in the **solar system**. They also contain a small amount of organic material of astrobiological interest. The Murchison meteorite, which fell in Australia in 1969, is one of the most famous and best studied chondrites, containing about 100 different amino acids. It has been shown that these amino acids did not come from terrestrial contamination, since their content of heavy isotopes such as deuterium is higher than terrestrial values. In addition, many meteoritic amino acids are not found in living beings, such as diamino acids with two amino groups (NH_2 , a functional group derived from ammonia) instead of one.

A truly intriguing property of these amino acids is related to **chirality**. Most amino acids are chiral, i.e., they have two

different configurations of their atoms, as when an object and its image in a mirror are different and no twist allows them to overlap (as happens with hands). In a conventional chemical synthesis, the same number of amino acids of the left hand and right hand type is always formed. However, biological amino acids are all left-handed and it is not known why. Meteoritic amino acids have hardly any preference for one of the two hands, but some do show a slight excess in the number of left-handed type molecules.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Peligros Cósmicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberón, ISBN-10-8441543518.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

64. METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA EXTRATERRESTRE

La meteorología estudia los fenómenos de la **atmósfera**, definida como envoltorio gaseoso de un cuerpo celeste. En un sistema climático, junto al componente atmosférico, se podría tener también una hidrosfera (conjunto de zonas con **agua** líquida), una criosfera (**hielos**), una superficie rocosa (litosfera) y una **biosfera** (espacio donde se desarrolla la **vida**), además de interacciones entre ellos. Son las diferencias entre los componentes de los diferentes cuerpos celestes y sus distancias a su **estrella** los que producen la diversidad de sus meteorologías. Los movimientos atmosféricos se deben, principalmente, al calentamiento solar desigual entre las latitudes del cuerpo celeste.

Venus sufrió en el pasado un efecto invernadero desbocado, haciendo que en superficie la presión atmosférica actual sea 92 veces la terrestre y la temperatura del aire exceda los 460 °C, impidiendo la presencia de vapor de agua, pero permitiendo la de dióxido de azufre y nubes de ácido sulfúrico. La circulación atmosférica es muy activa, con vientos de 360 km/h en

altura, los cuales distribuyen el calor por toda la atmósfera, donde apenas hay variación de temperatura entre día y noche.

En el caso de **Marte**, existen fenómenos meteorológicos tales como: estaciones asociadas a la oblicuidad planetaria, circulación atmosférica, inestabilidades y frentes en superficie, nubes de hielo de agua y de dióxido de carbono (CO₂), o tormentas y remolinos de **polvo**. Aunque lleva millones de años sin llover, hay indicios de precipitaciones actuales en forma de nieve cerca de los casquetes polares (ver **Ciclo hidrológico en Marte**). La temperatura media del aire cerca de su superficie es de -55 °C, la cual varía desde los 5-10 °C de máxima en regiones cercanas al ecuador, hasta los -123,15 °C de mínima en los casquetes polares. Son tan bajas porque Marte, al estar más lejos del **Sol** que la **Tierra**, recibe solo un 43 % de la luz solar que recibe nuestro planeta y su tenue atmósfera, unas 100 veces más liviana en la actualidad que la terrestre y compuesta en un 96 % de CO₂, impide que el calor se retenga eficientemente. La

diferencia de temperatura entre el día y la noche es enorme. El polvo es un actor principal de su atmósfera, haciendo que se reduzca en superficie la **radiación** entrante solar (disminuyendo las temperaturas diurnas) y que se aumente la radiación descendente infrarroja (aumentando las temperaturas nocturnas). Las tormentas globales de polvo son el proceso más impredecible de su atmósfera. No se conoce el mecanismo que las desencadena. Evolucionan desde tormentas locales de polvo en el hemisferio sur, y rápidamente comienzan a cubrir los trópicos y el hemisferio norte. Gracias a las estaciones meteorológicas de las tres misiones de NASA en Marte (**REMS** a bordo de Curiosity, **TWINS** a bordo de InSight y **MEDA** a bordo de Perseverance) España se ha convertido en la primera nación en medir de forma simultánea con tres estaciones en un cuerpo extraterrestre.

Las atmósferas de los gigantes gaseosos y de hielo destacan por sus grandes cantidades de hidrógeno y helio, remanentes

METEOROLOGY AND EXTRATERRESTRIAL CLIMATOLOGY

Meteorology studies the phenomena of the **atmosphere**, defined as the gaseous envelope of a celestial body. In a climatic system, together with the atmospheric component, we could also have a hydrosphere (set of areas with liquid **water**), a cryosphere (**ice**), a rocky surface (lithosphere) and a **biosphere** (areas where **life** develops), as well as interactions between them. It is the differences between the components of the different celestial bodies and their distances from their **star** that produce the diversity of their meteorologies. Atmospheric movements are mainly due to unequal solar heating between the latitudes of the celestial body.

Venus suffered in the past a runaway greenhouse effect, causing the current surface atmospheric pressure to be 92 times that of Earth's and the air temperature to exceed 460 °C, preventing the presence of water vapor, but al-

lowing sulfur dioxide and sulfuric acid clouds. The atmospheric circulation is very active, with winds of 360 km/h at altitude, which distribute the heat throughout the atmosphere, where there is hardly any temperature variation between day and night.

In the case of **Mars**, there are meteorological phenomena such as: seasons associated with the planetary obliquity, atmospheric circulation, surface instabilities and fronts, clouds of water ice and carbon dioxide (CO₂), or storms and **dust** devils. Although it has not rained for millions of years, there is evidence of current precipitation in the form of snow near the polar caps (see **Hydrologic cycle on Mars**). The average air temperature near its surface is -55 °C, which varies from a maximum of 5-10 °C in regions near the equator to a minimum of -123,15 °C at the polar caps. They are so low because Mars,

being farther from the **Sun** than **Earth**, receives only 43% of the sunlight that our planet receives and its tenuous atmosphere, about 100 times lighter at present than Earth's and composed of 96% CO₂, prevents heat from being retained efficiently. The temperature difference between day and night is enormous. Dust is a major player in its atmosphere, causing incoming solar **radiation** to be reduced at the surface (lowering daytime temperatures) and infrared downward radiation to be increased (raising nighttime temperatures). Global dust storms are the most unpredictable process in this atmosphere. The mechanism that triggers them is not known. They evolve from local dust storms in the southern hemisphere, and quickly begin to cover the tropics and the northern hemisphere. Thanks to the weather stations of the three NASA missions on Mars (**REMS** aboard Curiosity, **TWINS** aboard In-

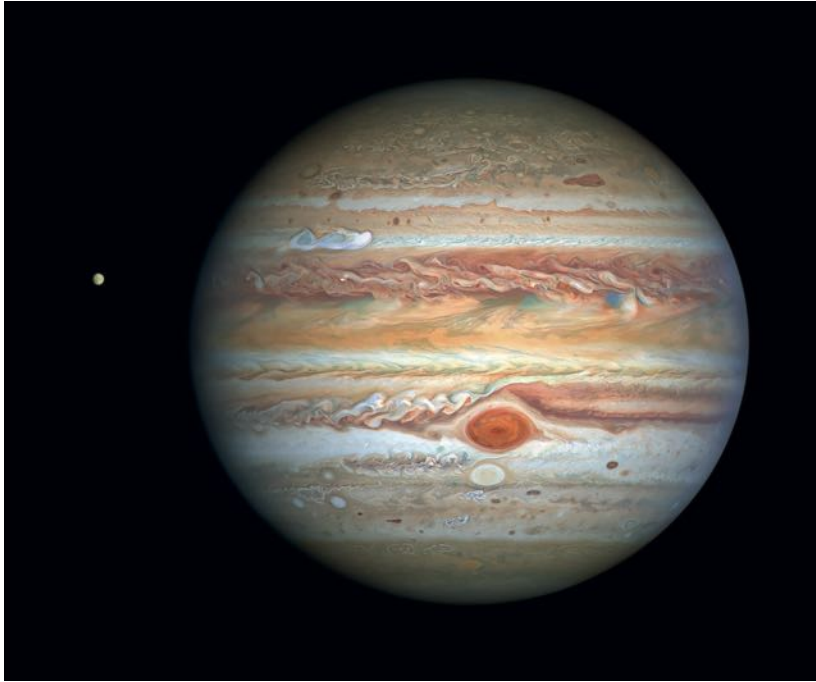


Figura 44:

Júpiter, su Gran Mancha Roja y su luna Europa, observados por el HST.

Jupiter, its Great Red Spot and its moon Europa, observed by HST.

Crédito: NASA, ESA, A. Simon (Goddard Space Flight Center), M. H. Wong (University of California, Berkeley) y el equipo OPAL.

de la nebulosa solar. Resaltan las nubes de agua y cristales de amoníaco en Júpiter y Saturno, y de metano en Urano y Neptuno. La diferente irradiación solar en función de la latitud genera grandes gradientes de temperatura, con fuertes vientos y tormentas que son mucho más duraderas que las de la Tierra (como la Gran Mancha Roja de Júpiter, ver figura 44), al no tener una superficie sólida con la que perder energía. En Titán, el satélite más grande de Saturno, la presión en superficie (la presión en superficie de su atmósfera) es la más similar, una vez y media, a la terrestre y la única del **sistema solar** rica en nitrógeno. Además, posee un ciclo hidrológico de hidrocarburos muy activo con nubes, tormentas, precipitaciones y lagos en superficie. La futura misión Dragonfly explorará esta luna a partir de 2034.

El estudio de las atmósferas de algunos **exoplanetas** empieza a poner de manifiesto que también existe esta fenomenología en sus atmósferas, incluyendo posibles precipitaciones de hierro evaporado, como parece ser el caso de WASP-76 b.

Sight and **MEDA** aboard Perseverance) Spain has become the first nation to measure simultaneously with three stations on an extraterrestrial body.

The atmospheres of the gas and ice giants are notable for their large amounts of hydrogen and helium, remnants of the solar nebula. The clouds of water and ammonia crystals stand out in Jupiter and Saturn, and of methane in Uranus and Neptune. The different solar irradiation depending on latitude generates large temperature gradients, with strong winds and storms that are much longer lasting than those on Earth (such as Jupiter's Great Red Spot, see figure 44), since they do not have a sol-

id surface to lose energy to. On Titan, Saturn's largest moon, the pressure at the surface of its atmosphere is the most similar, one and a half times, to the Earth's and the only one in the **solar system** rich in nitrogen. It also has a very active hydrological hydrocarbon cycle with clouds, storms, precipitation and surface lakes. The future Dragonfly mission will explore this moon starting in 2034.

The study of the atmospheres of some **exoplanets** is beginning to show that this phenomenology also exists in their atmospheres, including possible precipitations of evaporated iron, as seems to be the case of WASP-76 b.

65. MISIONES PLANETARIAS EN EL SISTEMA SOLAR

Desde el comienzo de la carrera espacial se han realizado numerosas misiones no tripuladas a distintos planetas del **sistema solar**, consiguiéndose aterrizajes exitosos sobre Venus, **Marte** y Titán (satélite de Saturno). Además, gracias al desarrollo de orbitadores, Mercurio, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno han sido explorados con cierto detalle, especialmente en los dos primeros casos, al igual que los planetas enanos Plutón y Ceres. Parte de estas misiones incluían la **exploración** de otros cuerpos del sistema solar como asteroides, **cometas** y satélites. La exploración espacial tripulada dentro del sistema solar ha sido únicamente a la Luna y en órbitas cercanas a la **Tierra**, aunque en un futuro se plantean misiones tripuladas a Marte.

Dos años después de que la primera sonda espacial sin astronautas aterrizara so-

bre la Luna, se produjo la primera aproximación a un planeta del sistema solar. El éxito fue conseguido por la extinta Unión Soviética con la misión Venera 1 en 1961 a 100 000 km de Venus. Pero no fue hasta 1962 cuando la misión Mariner 2 de la NASA llegó a este planeta y envió información sobre su **atmósfera** y su campo magnético. En 1965, Venera 3 se convirtió en el primer objeto humano que impactó sobre la superficie de otro planeta y, finalmente, Venera 7 consiguió aterrizar en su superficie.

Marte es un planeta de gran interés tanto desde el punto de vista geológico como astrobiológico y ha sido objeto de numerosas misiones no tripuladas. Mars 1 en 1963 fue la primera sonda espacial que se aproximó a su órbita, pero fue la Mariner 4 la primera misión que representó el primer sobrevuelo con éxito del planeta

rojo, enviando fotografías de su superficie. La primera misión en llegar con éxito a su superficie fue la sonda Mars 3, compuesta por un orbitador y un rover que aterrizó, pero del que se perdió la comunicación pocos segundos después. Por otro lado, Estados Unidos consiguió el aterrizaje sobre el planeta de las misiones Viking en 1976. Estas sondas tenían una clara orientación astrobiológica y su duración fue mucho más larga que sus predecesoras. Tras sucesivos intentos de diferentes países, actualmente se encuentran una docena de misiones activas sobre el planeta, de entre ellas Curiosity (MSL), InSight y Mars2020, que cuentan con instrumentos de medida españoles. (Ver **REMS**, **TWINS** y **MEDA**).

El primero de los planetas rocosos por su distancia al Sol, Mercurio, fue visitado por primera vez por la Mariner 10 en

PLANETARY MISSIONS IN THE SOLAR SYSTEM

Since the beginning of the space race, numerous unmanned missions have been carried out to different planets of the **solar system**, achieving successful landings on Venus, **Mars** and Titan (Saturn satellite). In addition, thanks to the development of orbiters, Mercury, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune have been explored in some detail, especially in the first two cases, as well as the dwarf planets Pluto and Ceres. Part of these missions included the exploration of other solar system bodies such as asteroids, **comets** and satellites. Manned space **exploration** within the solar system has been only to the Moon and in near-**Earth** orbits, although manned missions to Mars are planned for the future.

Two years after the first space probe without astronauts landed on the

Moon, the first approach to a planet in the solar system took place. Success was achieved by the defunct Soviet Union with the Venera 1 mission in 1961 at 100,000 km from Venus. But it was not until 1962 when NASA's Mariner 2 mission reached this planet and sent back information about its **atmosphere** and magnetic field. In 1965, Venera 3 became the first human object to impact the surface of another planet, and finally Venera 7 managed to land on its surface.

Mars is a planet of great geological and astrobiological interest and has been the subject of numerous unmanned missions. Mars 1 in 1963 was the first space probe to approach its orbit, but Mariner 4 was the first mission to carry out the first successful flyby of the red planet, sending back photographs of its

surface. The first mission to successfully reach its surface was the Mars 3 probe, composed of an orbiter and a rover that landed, but from which communication was lost a few seconds later. On the other hand, the United States succeeded in landing the Viking missions on the planet in 1976. These probes had a clear astrobiological orientation and their duration was much longer than their predecessors. After successive attempts by different countries, there are currently a dozen active missions on the planet, including Curiosity (MSL), InSight and Mars2020, which have Spanish measuring instruments. (See **REMS, TWINS** and **MEDA**).

The first of the rocky planets due to its distance from the Sun, Mercury, was visited for the first time by Mariner 10 in 1974 and later by the Messenger space

1974 y posteriormente por la sonda espacial Messenger en 2011. En 2025 llegará la misión BepiColombo, una misión conjunta de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la japonesa JAXA diseñada para analizar el planeta y su magnetosfera.

Dentro de los planetas gaseosos, las misiones Pioneer 10 y 11 realizaron la primera exploración de Júpiter y Saturno en los años 70. Más tarde la Voyager 2 llegó a Urano en 1986 y a Neptuno en 1989, tras explorar Júpiter y sus satélites en 1979. La sonda Galileo, que constaba de un orbitador y una sonda, penetró en la atmósfera de Júpiter en 1995 sumergiéndose unos 200 km al final de la misión. La sonda Cassini/Huygens alcanzó Saturno en 2004 y en su viaje realizó un

sobrevuelo sobre Júpiter en el año 2000. Llegó a pasar sobre los anillos de Saturno en 2017, cortando para ello las comunicaciones con la Tierra durante 20 horas. En 2016 la misión Juno entró en la órbita de Júpiter para estudiar su atmósfera, magnetosfera y auroras.

La misión Dawn fue la encargada de visitar Ceres en 2007, convirtiéndose en la primera misión de exploración de un planeta enano por delante de la misión New Horizons, lanzada en 2006 y destinada a explorar Plutón, sus satélites, asteroides del cinturón de Kuiper (anillo de cuerpos helados situado fuera de la órbita de Neptuno) y que alcanzó su objetivo primario en 2015 y el asteroide 2014 MU69, a 6470 millones de km del Sol, en 2019.

probe in 2011. In 2025, the BepiColombo mission will arrive, a joint mission of the European Space Agency (ESA) and the Japanese JAXA designed to analyze the planet and its magnetosphere.

Within the gaseous planets, the Pioneer 10 and 11 missions made the first exploration of Jupiter and Saturn in the 1970s. Later, Voyager 2 reached Uranus in 1986 and Neptune in 1989, after exploring Jupiter and its satellites in 1979. The Galileo probe, which consisted of an orbiter and a probe, penetrated Jupiter's atmosphere in 1995, plunging some 200 km at the end of the mission. The Cassini/Huygens probe reached Saturn in 2004 and made a flyby of Jupiter in 2000. It

went so far as to pass over Saturn's rings in 2017, cutting off communications with Earth for 20 hours to do so. In 2016 the Juno mission entered Jupiter's orbit to study its atmosphere, magnetosphere and auroras.

The Dawn mission was in charge of visiting Ceres in 2007, becoming the first mission to explore a dwarf planet ahead of the New Horizons mission, launched in 2006 and destined to explore Pluto, its satellites, asteroids of the Kuiper belt (ring of icy bodies located outside Neptune's orbit) and which reached its primary target in 2015 and the asteroid 2014 MU69, 6470 million km from the Sun, in 2019.

66. MODELADO Y SIMULACIÓN PLANETARIA

Los modelos numéricos atmosféricos comenzaron su desarrollo a mediados del siglo XX. Desde entonces, han permitido estudiar aspectos como el clima y la meteorología, la **química atmosférica** o el transporte radiativo de energía en la **atmósfera**. Los modelos actuales son capaces de representar con precisión procesos tales como emisión y deposición seca y húmeda, fotoquímica y química heterogénea, **radiación** solar y aerosoles, condensación, precipitación, transporte, turbulencia o interacción entre la atmósfera y la superficie. Por ello, los modelos se utilizan ampliamente para analizar observaciones, entender relaciones entre variables, probar hipótesis y predecir la **evolución** de variables de interés. Los modelos atmosféricos, constreñidos por mediciones tomadas tanto *in situ* como por aeronaves y satélites, resultan críticos para proveer información de calidad del aire en escalas espaciales, desde el medio urbano hasta la escala global, incluyendo el transporte a largas distancias de sus-

tancias nocivas para el medio ambiente. En aplicaciones en la atmósfera terrestre, también pueden utilizarse para explorar y predecir el impacto futuro en la composición atmosférica y emisiones con origen en la actividad humana y, por tanto, informar a los responsables políticos y a la población, siendo en definitiva una herramienta que forma parte de la toma de decisiones.

El modelado matemático de la atmósfera representa un gran reto científico y computacional. Detrás de cada modelo es habitual encontrar sistemas de ecuaciones imposibles de solventar analíticamente y cuya resolución numérica es muy compleja, además de conllevar largos tiempos de cálculo en los computadores actuales. Asimismo, estos modelos pueden generar cantidades ingentes de datos que han de analizarse convenientemente.

El estudio de atmósferas extraterrestres, como las presentes en otros plane-

tas y satélites del **sistema solar**, ha ido de la mano del desarrollo de modelos que permiten ayudar en la interpretación de las observaciones y probar hipótesis en un contexto con muy pocas medidas, que incluso pueden presentar sesgos. Los modelos numéricos se han aplicado a atmósferas planetarias desde los años 60, principalmente focalizados en el estudio de la atmósfera de **Marte** y de los planetas gigantes. Desde mediados de los años 90 se han realizado numerosos esfuerzos de modelado en Venus y Titán (una de las lunas de Saturno), así como aplicaciones en planetas enanos como Plutón. Las medidas sistemáticas recogidas *in situ* por aterrizadores o róveres, como los presentes en Marte en la actualidad, aportan gran información para la mejora continua de los modelos, que a su vez ayudan a interpretar los datos recogidos por estas misiones, y por tanto aumentar significativamente el retorno científico de las mismas.

PLANETARY MODELING AND SIMULATION

Atmospheric numerical models began their development in the middle of the 20th century. Since then, they have allowed the study of aspects such as climate and meteorology, **atmospheric chemistry** or radiative transport in the **atmosphere**. Current models are able to accurately represent processes such as emissions, dry and wet deposition, photochemistry and heterogeneous chemistry, solar **radiation** and aerosols, condensation, precipitation, transport, turbulence or surface-atmosphere interaction. Models are therefore widely used to analyze observations, understand relationships between variables, test hypotheses and predict the **evolution** of variables of interest. Atmospheric models, constrained by measurements taken both *in situ* and by aircraft and satellites, are critical for providing air quality information on spatial scales from the urban environment to the global scale, including long-range transport of environmentally harmful substances. In applications in the Earth's atmosphere, they can also be used to explore and predict the future impact on atmospheric composition and emissions originating from human activity, and thus inform policy makers and

the public; ultimately being a tool that is part of decision making.

Mathematical modeling of the atmosphere represents a great scientific and computational challenge. Behind each model it is common to find systems of equations that are impossible to solve analytically and whose numerical resolution is very complex, as well as involving long execution times on current computers. Also, these models can generate huge amounts of data that must be analyzed conveniently.

The study of extraterrestrial atmospheres, such as those present in other planets and satellites of the **solar system**, has gone hand in hand with the development of models that help in the interpretation of observations and test hypotheses in a context with sparse data, which may even present biases. Numerical models have been applied to planetary atmospheres since the 1960s, mainly focused on the study of the atmosphere of **Mars** and the giant planets. Since the mid-1990s, numerous modeling efforts have been carried out on Venus and Titan (one of Saturn's moons), as well as

applications on dwarf planets such as Pluto. Systematic measurements collected *in situ* by landers or rovers, such as those currently present on Mars, provide great information for the continuous improvement of models, which in turn help to interpret the data collected by these missions, and thus significantly increase the scientific return of these missions.

Lecturas adicionales /Further reading

- GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.
- NAIR, H. et al. (1994). "A photochemical model of the Martian atmosphere". *Icarus*, 111, pp. 124-150.
- NEWMAN, C. E. et al (2021). "Multi-model meteorological and aeolian predictions for Mars 2020 and the Jezero Crater Region". *Space Sci Rev.* 217(20).
- RICHARDSON, M. I. et al. (2007). "PlanetWRF: a general purpose, local to global numerical model for planetary atmospheric and climate dynamics." *JGR-Planets* 112(E9). E09001.
- VIÚDEZ-MOREIRAS, D. (2021) "A three-dimensional atmospheric dispersion model for Mars." *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(53).

67. MUESTRAS PLANETARIAS, RETORNO

En general, las misiones de retorno de muestras planetarias son misiones espaciales que persiguen traer a la **Tierra** muestras recogidas en otros cuerpos celestes (ya sean planetas, **cometas** o asteroides), con el fin de analizarlas pormenorizada y detalladamente en las instalaciones preparadas a tal efecto, en el más estricto cumplimiento de las directrices convenidas por los comités de **protección planetaria**.

La sofisticación tecnológica e instrumental de los sistemas embarcados en las misiones espaciales ha alcanzado niveles más que notables en las últimas décadas. No obstante, esos instrumentos espaciales para el análisis de muestras *in situ* no se pueden comparar a sus homólogos terrestres, dado que sobre los primeros se imponen severas restricciones de peso, consumo de potencia eléctrica y generación de datos, a la vez que deben ser suficientemente robustos para sobrevivir a condiciones ambientales extremas. Por añadidura, las oportunidades de análisis se ven tremendamente limitadas a la duración de la misión, con restringidos consumi-

bles, y habiendo pocas o ninguna ocasión para el reanálisis.

Todo ello hace que, si bien los análisis *in situ* aportan gran conocimiento y valor, en ocasiones se plantee el enorme reto de traer las muestras a la Tierra para su análisis más preciso y con múltiples técnicas, en pro de un mayor aprovechamiento científico.

En el pasado se ha seguido esta estrategia para traer a la Tierra muestras de rocas y **regolito** lunares (con el programa Apollo, las misiones soviéticas Luna, y la china Chang'e 5); de **polvo** interplanetario y partículas de la órbita terrestre (capturadas con aerogeles, sólidos de muy baja densidad y muy porosos, por la estación espacial Mir); de viento solar (por la misión Génesis); de muestras de polvo cometario (por la misión Stardust); y de muestras de asteroides (por las misiones japonesas Hayabusa y Hayabusa 2, y la europea OSIRIS-REx, que se espera que regrese a la Tierra en 2023).

Por lo que respecta al futuro, diversas agencias espaciales trabajan para traer

más muestras lunares, marcianas (incluidas las procedentes de Fobos, el satélite de **Marte**) y cometarias.

Quizás la más ambiciosa desde el punto de vista tecnológico sea el programa conjunto NASA-ESA Mars Sample Return (MSR, Retorno de muestras de Marte). La primera etapa del programa ya se encuentra en operación: el vehículo explorador Perseverance está recogiendo y almacenando muestras de la superficie y **atmósfera** desde su llegada al planeta en febrero de 2021. Está previsto que el programa cuente con varios elementos más (orbitador, aterrizadores, vehículos de superficie, lanzador y sistema de retorno), en los que las agencias participantes ya se encuentran trabajando. Estos nuevos elementos seguirían los pasos de Perseverance, recuperando las muestras que este depositaría en el suelo marciano en algún momento de su misión. Posteriormente estas muestras serían lanzadas fuera del planeta, y capturadas en órbita por otro elemento que las traería a la Tierra de forma segura a comienzos de la década de 2030.

PLANETARY SAMPLES, RETURN OF

In general, planetary sample return missions are space missions that aim to bring to **Earth** samples collected from other celestial bodies (whether planets, **comets** or asteroids), in order to analyze them in detail in the facilities prepared for this purpose, in strict compliance with the guidelines agreed by the **planetary protection** committees.

The technological and instrumental sophistication of the systems onboard space missions has reached remarkable levels in recent decades. However, these space-based instruments for *in situ* sample analysis cannot be compared to their terrestrial counterparts, since the former are subject to severe restrictions in terms of weight, power consumption and data generation, and must be sufficiently robust to survive extreme environmental conditions. In addition, analysis opportunities are severely limited to mission duration, with restricted consumables and little or no opportunity for reanalysis.

All of this means that, while *in situ* analyses provide great knowledge and value, there is sometimes the enormous challenge of bringing samples back to Earth for more precise, multi-technique analysis for greater scientific benefit.

In the past, this strategy has been followed to bring to Earth samples of lunar rocks and **regolith** (with the Apollo program, the Soviet Luna missions, and the Chinese Chang'e 5); of interplanetary **dust** and particles from Earth orbit (captured with aerogels, very low density highly porous solids, by the Mir space station); of solar wind (by the Genesis mission); and of solar wind (by the Genesis mission); solar wind (by the Genesis mission); cometary dust samples (by the Stardust mission); and asteroid samples (by the Japanese Hayabusa and Hayabusa 2 missions, and the European OSIRIS-REx, which is expected to return to Earth in 2023).

As for the future, several space agencies are working to bring back more lunar, Martian (including from Mars' satellite Phobos) and cometary samples.

Perhaps the most technologically ambitious is the joint NASA-ESA **Mars** Sample Return (MSR) program. The first stage of the program is already in operation: The Perseverance rover is collecting and storing samples of the surface and **atmosphere** since its arrival on the planet in February 2021. The program is planned to have several more elements (orbiter, landers, surface vehicles, launcher and return system), on which the participating agencies are already working. These new elements would follow in the footsteps of Perseverance, recovering the samples that it would deposit on the Martian soil at some point during its mission. These samples would then be launched off the planet and captured in Earth's orbit by another spacecraft that would bring them safely back to Earth in the early 2030s.

68. MUNDOS OCEÁNICOS

Son objetos planetarios que en la actualidad albergan capas líquidas, normalmente de **agua**, a escala global o regional. Dichas capas pueden estar presentes en la superficie, como en caso de la **Tierra**, o en el interior de los **planetas** y satélites de **hielo** de los planetas gigantes del **sistema solar** y fuera de él.

Se ha sugerido que en el sistema solar hay multitud de mundos oceánicos, pero solo algunos están apoyados por evidencias fuertes, por ejemplo, Europa, Ganimedes, Encélado, o Titán. Entre los océanos que deben ser confirmados destacan los de los planetas enanos Ceres y Plutón, así como los de los satélites Tritón, Ariel y Miranda, o Dione, de los que tenemos escasos indicios. Para evaluar si los mundos helados contienen océanos subterráneos se utilizan técnicas que investigan las huellas del océano en la superficie o la respuesta de sus propiedades geofísicas. Una actividad geológica reciente de origen endógeno, que produce estructuras tectónicas y criovolcánicas, revela un interior caliente que potencialmente puede sustentar un océano. Por ejemplo, las plumas del polo sur de Encélado que detectó la sonda Casini, que surgen de un terreno joven asociado

a fracturas, apuntan enérgicamente a la presencia de un océano. La composición de la superficie, en especial algunas especies químicas, como las sales que se originan en presencia de masas de agua líquida, también puede sugerir un océano subterráneo. Por ejemplo, el reciente emplazamiento de material endógeno rico en sales en la superficie de Ceres, como en el cráter Occator, se interpreta como evidencia de líquidos salinos formados en profundidad. Otras veces, los líquidos pueden estar en la superficie, como en Titán, cuya presencia se deduce por sus propiedades ópticas y de radar. Las medidas geofísicas que se han utilizado para confirmar los océanos son, por ejemplo, el estado orbital, la rotación diferencial de su capa exterior desacoplada del interior, la señal de un campo magnético autoinducido, o los datos de gravedad en combinación con una topografía detallada.

La detección de agua líquida en grandes cantidades advierte del potencial de **habitabilidad** de los objetos planetarios que la contienen y, por tanto, los mundos oceánicos adquieren gran interés en astrobiología. El atractivo se acentúa en aquellos cuerpos en los que el agua líquida

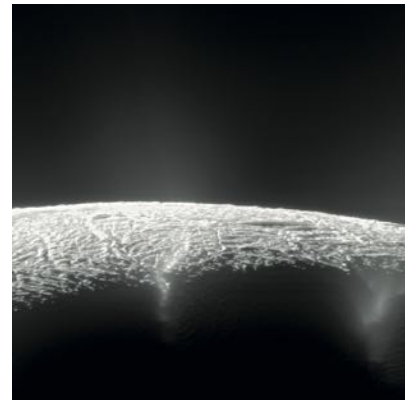


Figura 45:

Encélado, una de las lunas de Saturno.

Enceladus, one of Saturn's moons.

Emisión de material en una zona fractura de Encélado, próxima a su polo sur. La imagen fue tomada por la sonda Cassini-Huygens.

Emission of material in an area of Enceladus that presents fractures in its icy surface, close to its south pole. The image was taken by the Cassini-Huygens probe.

Crédito: NASA, the European Space Agency and the Italian Space Agency.

OCEAN WORLDS

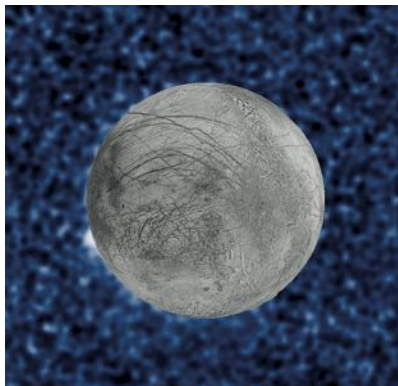


Figura 46:

Europa, la luna helada de Júpiter.

Jupiter's icy moon Europa.

Esta imagen compuesta de Europa muestra un presunto penacho de material de unos 40 km de altura. Fotografiado en luz ultravioleta por el telescopio espacial Hubble, se vio en silueta cuando la luna pasó por delante de Júpiter. La imagen de Europa fue tomada por la sonda Galileo de la NASA.

This composite image of Europa shows a suspected plume of material about 40 km high. Photographed in ultraviolet light by the Hubble Space Telescope, it was seen in silhouette as the moon passed in front of Jupiter. The image of Europa was taken by NASA's Galileo probe.

Ocean worlds are planetary objects that currently harbor liquid layers, usually **water**, on a global or regional scale. Such layers may be present on the surface, as in the case of the **Earth**, or in the interiors of **planets** and **ice** satellites of the giant planets of the **solar system** and beyond.

It has been suggested that there are a multitude of oceanic worlds in the solar system, but only a few are supported by strong evidence, for example Europa, Ganymede, Enceladus, or Titan. Among the planetary oceans to be confirmed are those of the dwarf planets Ceres and Pluto, as well as those of the satellites Triton, Ariel and Miranda, or Dione, for which we have scarce evidence. Several techniques are used to assess whether the icy worlds contain subsurface oceans, which investigate the ocean observable signs on the surface, or the indirect response of its geophysical properties. Generally, recent endogenous activity producing tectonic and cryovolcanic structures reveals a warm interior that can potentially support an ocean. For example, the plumes from the south pole of Enceladus detected by the Cassini probe, which arise from the fractures on the young ter-

rain, strongly point to the presence of an ocean. The composition of the surface, especially some chemical species, such as salts that originate in the presence of liquid water masses, may also suggest a subsurface ocean. The recent emplacement of endogenous salt-rich material on the surface of Ceres, such as in the Occator crater, is interpreted as evidence of saline liquids formed at depth. Conversely, liquids may be on the surface, as on Titan, whose presence is inferred from its optical and radar properties. Geophysical measurements that have been used to confirm the oceans are, for example, the orbital state, the differential rotation of its outer layer decoupled from the interior, the signal of a self-induced magnetic field, or gravity data in combination with detailed topography.

The detection of liquid water reservoirs alerts of the **habitability** potential of oceanic worlds and, consequently, are interesting for astrobiology. The attraction is accentuated in those bodies where the liquid water is in contact with the rock (as occur in Europa or Enceladus), since the interaction between both layers releases compounds to the

está en contacto con la roca (como Europa o Encelado), ya que la interacción entre ambas capas libera compuestos al océano potenciando su habitabilidad. Por otro lado, hay satélites en el sistema solar exterior que mantienen el agua líquida aislada entre fases distintas de hielo debido a su gran tamaño como las lunas Ganimedes, Calixto y Titán.

La exploración de los mundos oceánicos es prioritaria para la búsqueda de **vida** fuera de la Tierra por lo que hay misiones en desarrollo que tienen como objetivo

fundamental la caracterización de dichos océanos. Es el caso de las misiones Europa Clipper y Dragonfly de la NASA, por ejemplo, que se lanzarán a Europa y Titán en los próximos años. Encelado constituye también un objetivo de exploración preferente debido a la observación de plumas de materiales ricos en agua, volátiles y partículas de sal y silicatos. El análisis detallado de los compuestos de esas plumas nos ayudaría a caracterizar el océano del que supuestamente provienen sin tener que realizar perforaciones.

ocean enhancing its habitability. On the other hand, there are satellites in the outer solar system that keep liquid water isolated between different phases of ice due to their large size, such as the moons Ganymede, Callisto and Titan.

The exploration of oceanic worlds is also a priority in the search for extraterrestrial **life**, so there are space missions under development which main objective is the characterization of these oceans. This is

the case of NASA's Europa Clipper and Dragonfly missions, for example, which will be launched to Europa and Titan in the coming years. Considering this objective, Enceladus is a prime target as well due to the observation of plumes of water-rich materials, volatiles, and salt and silicate particles. Detailed analysis of the compounds in these plumes would help us to characterize the ocean from which they supposedly originate without having to drill holes.

Lecturas adicionales /Further reading

- HENDRIX, A. R., HURFORD, T. A., BARGE, L. M., et al. (2019). "The NASA Roadmap to Ocean Worlds". *Astrobiology*. Jan 2019.1-27.
- KIVELSON M.G., KHURANA K., STEVENSON D.J., et al. (1999). "Europa and Callisto: Induced or intrinsic fields in a periodically varying plasma environment". *J. Geophys. Res.* 104, pp. 4609–4629.
- LUNINE, J., I. (2017). "Ocean worlds exploration", *Acta Astronautica*, Volume 131, pp. 123-130, ISSN 0094-5765.
- NEVEU M., HAYS L., VOYTEK M., NEW M., AND SCHULTE M. (2018). "The ladder of life detection". *Astrobiology* 18.
- PAPPALARDO R.T., BELTON M.J.S., BRENNEMAN H.H., et al. (1999). "Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence". *J. Geophys. Res.* 104, pp. 24015–24056.
- SCHUBERT G., HUSSMANN H., LAINEY V., et al. (2010). "Evolution of icy satellites". *Space Sci. Rev.* 153, pp. 447–484.
- WAITE J. H., GLEIN C. R., PERRYMAN R. (2017). "Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: evidence for hydrothermal processes". *Science* 14, 356(6334), pp. 155-159.

69. MUTACIÓN

Una mutación es un cambio en la información genética contenida en un polímero informacional, es decir, una alteración en la secuencia de nucleótidos de un ácido nucleico (**ADN** o **ARN**), o bien en la secuencia de aminoácidos de una **proteína**. Los ácidos nucleicos y proteínas con mutaciones (y las entidades replicativas que contienen dichas moléculas modificadas, sean viroides, **virus**, microorganismos celulares u organismos pluricelulares) se denominan mutantes, mientras que los no alterados se conocen como “tipo silvestre” o *wild type*.

La introducción de mutaciones es una consecuencia inherente a la replicación del ADN (de células o virus) o del ARN (de virus o viroides), ya que las enzimas encargadas de realizar estos procesos nunca producen copias idénticas de la molécula molde y cometen un cierto número de errores. Con ello se contribuye a la generación de diversidad genética, lo

que resulta fundamental para la acción de la selección natural, motor de la **evolución biológica**.

Se define como tasa de mutación la fracción de mutaciones introducidas durante cada ronda de replicación de un ácido nucleico: de media, es de entre 10^{-3} y 10^{-5} (un error cada 1000 o cada 100 000 nucleótidos copiados) para el ARN y de entre 10^{-9} y 10^{-12} para el ADN (un error cada mil millones o cada billón de nucleótidos copiados). El motivo principal de esta gran diferencia de fidelidad de copia es que las enzimas que replican el ADN poseen una actividad adicional capaz de corregir los errores introducidos, mientras que las que replican el ARN carecen de dicha actividad correctora. Una de las consecuencias de este hecho es que los virus RNA y los viroides forman dentro de su hospedador distribuciones complejas de mutantes diferentes llamadas “**cuasiespecies** virales”.

La tasa de mutación natural o espontánea de las enzimas que copian el ADN o el ARN puede verse incrementada por la acción de diferentes agentes mutagénicos (que producen mutaciones) de tipo físico, químico o biológico. Entre ellos están la luz ultravioleta, las radiaciones ionizantes (energía de muy alta frecuencia como los rayos X o los rayos gamma) o determinadas moléculas que interfieren en el proceso de replicación. Se ha propuesto que la presencia de agentes mutagénicos en la **Tierra** primitiva pudo contribuir a un aumento de la diversidad genética durante el origen y la evolución temprana de la **vida**.

En los ácidos nucleicos pueden producirse diversos tipos de mutaciones, que conllevan sustituciones, inserciones o eliminaciones (“deleciones”) de nucleótidos. Cualquiera de estos procesos puede afectar a un único nucleótido (las denominadas mutaciones puntuales) o a

MUTATION

A mutation is a change in the genetic information contained in an informational polymer, that is, an alteration in the nucleotide sequence of a nucleic acid (**DNA** or **RNA**) or in the amino acid sequence of a **protein**. Nucleic acids and proteins with mutations (and the replicative entities containing such modified molecules, be they viroids, **viruses**, cellular microorganisms or multicellular organisms) are called mutants, while the unaltered ones are known as “wild type”.

The introduction of mutations is an inherent consequence of DNA replication (of cells or viruses) or RNA replication (of viruses or viroids), since the enzymes in charge of these processes never produce identical copies of the template molecules used but make a certain number of errors. This contributes to the generation of genetic diversity, which is essential for the action of natural selection, the driving force of **biological evolution**.

The mutation rate is defined as the fraction of mutations introduced during

each round of replication of a nucleic acid: on average, it ranges from 10^{-3} to 10^{-5} (one error per 1000 or per 100,000 nucleotides copied) for RNA, and from 10^{-9} to 10^{-12} for DNA (one error per billion or per trillion nucleotides copied). The main reason for this large difference in copying fidelity is that DNA replication enzymes have an additional activity capable of correcting most of the introduced errors, whereas RNA replication enzymes lack such activity. One consequence of this is that RNA viruses and viroids replicate within their host as complex distributions of different mutants called “viral **quasispecies**”.

The natural or spontaneous mutation rate of enzymes that copy DNA or RNA can be increased by the action of different mutagenic (mutation-producing) agents of a physical, chemical or biological nature. These include ultraviolet light, ionizing radiation (with very high frequency, such as X-rays or gamma rays) or certain molecules that interfere with the replication process.

It has been proposed that the presence of mutagenic agents on the early **Earth** may have contributed to an increase in genetic diversity during the origin and early evolution of **life**.

Various types of mutations can occur in nucleic acids, involving nucleotide substitutions, insertions or deletions. Any of these processes can affect either a single nucleotide (so-called point mutations) or a larger number of nucleotides, with or without influencing the sequence of the encoded protein. Mutations that alter the function of a gene are called direct, while those that have no apparent effect on the phenotype (observable traits of an organism) are called silent (or sometimes neutral).

In addition to mutations, insertions of longer or shorter segments of genetic material (from the same organism or even from a different one) through a process called recombination are relatively common, and have more profound physiological and evolutionary consequences. In-

un número mayor de ellos, influyendo o no en la secuencia de la proteína codificada. Las mutaciones que alteran la función de un gen se denominan directas y las que no tienen un efecto aparente en el fenotipo (rasgos observables de un organismo) se denominan silenciosas (o, en ocasiones, neutras).

Además de las mutaciones, las inserciones de segmentos más o menos largos de material genético (del mismo organismo o incluso de otros) mediante un proceso denominado recombinación son relativamente frecuentes, y poseen consecuencias fisiológicas y evolutivas más profundas. Las secuencias insertadas pueden ser de diferentes tipos, entre ellos los denominados transposones y los retrovirus. Adicionalmente, en los virus con genoma fragmentado (como es el caso de los de la gripe) se puede producir un reordenamiento de dichos fragmen-

tos, originando variantes muy diferentes de las originales.

La diferencia en la eficiencia biológica o *fitness* (que podemos entender como la capacidad reproductiva del organismo) entre los tipos silvestre y mutante en un entorno fisicoquímico concreto hará que la mutación o reordenamiento génico introducida en un genoma sea o no fijada en la línea de descendencia de dicho organismo. La gran mayoría de las mutaciones producen efectos negativos y no son seleccionadas, mientras que otras son neutrales y no confieren ventajas, pero contribuyen a la variabilidad genética de la población. En el caso poco frecuente de que un cambio genético origine una función mejorada o nueva, el organismo mutante poseerá una ventaja adaptativa frente al silvestre, con lo que a través de la selección natural podrá imponerse y hacerse mayoritario en la población.

served sequences can be of different types, including so-called transposons and retroviruses. Moreover, in viruses with fragmented genomes (such as influenza viruses), re-assortment of these fragments can occur, leading to variants that are very different from the original ones.

The difference in biological efficiency or fitness (which can be understood as the reproductive capacity of the organism) between wild and mutant types in a particular physico-chemical environment will determine whether or not the muta-

tion or gene rearrangement introduced into a genome is fixed in the offspring of such organism. The vast majority of mutations produce negative effects and are not selected for, while others are neutral and thus confer no advantage, but contribute to the genetic variability of the population. In the rare case where a genetic change results in an improved or new function, the mutant organism will have an adaptive advantage over the wild type, and it will be able to impose itself through natural selection and become dominant in the evolving population.

Lecturas adicionales /Further reading

FRIEDBERG, E.C., WALKER G.C., SIEDE, W., WOOD, R.D. (2005). *DNA repair and mutagenesis*. ASM Press, Washington, USA.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

KREBS, JOCELYN E., GOLDSTEIN, ELLIOTT S., KILPATRICK, STEPHEN T. (2017). *Lewin's GENES XII* 12th Edición. Ed. Jones & Bartlett Learning, Burlington, MA, USA.

LÁZARO, E. (2019). *La vida. Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Ed. Fundación Sicomoro, Madrid.

VILLALBA, A. (coordinador) (2021). Genes. *Escribiendo el guion de la vida*. Ed. Guadalquivir, Córdoba.

70. NEA, NEO Y PHA: ASTEROIDES POTENCIALMENTE PELIGROSOS

Entre la diversidad de cuerpos celestes que incluye el **sistema solar** se encuentran una enorme cantidad de **cometas** y asteroides, restos de la formación del **Sol** y sus **planetas**, que se incluyen en los cuerpos menores. Estos tienen tamaños y composiciones muy distintos y presentan órbitas en muchos casos fuertemente elípticas, de largos periodos, llegando a acercarse mucho al Sol.

Los asteroides se clasifican tanto por su composición (rocosa o metálica) como por sus elementos orbitales, sobre todo por su distancia al Sol. Desde el exterior hacia el centro del sistema solar se denominan Objetos Transneptunianos (TNO, por sus siglas en inglés), Centauros (localizados entre Neptuno y Júpiter), Troyanos (equidistantes del Sol y de Júpiter, en una disposición de triángulo equilátero), del cinturón de asteroides y los NEA (Near Earth Asteroids, asteroides cercanos a la **Tierra**), cuyas órbitas suelen cruzar la de la Tierra y están confinados dentro de la parte más interna del sistema solar.

Los NEO (“Near Earth Objects” u objetos cercanos a la Tierra) incluyen

también a cometas. Alrededor de un 10 % presentan una probabilidad de impacto relevante (en la actualidad el número asciende a 2199). Un NEA que se aproxima a menos de 0,05 unidades astronómicas (7,5 millones de kilómetros) a la Tierra y sea lo bastante brillante (una manera sencilla para estimar la masa) se denomina PHA (asteroide potencialmente peligroso, por sus siglas en inglés). El más brillante de los conocidos se denomina 1990 MU, de unos tres kilómetros de diámetro. La magnitud absoluta visual H (equivalente a su luminosidad en una escala logarítmica inversa) es esencial para determinar su potencial destructivo, ya que está relacionada con el tamaño y con su reflectividad (el porcentaje de luz que refleja) o albedo. Los PHA tienen magnitudes menores (más brillantes) que $H = 22$, lo que se traduce en tamaños mayores que 75-240 metros, dependiendo del albedo. Son los asteroides de mayor potencial destructivo, de los que se conocen unos 157 con un tamaño superior a un kilómetro.

Objetos menos brillantes y por tanto de menor tamaño no han sido estudiados

con tanto detalle hasta el momento, debido a que no se les considera que puedan provocar una catástrofe global. Sin embargo, un impacto, equivalente a varios millares de bombas atómicas como la de Hiroshima, producido por un cometa o asteroide de reducido tamaño, arrasó 2000 kilómetros cuadrados en la región de Tuskusca, en Siberia. Una categoría aparte está compuesta por los objetos AC3, por el asteroide 2006 AC3, que tiene magnitud $H = 24,2$ y un tamaño de unos 50 metros.

Las búsquedas y catalogación de todos estos objetos son procesos dinámicos y el cálculo de las órbitas está sujeto a grandes incertidumbres, ya que requiere técnicas matemáticas muy complejas. Cuando un objeto, bien sea tipo PHA o tipo AC3, se descubre y se clasifica, el cálculo de la probabilidad de impacto con la Tierra está fuertemente condicionada por la precisión con la que se conocen los elementos orbitales. Según se añaden nuevos datos (nuevos puntos en la órbita a partir de las observaciones), aquellos se refinan, y por lo general el objeto termina saliendo de la lista de objetos realmente peligrosos.

NEA, NEO AND PHA: POTENTIALLY HAZARDOUS ASTEROIDS

Among the diversity of celestial bodies included in the **solar system** are an enormous number of **comets** and asteroids, the minor bodies, remnants of the formation of the **Sun** and its **planets**. These have very different sizes and compositions and in many cases have strongly elliptical orbits, with long periods, coming very close to the Sun.

Asteroids are classified both by their composition (rocky or metallic) and by their orbital elements, especially by their distance from the Sun. From the outside to the center of the solar system they are called Trans-Neptunian Objects (TNO), Centaurs (located between Neptune and Jupiter), Trojans (equidistant from the Sun and Jupiter, in an equilateral triangle arrangement), the asteroid belt and NEAs (Near **Earth** Asteroids), whose orbits usually cross that of the Earth and are confined within the innermost part of the solar system.

NEOs (Near Earth Objects) also include comets. About 10% have a relevant impact probability (currently the number is 2199). A NEA that comes within 0.05 astronomical units (7.5 million kilometers)

of Earth and is bright enough (a simple way to estimate mass) is called a PHA (potentially hazardous asteroid). The brightest of the known ones is called 1990 MU, about three kilometers in diameter. The visual absolute magnitude H (equivalent to its luminosity on an inverse logarithmic scale) is essential to determine its destructive potential, as it is related to size and to its reflectivity or albedo. PHAs have magnitudes lower (brighter) than $H = 22$, which translates into sizes greater than 75-240 meters, depending on albedo. They are the most potentially destructive asteroids, of which about 157 are known to be larger than one kilometer.

Less bright and therefore smaller objects have not been studied in such detail so far, because they are not considered to be capable of causing a global catastrophe. So, an impact, equivalent to several thousand atomic bombs like the one at Hiroshima, produced by a small comet or asteroid, devastated 2000 square kilometers in the region of Tuskusca, in Siberia. A separate category is composed of AC3 objects, by the asteroid 2006 AC3, which has magnitude $H = 24.2$ and a size of about 50 meters.

The searches and cataloging of all these objects are dynamic processes and the calculation of the orbits is subject to large uncertainties, since it requires very complex mathematical techniques. When an object, either type PHA or type AC3, is discovered and classified, the calculation of the probability of impact with the Earth is strongly conditioned by the precision with which we know the orbital elements. As new data are added (new points in the orbit from observations), they are refined, and usually the object ends up being removed from the list of really hazardous objects.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Peligros C3smicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Ober3n, ISBN-10-8441543518.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en lnea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

71. PALEOAMBIENTES PLANETARIOS

En general, se denomina paleoambiente al conjunto de condiciones climatológicas, hidrológicas, geológicas y biológicas que se dieron en un tiempo pasado de la **Tierra** (ver término **Paleoatmósfera**). A raíz de la aparición de las ciencias planetarias, surge la necesidad de encontrar términos que nos permitan describir situaciones o características que hasta ese momento se utilizaban exclusivamente para describir la Tierra. Así surge el término paleoambiente planetario, que por analogía al término paleoambiente utilizado en el caso terrestre, hace referencia al conjunto de condiciones climatológicas, hidrológicas, geológicas y biológicas que pudieron haberse dado hace miles de millones de años en un planeta distinto al nuestro, bien dentro de nuestro **sistema solar** o incluso fuera de él.

El estudio de los paleoambientes planetarios permite conocer las condiciones que tuvieron lugar en el pasado de los cuerpos celestes, permitiéndonos extraer conclusiones sobre su **evolución** climática, hidrogeológica y biológica, de existir. Además, por analogía, contribuye a predecir el futuro ambiental de la Tierra

y así identificar los factores más determinantes, para intentar prevenir posibles catástrofes ambientales y climáticas.

Los paleoambientes planetarios se pueden estudiar de varias formas: i) Estudiando **análogos terrestres** de los cuerpos celestes objeto de estudio. Es decir, aquellos lugares de la Tierra que comparten ciertas características geológicas o ambientales con otros planetas. ii) Analizando en el laboratorio los procesos que pudieron darse en el pasado de estos cuerpos, intentando reproducir su tipo de **atmósfera**, sus componentes rocosos, u otros aspectos relevantes, para entender como todos estos factores interaccionaron entre sí. iii) Mediante técnicas de teledetección, ya que algunos planetas, como **Marte**, apenas han cambiado desde hace miles de millones de años. A partir de los datos obtenidos con los orbitadores y misiones espaciales a estos planetas (ver **Misiones planetarias en el sistema solar**) se puede obtener información sobre su composición atmosférica, topografía, geología o meteorología, lo que ayuda a reconstruir los paleoambientes plane-

tarios. iv) **Exploración in situ** de otros planetas mediante aparatos robóticos que pueden tomar muestras directamente sobre la superficie de estos cuerpos celestes, como es el caso de los rovers utilizados en las misiones a Marte. v) Mediante simulaciones por ordenador se puede llegar a reconstruir procesos dinámicos (que evolucionan en el tiempo) ocurridos en otros planetas, como, por ejemplo, procesos meteorológicos, hidrogeológicos y químicos.

Conocer los paleoambientes de los planetas del sistema solar es fundamental a la hora de determinar las posibles condiciones de **habitabilidad**, así como la emergencia de la **vida** y su posible evolución (ver **Zona de habitabilidad galáctica**). Aun así, las hipótesis de partida, e inevitablemente muchas de las conclusiones, están influidas por el conocimiento acerca de cómo evolucionó la Tierra y la vida que en ella se generó. Sin embargo, es posible que la actividad biológica en otros planetas sea muy diferente y haya evolucionado de forma completamente distinta en ambientes (o paleoambientes) radicalmente diferentes al de la Tierra.

PLANETARY PALEOENVIRONMENTS

In general, paleoenvironment is the name given to the set of climatological, hydrological, geological and biological conditions that existed in the **Earth's** past (see term **Paleoatmosphere**).

As a result of the emergence of Planetary Sciences, the need arises to find terms that allow us to describe situations or characteristics that until then were used exclusively to describe our planet. Thus, the term planetary paleoenvironment was raised, which by analogy to the term paleoenvironment used in the case of the Earth, refers to the set of climatological, hydrological, geological and biological conditions that could have occurred billions of years ago on a planet other than our own, either within our **solar system** or even outside it.

The study of planetary paleoenvironments allows us to know the conditions that took place in the past of celestial bodies, allowing us to draw conclusions about their climatic, hydrogeological and biological **evolution**, if any. Furthermore, by analogy, it helps to predict the Earth's environmental future and thus to identify the most determining factors, in order to try to prevent possible environmental and climatic catastrophes.

Planetary paleoenvironments can be studied in several ways: i) By studying **terrestrial analogues** of the celestial bodies under study. That is, those places on Earth that share certain geological or environmental characteristics with other planets. ii) Analyzing in the laboratory the processes that may have occurred in the past of these bodies, trying to reproduce their type of **atmosphere**, their rocky components, or other relevant aspects, to understand how all these factors interacted with each other. iii) Using remote sensing techniques, since some planets, such as **Mars**, have hardly changed for billions of years. From the data obtained by orbiters and space missions to these planets (see **Planetary missions in the solar system**), information can be obtained on their atmospheric composition, topography, geology or meteorology, which helps to reconstruct the planetary paleoenvironments. iv) **In situ exploration** of other planets by means of robotic devices that can take samples directly on the surface of these celestial bodies, as it is the case of the rovers used in missions to Mars. v) Computer simulations can be used to reconstruct dynamic processes (that

evolve over time) that have occurred on other planets, such as meteorological, hydrogeological and chemical processes.

Learning about the paleoenvironments of the planets of the solar system is fundamental to determine the possible conditions of **habitability**, as well as the emergence of **life** and its possible evolution (see **Galactic habitability zone**). Even so, the starting hypotheses, and inevitably many of the conclusions, are influenced by the knowledge about how the Earth evolved and the life that was generated on it. However, it is possible that biological activity on other planets is very different and has evolved completely differently in environments (or paleoenvironments) radically different from Earth.

Lecturas adicionales /Further reading

CARRIÓN, J. S., FERNÁNDEZ, S., FUENTES, N. (2006). *Paleoambientes y cambio climático*, 1ª ed. Murcia: Fundación Séneca, 2006, ISBN 84-932456-6-6.

IGME, "Paleoambientes sedimentarios", [en línea] <<https://www.igme.es/epvrf/FonelasP1/PaleoambientesSedimentarios.aspx>>

72. PALEOATMÓSFERA

Una paleoatmósfera, o **atmósfera** primitiva, es aquella correspondiente a las primeras etapas de un cuerpo planetario. El conocimiento actual acerca de las paleoatmósferas (principalmente de la **Tierra y Marte**), ha sido el resultado de un gran número de trabajos científicos en los que se han desarrollado modelos teóricos y realizado experimentos para entender cómo han evolucionado a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta la escasez de datos que se tienen de aquella época. La composición de las paleoatmósferas del **sistema solar** depende de la zona donde comenzó el proceso de formación planetaria por acreción gravitatoria (fenómeno por el cual materia, normalmente gas, es atraída por un cuerpo debido a la interacción gravitatoria y pasa a incorporarse al mismo), de tal forma que la distancia cuerpo-estrella y su gradiente térmico (variación de temperatura con la distancia) juegan un papel fundamental. Otro aspecto importante en el estudio de las paleoatmósferas es su estado de oxidación. Estas podrían haber pasado por estados reductores (cuando sus condiciones atmosféricas impiden los procesos de oxidación debido a la au-

sencia completa o casi completa de oxígeno y otros oxidantes) u oxidante (si su composición es elevada en gases como el oxígeno, dióxido de carbono, el vapor de **agua** o el nitrógeno).

La paleoatmósfera de la Tierra habría pasado por diferentes etapas: una primera etapa reductora (hace unos ~4490 millones de años), formada por la desgasificación de los gases reductores enterrados en el proceso de formación del núcleo y procedentes de la nebulosa solar (principalmente hidrógeno), y los emitidos por actividad volcánica (dióxido de carbono y vapor de agua), a la que seguiría una segunda etapa débilmente reductora (hace unos ~4400 millones de años) la cual se habría formado al añadirse paulatinamente gases procedentes del manto y los aportados en los impactos de planetesimales o agregados de materia rocosos, vaporizados en la colisión y ricos en vapor de agua, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃), metano (CH₄) e hidrógeno. La tercera etapa de la paleoatmósfera terrestre estaría ligada a la aparición de las primeras formas de **vida** (hace

~4100-3400 millones de años) y el impacto que estas tuvieron en la atmósfera. Los microbiólogos tienen indicios de que los primeros seres vivos eran procariotas metanógenos anaerobios, organismos unicelulares que sobreviven sin oxígeno, que respiraban gases de origen volcánico (dióxido de carbono e hidrógeno) produciendo como desecho grandes cantidades de metano. Posteriormente (hace ~3000-2500 millones de años), estos metanógenos debieron evolucionar hacia los primeros organismos generadores de oxígeno (cianobacterias), iniciándose la fotosíntesis oxigénica, en la que se aprovecha la energía solar para romper las moléculas de agua y así liberar oxígeno. La presencia de estas cianobacterias modificó considerablemente las condiciones de la atmósfera, incrementando la cantidad de oxígeno desde un 1 % hasta el 21 % de la actualidad.

En el caso de la paleoatmósfera de Marte, hoy pensamos que debió ser mucho más densa que la de la actualidad, siendo esta última unas cien veces menos densa que la de la Tierra actual. Debido a que Marte tiene, aproximadamente, la mitad del ta-

PALEOATMOSPHERE

A paleoatmosphere, or primitive **atmosphere**, is that corresponding to the first stages of a planetary body. Our current knowledge about the paleoatmospheres (mainly of the **Earth** and **Mars**), has been the result of a large number of scientific works in which theoretical models have been developed and experiments have been carried out to understand how they have evolved throughout time, taking into account the scarcity of data we have from that time. The composition of the paleoatmospheres of the **solar system** depends on the area where the process of planetary formation by gravitational accretion (a phenomenon by which matter, usually gas, is attracted to a body due to gravitational interaction and becomes incorporated into it) began, so that the body-star distance and its thermal gradient (temperature variation with distance) play a fundamental role. Another important aspect in the study of paleoatmospheres is their oxidation state. These could have passed through reducing states (when their atmospheric conditions prevent oxidation processes due to the complete or almost complete absence of oxygen and other oxidants)

or oxidizing (if their composition is high in gases such as oxygen, carbon dioxide, **water** vapor or nitrogen).

The Earth's paleoatmosphere would have gone through different stages: a first reducing stage (about ~4490 million years ago), formed by the degassing of the reducing gases buried in the process of core formation and coming from the solar nebula (mainly hydrogen), and those emitted by volcanic activity (carbon dioxide and water vapor), followed by a second weakly reducing stage (~4.4 billion years ago) which would have been formed by the gradual addition of gases from the mantle and those contributed in the impacts of planetesimals or rocky aggregates of matter, vaporized in the collision and rich in water vapor, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), ammonia (NH₃), methane (CH₄) and hydrogen. The third stage of the terrestrial paleoatmosphere would be linked to the appearance of the first **life** forms (~4100-3400 million years ago) and the impact they had on the atmosphere. Microbiologists have evidence that the first living things were anaerobic methano-

genic prokaryotes, single-celled organisms that survive without oxygen, which breathed volcanic gases (carbon dioxide and hydrogen) producing large amounts of methane as waste. Subsequently (~3000-2500 million years ago), these methanogens must have evolved into the first oxygen-generating organisms (cyanobacteria), initiating oxygenic photosynthesis, in which solar energy is harnessed to break down water molecules and thus release oxygen. The presence of these cyanobacteria considerably modified the conditions of the atmosphere, increasing the amount of oxygen from 1% to 21% today.

In the case of the paleoatmosphere of Mars, it is now known that it must have been much denser than that of today, now is about a hundred times less dense than that of present-day Earth. Because Mars is about half the size of Earth, the red planet could have lost its internal heat very quickly, which could have caused its planetary magnetic field (the protective shield of an atmosphere, preventing erosion and water loss) to disappear, as the convection movement of magma in the

maño que la Tierra, el planeta rojo podría haber perdido su calor interno de forma muy rápida, lo que pudo provocar que su campo magnético planetario (escudo protector de una atmósfera, evitando su erosión y pérdida de agua) desapareciera, al cesar el movimiento de convección del magma en el núcleo del planeta (ver término **Interacción estrella-planeta**). Marte se quedó por tanto expuesto y a merced del virulento bombardeo constante de las partículas del viento solar, las cuales fueron erosionando poco a poco la atmósfera marciana hasta nuestros días. Recientes investigaciones del orbitador marciano MAVEN han evidenciado que

Marte pierde como mínimo en la actualidad 8 toneladas al día de atmósfera. Otra forma de reconstruir las condiciones de la atmósfera primitiva de Marte es medir su composición isotópica actual. La escasez de isótopos ligeros en la atmósfera marciana actual indica que determinados procesos los han ido eliminando a lo largo de su historia. Uno de estos procesos es el escape fotoquímico por el cual las moléculas de la atmósfera son ionizadas por el viento solar y estos iones, al colisionar con otros o con un electrón, pueden dividirse en átomos individuales de menor masa y con energía suficiente para escapar de la gravedad.

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

PLA-GARCÍA, J., & MENOR-SALVÁN, C. (2017). *La composición química de la atmósfera primitiva del planeta Tierra*. Anales de Química de la RSEQ, 113(1).

planet's core ceased (see term **Star-planet interaction**). Mars was then exposed to the constant virulent bombardment of solar wind particles, which gradually eroded the Martian atmosphere until today. Recent investigations by the Martian orbiter MAVEN have shown that Mars is currently losing at least 8 tons of atmosphere per day. Another way to reconstruct the conditions of the early atmosphere of Mars is to measure its current isotopic composition. The scarcity of light isotopes in the present-day Martian atmosphere indicates that certain processes have been removing them throughout its history. One of these processes is photochemical escape by which molecules in the atmosphere are ionized by the solar wind and these ions, upon collision with each other or with an electron, can split into individual atoms of lower mass and sufficient energy to escape gravity.

SUPEREON	EON	ERA	ATMÓSFERA	MILLONES AÑOS ATRÁS	EVENTO
FANEROZOICO					
PRECAMBRIICO	PROTEROZOICO	TARDIO	ATMÓSFERA BIÓTICA Fondos oceánicos aeróbicos	-542 - Hoy	Vida animal
				-570	Evento Shuram: enorme impacto que redujo la oblicuidad terrestre
				-582	Glaciación Gaskiers
		-635-582		Periodo interglacial	
		-650-635		Glaciación Marinoan, Multicelularidad (~640 Ma)	
		-700-655		Periodo interglacial	
	-730-705	Glaciación Sturtian			
	-1.700 - 1.000	Los estromatolitos alcanzan su mayor abundancia y diversidad (~1.200 Ma)			
	-1.800				
	-1.900	Atmósfera y fondo oceánico aeróbicos			
	-2.000	Fin de glaciación			
	-2.400 - 2.100	El aumento de O ₂ consume CH ₄ (además de ser tóxico para los metanógenos), haciendo descender las temperaturas: Glaciación Huronian . Teoría Tierra Bola de Nieve			
-2.400	Gran Evento Oxidativo (GOE) : el O ₂ comienza a acumularse en la atmósfera				
-2.500	Cianobacterias comienzan a acumular O ₂ en la atmósfera (fotosíntesis)				
-2.800 - 2.500	Condiciones reductoras en los fondos oceánicos (formaciones de hierro bandeado). Primeros estromatolitos contrastados (~2.600 Ma)				
-2.900	Glaciación Pongopong debida a los hidrocarburos acumulados en la atmósfera que apantallaban frente a UV. Teoría Tierra Bola de Nieve				
-3.000	Primeras cianobacterias productoras de O ₂ (fotosíntesis oxigénica). Formación de placas continentales				
-3.400 - 3.100	El metano se ha acumulado en la atmósfera, y la concentración de CO ₂ ha disminuido un orden de magnitud				
-3.500	Primeros fósiles (Strelley Pool, Australia)				
-3.700 - 3.600	Los metanógenos comienzan a producir metano				
-3.850	Posibles evidencias de actividad biológica (podrían ser incluso anteriores a 4.100 Ma) al identificarse isótopos de carbono en apatitas: metanógenos que consumían CO ₂ (descenso de CO ₂ y aumento de CH ₄)				
-4.100 - 3.900	LHB Gran Bombardeo Tardío (LHB): aporte de grandes cantidades de H ₂ O y abundante vulcanismo (grandes cantidades de CO ₂ a la atmósfera).				
-4.200	Clima Templado				
-4.400	Formación de océano de agua líquida (datos isótopos en granos de circones), gracias a que el CO ₂ compensa el joven Sol tenue				
-4.490	Gran Bombardeo Temprano (Incorporación de H ₂ O y orgánicos procedentes de asteroides carbonáceos). El CO ₂ (volcanes), compensa la paradoja del joven Sol tenue: la Tierra se enfría pero más lentamente (agua líquida)				
-4.490	Tierra formada: núcleo y corteza (diferenciación planetaria). Primera atmósfera: H ₂ , CO ₂ y H ₂ O. Muy inestable por la pérdida de gases ligeros al espacio, lo que conlleva, sumado a una menor luminosidad solar en el visible, un enfriamiento de la Tierra				
-4.518±10	Gran Impacto que formó la Luna				
-4.538	Proto-Tierra formada. Formación de océano de magma debido al elevado calor de las colisiones (que entierran CO ₂)				
-4.568	ADICIÓN INICIAL Origen del Sistema Solar (elementos más antiguos, las CAIs). Comienza el proceso de formación de la Tierra agregando planetesimales				

Figura 47:

Fases de la atmósfera terrestre frente a las eras geológicas.

Phases of the Earth's atmosphere versus geological eras.

Adaptado de Pla-García y Menor-Salván 2017.

73. PANSPERMIA

La panspermia (del griego *pan*, “todo”, y *sperma*, “semilla”) es una hipótesis no probada que sostiene que la **vida** en la **Tierra** tiene un origen extraterrestre. De forma más general, la panspermia postula la migración interplanetaria o interestelar de microorganismos simples, distribuyéndose continuamente por medio de portadores como **meteoritos**, asteroides y **cometas**. Así pues, la panspermia no busca responder directamente a la cuestión última sobre el origen de la vida, sino que propone un mecanismo de propagación de la misma.

La idea de que la vida pudo haberse originado en algún otro rincón del universo es muy antigua. El concepto panspermia aparece ya mencionado en los escritos del filósofo griego Anaxágoras (siglo V a. e. c.), pero no fue hasta finales del s. XIX y comienzos del XX, con el auge de la microbiología, que se abordó desde un prisma científico. En las últimas décadas, el descubrimiento

de numerosos compuestos orgánicos en el medio interestelar, así como de miles de sistemas exoplanetarios (muchos de los cuales albergan planetas en la denominada zona habitable, ver **Zona de habitabilidad galáctica**) ha reavivado el interés por esta hipótesis en el ámbito de la Astrobiología.

Existen diversos modelos de panspermia, entre los cuales destaca la litopanspermia (del griego *lithos*, “piedra”), según la cual sería posible una transferencia de organismos entre cuerpos de un mismo sistema planetario, contenidos en fragmentos de roca provenientes de superficies planetarias, que han sido expulsados al espacio por el impacto de asteroides o cometas. No obstante, la panspermia, en su concepción original, es altamente especulativa y presenta algunos inconvenientes tanto desde el punto de vista fisicoquímico (los organismos deberían soportar condiciones extremadamente hostiles en un supuesto viaje a través del espacio y,

posteriormente sobrevivir a la entrada en la **atmósfera** del planeta receptor), como del estadístico (puesto que la probabilidad de algunos de los eventos necesarios para que se produzca la panspermia es, *a priori*, muy baja). Por ello, la mayor parte de los esfuerzos en este ámbito se centran en el estudio de organismos **extremófilos** (organismos que viven en condiciones extremas) en la Tierra, y en el desarrollo de modelos estadísticos que permitan estimar la viabilidad, tasas de transferencia y escalas de tiempo de los distintos mecanismos de panspermia.

La panspermia blanda o panspermia molecular constituye una hipótesis alternativa más plausible. Esta propone que, en lugar de formas de vida, son los componentes básicos de la misma (por ejemplo, compuestos prebióticos como aminoácidos y azúcares) los que se originan en el espacio y son posteriormente distribuidos a las superficies planetarias por medio de impactos.

PANSPERMIA

Panspermia (from the Greek *pan*, “all”, and *sperma*, “seed”) is an unproven hypothesis that holds that **life** on **Earth** has an extraterrestrial origin. More generally, panspermia postulates the interplanetary or interstellar migration of simple microorganisms, continuously distributed by carriers such as **meteorites**, asteroids and **comets**. Thus, panspermia does not seek to answer directly the ultimate question of the origin of life, but rather proposes a mechanism for the propagation of life.

The idea that life could have originated in some other corner of the universe is very old. The concept of panspermia is already mentioned in the writings of the Greek philosopher Anaxagoras (5th century B.C.E.), but it was not until the late 19th and early 20th centuries, with the rise of microbiology, that it was approached from a scientific perspective. In recent decades, the discovery of numerous organic compounds in the interstellar medium, as well as thousands of exoplanetary systems (many of which host planets in the so-called habitable zone, see **Habitability zone**) has rekindled interest in this hypothesis in the field of Astrobiology.

There are several models of panspermia, among which lithopanspermia (from the Greek *lithos*, “stone”) stands out. Lithopanspermia proposes that it would be possible to transfer organisms between bodies in the same planetary system, contained in rock fragments from planetary surfaces, which have been ejected into space by the impact of asteroids or comets. However, panspermia, in its original conception, is highly speculative and presents some drawbacks from the physical-chemical point of view (the organisms would have to endure extremely hostile conditions in a supposed journey through space and then survive the entry into the **atmosphere** of the receiving planet) as well as from the statistical point of view (since the proba-

bility of some of the events necessary for panspermia to occur is, a priori, very low). Therefore, most of the efforts in this field are focused on the study of **extremophile** organisms (organisms that live in extreme conditions) on Earth, and on the development of statistical models to estimate the viability, transfer rates and time scales of the different panspermia mechanisms.

Soft panspermia or molecular panspermia is a more plausible alternative hypothesis. It proposes that, instead of life forms, it is the building blocks of life (e.g., prebiotic compounds such as amino acids and sugars) that originate in space and are subsequently distributed to planetary surfaces by impacts.

Lecturas adicionales /Further reading

MELOSH, H. (1988). “The rocky road to panspermia”, *Nature* 332, pp. 687–688.

NAPIER, W. M. (2004). “A mechanism for interstellar panspermia”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 348, pp. 46–51.

LINGAM, M. (2016). “Analytical approaches to modelling panspermia – beyond the mean-field paradigm”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 455, pp. 2792–2803.

GOBAT, R. (2021). “Panspermia in a Milky Way-like Galaxy”, *ApJ*, 921, 157.

MARTÍN, D. *Eureka*, “Panspermia en el Sistema Gliese 581”, [en línea]

<https://danielmarin.naukas.com/2012/03/25/panspermia-en-el-sistema-gliese-581/>.

74. PDS Y PSA (ACRÓNIMOS). SISTEMA DE DATOS PLANETARIOS Y ARCHIVO DE CIENCIAS PLANETARIAS

El Planetary Data System (PDS, Sistema de Datos Planetarios) es un sistema de archivado distribuido y a largo plazo que NASA emplea para almacenar, documentar y poner a disposición de la comunidad científica internacional todos los productos de datos digitales generados por las **misiones planetarias** que esta agencia desarrolla, es decir, procedentes de los orbitadores, aterrizadores o vehículos exploradores, así como de los sistemas terrestres de apoyo a las misiones que sean relevantes para ese propósito.

De manera equivalente, el Planetary Science Archive (PSA, Archivo de Ciencias Planetarias) es el repositorio de la Agencia Espacial Europea (ESA), donde se almacenan los datos científicos y de ingeniería generados por las misiones europeas al **sistema solar**.

Tanto uno como otro responden al compromiso de ambas agencias espaciales para con la comunidad científica internacional, por el cual, tras un cierto y corto tiempo empleado para la validación, calibración y revisión de los datos generados por las misiones, estos son puestos a libre disposición de los investigadores planetarios, pudiéndose descargar de manera gratuita. Para ello, estos sistemas emplean unos estrictos estándares de formato, documentación y almacenamiento que garanticen la durabilidad y compatibilidad futura.

Los productos archivados son preparados, bien documentados, catalogados, revisados por otros investigadores de manera independiente (revisión por pares) y distribuidos en nodos (distintos repositorios organizados por disciplinas y que tie-

nen por fin facilitar el acceso), para garantizar su calidad, utilidad y facilidad de uso por parte de los potenciales interesados. También se proporcionan herramientas y código *software* para ayudar a producir, obtener y utilizar esos datos almacenados.

En el caso del PDS y en la actualidad (la distribución tiende a cambiar con el tiempo), los nodos en los que se distribuyen los productos planetarios son:

- **Atmósferas** (ATM), albergado por la Universidad Estatal de Nuevo México, donde se almacenan los datos atmosféricos de las misiones planetarias de NASA, con exclusión de los terrestres y las imágenes.

PDS AND PSA (ACRONYMS). PLANETARY DATA SYSTEM AND PLANETARIAN SCIENCE ARCHIVES

The Planetary Data System (PDS) is a long-term, distributed archiving system used by NASA to store, document and make available to the international scientific community all digital data products generated by the agency's **planetary missions**, i.e., from orbiters, landers or rovers, as well as from ground-based mission support systems relevant to that purpose.

Similarly, the Planetary Science Archive (PSA) is the repository of the European Space Agency (ESA), where scientific and engineering data generated by European missions to the **solar system** are stored.

Both of them respond to the commitment of both space agencies to the international scientific community, by

which, after a certain and short time used for the validation, calibration and revision of the data generated by the missions, these are made freely available to planetary researchers and can be downloaded free of charge. To this end, these systems employ strict formatting, documentation and storage standards to ensure durability and future compatibility.

The archived products are prepared, well documented, catalogued, independently peer-reviewed and distributed in nodes (different repositories organized by disciplines and intended to facilitate access), to ensure their quality, usefulness and accessibility for potential users. Tools and software code are also provided to help produce, obtain and use these stored data.

In the case of the PDS and at present (distribution tends to change over time), the nodes where planetary products are distributed are:

- **Atmospheres** (ATM), hosted by New Mexico State University, where atmospheric data from NASA planetary missions, excluding terrestrial and imagery, are stored.
- **Geosciences** (GEO), hosted by Washington University in St. Louis, where digital data related to the study of the surfaces and interiors of terrestrial planetary bodies are archived.

- Geociencias (GEO), alojado en la Universidad de Washington en San Luis, donde se archivan los datos digitales relacionados con el estudio de las superficies e interiores de los cuerpos planetarios terrestres.
 - Cartografía e imágenes (IMG), controlado por el Jet Propulsion Laboratory y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, almacena las principales colecciones de imágenes digitales de muchos cuerpos planetarios terrestres y satélites helados, y sus datos auxiliares correspondientes, así como herramientas para su fácil utilización.
 - Interacciones plasmáticas planetarias (IPP), bajo el control de la Universidad de California en Los Ángeles, archiva y distribuye los datos digitales relacionados con el estudio de la interacción entre el viento solar y los vientos planetarios, con las magnetosferas, ionosferas y superficies planetarias.
 - Sistemas de anillos y lunas (RMS), en el Instituto SETI, se ocupa de archivar los conjuntos de datos científicos relevantes para los sistemas planetarios, incluidos los planetas, anillos y lunas, y las formas en la que interactúan.
 - Cuerpos pequeños (SBN), en la Universidad de Maryland, se especializa en el archivado de los datos científicos de misiones enfocadas a asteroides, **cometas** y **polvo** interplanetario, así como la recopilación de información sobre cuerpos pequeños de la literatura publicada.
 - Servicio de información de navegación y auxiliar (NAIF), alojado en el Jet Propulsion Laboratory, EE. UU., proporciona herramientas y sistemas de información en apoyo a la planificación e interpretación de las geometrías orbitales de las misiones espaciales.
- Estos nodos, a su vez, pueden albergar otros subnodos para facilitar el acceso y la catalogación.

- Mapping and Imaging (IMG), controlled by the Jet Propulsion Laboratory and the U.S. Geological Survey, stores major digital image collections of many terrestrial planetary bodies and icy satellites, and their associated ancillary data, as well as tools for ease of use.
- Planetary Plasma Interactions (PPI), under the control of the University of California at Los Angeles, archives and distributes digital data related to the study of the interaction of solar wind and planetary winds with magnetospheres, ionospheres, and planetary surfaces.
- Ring and Moon Systems (RMS), at the SETI Institute, archives scientific datasets relevant to planetary systems, including planets, rings and moons, and the ways in which they interact.
- Small Bodies (SBN), at the University of Maryland, specializes in archiving science data from missions focused on asteroids, **comets**, and interplanetary **dust**, as well as collecting information on small bodies from the published literature.
- Navigation and Auxiliary Information Facility (NAIF), hosted at the Jet Propulsion Laboratory, USA, provides tools and information systems in support of the planning and interpretation of space mission orbital geometries.

These nodes, in turn, can host other sub-nodes to facilitate access and cataloging.

75. PERCLORATO

Compuesto químico en el que cada átomo de cloro se enlaza a cuatro átomos de oxígeno (ion perclorato) y que puede encontrarse en forma de sal. Utilizado para la fabricación de explosivos y combustibles, se le considera también un peligroso contaminante. Su presencia puede impactar en la **habitabilidad** de cuerpos planetarios (como **Marte** donde se cree muy abundante en superficie) tanto de forma negativa como positiva. Interfiere en la detección y preservación de materia orgánica, pero también permite la presencia del **agua** líquida en las condiciones actuales del planeta en superficie y subsuperficie.

Aunque puede producirse de manera artificial, los percloratos se forman naturalmente en la **atmósfera** terrestre. Hay depósitos importantes en zonas áridas, como los desiertos de Chile y Estados Unidos. También se han detectado en **muestras** y **meteoritos** lunares y múltiples análisis parecen indicar ele-

Figura 48:

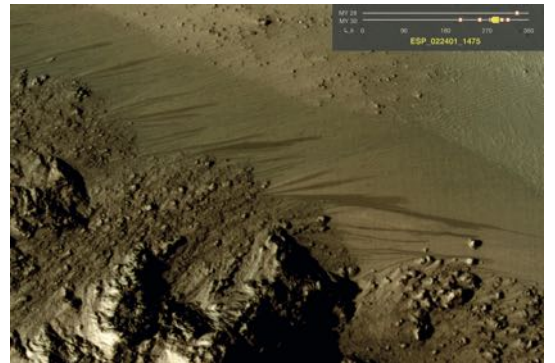
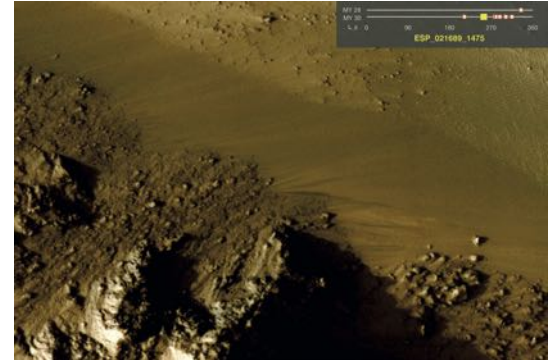
Líneas recurrentes en pendiente.

Recurring Slope Lineae (RSL).

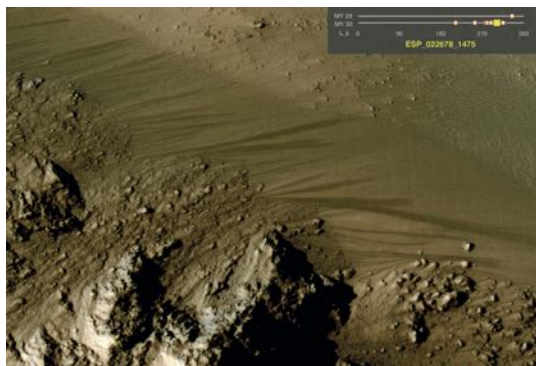
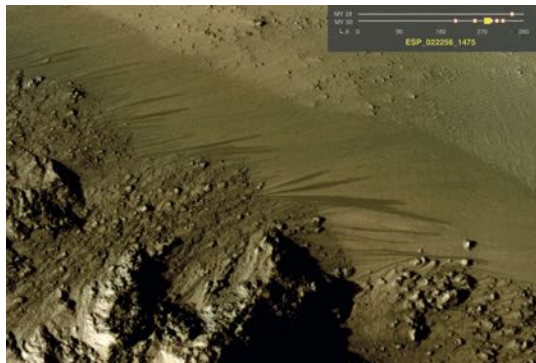
Secuencia temporal de las líneas recurrentes en pendiente que se han relacionado con percloratos en Marte. Imágenes en color y alta resolución de HiRISE.

Time sequence of the Recurring Slope Lineae which have been associated with perchlorates on Mars. High-resolution color images from HiRISE.

Crédito: NASA/JPL-Caltech/UArona.



PERCHLORATE



A chemical compound in which each chlorine atom is bonded to four oxygen atoms (perchlorate ion) and which can be found in salt form. Used in the manufacture of explosives and fuels, it is also considered a dangerous pollutant. Its presence can impact the **habitability** of planetary bodies (such as **Mars** where it is believed to be very abundant on the surface) both negatively and positively. It interferes with the detection and preservation of organic matter, but also allows for the presence of liquid **water** under current planetary surface and subsurface conditions.

Although it can be produced artificially, perchlorates form naturally in the Earth's **atmosphere**. Significant deposits are found in arid areas, such as the deserts of Chile and the United States. They have also been detected in lunar **samples** and **meteorites**, and multiple analyses seem to indicate high concentrations of perchlorates widely distributed

throughout the surface of Mars. Due to the difficulty of identifying it by satellite, its presence on the surface of Mars had to be confirmed *in situ* by NASA's Phoenix and Curiosity probes (see term **REMS**). Their presence was later confirmed from satellites, in meteorites, as well as by re-evaluating the results of the Viking probes. These perchlorates may have been produced both in the atmosphere and by processes favored by the high ultraviolet **radiation** to which the Martian surface is subjected.

As highly soluble and stable compounds in water and due to their widespread presence in fertilizers, perchlorates can concentrate in aquifers, fruits and vegetables, posing a potential public health hazard. Their brines, waters with high concentrations of this salt, have a water activity below that necessary for the proliferation of **life** and their decomposition by pyrolysis destroys organic matter (organic matter decomposes due to heating at high

vadas concentraciones de percloratos ampliamente distribuidos por toda la superficie de Marte. Debido a la dificultad de identificarlo por satélite, su presencia en la superficie de Marte ha tenido que confirmarse *in situ* por las sondas Phoenix y Curiosity de la NASA (ver término **REMS**). Más tarde se ha podido ratificar su presencia desde satélite, en meteoritos, así como reevaluando los resultados de las sondas Viking. Estos percloratos pueden haberse producido tanto en la atmósfera como mediante procesos favorecidos por la elevada **radiación** ultravioleta a la que está sometida la superficie marciana.

Al ser compuestos altamente solubles y estables en agua y debido a su extendida presencia en fertilizantes, los percloratos pueden concentrarse en acuíferos, frutas y verduras, pudiendo suponer un peligro para la salud pública. Sus salmueras, aguas con altas concentraciones de esta sal, tienen una actividad acuosa por debajo de la necesaria para la proliferación de **vida** y su descomposición por pirólisis destruye la materia orgánica (la materia orgánica se descompone debido al calentamiento a altas temperaturas en

ausencia de oxígeno). Pero ciertas **bacterias** generadoras de metano (metanógenas) sobreviven a concentraciones moderadas de percloratos e incluso algunas pueden alimentarse de su reducción.

Los percloratos disminuyen la temperatura a la que el agua se puede encontrar en estado líquido, bajando su punto de fusión hasta poder hacerla posible en las condiciones de temperatura actuales de Marte. Unas marcas oscuras que aparecen y desaparecen estacionalmente en las paredes de algunos **cráteres**, llamadas líneas recurrentes en pendiente (RSL, Recurring Slope Lineae), se han relacionado con el flujo de agua líquida. Al detectarse percloratos en ellas desde satélite, se ha reforzado esta hipótesis. Pero otros estudios explican este fenómeno por procesos que no requerirían de agua líquida, con lo que aún está por demostrar si esto sería posible.

Los percloratos además de suponer un riesgo para la **exploración** humana, ya que podría ser tóxico para los astronautas y hacer inviable el sustrato marciano, podrían también utilizarse para generar oxígeno o fabricar combustible.

temperatures in the absence of oxygen). But certain methane-generating **bacteria** (methanogens) survive at moderate concentrations of perchlorates and some can even feed on their reduction.

Perchlorates lower the temperature at which water can be found in a liquid state, lowering its melting point to the point where it can be made possible under current temperature conditions on Mars. Dark markings that appear and disappear seasonally on the walls of some **craters**, called Recurring Slope

Lineae (RSL), have been linked to the flow of liquid water. The detection of perchlorates in them from satellites has reinforced this hypothesis. But other studies explain this phenomenon by processes that would not require liquid water, so it remains to be demonstrated whether this would be possible.

Perchlorates not only pose a risk to human **exploration**, as they could be toxic to astronauts and make the Martian substrate unviable, but could also be used to generate oxygen or manufacture fuel.

Lecturas adicionales /Further reading

CLARK, B. C., & KOUNAVES, S. P. (2016). Evidence for the distribution of perchlorates on Mars. *International Journal of Astrobiology*, 15(4), 311-318.

COATES, J. D., & ACHENBACH, L. A. (2004). Microbial perchlorate reduction: rocket-fuelled metabolism. *Nature Reviews Microbiology*, 2(7), 569-580.

FDA, “Preguntas y respuestas sobre percloratos Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA)”, [en línea] <<https://www.fda.gov/food/chemical-contaminants-food/perchlorate-questions-and-answers>> .

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

MCEWEN, A. S., OJHA, L., DUNDAS, C. M., et al. (2011). Seasonal flows on warm Martian slopes. *Science*, 333(6043), 740-743.

STILLMAN, D. E., BUE, B. D., WAGSTAFF, K. L., PRIMM, K. M., MICHAELS, T. I., & GRIMM, R. E. (2020). Evaluation of wet and dry recurring slope lineae (RSL) formation mechanisms based on quantitative mapping of RSL in Garni Crater, Valles Marineris, Mars. *Icarus*, 335, 113420.

WADSWORTH, J., & COCKELL, C. S. (2017). Perchlorates on Mars enhance the bacteriocidal effects of UV light. *Scientific reports*, 7(1), 1-8.

76. PERMAFROST

Se conoce como suelo permanentemente congelado o *permafrost* al sustrato que se ha mantenido con temperaturas por debajo de 0 °C durante al menos dos años. Este sustrato puede estar compuesto por sedimento, materia orgánica, roca y **hielo**, en diferentes proporciones, aunque la descripción se restringe únicamente a su temperatura. En la **Tierra**, se encuentra cerca de los polos y en zonas de alta montaña, constituyendo casi un 20 % de su superficie emergida. En otros cuerpos planetarios, como **Marte**, supone la práctica totalidad de su superficie. El *permafrost* terrestre se encuentra habitado por microorganismos adaptados a estas condiciones frías, pudiéndose considerar un buen modelo para la **vida** fuera de la Tierra. Sus condiciones excepcionalmente estables también lo convierten en un ambiente propicio para la conservación de **biomarcadores**.

El *permafrost* se encuentra limitado en profundidad por el gradiente geotérmico (el calor aumenta con la profundidad debido a la presión que ejerce la materia acumulada y la actividad interna del planeta) y por arriba a causa de las variaciones superficiales, como la tem-

peratura del aire y la **radiación** solar. Estas últimas cambian estacionalmente, congelándose y descongelándose la parte superior del *permafrost* en lo que se denomina capa activa. Estos ciclos anuales forman estructuras peculiares como terrenos poligonales y círculos de piedra, que indican la presencia actual o pasada de *permafrost* y que también

han sido observados en las superficies de otros planetas (junto con otros para los que no se encuentran análogos terrestres, pero que también pueden deberse a procesos de congelación-sublimación en condiciones que no se dan en la Tierra).

El *permafrost* puede ser discontinuo, encontrando en su interior zonas des-

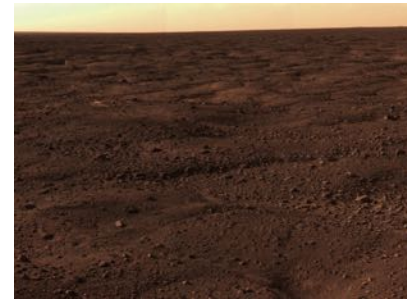
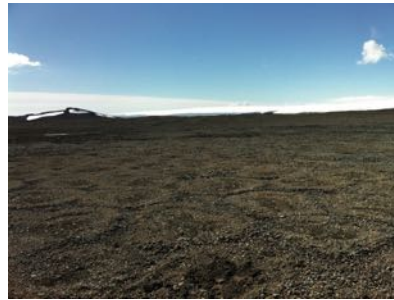


Figura 49:
Permafrost.

Comparación de una de las manifestaciones típicas del permafrost, los círculos de piedras, en la Antártida (Isla Livingston, Fuente: Fotografía tomada por Antonio Molina Jurado) y Marte (zona de aterrizaje de la sonda de NASA Phoenix).

Comparison of one of the typical manifestations of permafrost, the stone circles, in Antarctica (Livingston Island, Source: Photograph taken by Antonio Molina Jurado) and Mars (landing zone of NASA's Phoenix).

Crédito: Antonio Molina Jurado / NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University.

PERMAFROST

Permanently frozen soil or permafrost is a substrate that has been maintained at temperatures below 0 °C for at least two years. This substrate can be composed of sediment, organic matter, rock and **ice**, in different proportions, although the description is restricted only to its temperature. On **Earth**, it is found near the poles and in high mountain areas, constituting almost 20% of its emerged

surface. On other planetary bodies, such as **Mars**, it accounts for almost its entire surface. Terrestrial permafrost is inhabited by microorganisms adapted to these cold conditions, and can be considered a good model for **life** outside the Earth. Its exceptionally stable conditions also make it a favorable environment for the preservation of **biomarkers**.

Permafrost is limited at depth by the geothermal gradient (heat increases with depth due to the pressure exerted by accumulated matter and the planet's internal activity) and above by surface variations, such as air temperature and solar **radiation**. The latter change seasonally, freezing and thawing the upper part of the permafrost in what is called the active layer. These annual cycles form peculiar structures such as polygonal terrains and stone circles, which indicate the current or past presence of permafrost and which have also been observed on the surfaces of other planets (along with others for which no terrestrial analogues are found, but which may also be due to freeze-sublimation processes under conditions that do not occur on Earth).

Permafrost can be discontinuous, finding in its interior permanently thawed areas due to the presence of vegetation or surface **water** sheets, forming what is called talik. In addition, wedges of pure ice can be found that have filled thermal contraction cracks or ice lenses or brines in liquid state called cryopegs. Related to these and other

Lecturas adicionales /Further reading

ABRAMOV, A., VISHNIVETSKAYA, T., & RIVKINA, E. (2021). "Are permafrost microorganisms as old as permafrost?". *FEMS Microbiology Ecology*, 97(2), fiae260.

GILICHINSKY, D. A. (2002). "Permafrost model of extraterrestrial habitat". *Astrobiology. Springer, Berlin*, Heidelberg. pp. 125-142.

GILICHINSKY, D., RIVKINA, E., SHCHERBAKOVA, V., LAURINAVICHUIS, K., & TIEDJE, J. (2003). "Supercooled water brines within permafrost—an unknown ecological niche for microorganisms: a model for astrobiology". *Astrobiology*, 3(2), 331-341.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

GÓMEZ GÓMEZ, F. (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

STEVEN, B., LEVEILLE, R., POLLARD, W. H., & WHYTE, L. G. (2006). "Microbial ecology and biodiversity in permafrost". *Extremophiles*, 10(4), 259-267.

congeladas permanentemente por la presencia de vegetación o láminas de **agua** superficiales, formando lo que se denomina como *talik*. Además, se pueden encontrar cuñas de hielo puro que han rellenado grietas de contracción térmica, o lentejones de hielo o salmueras en estado líquido denominados *cryopegs*. Relacionados con estas y otras estructuras dentro del suelo congelado puede encontrarse agua líquida.

En la Tierra, el aumento de la capa activa por el calentamiento global está provocando la expulsión de metano y dióxido de carbono que retroalimentan a su vez el cambio climático. Esto no solo se debe a la descongelación de los gases atrapados en el hielo del subsuelo, sino también a la actividad microbiana. El

permafrost puede considerarse un **ambiente extremo**, no solo por las bajas temperaturas sino también por la escasez de agua y nutrientes disponibles para los organismos vivos. Sin embargo, en él se han encontrado un gran número y diversidad de microorganismos funcionales.

La estabilidad térmica y fisicoquímica del *permafrost*, la presencia de agua líquida con sales, y un sustrato poroso con gases aislados de la **atmósfera** y de otros factores externos como la radiación superficial hacen que, sin ser especialmente benigno, sea uno de los ambientes que mejor pueda representar los posibles ecosistemas extraterrestres. En los suelos congelados de Siberia se hallan las únicas células que han sido capaces de mantenerse viables durante millones de años.

structures within the frozen ground may be liquid water.

On Earth, the increase in the active layer due to global warming is causing methane and carbon dioxide to be expelled, which in turn feeds back into climate change. This is not only due to the thawing of gases trapped in subsurface ice, but also to microbial activity. Permafrost can be considered an **extreme environment**, not only because of the low temperatures but also because of the scarcity of water and bioavailable nutrients. However, a large number and

diversity of functional microorganisms have been found there.

The thermal and physicochemical stability of permafrost, the presence of liquid water with salts, and a porous substrate with gases isolated from the **atmosphere** and other external factors such as surface radiation make it, without being particularly benign, one of the environments that can best represent possible extraterrestrial ecosystems. In the frozen soils of Siberia are the only cells that have been able to remain viable for millions of years.

77. POLÍMEROS INFORMACIONALES: ADN, ARN Y PROTEÍNAS

Los polímeros informacionales o informativos son moléculas biológicas formadas por la unión covalente (mediante la compartición de electrones) de unidades básicas (monómeros) que portan información genética (los ácidos nucleicos, polímeros de nucleótidos) o son el resultado de su expresión (las **proteínas**, formadas por aminoácidos). En todos los seres vivos conocidos, la información genética heredable está codificada en forma de un biopolímero denominado ácido desoxirribonucleico (**ADN**), mientras los **virus** (que no deberían considerarse seres vivos ya que carecen de **metabolismo** propio) pueden tener genoma de ADN o de otro biopolímero llamado ácido ribonucleico (**ARN**). El flujo de información genética en las **células** se produce en el sentido ADN→ARN→proteínas, y las dos etapas enzimáticas indicadas por las flechas se denominan transcripción y traducción. Algunos virus con genoma de ARN (los pertenecientes a la familia *Retroviridae*) poseen una enzima capaz de realizar retrotranscripción en el sentido ARN→ADN.

En los campos del origen de la **vida** y la Astrobiología, una cuestión muy rele-

vante es cuál de los polímeros informacionales fue el primero en aparecer. Tras más de medio siglo de investigación, todas las pruebas disponibles apuntan a que el ARN fue anterior al ADN y a las proteínas, ya que es el único biopolímero conocido que puede actuar como genotipo (archivo de información genética, como hace en los virus de ARN y los viroides) y también como fenotipo (al estructurarse en disolución y poder realizar diversas funciones bioquímicas). Entre las moléculas de ARN funcionales que se han podido caracterizar en la naturaleza, y las obtenidas en los laboratorios mediante sistemas de **evolución *in vitro***, destacan las ribozimas (enzimas o catalizadores de reacciones químicas, compuestos de ARN y presentes en todos los organismos) y los aptámeros (moléculas de ARN o ADN monocatenario capaces de unirse con alta afinidad y especificidad a un amplio rango de ligandos. Además de la existencia de ARN funcional, en el metabolismo de todas las células los ribonucleótidos son precursores de los desoxirribonucleótidos (los monómeros que forman el ADN), lo que también apunta hacia una mayor antigüedad del ARN.

Todo ello permitió establecer en 1986 el modelo del “Mundo ARN”, según el cual, en una etapa intermedia entre la **química prebiótica** y la aparición de **LUCA** (quizá hace unos 3900 millones de años), las primeras protocélulas con capacidad de replicarse y evolucionar (denominadas ribocitos) contendrían un genoma de ARN y además ribozimas como catalizadores. Las versiones modernas de este modelo, que incorporan los avances en química prebiótica de sistemas, mantienen que probablemente el ARN fue anterior al ADN y a las proteínas, pero estaría ayudado en sus funciones catalíticas por moléculas de pequeño tamaño como péptidos (polímeros cortos de aminoácidos) y diversos cofactores orgánicos e inorgánicos. La evolución posterior daría lugar a otra etapa en la que ya se habrían formado proteínas codificadas por ARN (Mundo ARN/proteínas) y más tarde aparecería el ADN con el consiguiente desacoplamiento entre genotipo y fenotipo (Mundo ADN/ARN/proteínas), dando así lugar a LUCA y a toda la diversificación posterior del árbol de la vida (ver figura 7, **Arquea**; figura 29, **Filogenia**; o figura 38, LUCA).

INFORMATIONAL POLYMERS: DNA, RNA AND PROTEINS

Informational polymers are biological molecules formed by the covalent bonding (which involves the sharing of electron pairs between atoms) of basic units (monomers) that either carry genetic information (in the case of nucleic acids, i.e., nucleotide polymers) or are the result of their expression or decoding (**proteins**, formed by amino acids). In all known living beings, heritable genetic information is encoded in the form of a nucleic acid called deoxyribonucleic acid (**DNA**), while **viruses** (which should not be considered living beings since they lack their own **metabolism**) can have a genome of DNA or of another nucleic acid called ribonucleic acid (**RNA**). The flow of genetic information in **cells** occurs in the DNA→RNA→protein direction, and the two enzymatic steps indicated by the arrows are called transcription and translation, respectively. Some viruses with an RNA genome (those belonging to the *Retroviridae* family) possess an enzyme capable of catalyzing retro-transcription in the RNA→DNA direction.

In the fields of the origin of **life** and Astrobiology, a very relevant question is which of the informational polymers was the first to appear. After more than half a century of research, all available evidence points to the fact that RNA predated DNA and proteins, since it is the only known biopolymer that can act as a genotype (archive of genetic information, as it does in RNA viruses and viroids) and also as a phenotype (by structuring itself in solution and being able to perform various biochemical functions). Among the functional RNAs that have been characterized in nature, and those produced in laboratories through *in vitro* **evolution** systems, the most relevant ones are ribozymes (catalysts of chemical reactions, composed of RNA and present in all organisms) and aptamers (*in vitro* evolved, single-stranded RNA or DNA molecules capable of binding with high affinity and specificity to a wide range of ligands). In addition, monomers of RNA (ribonucleotides) are precursors of those of DNA (deoxyribonucleotides) in the metabolism of all cells, which also points to a greater antiquity of RNA.

This led to the establishment of the so-called “RNA World” model in 1986. According to it, at an intermediate stage between **prebiotic chemistry** and the origin of **LUCA** (perhaps around 3.900 billion years ago), the first protocells with the capacity to replicate and evolve (called ribocytes) would contain an RNA genome and also ribozymes as catalysts. Modern versions of this model, which incorporate advances in prebiotic systems chemistry, maintain that RNA probably predated DNA and proteins, but it would be aided in its catalytic functions by small molecules such as peptides (short amino acids polymers), as well as various organic and inorganic cofactors. The evolution of the RNA world would give rise to another stage that already included proteins encoded by RNA (RNA/protein world). Later on, DNA would appear with the consequent uncoupling between genotype and phenotype (DNA/RNA/protein world), thus giving rise to **LUCA** and to all the subsequent diversification of the tree of life (see figure 7, **Archaea**; figure 29, **Phylogeny**; or figure 38, **LUCA**).

En cualquier caso, en Astrobiología se considera que además de los polímeros informacionales y funcionales que protagonizan la vida en la **Tierra** podrían existir muchos otros. Estos tal vez fueran similares a los que se conocen, por ejemplo, ácidos nucleicos con nucleótidos diferentes de los cinco típicos (A, C, G, T, U) o proteínas formadas por aminoácidos distintos de los 20 habituales. También podrían ser moléculas estructuralmente análogas a los ácidos nucleicos, como ejemplifican las que se han sintetizado en diferentes laboratorios durante las últimas décadas al sustituir el esqueleto natural de (desoxi)ribosa-fosfato por distintas variantes: polímeros de glicerol-fosfato (en la molécula conocida como GNA), treosa-fosfato (TNA), ribosa en una conformación cerrada unida a fosfato (LNA), o monómeros similares a aminoácidos en los llamados ácidos nucleicos peptídicos (PNA). Por último, se ha de considerar que otras vidas extraterrestres podrían utilizar polímeros muy diferentes de los que hasta ahora se conocen. El reto, en ese caso, es desarrollar **biosensores** capaces de detectarlos.

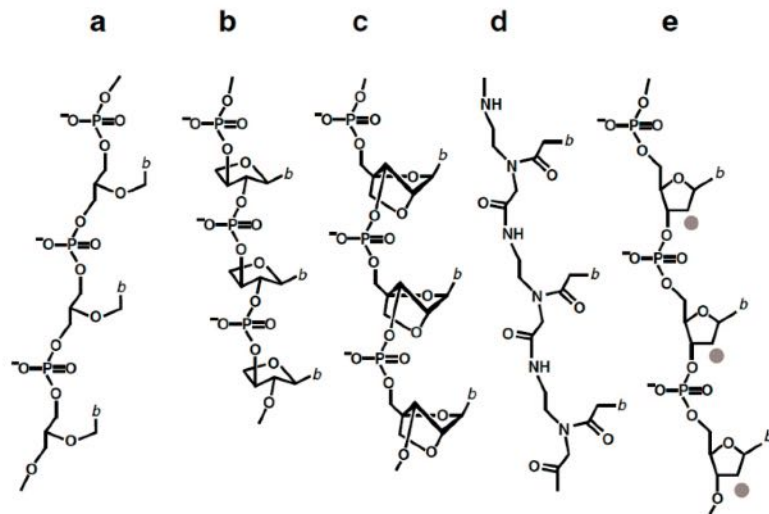


Figura 50:

Estructura de cinco polímeros informacionales.

Structure of five informational polymers.

Los cuatro primeros son análogos de los ácidos nucleicos naturales: GNA (a), TNA (b), LNA (c) y PNA (d). Por comparación, se incluye también un trinucleótido de ADN (e), que sería de ARN si tuviera grupos -OH en las posiciones indicadas con círculos grises. En todos los casos, el símbolo "b" muestra la posición de las bases nitrogenadas, en las que reside la información del polímero.

The first four are analogues of natural nucleic acids: GNA (a), TNA (b), LNA (c) and PNA (d). For comparison, a DNA trinucleotide (e), which would be RNA if it had -OH groups in the positions marked with gray circles, is also included. In all cases, the symbol "b" shows the position of the nucleobases, in which the information of the polymer resides.

Adaptado de Briones y Moreno (2012).

In any case, in astrobiology it is considered that, apart from the informational and functional polymers that are the key players of life on **Earth**, many others could exist. These could be similar to those already known, for example nucleic acids with nucleotides different from the typical five (A, C, G, T, U) or proteins formed by amino acids different from the usual 20. They could also be molecules structurally analogous to nucleic acids, as exemplified by those that have been synthesized in different laboratories during the last decades

through the substitution of the natural (deoxy)ribose-phosphate backbone with different variants: glycerol-phosphate polymers (in the molecule known as GNA), treose-phosphate (TNA), ribose in a closed or locked conformation (LNA), or peptide-like monomers in the so-called peptide nucleic acids (PNA). Finally, we must be open to the possibility that extraterrestrial life used polymers very different from those we know or imagine so far. The challenge, in that case, is to develop **biosensors** capable of detecting them.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C., FERNÁNDEZ SOTO, A., BERMÚDEZ DE CASTRO, J. M. (2015). *Orígenes. El universo, la vida, los humanos*. Ed. Crítica, Barcelona.

BRIONES, C., MORENO, M. (2012). "Applications of peptide nucleic acids (PNAs) and locked nucleic acids (LNAs) in biosensor development. *Anal. Bioanal. Chem.* 402, pp. 3071–3089. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-012-5742-z>

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GILBERT, W. (1986). "Origin of life: The RNA world". *Nature* 319, p. 618.

LÁZARO, E., (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro (ISBN: 978484651441).

PRESSMAN, A., BLANCO, C., CHEN, I. A. (2015). "The RNA World as a Model System to Study the Origin of Life". *Current Biology* 25, R953–R963.

78. POLVO INTERESTELAR E INTERPLANETARIO

Las nubes interestelares, además de gas, contienen polvo, que contribuye en un 1 %. Los granos o partículas de polvo que absorben y dispersan la luz en el medio interestelar presentan toda una distribución de tamaños con un diámetro promedio de 0,1 micrómetros. El polvo se manifiesta en forma de nubes oscuras en el espacio, cuando no permite que llegue la luz de las **estrellas** situadas al fondo. También forma nebulosas de reflexión azules que absorben la luz de las estrellas cercanas y la dispersan en tonalidades azules, como se ve, por ejemplo, en las imágenes de las Pléyades.

La composición del polvo depende de las abundancias atómicas en el entorno donde se forma. En nubes densas interestelares se cubren de un manto de **hielo**. El polvo está hecho de silicatos y/o de material carbonáceo. El polvo de silicatos se forma en **atmósferas** de estrellas en la rama asintótica de las gigantes (AGB en las siglas en inglés de Asymptotic Giant Branch, una fase posterior a la de gigante roja) y es expulsado al medio interestelar. El nacimiento de partículas de polvo en el espacio está, por tanto, ligado a la muerte de las estrellas. El material carbonáceo del

polvo también se forma en atmósferas estelares y al igual que el de silicatos se transforma en el medio interestelar. Se trata de una forma de carbono amorfo más o menos hidrogenada, conocida como HAC (Hydrogenated Amorphous Carbon) en la literatura astrofísica, que soporta bien el intenso campo de **radiación** ultravioleta del medio interestelar. En su periplo por el medio interestelar, un grano de polvo se mueve del medio difuso al denso, y viceversa, hasta que es destruido por ondas de choque en una explosión de supernova.

En las nubes densas, el polvo facilita la formación estelar absorbiendo el exceso de energía generado durante el colapso gravitatorio (la fase inicial del proceso de formación estelar a partir de la nube primordial), reemitiéndola y liberándola como radiación infrarroja que atraviesa la nube. El polvo pasa posteriormente a integrarse en el **disco protoplanetario** y con el tiempo se irá aglomerando para crear cometesimales y planetesimales. Si estos cuerpos se mantienen lo suficientemente alejados de la estrella, como es el caso de los **cometas**, preservarán el material más volátil y tendrán hielo en su composición.

Aunque el polvo cósmico ha sido tradicionalmente considerado una molestia para la observación de objetos astronómicos, hoy es un interesante objeto de estudio que aporta valiosa información sobre su entorno. Además, estas partículas son las primeras superficies disponibles en un universo dominado por el gas, permitiendo la formación de la molécula más abundante, el hidrógeno molecular (H_2), **agua** (H_2O) y otras moléculas. La química de los granos de polvo cubiertos de hielo es de interés astrobiológico.

En el **sistema solar** actual encontramos partículas de polvo interplanetario (IDP en sus siglas en inglés), con un tamaño de varios micrómetros, que se capturan en vuelos estratosféricos. La mayoría proceden de asteroides y cometas. Las más interesantes son probablemente las de tipo *cluster*, en forma de racimo, compuestas de partículas de silicatos mucho más pequeñas con una cobertura carbonácea. Contienen altos contenidos de deuterio, una variedad del hidrógeno con un protón y un neutrón, y otros isótopos pesados, y se cree que son de origen cometario (ver término **Cometas**).

INTERSTELLAR AND INTERPLANETARY DUST

Interstellar clouds, in addition to gas, contain dust, which contributes with about 1%. The grains or dust particles that absorb and scatter light in the interstellar medium have a whole size distribution with an average diameter of 0.1 micrometers. Dust manifests itself in the form of dark clouds in space, when it does not allow the light from the **stars** in the background to reach us. It also forms blue reflection nebulae that absorb light from nearby stars and scatter it in blue hues, as we see, for example, in the images of the Pleiades.

The composition of the dust depends on the atomic abundances in the environment where it forms. In dense interstellar clouds they are covered with a mantle of **ice**. Dust is made of silicates and/or carbonaceous material. Silicate dust forms in the **atmospheres** of stars in the Asymptotic Giant Branch (AGB), a phase after the red giant phase, and is ejected into the interstellar medium. The birth of dust particles in space is therefore linked to the death of stars. Carbonaceous dust material also forms in stellar atmospheres and, like silicate material, is transformed in the interstellar medium. It is a more or less hydrogenated form

of amorphous carbon, known as HAC (Hydrogenated Amorphous Carbon) in the astrophysical literature, which copes well with the intense ultraviolet **radiation** field of the interstellar medium. On its journey through the interstellar medium, a dust grain moves from the diffuse to the dense medium, and vice versa, until it is destroyed by shock waves in a supernova explosion.

In dense clouds, dust facilitates star formation by absorbing the excess energy generated during gravitational collapse (the initial phase of the star formation process from the primordial cloud), re-emitting it and releasing it as infrared radiation that passes through the cloud. The dust then becomes integrated into the **protoplanetary disk** and will eventually clump together to create cometsimals and planetesimals. If these bodies are kept far enough away from the star, as is the case with **comets**, they will preserve the most volatile material and will have ice in their composition. Although cosmic dust has traditionally been considered a nuisance for the observation of astronomical objects, today it is an interesting object of study that provides

valuable information about its environment. Moreover, these particles are the first available surfaces in a gas-dominated universe, allowing the formation of the most abundant molecule, molecular hydrogen (H_2), **water** (H_2O) and other molecules. The chemistry of ice-covered dust grains is of astrobiological interest.

In the present **solar system**, we find interplanetary dust particles (IDPs), several micrometers in size, which are captured in stratospheric flybys. Most of them come from asteroids and comets. The most interesting are probably the cluster-like, cluster-shaped ones, composed of much smaller silicate particles with a carbonaceous coating. They contain high contents of deuterium, a variety of hydrogen with a proton and a neutron, and other heavy isotopes, and are believed to be of cometary origin (see term **Comets**).

Lecturas adicionales /Further reading

EVANS, A. (1994), *The Dusty Universe*. Ed. Wiley

79. PROTECCIÓN PLANETARIA

La protección planetaria es un conjunto de prácticas que se aplican en la **exploración espacial** para proteger los cuerpos del **sistema solar** de la contaminación biológica terrestre y para preservar la **vida** en la **Tierra** de posibles contaminantes biológicos que lleguen en materiales devueltos del espacio exterior. Desde el comienzo de la exploración espacial, con los viajes a la Luna y **Marte**, todas las agencias espaciales (NASA, ESA, JAXA, IKI, etc.) han aplicado algún tipo de medidas de protección planetaria a sus misiones de exploración del sistema solar (ver término **Muestras planetarias, retorno**). El estándar actual para la protección planetaria lo desarrolla y revisa periódicamente el Comité de Investigación Espacial (COSPAR) a través del Panel de Protección Planetaria. La eficacia de estas medidas depende de la

cooperación internacional entre todos los agentes que participan en la exploración espacial.

En el caso de misiones con origen en la Tierra hacia un planeta, un satélite, o un **cometa** del sistema solar, el objetivo final de la protección planetaria es asegurar que las misiones no contaminan el objeto de estudio con restos biológicos de la Tierra que pudieran confundirse en el futuro con indicadores de vida o de moléculas orgánicas autóctonas y, por lo tanto, pudieran comprometer las investigaciones de esa u otra misión proporcionando falsos positivos. En cuanto a las misiones de retorno a la Tierra, los objetivos son: i) asegurar que las muestras del espacio, desde su captación en el espacio hasta su llegada a los laboratorios, no se contaminan con

organismos o moléculas orgánicas de la Tierra que pudieran alterar los análisis de las muestras puras o dar falsos positivos; y ii) que dichas muestras, en el caso de contener formas de vida o moléculas orgánicas exógenas, no interactúan con la **biosfera** o conjuntos de seres vivos de la Tierra.

Para minimizar el nivel de carga biológica que sale de la Tierra es necesario trabajar con los equipos en las llamadas salas limpias. Estos espacios tienen acceso restringido, con filtros en los circuitos de aire para evitar que entre contaminación biológica o partículas sólidas. En estas salas los operarios manejan los equipos con mascarillas, guantes y trajes estériles desechables. En dichas salas es necesario monitorizar la contaminación ambiental de partículas y microorganismos perió-

PLANETARY PROTECTION

Planetary protection is a set of practices applied in **space exploration** to protect **solar system** bodies from terrestrial biological contamination and to preserve **life on Earth** from possible biological contaminants arriving in materials returned from outer space. Since the beginning of space exploration, with the trips to the Moon and **Mars**, all space agencies (NASA, ESA, JAXA, IKI, etc.) have applied some form of planetary protection measures to their solar system exploration missions (see term **Planetary samples, return**). The current standard for planetary protection is developed and periodically reviewed by the COmmittee on SPace Research (COSPAR) through the Planetary Protection Panel. The effectiveness of these measures depends on international cooperation among all actors involved in space exploration.

In the case of Earth-based missions to a planet, satellite, or **comet** in the solar system, the ultimate goal of planetary protection is to ensure that missions do not contaminate the object of study with biological *debris* from Earth that could be mistaken in the future for indicators of life or indigenous organic molecules and thus compromise the research of that or any other mission by providing false positives. For return-to-Earth missions, the objectives are: i) to ensure that samples from space, from their capture in space to their arrival in laboratories, are not contaminated with organisms or organic molecules from Earth that could alter analyses of pure samples or give false positives; and ii) that such samples, if they contain exogenous life forms or organic molecules, do not

interact with the **biosphere** or assemblages of living things on Earth.

To minimize the level of bioburden leaving the Earth, it is necessary to work with equipment in so-called clean rooms. These spaces have restricted access, with filters in the air circuits to prevent biological contamination or solid particles from entering. Within these facilities, operators handle the equipment with masks, gloves and disposable sterile suits. In these rooms it is necessary to monitor the environmental contamination of particles and microorganisms periodically. The vessels and their instruments are sterilized by different methods, such as dry heat, **radiation** or the use of chemicals such as peroxides. Once sterilized, the amount of remaining viable organisms is monitored by taking bio-

dicamente. Las naves y sus instrumentos se esterilizan con diferentes métodos, tales como el calor seco, la **radiación** o el uso de productos químicos como peróxidos. Una vez esterilizadas, se controla la cantidad de organismos viables restantes tomando muestras biológicas con torundas y cultivando lo extraído del muestreo en placas de cultivo con agar. El objetivo final es reducir y cuantificar la cantidad de carga biológica, hasta cumplir con el estándar definido para el objeto planetario que la nave visitará.

El nivel de contaminación biológica tolerado depende del entorno de exploración. Las medidas de protección planetaria son más estrictas cuando el objeto explorado es un entorno potencialmente habitable, ya que en este ambiente un único organismo

viable podría reproducirse, generando muchos más microorganismos que a su vez se dispersen, y por lo tanto dar falsos positivos en el futuro cuando una misión intentara buscar vida. Ejemplos de misiones espaciales donde se deben aplicar los criterios más estrictos de protección planetaria son: i) la exploración a las llamadas regiones especiales en Marte, donde existe **agua** helada, protección de la radiación incidente, etc.; ii) la exploración de la subsuperficie de satélites helados como Europa donde existe un océano de agua y protección de la radiación; y iii) la misión de retorno de muestras de Marte, que ha comenzado en el 2021 con el muestreo que está realizando el vehículo Perseverance (NASA) en el **cráter** Jezero (ver término **Mars 2020, misión de exploración de Marte**).

logical samples with swabs and culturing the sample extracted on agar culture plates. The ultimate goal is to reduce and quantify the amount of biological material to meet the standard defined for the planetary object the spacecraft will visit.

The level of biological contamination tolerated depends on the exploration environment. Planetary protection measures are stricter when the explored object is a potentially habitable environment, since in this environment a single viable organism could reproduce, generating many more microorganisms that in turn disperse, and thus might give false

positives in the future when a mission will attempt to search for life. Examples of space missions where the most stringent planetary protection criteria must be applied are: i) exploration to the so-called special regions on Mars, where there is **water** ice, protection from incident radiation, etc. ii) exploration of the subsurface of icy satellites such as Europa where there is an ocean of water and radiation shielding; and iii) the Mars sample return mission, which has started in 2021 with the ongoing sampling by the Perseverance rover (NASA) in the Jezero **crater** (see term **Mars 2020, Mars exploration mission**).

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2020) “Los riesgos de la exploración espacial”, *The Conversation*, [en línea] BARRADO, D (2016) “La Ley del Espacio y la exploración espacial”, OpenMind/BBVA, [en línea] <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/la-ley-del-espacio-y-la-exploracion-espacial/>

BARRADO, D. (2016). “The Space Law and Space Exploration”, OpenMind/BBVA. <https://www.bbvaopenmind.com/en/science/physics/space-law-and-space-exploration/>
<https://theconversation.com/los-riesgos-de-la-exploracion-espacial-141946>.

80. PROTEÍNA

La proteína es una macromolécula compleja que está compuesta por elementos de carbono, hidrógeno, nitrógeno y, ocasionalmente, azufre, con funciones esenciales en los seres vivos. La unidad fundamental de la proteína son los aminoácidos, moléculas de carbono con dos grupos funcionales comunes —amino (-NH₂) y carboxilo (-COOH)—, y un grupo funcional variable que da lugar a los veinte aminoácidos codificados en el genoma de todos los seres vivos (ver término **Genoma**). Estos veinte aminoácidos son los más frecuentes en todas las formas de **vida** y son quirales (ver **Quiralidad**), es decir, son dos formas que se diferencian de la misma manera que dos imágenes reflejadas en un espejo y que no se pueden superponer si las colocamos una encima de la otra (como las palmas de las manos derecha e izquierda). En la vida terrestre solo existen aminoácidos con orientación a la izquierda (L-aminoácidos). Por tanto, la preferencia de la vida por aminoácidos con una de las formas puede ser un marcador para la búsqueda de vida fuera de la **Tierra**.

Las proteínas están formadas por cadenas de aminoácidos unidos mediante

enlaces peptídicos, es decir, enlaces entre el grupo amino de un aminoácido y el grupo carboxilo del contiguo. La unión de varios aminoácidos da lugar a péptidos de longitud variable (dipéptidos, oligopéptidos, polipéptidos, etc.) que conforman una estructura primaria que se pliega espacialmente dando lugar a una estructura secundaria, terciaria y, a veces, cuaternaria con función biológica, es decir, con implicación en el **metabolismo** de los organismos (figura 51). Dichas funciones pueden ser estructurales, como las proteínas que forman el citoesqueleto de las **células** (un entramado de proteínas que sujetan su estructura interna), o enzimáticas, que realizan y aceleran las reacciones químicas celulares.

Los aminoácidos no se originan exclusivamente de forma biológica, sino que se pueden sintetizar de forma abiótica (demostrado empíricamente en el experimento de Miller-Urey en 1953) y también se han detectado en **meteoritos** y **cometas**. Sin embargo, se desconoce a día de hoy cómo se originó una proteína con función biológica a partir de aminoácidos formados abióticamente

(sin intermediación biológica, ver **Abiogénesis**). A la rama de la química que trata de responder a esta pregunta se le denomina **química prebiótica**, y apunta a los ambientes hidrotermales marinos y/o terrestres como los escenarios más plausibles para el origen de la vida. En particular, una de las hipótesis que explica el autoensamblaje de aminoácidos es la combinación de cambios de temperatura y ciclos de evaporación y condensación, como los que tienen lugar en ambientes hidrotermales terrestres.

El estudio de las primeras proteínas en la Tierra, así como las condiciones en las que se originaron, se estudia a través de la reconstrucción de secuencias de proteínas ancestrales (ASR, *Ancestral Sequence Reconstruction*, en inglés). Mediante esta técnica, que combina la biología molecular y las herramientas filogenéticas, es posible obtener una secuencia hipotética de proteínas del pasado a través del análisis de los cambios evolutivos de la proteína existente. Según la reconstrucción de proteínas ancestrales, las primeras proteínas (con cuatro mil millones de años de antigüedad, aproximadamente), se habrían originado en ambientes hi-

PROTEIN

Proteins are macromolecules that are mainly composed of carbon, hydrogen, nitrogen and occasionally sulfur elements, with essential functions in living organisms. Amino acids, the fundamental units of proteins, are carbon molecules with two common functional groups—amino ($-\text{NH}_2$) and carboxyl ($-\text{COOH}$)—, and a variable functional group that gives rise to the twenty amino acids encoded in the genome of all living organisms (see **Genome**). These twenty amino acids are the most frequent in all forms of **life** and are chiral (see **Chirality**), that is, they exist in two forms that differ in the same way as two images reflected in a mirror, and that cannot be superimposed if we place one on top of the other (such as the palms of the right and left hands). In terrestrial life there are only left-oriented amino acids (L-amino acids). Thus, life's preference for amino acids with one of the forms may be a marker in the search for life beyond **Earth**.

Proteins are made up of chains of amino acids linked by peptide bonds, that is, bonds between the amino group of one amino acid and the carboxyl group

of the next one. The union of several amino acids gives rise to peptides of variable length (dipeptides, oligopeptides, polypeptides, etc.) that form a primary structure that folds spatially, giving rise to a secondary, tertiary and, sometimes, quaternary structure with biological functions, that is, involved in organisms' metabolism (figure 51). These functions can be structural, such as the proteins that form the cytoskeleton of **cells**—a network of proteins that support the cell internal structure—, or enzymatic, which carry out and accelerate cellular chemical reactions.

Amino acids can be generated both biotically and abiotically (empirically demonstrated in the Miller-Urey experiment in 1953), having also been found in **comets** and **meteorites**. However, it is currently unknown how a protein with a biological function originated from amino acids formed abiotically (without biological intermediation, see **Abiogenesis**). The branch of chemistry that tries to answer this question is called **prebiotic chemistry**, and points to marine and/or terrestrial hydrothermal environments as the most plausible sce-

narios for the origin of life. In particular, one of the hypotheses that explains the self-assembly of amino acids is the combination of changes in temperature and cycles of evaporation and condensation, such as those that take place in terrestrial hydrothermal environments.

The study of the first proteins on Earth, as well as the conditions in which they originated, is studied through the reconstruction of ancestral protein sequences (ASR or Ancestral Sequence Reconstruction). Through this technique, which combines molecular biology and phylogenetic tools, it is possible to obtain a hypothetical protein sequence from the past through the analysis of the evolutionary changes of the existing proteins. According to the reconstruction of ancestral proteins, the first proteins (approximately four billion years old) would have originated in hydrothermal environments and would have less specialized functions than their current counterparts.

Proteins do not perform their functions within the organism as isolated entities, but together with other proteins

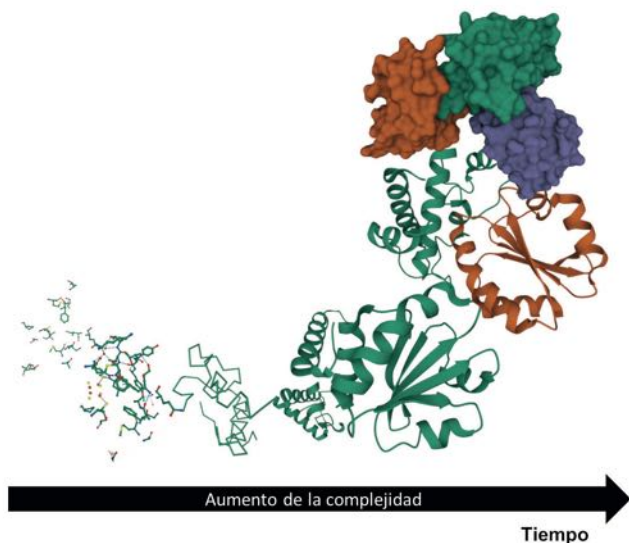


Figura 51:

Complejidad estructural de una proteína a lo largo del tiempo.

Structural complexity of a protein over time.

Aumento de la complejidad estructural de una proteína a lo largo del tiempo, desde los aminoácidos hasta la estructura cuaternaria funcional.

Increase in the structural complexity of a protein over time, from amino acids to functional quaternary structure.

Figura realizada con imágenes depositadas en / Figure made from images available at Protein Data Bank (www.rcsb.org). 4BA7 (DOI: 10.1016/j.str.2013.06.020), 7BZK (DOI: 10.1002/pro.3964), y 2PU9 (DOI: 10.1038/nature05937), usando Mol* Viewer (DOI: 10.1093/nar/gkab314).

Crédito: Maria Angeles Lezcano y Rita Severino (CAB)

drotermales y tendrían funciones menos especializadas que las que tienen sus homólogas actuales.

Las proteínas no realizan su función dentro del organismo como entidades aisladas, sino junto a otras proteínas y otros componentes bioquímicos, formando un entramado de estructuras y rutas metabólicas. Se define proteoma como el conjunto de todas las proteínas de un organismo en un momento y en unas condiciones ambientales determinadas. Dado que las condiciones ambientales de nuestro planeta han ido cambiando a lo largo del tiempo (por ejemplo, la atmósfera primitiva -ver **Paleoatmósfera**- no tenía oxígeno y era rica en metano y otros compuestos reducidos), se piensa que el proteoma ancestral pudo haber tenido las proteínas necesarias para realizar un metabolismo anaeróbico, es decir, un metabolismo independiente del oxígeno.

and other biochemical components, forming a network of structures and metabolic pathways. A proteome is defined as the set of all the proteins of an organism at a given time and under certain environmental conditions. Given that the environmental conditions of our planet have been changing over time (for example, the primitive atmosphere –see **Paleoatmosphere**– was devoid of oxygen and rich in methane and other reduced compounds), it is thought that the ancestral proteome must have had the necessary proteins to carry out an anaerobic metabolism, that is, an oxygen-independent metabolism.

Lecturas adicionales /Further reading

- BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.
- FRENKEL-PINTER, M. et al. (2020). “Prebiotic Peptides: Molecular Hubs in the Origin of Life”, *Chemical Reviews* vol. 120, pp. 4707–4765.
- GARCIA, A. K. & KAÇAR, B. (2019). “How to resurrect ancestral proteins as proxies for ancient biogeochemistry”, *Free Radic. Biol. Med.* 140, pp.260–269.
- GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.
- HUERTAS, O., Ruiz Hueso, P., Porcel, R., et al. (2021). *GENES. Escribiendo el guion de la vida*. Almuzara Libros.
- MILLER, S. L (1953). “A production of amino acids under possible primitive earth conditions”. *Science*. 117, pp. 528–529.
- WEISS, M. C. et al. (2016). “The physiology and habitat of the last universal common ancestor”, *Nat. Microbiol.* 1.
- XAVIER, J. C. et al. (2021). “The metabolic network of the last bacterial common ancestor”, *Commun. Biol.* 4, pp. 1–10.

81. QUÍMICA ATMOSFÉRICA, OZONO Y OTROS GASES

El estudio de la química atmosférica se centra en cómo las especies químicas se transforman y distribuyen en la **atmósfera**. Originalmente, la química atmosférica se focalizaba solamente en la atmósfera del planeta **Tierra**. En este contexto, es habitual separar la química atmosférica en dos regiones bien diferenciadas: la troposfera, hasta 10-15 km de altura, y la estratosfera. En esta última, la especie química más importante es el ozono (formado por tres átomos de oxígeno y representado como O_3), debido a la protección que ofrece a la **biosfera** (espacio donde se desarrolla la **vida**) frente a la **radiación** ultravioleta que proviene del **Sol**. En la troposfera, se puede considerar el dióxido de carbono (CO_2) como la especie química más importante, debido a su implicación en el cambio climático. La fuente de energía que regula los procesos químicos en la atmósfera proviene del Sol y, en particular, de la radiación ultravioleta. La radiación ultravioleta es capaz de romper los enlaces que unen los átomos de moléculas como el oxígeno (O_2) o el nitrógeno (N_2), e incluso de ionizar los átomos resultantes de este proceso en

las capas altas de la atmósfera, dando lugar a la capa que conocemos como ionosfera, entre los 80 y los 400 km de altura. Es precisamente la interacción de la radiación ultravioleta con las moléculas de oxígeno que abundan en la atmósfera terrestre el origen de la capa de ozono. Las moléculas de oxígeno son destruidas por la radiación, formando átomos de oxígeno que interactúan rápidamente con moléculas presentes en la atmósfera formando ozono. El ozono también se puede destruir por efecto de la radiación, formando oxígeno molecular y atómico, que a su vez también reacciona con átomos de ozono formando, de nuevo, oxígeno molecular. Este proceso simplificado se conoce como ciclo de Chapman, en honor al físico Sidney Chapman que lo propuso en 1930. En realidad, hay muchas más especies y reacciones químicas que están involucradas en la química del ozono. Entre ellas se encuentran los clorofluorocarbonos (CFC), con enormes aplicaciones industriales, muy conocidos porque una vez emitidos a la atmósfera reaccionan con el ozono, destruyéndolo y por tanto degradando la capa de ozono, razón por

la cual se limitó su uso en el protocolo de Montreal en 1987.

La existencia de ozono no solo se restringe a nuestro planeta. El ozono está presente en otros cuerpos del **sistema solar** como Venus o **Marte**. Sin embargo, la abundancia de esta especie es mucho más baja en estos planetas, lo que en Marte da lugar a la existencia de altísimos niveles de radiación ultravioleta, uno de los factores más importantes que hacen la superficie del planeta hostil para la vida tal y como la conocemos. Sin duda, el ozono es la especie química más estudiada en Marte, con mediciones de los primeros orbitadores como los Mariner 7 y 9, seguidas por sondas soviéticas y europeas. La caracterización del ozono en Marte tiene gran importancia debido a que hay una estrecha relación entre la concentración de esta especie en la atmósfera y otras especies producto de la destrucción de la molécula del **agua** en la atmósfera marciana. Estas especies compiten por el oxígeno atómico que necesita la molécula de ozono para formarse, y son clave para entender la estabilidad a largo plazo de la atmósfera de Marte.

ATMOSPHERIC CHEMISTRY, OZONE AND OTHER GASES

The study of atmospheric chemistry focuses on how chemical species are transformed and distributed in the **atmosphere**. Originally, atmospheric chemistry focused only on the **Earth** atmosphere. In this context, it is common to separate atmospheric chemistry into two distinct regions: the troposphere, up to 10-15 km altitude, and the stratosphere. In the stratosphere, the most important chemical species is ozone (formed by three oxygen atoms and represented as O_3), due to the protection it offers to the **biosphere** (layer where **life** develops) against ultraviolet **radiation** from the **Sun**. In the troposphere, carbon dioxide (CO_2) can be considered the most important chemical species, due to its involvement in climate change. The energy source that regulates the chemical processes in the atmosphere comes from the Sun and, in particular, from ultraviolet radiation. Ultraviolet radiation is capable of breaking the bonds that hold the atoms of molecules together such as oxygen (O_2) or nitrogen (N_2), and even of ionizing the atoms resulting from this process in the upper layers of the atmosphere, giving rise to the layer we know as the ionosphere, between 80

and 400 km above sea level. It is precisely the interaction of ultraviolet radiation with the oxygen molecules present in the Earth's atmosphere what originates the ozone layer. Oxygen molecules are destroyed by radiation, forming oxygen atoms that rapidly interact with molecules present in the atmosphere to form ozone. Ozone can also be destroyed by radiation, forming molecular and atomic oxygen, which in turn also reacts with ozone to produce, again, molecular oxygen. This simplified process is known as Chapman's cycle, after the physicist Sidney Chapman who proposed it in 1930. In reality, there are many more species and chemical reactions that are involved in ozone chemistry. Among them are chlorofluorocarbons (CFCs), with enormous industrial applications, which is well known because once emitted into the atmosphere CFCs react with ozone, destroying it and degrading the ozone layer, which is why their use was limited in the Montreal Protocol in 1987.

The existence of ozone is not only restricted to our planet. Ozone is present in other bodies of the **solar system** such as Venus or **Mars**. However, the abundance of this

species is much lower on these planets, which on Mars results in the existence of very high levels of ultraviolet radiation, one of the most important factors that make the planet's surface hostile to life as we know it. Ozone is undoubtedly the most studied chemical species on Mars, with measurements from early orbiters such as Mariner 7 and 9, followed by Soviet and European spacecraft. The characterization of ozone on Mars is of great importance because there is a close relationship between the concentration of this species in the atmosphere and other species resulting from the destruction of the **water** molecule in the Martian atmosphere. These species compete for the atomic oxygen that the ozone molecule needs to form, and are key to understanding the long-term stability of the Martian atmosphere.

Lecturas adicionales /Further reading

LANE, A. L., BARTH, C. A., HORD, C. W., STEWART, A. I. (1973). "Mariner 9 ultraviolet spectrometer: observations of ozone on Mars", *Icarus*, 18, pp. 102-108.

POTTER, T. D. & COLMAN, B. R. (2003). *Handbook of Weather, Climate and Water*. Wiley Interscience. ISBN 0-471-21489-2.

82. QUÍMICA EN EL MEDIO INTERESTELAR Y CIRCUNESTELAR

La materia situada en las inmediaciones de las **estrellas** (medio circunestelar) y en el espacio comprendido entre ellas (medio interestelar) está formada por una gran cantidad de moléculas y diminutos granos de **polvo**. Este material formará nuevas generaciones de estrellas, de manera similar a como se forjó el **Sol** hace unos 4650 millones de años. El **sistema solar** fue fruto de la **evolución** de una enorme nube molecular de gas y polvo, que colapsó sobre sí misma y se fragmentó, dando lugar al Sol, los planetas y sus satélites, junto con otros objetos celestes como **cometas** y asteroides. Todos ellos, incluida la **Tierra**, recibieron de su nube natal una rica herencia química.

El medio interestelar y circunestelar alberga una amplia variedad de moléculas, más de 270 identificadas hasta la fecha. A pesar de unas condiciones aparentemente hostiles (temperaturas y densidades extremadamente bajas, altas dosis de **radiación**, violentos choques de material), la química interestelar es capaz de generar un extenso catálogo de moléculas, muchas de ellas de carácter orgánico. Estas moléculas se forman mediante reacciones químicas

que tienen lugar tanto en fase gaseosa como en los granos de polvo interestelar, cuya superficie sirve de eficiente catalizador (agente intermedio cuya presencia facilita de las reacciones).

Las moléculas, al rotar y vibrar, emiten luz a unas frecuencias muy características, generando unas “huellas dactilares” (ver **Espectroscopía**), que pueden ser observadas con potentes radiotelescopios. Desde las primeras detecciones de moléculas diatómicas en el espacio a finales de los años 30 del siglo XX, la incesante mejora de la sensibilidad de los telescopios ha permitido a los astrofísicos detectar nuevas especies moleculares, cada vez con mayor **complejidad** química. Desde la molécula más abundante del universo, el hidrógeno molecular (H_2), hasta moléculas con más de 10 átomos, como formiato de etilo (CH_3CH_2OCHO), etanolamina ($NH_2CH_2CH_2OH$), propanol ($CH_3CH_2CH_2OH$), benzonitrilo ($c-C_6H_5CN$) o indeno ($c-C_9H_8$).

Las moléculas detectadas en el espacio contienen, entre otros, los cinco ele-

mentos químicos considerados básicos para la vida tal y como la conocemos en nuestro planeta: CHONPS (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre). Este rico maná químico interestelar estuvo presente en la nube natal del sistema solar, formando parte de cometas y asteroides, que tal vez pudieron transportarlo a la joven Tierra mediante los numerosos impactos que se sabe que ocurrieron hasta hace unos 3900 millones de años. Una vez en la superficie de la Tierra, estas moléculas de origen extraterrestre pudieron tener un papel clave en el desarrollo de la **química prebiótica** que condujo al nacimiento de la vida.

Una de las teorías más aceptadas para explicar el origen de la vida es el mundo ARN (ácido ribonucleico), que sostiene que esta molécula compleja es la base sobre la que se construyó la química prebiótica. En la última década numerosos experimentos prebióticos realizados en laboratorios que simulan las condiciones de la Tierra primitiva han propuesto que las unidades fundamentales de ARN, llamadas ribonucleótidos, se pueden sintetizar a partir de moléculas mucho más

INTERSTELLAR AND CIRCUMSTELLAR CHEMISTRY

The matter located in the vicinity of **stars** (circumstellar medium) and in the space between them (interstellar medium) is formed by a large amount of molecules and tiny **dust** grains. This material will form new generations of stars, similar to the way the **Sun** was formed around 4650 million years ago. The **solar system** was the result of the **evolution** of a huge molecular cloud of gas and dust, which collapsed and fragmented, giving rise to the Sun, the planets and their satellites, along with other celestial objects such as **comets** and asteroids. All of them, including the **Earth**, received from their natal cloud a rich chemical heritage.

The interstellar or circumstellar medium harbors a wide variety of molecules, more than 270 identified to date. Despite seemingly hostile conditions (extremely low temperatures and densities, high doses of **radiation**, violent collisions of material), interstellar chemistry is capable of generating an extensive catalog of molecules, many of them organic. These molecules are formed by chemical reactions that take place both in the gas

phase and on interstellar dust grains, whose surface serves as an efficient catalyst (intermediate agent whose presence facilitates the reactions).

When the molecules rotate and vibrate, they emit light at very characteristic frequencies, generating “fingerprints” (see **Spectroscopy**), that can be observed with powerful radio telescopes. Since the first detections of diatomic molecules in space in the late 1930s, the ever-improving sensitivity of telescopes has allowed astrophysicists to detect new molecular species of higher chemical **complexity**. From the most abundant molecule in the universe, molecular hydrogen (H_2), to molecules with more than 10 atoms, such as ethyl formate (CH_3CH_2OCHO), ethanolamine ($NH_2CH_2CH_2CH_2OH$), propanol ($CH_3CH_2CH_2CH_2OH$), benzonitrile ($c-C_6H_5CN$) or indene ($c-C_9H_8$).

The molecules detected in space contain, among others, the five chemical elements considered basic for life as we know it in our planet: CHONPS (carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen,

phosphorus and sulfur). This rich interstellar chemical reservoir was present in the solar system’s natal cloud, being part of comets and asteroids, which may have been able to transport it to the young Earth through the numerous impacts that occurred around 3.9 billion years ago. Once on the surface of our planet, these molecules of extraterrestrial origin may have played a key role in the development of **the prebiotic chemistry** that led to the birth of life.

One of the most widely accepted theories to explain the origin of life is the RNA (ribonucleic acid) world, which holds that this complex molecule is the basis on which prebiotic chemistry was built. In the last decade numerous prebiotic experiments conducted in laboratories simulating early Earth conditions have proposed that the fundamental units of RNA, called ribonucleotides, can be synthesized from much simpler molecules, such as cyanamide (NH_2CN), cyanoacetylene (HC_3N), glycolaldehyde ($HCOCH_2OH$), glycolonitrile ($HOCH_2CN$), hydroxylamine (NH_2OH), urea (NH_2CONH_2),

Lecturas adicionales /Further reading

—, “Primera detección de un precursor del mundo ARN en el medio interestelar”, [en línea] <<https://cab.inta-csic.es/noticias/primera-deteccion-de-un-precursor-del-mundo-arn-en-el-medio-interestelar/22/>>

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

simples, como cianamida (NH_2CN), cianoacetileno (HC_3N), glicolaldehído (HCOCH_2OH), gliconitrilo ($\text{HO-CH}_2\text{CN}$), hidroxilamina (NH_2OH), urea (NH_2CONH_2), o etendiol ($(\text{CHOH})_2$). Todos estos precursores moleculares de ARN se han detectado en el medio interestelar, varios de ellos en los últimos años. Por tanto, es muy razonable pensar que la nube molecular que formó el sistema solar contuviera en su seno estas moléculas necesarias para la vida, formadas gracias a la química interestelar. Dado que los ingredientes químicos están disponibles también en otros muchos lugares de la Vía Láctea, nuestra **galaxia**, e incluso en otras, un proceso similar podría haber originado la vida más allá del sistema solar.

or ethenediol ((CHOH)₂). All these molecular precursors of RNA have been detected in the interstellar medium, several of them in recent years. It is therefore very reasonable to think that the molecular cloud that formed the solar system contained these molecules necessary for life, formed through interstellar chemistry. Since the chemical ingredients are also available in many other places in the Milky Way, our **galaxy**, and even in other galaxies, a similar process could have given rise to life beyond the solar system.

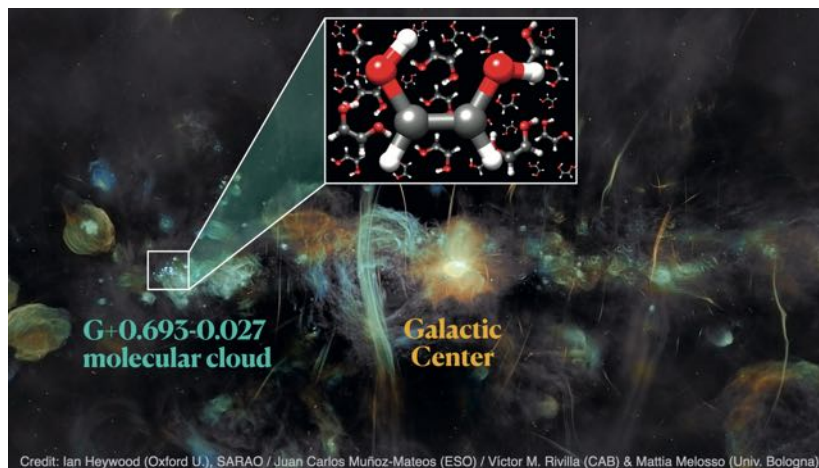


Figura 52:

Molécula Z-1,2-etendiol en el medio interestelar.

Molecule Z-1,2-ethenediol in the interstellar medium.

El centro de la Vía Láctea obtenida en el rango de ondas de radio a 1,28 GHz por el conjunto de telescopios MeerKAT (Observatorio de Radioastronomía de Sudáfrica). La molécula Z-1,2-etendiol, (CHOH)₂, ha sido detectada por primera vez en el medio interestelar hacia la nube molecular G+0.693-0.027, mediante el uso de los radiotelescopios de Yebes 40m e IRAM 30m.

The center of the Milky Way obtained in the radio wave range at 1.28 GHz by the MeerKAT (Radio Astronomy Observatory of South Africa) telescope array. The molecule Z-1,2-ethenediol, (CHOH)₂, has been detected for the first time in the interstellar medium towards the molecular cloud G+0.693-0.027, using the Yebes 40m and IRAM 30m radio telescopes.

83. QUÍMICA PREBIÓTICA

La química prebiótica comprende el estudio de la producción de los compuestos orgánicos que pudieron haber sido necesarios para el origen de la **vida**, generados a partir de fuentes inorgánicas de carbono. En este sentido, puede considerarse como una rama especial de la química orgánica sintética, cuyo objetivo principal es definir y explorar los procesos relacionados con la abiogénesis.

La química prebiótica tiene sus raíces en la hipótesis del bioquímico ruso Alexander I. Oparín y del biólogo británico John B. S. Haldane sobre el origen de la vida en la **Tierra** y fue experimentalmente emprendida por Stanley L. Miller en 1953. Lo que diferencia a este tipo de química de la denominada como química sintética tradicional es que está dominada por un imperativo que dicta condiciones de reacción que deben ser referidas como potencialmente prebióticas. Esto es, se deben simular aquellas condiciones geofísicas y/o geoquímicas acordes con los modelos existentes de la Tierra primitiva o del objeto planetario o medioambiente que se quiera estudiar, susceptible de generar en él materia orgánica a partir de precursores muy

sencillos, tales como, metano, dióxido de carbono, amoníaco o nitrógeno molecular como fuentes de carbono y nitrógeno. En este tipo de experimentos se recrean condiciones planetarias, o bien del medio interestelar, que potencialmente conduzcan o pudieron conducir a la aparición de vida, o al menos a la generación de moléculas orgánicas relativamente complejas susceptibles de poder experimentar procesos de **evolución** química hasta la formación de las primeras protocélulas. Por lo tanto, los experimentos de simulación bajo condiciones prebióticas están limitados por los conocimientos de las características geoquímicas y físicas del objeto planetario objeto de estudio (planeta o satélite), así como del medio interestelar. Por ejemplo, si se considera el caso de la Tierra primitiva, entre la comunidad científica existe actualmente un intenso debate sobre la posible composición de su atmósfera, sobre el valor de pH del océano primitivo o la temperatura media del planeta (ver término **Paleoatmósfera**). La consideración de unas variables ambientales frente a otras indudablemente conduce a la generación, o no, de sustancias orgánicas de diferente naturaleza. Por otro lado,

en estos experimentos de simulación bajo potenciales condiciones prebióticas también es necesario considerar condiciones medioambientales locales que pudieron o pueden estar presentes en un determinado entorno planetario como sistemas hidrotermales, vulcanismo activo, tormentas eléctricas, generación de aerosoles acuosos debido al viento o a ondas de choque, procesos de cambio de fase del **agua** como congelación o fusión, o evaporación y condensación, procesos catalíticos debido a la presencia de determinados minerales, etc. Todas estas condiciones ambientales van a influir en la producción de compuestos orgánicos, pero también en sus subsecuentes transformaciones. Además, junto con la síntesis endógena de productos orgánicos que pudieron producirse en la Tierra primitiva, también habría habido un importante aporte de materia orgánica extraterrestre, formada en el medio interplanetario, y que habría llegado a la Tierra transportada en **meteoritos**. A su vez, este material orgánico exógeno también podría experimentar cambios químicos debido a las condiciones locales del lugar de impacto, e incluso al propio impacto.

PREBIOTIC CHEMISTRY

Prebiotic chemistry is the study of the abiotic synthesis of organic compounds that may have been necessary for the origin of **life**. In this sense, it can be considered as a special branch of synthetic organic chemistry, whose main objective is to define and explore the processes related to abiogenesis.

Prebiotic chemistry has its roots in the hypothesis of the Russian biochemist Alexander I. Oparin and the British biologist John B. S. Haldane on the origin of life on **Earth** and was experimentally undertaken by Stanley L. Miller in 1953. What differentiates this type of chemistry from so-called traditional synthetic chemistry is that it is dominated by an imperative that dictates reaction conditions that must be referred to as potentially prebiotic. That is, geophysical and/or geochemical conditions must be simulated in accordance with existing models of the primitive Earth or of the planetary object or environment to be studied, susceptible to generate organic matter from very simple precursors such as methane, carbon dioxide, ammonia, molecular nitrogen as carbon and nitrogen sources. In this type of experiments,

planetary or interstellar environment conditions are recreated that potentially lead or could have led to the appearance of life, or at least to the generation of relatively complex organic molecules capable of undergoing chemical **evolution** processes up to the formation of the first protocells. Therefore, simulation experiments under prebiotic conditions are limited by the knowledge of the geochemical and physical characteristics of the planetary object under study (planet or satellite), as well as of the interstellar medium. For example, if we consider the case of the early Earth, there is currently an intense debate among the scientific community about the possible composition of its atmosphere, about the pH value of the early ocean or the average temperature of the planet (see term **Paleoatmosphere**). The consideration of some environmental variables versus others undoubtedly leads to the generation, or not, of organic substances of different nature. On the other hand, in these simulation experiments under potential prebiotic conditions it is also necessary to consider local environmental conditions that could or may be present in a given planetary environment such as

hydrothermal systems, active volcanism, electrical storms, generation of aqueous aerosols due to wind or shock waves, **water** phase change processes such as freezing or melting, or evaporation and condensation, catalytic processes due to the presence of certain minerals, etc. All these environmental conditions will influence the production of organic compounds but also their subsequent transformations. In addition, together with the endogenous synthesis of organic products that could have been produced on the primitive Earth, there would also have been an important contribution of extraterrestrial organic matter, formed in the interplanetary environment, and which would have arrived on Earth transported in meteorites. In turn, this exogenous organic material could also undergo chemical changes due to the local conditions of the impact site, and even to the impact itself.

There are two fundamental approaches in the study of the origin of life: the approach from the most complex to the simplest (top-down) and the approach from the simplest to the most complex (bottom-up) (see figure 53). The first

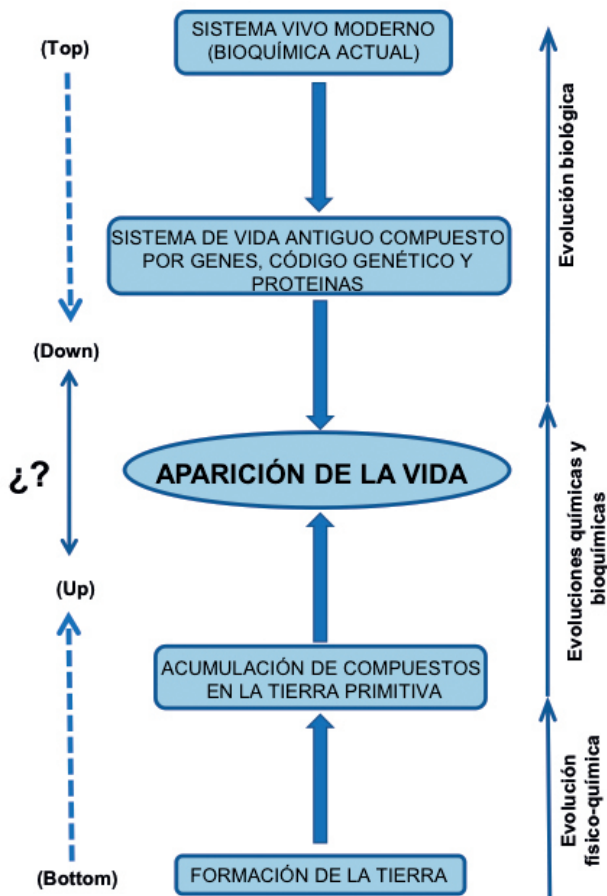


Figura 53:

Aparición de la vida a partir de la química compleja anterior.

Emergence of life from prior complex chemistry.

Existen dos aproximaciones fundamentales en el estudio del origen de la vida: la aproximación desde lo más complejo a lo más sencillo (*top-down*) y la aproximación desde lo más sencillo a lo más complejo (*bottom-up*) (ver figura 53). La primera se basa en la uniformidad general de la bioquímica moderna encontrada en los principales dominios de la vida (**Archaea**, **Bacteria** y **Eukarya**), claramente originados a partir de un antecesor común (**LUCA**). La segunda se centra en los compuestos que pudieron haberse producido bajo condiciones planetarias prebióticas y como estos compuestos fueron reaccionando entre sí para autoensamblarse y autoorganizarse dando lugar a cada vez un mayor grado de **complejidad**, resultando finalmente en la formación de la primera protocélula. En la línea de la aproximación *bottom-up* está la hipótesis de la evolución química que entronca directamente con la hipótesis propuesta por Oparin-Haldane, y hacia la que principalmente se encamina el diseño de síntesis en el área de la química prebiótica.

is based on the general uniformity of modern biochemistry found in the main domains of life (**Archaea**, **Bacteria** and **Eukarya**), clearly originating from a common ancestor (**LUCA**). The second focuses on the compounds that could have been produced under prebiotic planetary conditions and how these compounds were reacting with each other to self-assemble and self-organize leading to an increasing degree of **complexity**, finally resulting in the formation of the first protocell. In line with the bottom-up approach is the hypothesis of chemical evolution, which is directly related to the hypothesis proposed by Oparin-Haldane, and towards which the design of syntheses in the area of prebiotic chemistry is mainly directed.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

ESCHENMOSER, A. (2007). "The search for chemistry of life's origin", *Tetrahedron*, 63, 12821.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

RUIZ-BERMEJO, M. (2020). "Una pincelada azul en el lienzo del origen de la vida", *Anales de Química*, 116, pp. 154-163.

84. QUIMIOLITOTROFÍA

Se trata de un tipo de **metabolismo** microbiano por el que la energía (intercambiada mediante la biomolécula conocida como ATP, adenosín trifosfato) para los procesos celulares se obtiene a partir de materia inorgánica. Estos compuestos inorgánicos reducidos actúan como donadores de electrones y quedan en estado oxidado por un proceso que se denomina fosforilación oxidativa que da lugar a la molécula de ATP, pilar básico en el metabolismo energético e imprescindible para los procesos celulares que, entre otras cosas, se utiliza para la fijación del CO_2 y obtención de carbono. Dicho proceso ocurre en diferentes pasos en lo que se denomina cadena de transporte de electrones donde el donador inicial, como se ha mencionado, es materia inorgánica (ej. rocas y minerales) y el aceptor final de estos electrones puede ser el oxígeno, en el caso de los microorganismos aerobios, que son la mayoría de los quimiolitótrofos, o puede ser nitrito, en los quimiolitótrofos anaerobios (que no utilizan oxígeno). El donador de electrones, es decir el compuesto inorgánico

del que se obtienen los electrones cuyo transporte conllevará la generación de energía, puede ser hidrógeno, hierro en estado ferroso, sulfuros, azufre elemental, nitrito y amoníaco; este último tanto en los microorganismos aerobios como en los anaerobios.

Este modo de obtener la energía mediante el mencionado proceso de fosforilación oxidativa desde materia inorgánica ha evolucionado solo en ciertos grupos de procariotas, y necesita de grandes cantidades y diversidad de compuestos inorgánicos para generar suficiente cantidad de ATP. Dichos requerimientos se dan, entre otros sitios, en uno de los enclaves más estudiados dentro de la Astrobiología y que es considerado un gran análogo geoquímico de **Marte**: Río Tinto (ver término **Análogos terrestres**). Este río de Huelva, con una acidez extrema, es producto de la actividad de microorganismos quimiolitótrofos que utilizan los compuestos de sulfuro y hierro que se encuentran en altas concentraciones.

CHEMOLITHOTROPHY

This is a type of microbial **metabolism** whereby energy (exchanged via the biomolecule known as ATP, adenosine triphosphate) for cellular processes is obtained from inorganic matter. These reduced inorganic compounds act as electron donors and remain in an oxidized state by the oxidative phosphorylation process, which gives rise to the ATP molecule, a basic pillar in energy metabolism and essential for cellular processes which, among other things, is used to fix CO₂ and obtain carbon. This process occurs in different steps in what is called the electron transport chain where the initial donor, as mentioned, is inorganic matter (e.g. rocks and minerals) and the final acceptor of these electrons can be oxygen, in the case of aerobic microorganisms, which are the majority of chemolithotrophs, or it can be nitrite, in anaerobic chemolithotrophs (which do not use oxygen). The electron donor, i.e. the inorganic compound from which the

electrons whose transport will lead to the generation of energy are obtained, can be hydrogen, iron in the ferrous state, sulfides, elemental sulfur, nitrite and ammonia; the latter in both aerobic and anaerobic microorganisms.

This way of obtaining energy through the aforementioned process of oxidative phosphorylation from inorganic matter has evolved only in certain groups of prokaryotes, and requires large quantities and diversity of inorganic compounds to generate sufficient ATP. Such requirements are found, among other places, in one of the most studied sites in Astrobiology, which is considered a great geochemical analogue of **Mars**: Rio Tinto (see term **Terrestrial analogues**). This river in Huelva, with its extreme acidity, is the product of the activity of chemolithotrophic microorganisms that use sulfur and iron compounds found in high concentrations.

85. QUIRALIDAD, HOMOQUIRALIDAD

Una molécula cuya estructura geométrica no coincide con su imagen especular posee quiralidad. Las dos estructuras de una molécula quiral, es decir, la directa y su imagen especular, se llaman enantiómeros. La química de la **vida** como se conoce en la **Tierra** está basada en esta asimetría geométrica. Los aminoácidos, los elementos que conforman las **proteínas**, y la desoxirribosa en el ADN, son moléculas quirales. Según Francis Crick, “el primer gran principio unificador de la bioquímica es el hecho de que todas las moléculas claves tienen la misma quiralidad en todos los organismos”. Este hecho unificador se conoce como la homoquiralidad biológica.

La homoquiralidad biológica está asociada al fenómeno de la vida para la cual probablemente es una condición necesaria. Actualmente existe un consenso de que: i) la emergencia de quiralidad se produjo en la ausencia de la biología en estadios primarios de la **evolución** química; ii) la alta sensibilidad de los procesos de la conversión de proporciones iguales de los dos enantiómeros a proporciones desiguales a influencias

quirales externas, tanto físicas como químicas, justifica la evolución química hacia un determinado signo de quiralidad y las amplificaciones de quiralidad que han sido necesarias para llegar a la homoquiralidad biológica; iii) las influencias quirales externas físicas, incluyendo la fuerza débil nuclear, deben haberse producido efectos cooperativos entre sí. De especial importancia es el estudio del efecto sobre procesos de ruptura espontánea de la simetría especular de los sesgos quirales químicos originados por fluctuaciones en la composición química o por “ruido químico” (ruido químico son desviaciones en las concentraciones químicas respecto a las proporciones iguales de los dos enantiómeros) de la composición racémica ideal (compuestos de proporciones iguales en los dos enantiómeros) y del efecto de fuerzas mecánicas (p. ej. vórtices hidrodinámicos en tres dimensiones).

La quiralidad es una condición necesaria para la vida, puesto que los compuestos químicos racémicos son ineficientes en fenómenos de reconocimiento molecular e intercambio de información como: i)

la capacidad de las moléculas de hacer copias de sí mismas; ii) la formación de **biopolímeros**, y el control de las moléculas que participan en reacciones del **metabolismo**, y en el control de la traducción del código genético en proteínas. La homoquiralidad de las macromoléculas necesarias para la vida (**proteínas**, **ADN**, polisacáridos) es consecuencia de una selección que probablemente ha actuado más a nivel de la amplificación de quiralidad durante la formación de sistemas moleculares que por síntesis a partir de un conjunto de aminoácidos o azúcares ya en concentraciones consistiendo de un solo enantiómero. Esto implica que la quiralidad debió emerger en los estadios iniciales de la evolución primordial (origen abiótico). Esta selección debió proceder a través de procesos de ruptura de simetría especular (escenarios de bifurcación) acompañados de mecanismos de transmisión, amplificación y memoria del signo de quiralidad en sistemas químicos complejos.

En el caso de reacciones químicas la síntesis asimétrica absoluta fue un tema de discusión en el siglo XIX, luego fue pre-

CHIRALITY, HOMOCHIRALITY

A molecule whose geometrical structure does not coincide with its mirror image possesses chirality. The two structures of a chiral molecule, i.e., the direct structure and its mirror image, are called enantiomers. The chemistry of **life** as known on **Earth** is based on this geometric asymmetry. Amino acids, the building blocks of **proteins**, and deoxyribose in DNA are chiral molecules. According to Francis Crick, “the first great unifying principle of biochemistry is the fact that all key molecules have the same chirality in all organisms.” This unifying fact is known as biological homochirality.

Biological homochirality is associated with the phenomenon of life for which it is probably a necessary condition. There is now a consensus that: i) the emergence of chirality occurred in the absence of biology at early stages of chemical **evolution**; ii) the high sensitivity of the processes of the conversion of equal proportions of the two enantiomers to unequal proportions to external chiral influences, both physical and chemical, justifies the chemical evolution toward a certain sign of chirality and the amplifications of chi-

rality that have been necessary to arrive at biological homochirality; iii) the physical external chiral influences, including the nuclear weak force, must have produced cooperative effects on each other. Of particular importance is the study of the effect on spontaneous specular symmetry breaking processes of chiral chemical biases caused by fluctuations in the chemical composition or by “chemical noise” (chemical noise are deviations in the chemical concentrations from the equal proportions of the two enantiomers) of the ideal racemic composition (compounds of equal proportions in the two enantiomers) and of the effect of mechanical forces (e.g. hydrodynamic vortices in three dimensions).

Chirality is a necessary condition for life, since racemic chemical compounds are inefficient in molecular recognition and information exchange phenomena such as: i) the ability of molecules to make copies of themselves; ii) the formation of **biopolymers**, and the control of molecules involved in **metabolism** reactions, and in the control of the translation of the genetic code into

proteins. The homochirality of macromolecules necessary for life (**proteins**, **DNA**, polysaccharides) is the consequence of a selection that probably acted more at the level of chirality amplification during the formation of molecular systems than by synthesis from a set of amino acids or sugars already in concentrations consisting of a single enantiomer. This implies that chirality must have emerged in the initial stages of primordial evolution (abiotic origin). This selection must have proceeded through processes of specular symmetry breaking (bifurcation scenarios) accompanied by mechanisms of transmission, amplification and memory of the chirality sign in complex chemical systems.

In the case of chemical reactions, the absolute asymmetric synthesis was a topic of discussion in the 19th century, then it was theoretically predicted and only recently some chemical transformations have been described that exhibit it. Theoretical and mechanistic justifications have been proposed for them. In the case of these molecular transformations, the interest in their study is not so much in symmetry

vista teóricamente y solo recientemente se han descrito algunas transformaciones químicas que la presentan. Para ellas se han propuesto justificaciones teóricas y mecánicas. En el caso de estas transformaciones moleculares el interés en su estudio no es tanto en la ruptura de simetría, *per se*, sino en poder comprender los mecanismos que permiten la amplificación de quiralidad. En este sentido sistemas complejos de redes de reacciones pueden generar amplificaciones grandes de quiralidad (proporciones desiguales de los enantiómeros)

que permitan, a partir de las pequeñas fluctuaciones de quiralidad respecto a la composición racémica (la composición con proporciones iguales de los dos enantiómeros), llegar a excesos enantioméricos elevados, en los que hay un enantiómero dominante.

Lecturas adicionales /Further reading

BUHSE et al. (2022). "Spontaneous Deracemizations", *Chem. Rev.* 121, 4, pp. 2147–2229.

breaking, *per se*, but in being able to understand the mechanisms that allow chirality amplification. In this sense, complex systems of reaction networks can generate large amplifications of chirality (unequal proportions of the enantiomers) that

allow, from small fluctuations of chirality with respect to the racemic composition (the composition with equal proportions of the two enantiomers), to reach high enantiomeric excesses, in which there is a dominant enantiomer.

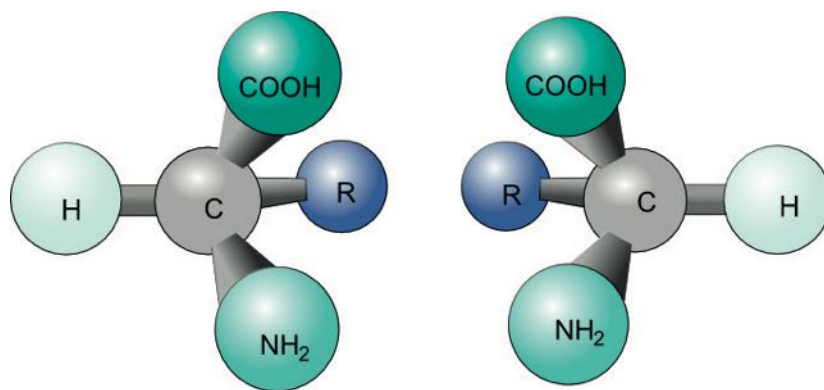


Figura 54:

Quiralidad: simetría especular en una molécula.

Chirality: specular symmetry in a molecule.

Crédito: <https://chem.libretexts.org/@api/deki/files/19089/molecule.png?revision=1>

86. RADIACIÓN, RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y ESPACIAL

La radiación es la emisión o transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas a través del espacio o de un medio material. Cuando la **radiación** es muy energética es capaz de ionizar los átomos, arrancando electrones, y se denomina radiación ionizante. También puede romper los enlaces de moléculas. Estos iones de átomos o moléculas son muy reactivos y pueden combinarse entre sí dando lugar con ello a la síntesis de nuevas moléculas.

En el universo existen diferentes fuentes de radiación, tanto en el entorno espacial como en los ambientes planetarios que orbitan a una **estrella**. Las principales fuentes naturales de radiación ionizante en un ambiente planetario son: i) la desintegración de isótopos radiactivos presentes en las rocas (es decir, núcleos de átomos que no son estables y se transforman espontáneamente en otros núcleos, emitiendo partículas α (alfa), β (beta) o radiación γ (gamma)); ii) el flujo de rayos cósmicos (partículas subatómicas cargadas que se originan en el espa-

cio, de gran velocidad y altas energías); y iii) la radiación ionizante emitida por su estrella como partículas energéticas o como fotones de rayos gamma y rayos X. Por otro lado, las estrellas emiten también radiación UV (fotones en el rango ultravioleta, con longitudes de onda entre 10 y 400 nanómetros). Este rango de radiación electromagnética es capaz también de romper los enlaces de ciertas moléculas, aunque no se considera ionizante porque no posee suficiente energía para ionizar los átomos.

La radiación, en altas dosis es nociva para la **vida** ya que puede romper moléculas con funcionalidades críticas y por ello es esterilizante. Por lo tanto, para que la vida surja, evolucione con biomoléculas funcionales complejas y se mantenga en un ambiente planetario es necesario un cierto nivel de protección de la radiación ionizante y ultravioleta (UV) incidente. La superficie de la **Tierra** en la actualidad es un ambiente relativamente benigno con respecto a la radiación ionizante y la radiación ultravioleta, ya que la **at-**

mósfera absorbe la mayor parte de esta. En concreto la capa de ozono absorbe la radiación en el rango denominado UVC, que es altamente dañina para la vida. En la superficie de otros ambientes planetarios, como **Marte**, donde la atmósfera es 100 veces más tenue y no existe apenas ozono, la radiación UV del **Sol** incide con tal intensidad que cualquier microorganismo terrestre perecería en unos días u horas. Cuando no existe una atmósfera protectora, para buscar ambientes habitables hay que ir a la subsuperficie, bajo una fina capa de roca o **polvo**, o bien en el interior de los **hielos** y masas de **agua** líquida, donde la radiación se atenúa fuertemente.

Existen experimentos de laboratorio que imitan las condiciones del espacio, con temperaturas criogénicas y un vacío ultraalto, donde se producen aminoácidos (biomoléculas esenciales, que forman las **proteínas**) irradiando con electrones hielos de metano, amoníaco y dióxido de carbono. Otros experimentos con incidencia de fotones de

RADIATION, ULTRAVIOLET AND SPACE RADIATION

Radiation is the emission or transmission of energy in the form of electromagnetic waves or particles through space or a material medium. When **radiation** is very energetic it is capable of ionizing atoms, removing electrons, and is called ionizing radiation. It can also break the bonds of molecules. These ions of atoms or molecules are very reactive and can combine with each other leading to the synthesis of new molecules.

In the universe there are different sources of radiation, both in the space environment and in planetary environments orbiting a **star**. The main natural sources of ionizing radiation in a planetary environment are: i) the disintegration of radioactive isotopes present in rocks (that is, nuclei of atoms that are not stable and spontaneously transform into other nuclei, emitting alpha α or beta β particles and gamma γ radiation), ii) the cosmic ray flux (charged subatomic particles originating in space, of high speed and high energies); and iii) ionizing radiation emitted by its star as energetic particles

or as gamma ray and X-ray photons. On the other hand, stars also emit ultraviolet radiation, (or UV radiation, photons in the ultraviolet range, with wavelengths between 10 and 400 nanometers). This range of electromagnetic radiation is also capable of breaking the bonds of certain molecules, although it is not considered ionizing because it does not have sufficient energy to ionize atoms.

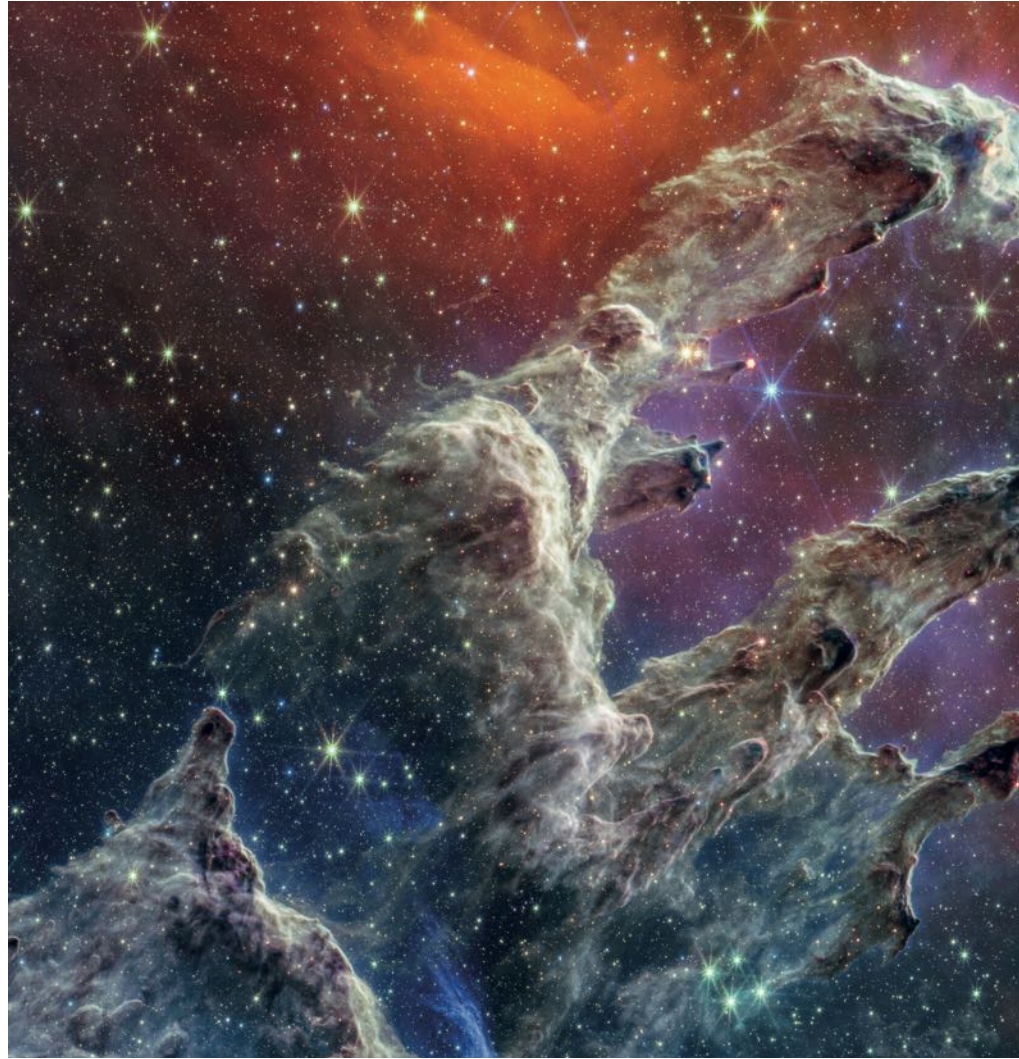
Radiation, in high doses, is harmful to **life** because it can break molecules with critical functionalities and is therefore sterilizing. Therefore, for life to emerge, evolve with complex functional biomolecules, and sustain itself in a planetary environment, a certain level of protection from incident ionizing and ultraviolet (UV) radiation is necessary. The **Earth's** surface is currently a relatively benign environment with respect to ionizing radiation and ultraviolet radiation, as the atmosphere absorbs most of it. In particular, the ozone layer absorbs radiation in the range called UVC, which is highly harmful to life. On the surface of other

planetary environments, such as **Mars**, where the atmosphere is 100 times thinner and there is hardly any ozone, UV radiation from the **Sun** hits with such intensity that any terrestrial microorganism would perish in a few days or hours. When there is no protective atmosphere, to search for habitable environments we must go to the subsurface, under a thin layer of rock or **dust**, or inside the **ice** and liquid **water** masses, where radiation is strongly attenuated.

There are laboratory experiments that mimic space conditions, with cryogenic temperatures and an ultra-high vacuum, where amino acids (the essential biomolecules that form **proteins**) are produced by irradiating methane, ammonia and carbon dioxide ices with electrons. Other experiments with UV photon incidence on ices have also demonstrated the synthesis of various organic molecules. This explains why organic molecules are found in the interstellar medium with relative ease and why a continuous supply of simple

ultravioleta sobre hielos también han demostrado la síntesis de diversas moléculas orgánicas. Esto explica por qué se encuentran moléculas orgánicas en el medio interestelar con relativa facilidad y por qué se deposita, sobre la superficie de cualquier ambiente planetario, un aporte continuo de moléculas orgánicas simples producidas en el espacio.

En algunos entornos de la Tierra la vida se ha adaptado para tolerar o incluso utilizar la radiación natural. Por ejemplo, en zonas desérticas y áridas de alta montaña se han encontrado microorganismos que han desarrollado mecanismos para tolerar niveles de radiación UV altos. En la subsuperficie existen en las rocas microorganismos que utilizan el decaimiento natural de ciertos isótopos radiactivos (tales como el potasio, uranio, radón etc.) como fuente de energía para su **metabolismo**. También existen organismos que han sobrevivido en el exterior de la estación espacial internacional tras varios meses de exposición a la radiación espacial y solar. Estos microorganismos son objeto de estudio para caracterizar sus mecanismos de adaptación a la radiación (ver **Extremófilos**).





organic molecules produced in space is deposited on the surface of any planetary environment.

In some environments on Earth, life has adapted to tolerate or even utilize natural radiation. For example, in desert and arid high mountain areas, microorganisms have been found that have developed mechanisms to tolerate high levels of UV radiation. In the subsurface, there are mi-

croorganisms in rocks that use the natural decay of certain radioactive isotopes (such as potassium, uranium, radon etc.) as a source of energy for their **metabolism**. There are also organisms that have survived outside the international space station after several months of exposure to space and solar radiation. These microorganisms are being investigated to characterize their radiation adaptation mechanisms (see **Extremophiles**).

Figura 55:

Los Pilares de la Creación (imagen compuesta de NIRCam y MIRI).

Pillars of Creation (NIRCam and MIRI composite image).

El polvo y el gas de los pilares son erosionados por la intensa radiación y viento estelar de las estrellas jóvenes próximas.

The dust and gas of the pillars are eroded by the intense stellar radiation and wind from nearby young stars.

Crédito: NASA, ESA, CSA, STScI, J. DePasquale (STScI), A. Pagan (STScI), A. M. Koekemoer (STScI).

87. RADIÓMETRO

Un radiómetro es un dispositivo que mide la potencia de **radiación** en todo o parte del espectro electromagnético, aunque suele usarse para referirse específicamente al espectro infrarrojo. La radiometría comparte técnicas con la fotometría, limitada tradicionalmente al espectro visible; las técnicas cuánticas, como el conteo de fotones; y la espectrometría, de aplicación a bandas estrechas de longitud de onda.

Históricamente, la construcción del primer radiómetro se atribuye a Sir William Crookes en 1873. Este radiómetro, también conocido como “molino de luz”, constaba de un bulbo de vidrio donde se había creado un vacío parcial, y un rotor interior con cuatro paletas metálicas cuyas superficies presentaban un lado pulido y el otro ennegrecido. Al incidir la radiación sobre la superficie ennegrecida esta era absorbida y elevaba la temperatura del aire circundante, el cual ejercía una presión que hacía girar el rotor.

Existen múltiples tipos de radiómetros dependiendo del rango espectral de medida, su orientación, el objetivo al

que son expuestos, etc. Por ejemplo, los radiómetros para medir la irradiancia solar directa de banda ancha se denominan pirheliómetros, si miden radiación directa y difusa se denominan piranómetros, o albedómetros si integran la radiación solar reflejada en el suelo. Hablamos de radiómetros ultravioleta o de microondas si miden la radiación en estos rangos espectrales específicos. Si son utilizados para determinar la temperatura de objetos o gases se les denomina pirómetros, y pueden ser de banda espectral ancha o banda estrecha. A los radiómetros que miden en bandas muy estrechas y contiguas para recuperar un espectro de radiación se les denomina espectrorradiómetros. En todos los casos un aspecto importante que interviene en las medidas es el tratamiento del medio entre la fuente y el detector.

Los radiómetros también difieren en el método de detección o detector utilizado. Los que usan detectores térmicos se basan en la medición del aumento de temperatura en el transductor, siendo los más habituales termopilas y bolómetros. Los dispositivos que son capaces de de-

tectar fotones, se denominan detectores cuánticos. Además de los detectores, los radiómetros incluyen sistemas ópticos como lentes, filtros, espejos, y en algunos casos troceadores y objetivos de calibración con el objetivo de proporcionar una referencia de radiación cero y un punto de calibración.

La radiometría infrarroja ha jugado un papel importante en la **exploración** astrobiológica de **Marte**. El primer radiómetro infrarrojo embarcado en un orbitador fue en la misión Mariner en 1969, el cual contaba con dos bandas dedicadas principalmente a la medida de la temperatura de la superficie de Marte. Posteriormente, instrumentos más sofisticados como el espectrómetro Thermal Emission Spectrometer (TES) de la misión Global Surveyor en 1996 y el radiómetro de nueve bandas Thermal Emission Imaging System (THEMIS) de la misión Mars Odyssey en 2001 han permitido determinar la composición mineralógica y las propiedades térmicas y ópticas de la superficie, y elaborar teorías científicas sobre su capacidad para albergar **vida**, la preservación de **biomarcadores**, y la

RADIOMETER

A radiometer is a device that measures the power of **radiation** in all or part of the electromagnetic spectrum, although it is often used to refer specifically to the infrared spectrum. Radiometry shares techniques with photometry, traditionally limited to the visible spectrum; quantum techniques, such as photon counting; and spectrometry, which applies to narrow wavelength bands.

Historically, the construction of the first radiometer is attributed to Sir William Crookes in 1873. This radiometer, also known as a “light mill”, consisted of a glass bulb in which a partial vacuum had been created, and an inner rotor with four metal vanes whose surfaces were polished on one side and blackened on the other. When the radiation impinged on the blackened surface, it was absorbed and raised the temperature of the surrounding air, which exerted a pressure that made the rotor rotate.

There are multiple types of radiometers depending on the spectral range of measurement, their orientation, the target to which they are exposed, etc. For

example, radiometers for measuring broadband direct solar irradiance are called pyrheliometers, if they measure direct and diffuse radiation they are called pyranometers, or albedometers if they integrate solar radiation reflected from the ground. We speak of ultraviolet or microwave radiometers if they measure radiation in these specific spectral ranges. If they are used to determine the temperature of objects or gases, they are called pyrometers, and can be either broad or narrow spectral band. Radiometers that measure in very narrow and contiguous bands to retrieve a spectrum of radiation are called spectroradiometers. In all cases an important aspect involved in the measurements is the treatment of the medium between the source and the detector.

Radiometers also differ in the detection method or detector used. Those using thermal detectors are based on the measurement of the temperature rise in the transducer, the most common being thermopiles and bolometers. Devices that are capable of detecting photons are called quantum detectors. In addition to detec-

tors, radiometers include optical systems such as lenses, filters, mirrors, and in some cases choppers and calibration targets with the objective of providing a zero radiation reference and a calibration point.

Infrared radiometry has played an important role in the astrobiological **exploration** of **Mars**. The first infrared radiometer onboard an orbiter was on the Mariner mission in 1969, which had two bands dedicated primarily to the measurement of Mars surface temperature. Subsequently, more sophisticated instruments such as the Thermal Emission Spectrometer (TES) of the Global Surveyor mission in 1996 and the nine-band Thermal Emission Imaging System (THEMIS) radiometer of the Mars Odyssey mission in 2001 have made it possible to determine the mineralogical composition and the thermal and optical properties of the surface, and to develop scientific theories about its capacity to support **life**, the preservation of **bio-markers**, and the **evolution** of the climate. The study of the **atmosphere** and more specifically of the area closest to the planet’s surface (Planetary Boundary

evolución del clima. El estudio de la **atmósfera** y más concretamente de la zona más próxima a la superficie del planeta e influencia de esta (Planetary Boundary Layer), en aspectos como el perfil de temperatura, concentración de vapor de **agua y polvo**, y la existencia de nubes, es otra de las aportaciones principales de los radiómetros en exploración planetaria. Pero el uso de radiómetros en Marte

no se ha limitado a los embarcados en orbitadores. El más destacado de los radiómetros para exploración *in situ* es el espectroradiómetro infrarrojo Miniature Thermal Emission Spectrometer (Mini-TES) de los Mars Exploration Rovers, y otros ejemplos son los pirómetros GTS de la misión MSL y HP3-RAD de la misión InSight o el radiómetro neto TIRS de la misión Mars2020.

Layer), in aspects such as temperature profile, concentration of **water** vapor and **dust**, and the existence of clouds, is another of the main contributions of radiometers in planetary exploration. But the use of radiometers on Mars has not been limited to those onboard orbiters. The most prominent of the radiometers for *in situ* exploration is the Miniature Thermal Emission Spectrometer (Mini-TES) infrared spectrometer of the Mars Exploration Rovers, and other examples

are the GTS pyrometers of the MSL mission and HP3-RAD of the InSight mission or the TIRS net radiometer of the Mars2020 mission.

Lecturas adicionales /Further reading

SMITH, M. D., WOLFF, M. J., LEMMON, M. T., et al. (2004). "First Atmospheric Science Results from the Mars Exploration Rovers Mini-TES", *Science*. 306(5702), pp. 1750-1753.

88. REGOLITO

La palabra regolito procede de los términos griegos *reghos*, “manto de colores”, y *lithos*, “piedra”. El regolito es el material fracturado y no consolidado procedente de la degradación de las rocas, el sustrato superficial y los sedimentos debido a la erosión ambiental y que se deposita en forma de material fino en la superficie de un planeta o satélite. El regolito se forma y está presente en cualquier cuerpo planetario, ya sea un planeta, un satélite o incluso un asteroide. En el caso del planeta **Tierra**, los factores fundamentales que intervienen en la formación del regolito son varios, la hidrosfera, la **atmósfera** y la **biosfera**. En otros cuerpos

planetarios, las atmósferas habituales son menos densas que la terrestre y sin la presencia de los otros dos factores. En estos casos, lo habitual es que el regolito se forme por procesos de impacto y erosión debido a esa delgada atmósfera o incluso por meteorización espacial.

Existen varios ejemplos de regolitos bien estudiados, entre ellos el lunar y el marciano, aunque el mejor estudiado es el primero de ellos. En términos generales al caso lunar, el término regolito se utiliza en astronomía para referirse únicamente a la capa superficial de grano fino que cubre una superficie planetaria.

REGOLITH

The word regolith comes from the Greek terms *reghos* “colorful blanket” and *lithos*, “stone”. The regolith is the fractured and unconsolidated material from the degradation of rocks, surface substrate and sediments due to environmental erosion and that is deposited in the form of fine material on the surface of a planet or satellite. The regolith forms and is present in any planetary body, be it a planet, a satellite, or even an asteroid. In the case of planet **Earth**, the fundamental factors that intervene in the formation of the regolith are several, the hydrosphere, **atmosphere** and **biosphere**. In other planetary bodies, the usual atmospheres are less dense than the terrestrial one and without the presence of the other two factors. In these cases, the usual thing is that the regolith is formed by impact and

erosion processes due to that thin atmosphere or even by space weathering.

We have several examples of well-studied regoliths, including the Lunar and the Martian, although the best studied is the first of them. In general terms to the lunar case, the term regolith is used in astronomy to refer only to the fine-grained surface layer that covers a planetary surface.

Lecturas adicionales / Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

89. REMS, INSTRUMENTO EN EL RÓVER CURIOSITY, MISIÓN MSL

El 26 de noviembre de 2011 fue lanzado desde la base de Cabo Cañaveral, en Florida, el rover Curiosity de la NASA. Tras un viaje de casi 9 meses, el 6 de agosto de 2012 aterrizó en **Marte**, en el **cráter Gale**, para cumplir con la misión MSL (Mars Science Laboratory). El objetivo es buscar áreas con condiciones pasadas o presentes favorables para la **vida**, estudiar el entorno de **habitabilidad** y realizar análisis *in situ* de tipo físico, químico y meteorológico con el fin de entender procesos climáticos y geológicos, entre otros. El lugar de aterrizaje fue previamente seleccionado por sus intereses científicos, teniendo en cuenta los riesgos técnicos para la misión.

Curiosity, cuyo nombre fue seleccionado por la ciudadanía, lleva a bordo

unos diez instrumentos científicos sofisticados de varios países, incluyendo varias cámaras. Entre ellos se encuentra la estación meteorológica **REMS** (Rover Environmental Monitoring Station), que proporciona a la misión mediciones ambientales.

Su desarrollo duró más de siete años y fue liderado por el Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA. REMS se compone de seis tipos de sensores que pueden medir simultáneamente: la humedad relativa (HS), la presión (PS), la **radiación** ultravioleta incidente (UVS), la temperatura local de la **atmósfera** (ATS), la temperatura del suelo (TIRS) y la dirección/velocidad del viento (WS). Su objetivo es monitorizar las condiciones ambientales sobre la

superficie para caracterizar la atmósfera marciana.

El instrumentó REMS está montado en varios sitios del vehículo Curiosity. Los elementos principales son dos protuberancias o *booms* donde van distribuidos la mayoría de los sensores, estructuras que están acopladas al mástil del vehículo y separadas por 120 grados a una altura aproximada del suelo de 1,6 metros. En el primero (identificado como *boom1*) van montados ATS, TIRS y WS, mientras que en el segundo (*boom2*) van montados ATS, HS y WS.

El UVS está ubicado en la cubierta superior del rover apuntando al cielo del planeta rojo. Además, la unidad de control del instrumento (ICU), ubica-

REMS, INSTRUMENT ON THE CURIOSITY ROVER, MSL MISSION

On November 26, 2011, NASA's Curiosity rover was launched from the Cape Canaveral base in Florida. After a journey of almost 9 months, on August 6, 2012 it landed on **Mars**, in the Gale **Crater**, to fulfill the MSL (Mars Science Laboratory) mission. The objective is to search for areas with past or present conditions favorable for **life**, study the **habitability** and perform *in situ* physical, chemical and meteorological analyses in order to understand climatic and geological processes, among others. The landing site was previously selected for its scientific interests, taking into account the technical risks to the mission.

Curiosity, whose name was selected by the public, carries on board about ten sophisticated scientific instruments

from several countries, including several cameras. Among them is the REMS (Rover Environmental Monitoring Station) weather station, which provides the mission with environmental measurements.

Its development took more than seven years and was led by the Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA. **REMS** is composed of six types of sensors that can simultaneously measure: relative humidity (HS), pressure (PS), incident ultraviolet **radiation** (UVS), local atmospheric temperature (ATS), ground temperature (TIRS) and wind direction/speed (WS). Its objective is to monitor the environmental conditions on the surface to characterize the Martian **atmosphere**.

The REMS instrument is mounted at several locations on the Curiosity rover. The main elements are two protuberances or booms where most of the sensors are distributed, structures that are attached to the vehicle's mast and separated by 120 degrees at an approximate height of 1.6 meters from the ground. ATS, TIRS and WS are mounted on the first boom (identified as boom1), while ATS, HS and WS are mounted on the second boom (boom2).

The UVS is located on the upper deck of the rover pointing to the sky of the red planet. In addition, the instrument control unit (ICU), located in the warmer inner part of the rover, is mounted on the PS which is in contact with the atmosphere through a duct.

da en la zona interior más caliente del vehículo, lleva montado el PS que está en contacto con la atmósfera a través de un conducto.

Para lograr sus objetivos, el instrumento REMS, capaz de tomar medidas cada segundo, permite determinar las variaciones diarias y estacionales de las propiedades meteorológicas que está midiendo. El modo nominal de monitorización es adquirir datos

durante 5 minutos cada hora, pero se pueden añadir más mediciones en función de los recursos de la misión para ese día. Curiosity lleva casi 10 años operando y desplazándose en la superficie de Marte, lo que ha permitido a REMS obtener datos que se pueden correlacionar con los datos de otros instrumentos de la misión MSL, información obtenida por orbitadores o comparar con los resultados calculados por simulaciones numéricas.

Lecturas adicionales /Further reading

CENTRO DE ASTROBIOLOGÍA (CAB), CSIC-INTA, *Rover Environmental Monitoring Station, Mars Science Laboratory* (NASA) , [en línea], <<http://cab.inta-csic.es/remes/es>>.

To achieve its objectives, the REMS instrument, capable of taking measurements every second, allows to determine the daily and seasonal variations of the meteorological properties it is measuring. The nominal monitoring mode is to acquire data for 5 minutes every hour, but more measurements can be added depending on mission resources for that day. Curiosity has been operating and moving on the surface of Mars for nearly 10 years, which has allowed REMS to obtain information that can be correlated with data from other MSL mission instruments, data calculated by orbiters, or compared with results obtained by numerical simulations.

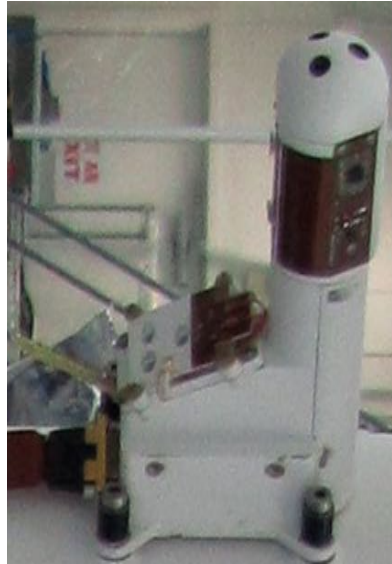


Figura 56:

El instrumento REMS.

The REMS instrument.

Crédito: Centro de Astrobiología (CAB),
CSIC-INTA.

90. SISTEMA SOLAR

El sistema solar es el sistema planetario que, en torno al **Sol**, alberga a la **Tierra**, junto a los otros siete planetas conocidos por todos (los rocosos Mercurio, Venus y **Marte**, los gigantes gaseosos Júpiter y Saturno, y los fríos Urano y Neptuno), los planetas enanos confirmados (Ceres, Plutón, Eris, Makemake y Haumea, en orden cronológico de su descubrimiento) y una docena de potenciales planetas enanos, aún no catalogados como tales por la Unión Astronómica Internacional. El **sistema solar** contiene además el cinturón de asteroides, entre Marte y Júpiter, con más de 1,1 millones de objetos conocidos, el cinturón de Kuiper, situado más allá de la órbita de Neptuno, entre 30 y 55 unidades astronómicas (1 ua = 150 000 000 km) compuesto de **polvo**, cientos de miles de cuerpos helados con tamaños típicos de más de 100 km, y cientos de millones de **cometas**. Los cometas de largo periodo se supone que provienen de un enjambre situado más allá del cinturón de Kuiper, la

nube de Oort, que se extiende hasta aproximadamente 1 año luz, la cuarta parte de la distancia que separa el Sol de Próxima Centauri, la **estrella** más próxima al sistema solar. Algunas estimaciones estadísticas predicen que esta nube podría albergar entre 1 y 100 billones (10^{12} - 10^{14}) de objetos.

El sistema solar comenzó a formarse a partir de una nube de gas y polvo hace más de 4650 millones de años, la edad estimada para el Sol. Durante la contracción de la nube se formó un **disco** protoplanetario (no es casualidad que los planetas y los cinturones de asteroides y de Kuiper sean aproximadamente coplanarios), más del 99,9 % en masa del material de la nube fue acrecido (ver término **Acrecimiento**) por el protosol, y el resto, después de violentos procesos de colisiones e interacciones gravitatorias, dio lugar a los planetas y a los demás cuerpos del sistema solar.

Desde el punto de vista astrobiológico, la Tierra es el único lugar del sistema solar donde se conoce la existencia de **vida**, pero existen otros lugares donde esta pudo desarrollarse en el pasado, como por ejemplo en Marte, objeto de un intenso estudio con misiones robóticas, y algunos satélites de los planetas gigantes que son candidatos interesantes para futuras exploraciones con sondas espaciales: Europa e Io, dos de los satélites galileanos de Júpiter muestran características singulares, el primero tiene un océano (ver **Mundos océano**) debajo de una corteza de **hielo** de más de 3 km de espesor, el segundo tiene un activo vulcanismo, fenómeno que se sabe que representó un papel importante en la **evolución** de la vida en la Tierra; Encélado, uno de los satélites de Saturno, cuenta en su orografía con criovolcanes, que expulsan al espacio, en forma de géiseres, vapor de **agua** y material sólido, como cristales de cloruro sódico (la sal común) y partículas de hielo.

SOLAR SYSTEM

The solar system is the planetary system that, around the **Sun**, houses the **Earth**, along with the other seven planets known to all (the rocky Mercury, Venus and **Mars**, the gas giants Jupiter and Saturn, and the cold Uranus and Neptune), the confirmed dwarf planets (Ceres, Pluto, Eris, Makemake and Haumea, in chronological order of their discovery) and a dozen potential dwarf planets, not yet catalogued as such by the International Astronomical Union. The **solar system** also contains the asteroid belt, between Mars and Jupiter, with more than 1.1 million known objects, the Kuiper belt, located beyond the orbit of Neptune, between 30 and 55 astronomical units (1 ua = 150,000,000 km) composed of **dust**, hundreds of thousands of icy bodies with typical sizes of more than 100 km, and hundreds of millions of **comets**; the long-period comets are assumed to come from a swarm located beyond the Kuiper belt, the Oort cloud, which extends to about 1 light-year, a quarter of the distance from the Sun to

Proxima Centauri, the nearest **star** to the solar system. Some statistical estimates predict that this cloud could hold between 1 and 100 trillion objects.

The solar system began to form from a cloud of gas and dust more than 4650 million years ago, the estimated age of the Sun. During the contraction of the cloud a protoplanetary **disk** was formed (it is not a coincidence that the planets and the asteroid and Kuiper belts are approximately coplanar), more than 99.9% by mass of the cloud material was accreted (see term **Accretion**) by the proto-Sun, and the rest, after violent processes of collisions and gravitational interactions, gave rise to the planets and the other bodies of the solar system.

From the astrobiological point of view, the Earth is the only place in the solar system where we know of the existence of **life**, but there are other places where it could have developed in the past, such as Mars, a target of intense study with robotic missions,

and some satellites of the giant planets that are interesting candidates for future exploration with space probes: Europa and Io, two of Jupiter's Galilean satellites show unique characteristics, the former has an ocean (see **Ocean worlds**) beneath an **ice** crust more than 3 km thick, the latter has active volcanism, a phenomenon that we know represented an important role in the **evolution** of life on Earth; Enceladus, one of Saturn's satellites, has cryovolcanoes in its orography, which expel into space, in the form of geysers, **water** vapor and solid material, such as sodium chloride crystals –salt- and ice particles

Lecturas adicionales /Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

91. SOL

El Sol es una de los 200 000 millones de **estrellas** de nuestra **galaxia**. Nació hace ~4650 millones de años a partir de una nube de materia interestelar en el proceso que dio origen al **sistema solar**. Distaba unos 27 000 años luz del centro galáctico. Se encuentra en la mitad de su vida estable, la secuencia principal, fusionando hidrógeno (H) y transformándolo en helio (He) en su parte central. Dentro de unos 4000 millones de años se convertirá en gigante roja y, posteriormente, en nebulosa planetaria, expulsando al medio interestelar sus capas externas, dejando al descubierto su núcleo que se observaría como una enana blanca (ver **Diagrama H-R**).

Como otras estrellas de su misma clase, la estructura del Sol, desde dentro hacia fuera se compone de: i) un núcleo, con una temperatura de ~15 millones de grados; ii) la zona radiativa, que ocupa unos 2/3 del radio y donde la energía

producida en el interior es transportada por el mecanismo de **radiación**; iii) la zona convectiva, en el último tercio del radio, donde el transporte energético es convectivo, antes de llegar a la región de la **atmósfera** donde la radiación puede escapar libremente y iv) la fotosfera (el disco que observamos) cuya temperatura es de ~5780 kelvin (K). Por encima de la fotosfera se sitúan la cromosfera, la región de transición y la **corona**. A partir de un mínimo de temperatura en la cromosfera con ~3800 K, la temperatura de la atmósfera aumenta con la altura, alcanzando valores de más de 1 millón de grados.

Comparado con otras estrellas que están en un estado de **evolución** semejante, es decir, fusionando hidrógeno en helio de forma estable, el Sol es una estrella más bien fría (hay objetos que pueden alcanzar ~50 000 K), poco masiva (los límites inferior y superior de masas

del zoo estelar son 0,08 y ~120 masas solares, y pequeña (las estrellas más calientes pueden tener hasta ~12 radios solares). Los valores de la masa y radio solares son ~ 2×10^{30} kg y ~700 000 km, respectivamente, ambos se toman como patrones a la hora de medir masas y radios estelares. Tiene un periodo de rotación de ~27 días, aunque presenta rotación diferencial, es decir, la rotación es más lenta en los polos que en el ecuador solar. El Sol primitivo rotaba alrededor de 10 veces más rápido.

El Sol es una estrella activa desde el punto de vista magnético. Las manchas solares, regiones en la fotosfera con temperaturas de unos ~4500 K, son las manifestaciones más conocidas del campo magnético, que se genera en la base de la zona convectiva. El número de manchas solares, y de regiones activas asociadas en la cromosfera, varía cíclicamente con un periodo medio de ~11 años.

SUN

The Sun is one of the 200,000 million **stars** in our **Galaxy**. It was born ~4650 million years ago from a cloud of interstellar matter in the process that gave rise to the **solar system**. It is about 27,000 light-years away from the Galactic center. It is in the middle of its stable half-life, the main sequence, burning hydrogen (H) and transforming it into helium (He) in its central part. In ~4000 million years it will become a red giant and, subsequently, a planetary nebula, expelling its outer layers into the interstellar medium, exposing its core, which would be observed as a white dwarf (see **H-R Diagram**).

Like other stars of the same class, the structure of the Sun, from the inside out, is composed of: i) a core, with a temperature of ~15 million degrees;

ii) the radiative zone, which occupies about 2/3 of the radius where the energy produced in the interior is transported by **radiation**; iii) the convective zone, in the last third of the radius, where the energy transport is convective, before reaching the region of the **atmosphere** where the radiation can escape freely, and iv) the photosphere -the disk we observe- whose temperature is ~5780 kelvin (K). Above the photosphere are the chromosphere, the transition region and the **corona**. From a temperature minimum in the chromosphere at ~3800 K, the temperature of the atmosphere increases with height, reaching values of more than 1 million degrees.

Compared to other stars that are in a similar state of **evolution**, i.e. burning

hydrogen into helium, the Sun is a rather cool star -there are objects that can reach ~50,000 K-, not very massive -the lower and upper mass limits of the stellar zoo are 0.08 and ~120 solar masses-, and small -the hottest stars can have up to ~12 solar radii. The values for the solar mass and the solar radius are $\sim 2 \times 10^{30}$ kg and ~700,000 km, respectively, both of which are taken as standards when measuring stellar masses and radii. It has a rotation period of ~27 days, although it has differential rotation, i.e., rotation is slower at the poles than at the solar equator. The early Sun rotated about 10 times faster.

The Sun is a magnetically active star. Sunspots, regions in the photosphere with temperatures of about ~4500 K, are the

La **interacción Sol-Tierra** y el aporte constante de energía, a un ritmo que no ha variado apreciablemente en los últimos 3500 millones de años, han sido cruciales para la aparición de la vida y la **evolución** de todas las especies.

Figura 57:

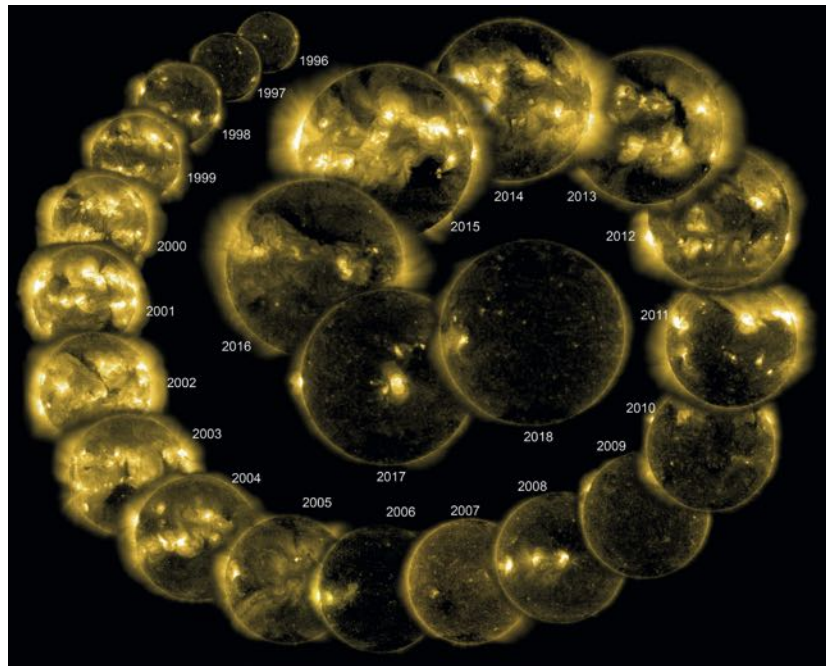
Ciclo de actividad solar en la corona.

Solar activity cycle as seen in the corona.

El ciclo de actividad se ve más claramente en la corona que en otras capas del Sol. En la imagen se puede ver la evolución de la emisión coronal del Sol durante dos ciclos de actividad completos. Observaciones tomadas por el satélite SOHO (ESA/NASA) en la línea de Fe XV de 284 angstroms. En las imágenes podemos percibir que las regiones activas tienden a estar en zonas más ecuatoriales, y están ausentes de los polos.

The activity cycle is more obvious in the corona than in other solar layers. This image shows us the evolution of the solar coronal emission during two complete activity cycles. The observations were taken by SOHO (ESA/NASA) in the Fe XV line at 284 angstroms. In the image we can notice that active regions tend to be more equatorial, avoiding the polar caps of the Sun.

Crédito: ESA/NASA.



best known manifestations of the magnetic field, which is generated at the base of the convective zone. The number of sunspots, and associated active regions in the chromosphere, varies cyclically with an average period of ~11 years.

The **Sun-Earth interaction** and the constant input of energy, at a rate that has not varied appreciably over the last 3.5 billion years, have been crucial for the emergence of life and the evolution of all species.

Lecturas adicionales/Further reading

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

92. SUPERFICIES MINERALES

Es la parte más externa de un sólido homogéneo que se forma en procesos naturales, con una composición química definida. Las superficies minerales pueden actuar como catalizadores heterogéneos, definiendo catalizador como cualquier sustancia que aumenta la velocidad de una reacción química sin experimentar cambio alguno en sí misma. En este contexto, las superficies minerales serían sólidos que actúan como sustratos en una mezcla de reacción líquida o gaseosa, teniendo la función de catalizadores heterogéneos que se presentan en una fase diferente que los reactivos. La reacción se produce en la superficie de contacto entre dos medios, en la región interfacial.

Las superficies minerales tienen gran relevancia en **química prebiótica**, como soportes prebióticos capaces de concentrar moléculas orgánicas y son potenciales catalizadores de reacciones importantes en las condiciones de la **Tierra** primitiva. La concentración de moléculas orgánicas en el océano

primordial debió haber sido extremadamente baja y se ha propuesto como posible escenario que las moléculas orgánicas, como los aminoácidos, pueden ser adsorbidas sobre sustratos minerales que favorecen su concentración. La adsorción es el proceso de unión de una molécula procedente de otra fase (gas o líquido) sobre la superficie de un sólido. Posteriormente dichas moléculas reaccionan en condiciones ambientales adecuadas, favoreciendo la formación de moléculas más complejas en la superficie del mineral, debido a las propiedades catalíticas de la superficie.

En este sentido, una posible alternativa a la teoría de la sopa prebiótica (el océano o charca donde se formaron las primeras moléculas complejas) fue propuesta por Günter Wächtershäuser, que defiende que las primeras reacciones para la formación de moléculas sencillas, como los aminoácidos, no se produjeron en una solución masiva en los océanos, sino en la superficie de los

minerales. Los minerales como silicatos, los óxidos y los sulfuros (como la pirita, sulfuro de hierro) que estaban presentes en varios entornos terrestres primitivos, y debido a sus propiedades catalíticas, las moléculas (precursores prebióticos) pueden adsorberse, concentrarse y reaccionar, dando lugar a la formación de precursores prebióticos, facilitando la polimerización prebiótica.

Los minerales altamente reactivos pueden ver fácilmente afectada su química superficial por las condiciones del entorno, lo que sería una condición necesaria para un potencial catalizador eficaz. Las superficies minerales podrían haber permitido potencialmente casi cualquier tipo de catálisis general, con baja especificidad y eficiencia en varios entornos prebióticos, además de procesos de fotocatalisis inducida mediante **radiación** ultravioleta, proporcionando un mecanismo natural de fijación prebiótica o adsorción de moléculas prebióticas desarrollando una función crítica en la **evolución** química prebiótica.

MINERAL SURFACES

It is the outermost part of a homogeneous solid that is formed in natural processes, with a defined chemical composition. Mineral surfaces can act as heterogeneous catalysts, defining catalyst as any substance that increases the speed of a chemical reaction without undergoing any change in itself. In this context, mineral surfaces would be solids that act as substrates in a liquid or gaseous reaction mixture, having the function of heterogeneous catalysts that occur in a different phase than the reactants, the reaction taking place at the contact surface between two media, in the interfacial region.

Mineral surfaces have great relevance in **prebiotic chemistry**, as prebiotic supports capable of concentrating organic molecules and are potential catalysts for reactions important in early **Earth** conditions. The concentration of organic molecules in the primordial ocean must have been extremely low and it has been proposed as a possible scenario that organic molecules, such as amino acids, may be adsorbed on mineral substrates that favor their concentration. Adsorption is the process of binding a molecule

from another phase (gas or liquid) onto the surface of a solid. Subsequently, these molecules react under suitable environmental conditions, favoring the formation of more complex molecules on the surface of the mineral, due to the catalytic properties of the surface.

In this sense, a possible alternative to the prebiotic soup theory was proposed by Günter Wächtershäuser, who argues that the first reactions for the formation of simple molecules, such as amino acids, did not occur in a massive solution in the oceans, but on the surface of minerals. Minerals such as silicates, oxides and sulfides (such as pyrite, iron sulfide) that were present in various primitive terrestrial environments, and due to their catalytic properties, molecules (prebiotic precursors) can adsorb, concentrate and react, leading to the formation of prebiotic precursors, facilitating prebiotic polymerization.

Highly reactive minerals can easily have their surface chemistry affected by environmental conditions, which would be a necessary condition for a potential effective catalyst. Mineral surfaces could

potentially have enabled almost any type of general catalysis, with low specificity and efficiency in various prebiotic environments, in addition to ultraviolet **radiation** induced photocatalysis processes, providing a natural mechanism for prebiotic attachment or adsorption of prebiotic molecules developing a critical role in prebiotic chemical **evolution**.

Lecturas adicionales /Further reading

BERNAL, J. D. (1951). *The physical basis of life*, Routledge and Paul.

MARSHALL-BOWMAN, K., OHARA, S., SVETKEY, D. A., HAZEN, R. M., CLEAVES, H. J. (2010). "Mineral-organic interfacial processes: potential roles in the origin of life". *Geochim. Cosmochim. Acta*, 74, pp. 5852–5861.

HUBER, C., WÄCHTERSÄUSER, G. (1998). "Peptides by activation of amino acids with CO on (Ni,Fe)S surfaces: implications for the origin of life". *Science*, 281, pp. 670–672.

MATEO-MARTI, E., GALVEZ-MARTINEZ, S., GIL-LOZANO, C., ZORZANO, M. P. (2019). "Pyrite-induced UV-photocatalytic abiotic nitrogen fixation: implications for early atmospheres and life", *Scientific Reports*, 9:15311-1.

93. TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS: NUCLEOSÍNTESIS Y RELEVANCIA ASTROBIOLÓGICA

La tabla periódica consiste en la disposición ordenada de todos los elementos químicos, según sus características primordiales: número atómico, que representa la cantidad de protones de su núcleo, de carga eléctrica positiva, y la configuración de los electrones, de carga negativa, que orbitan alrededor de aquel. Esta disposición de electrones, especialmente los más externos, es la que proporciona las propiedades químicas a cada uno de los elementos. Otra característica esencial es el número de neutrones, sin carga eléctrica, del núcleo, que no es siempre la misma para cada elemento químico y diferencia por tanto a los diversos isótopos o variedades de cada elemento. Así, por ejemplo, el hidrógeno existe en tres versiones: el más común, conocido como protio, que solo incluye un protón en el núcleo; el deuterio, que añade un neutrón; y el tritio, con dos partículas de este tipo junto al protón. La suma de protones y neutrones proporciona el denominado número másico.

Los elementos químicos son producto de unos complejos procesos físicos que han sucedido o siguen teniendo lugar en contextos astrofísicos muy diversos. Los dos elementos más sencillos y menos masivos, el hidrógeno y el helio, aparecieron durante el Big Bang, el momento inicial en el que emergieron espacio, tiempo y materia. Casi todo el berilio y el boro, con cuatro y cinco protones, provienen de la interacción con rayos cósmicos (partículas atómicas, como núcleos de otros elementos, que viajan a gran velocidad). Las **estrellas** de masa menor o similar al **Sol** tienen una larga y tranquila **vida**, tras la cual, tras consumir el hidrógeno central, se expanden, convirtiéndose en gigantes rojas, expulsan las capas exteriores y queda solo el núcleo central, pasando a ser una enana blanca, que se enfría muy lentamente (ver **Diagrama H-R**). Durante estas fases se generan elementos como el litio, de tres protones. Otros eventos que indican el final de la vida de una estrella también puede tener como consecuencia la aparición de elementos de caracterís-

ticas muy distintas. Así, la explosión de una supernova de tipo Ia, generadas en sistemas que contienen una enana blanca y una gigante roja (un sistema binario evolucionado), produce varios elementos metálicos conocidos, como el hierro o el níquel. Las estrellas mucho más masivas que el Sol también terminan su vida con una explosión de tipo supernova (de tipos Ib, Ic o II). El elemento más masivo que se genera durante estos procesos es rubidio, con 37 protones, pero también se forma de esta manera el más común aluminio. Una gran cantidad de elementos pesados, con un gran número de protones y neutrones, se genera durante la fusión de dos estrellas de neutrones (uno de los posibles finales de estrellas más masivas que el Sol). Este sería el caso de oro o la plata, de uso común desde la Antigüedad, o el uranio o el plutonio, identificados en 1789 y 1940 y de uso en la industria nuclear. En cualquier caso, muchos elementos químicos se forman por más de una vía, como se ilustra en el diagrama adjunto (figura 58).

PERIODIC TABLE OF THE CHEMICAL ELEMENTS: NUCLEOSYNTHESIS AND ASTROBIOLOGICAL RELEVANCE

The periodic table consists of the ordered arrangement of all the chemical elements, according to their primary characteristics: atomic number, which represents the number of protons, with positive electric charge, in their nucleus, and the configuration of the negatively charged electrons orbiting around it. This arrangement of electrons, especially the outermost ones, is what gives each element its chemical properties. Another essential characteristic is the number of neutrons, without electric charge, in the nucleus, which is not always the same for each chemical element and therefore differentiates the various isotopes or varieties of each element. Thus, for example, hydrogen exists in three versions: the most common, known as protium, which includes only one proton in the nucleus; deuterium, which adds a neutron; and tritium, with two such particles together to the proton. The sum of protons and neutrons gives the so-called mass number.

The chemical elements are the product of complex physical processes that have taken place or continue to take place in very diverse astrophysical contexts. The two simplest and least massive elements, hydrogen and helium, appeared during the Big Bang, the initial moment when space, time and matter emerged. Most of beryllium and boron, with four and five protons, come from interaction with cosmic rays (atomic particles, like nuclei of other elements, traveling at high speed). **Stars** of mass less than or similar to the **Sun** have a long and quiet **life**, after which, after consuming the central hydrogen, they expand, becoming red giants, expel the outer layers and only the central core remains, becoming a white dwarf, which cools very slowly (**see H-R Diagram**). During these phases, elements such as lithium, with three protons, are generated. Other events that indicate the end of the life of a star can also result in the appearance of elements with very different charac-

teristics. Thus, the explosion of a type Ia supernova, generated in systems containing a white dwarf and a red giant (an evolved binary system), produces several known metallic elements, such as iron or nickel. Stars much more massive than the Sun also end their lives with a supernova-type explosion (of types Ib, Ic or II). The most massive element generated during these processes is rubidium, with 37 protons, but the more common aluminum is also formed in this way. A large number of heavy elements, with a large number of protons and neutrons, are generated during the fusion of two neutron stars (one of the possible endings of stars more massive than the Sun). This would be the case of gold or silver, commonly used since ancient times, or uranium or plutonium, identified in 1789 and 1940 and used in the nuclear industry. In any case, many chemical elements are formed by more than one route, as illustrated in the accompanying diagram (figure 58).

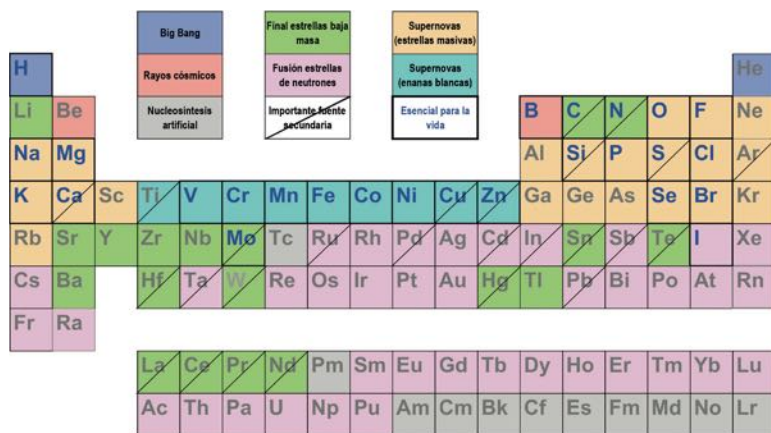


Figura 58:

Tabla periódica de los elementos químicos.

Periodic table of the chemical elements.

En ella se resaltan tanto la principal fuente de generación (según los colores de cada caja) como su relevancia astrobiológica (cajas realzadas, con símbolos representando a cada elemento en rojo).

It highlights both the main source of generation (according to the colors of each box) and their astrobiological relevance (highlighted boxes, with symbols representing each element in red).

Crédito: D. Barrado.

Algunos de estos elementos químicos tienen una importancia esencial en múltiples procesos biológicos. Los principales son hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, acompañados por fósforo y azufre y, en menor medida, sodio, magnesio, potasio y calcio. Dentro de los oligoelementos, también esenciales pero que solo parecen en cantidades mínimas, se encuentran cobalto, cobre, cromo, flúor, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, selenio, silicio, yodo y zinc. Así, la mayor parte de los compuestos químicos esenciales para la vida tienen origen en los diferentes finales de la vida de las estrellas (ver figura 58), tanto aquellas que finalizan en procesos cataclísmicos como en gigantes rojas. En cualquiera de ellos, al final se produce la expulsión de una gran cantidad de material procesado que enriquece el medio interestelar de elementos químicos no presentes con anterioridad o aumentando su concentración frente al hidrógeno o el helio, los componentes primordiales.

Some of these chemical elements are of essential importance in many biological processes. The main ones are hydrogen, carbon, nitrogen and oxygen, accompanied by phosphorus and sulfur and, to a lesser extent, sodium, magnesium, potassium and calcium. Among the trace elements, also essential but which only appear in minimal quantities, are cobalt, copper, chromium, fluorine, iron, manganese, molybdenum, nickel, selenium, silicon, iodine and zinc.

Thus, most of the chemical compounds essential for life have their origin in the different ends of the life of stars (see figure 58), both those that end in cataclysmic processes and red giants. In any of them, at the end there is the expulsion of a large amount of processed material that enriches the interstellar medium with chemical elements not present before or increasing its concentration compared to hydrogen or helium, the primary components.

94. TIERRA, EL FUTURO

El futuro de la Tierra como planeta está íntimamente ligado a la evolución del **Sol**. En **evolución estelar** intervienen varios procesos que afectan a la supervivencia de todos los cuerpos mayores y menores del **sistema solar**, incluidos la Tierra y la **biosfera**. Cambios estructurales en la **estrella** modificarán órbitas y provocarán un aumento en los procesos de irradiación afectando la **atmósfera**. Además, como consecuencia del enfriamiento interno del planeta es probable que se detenga la tectónica de placas.

En un futuro a corto plazo y como consecuencia de un cambio gradual en la composición química del núcleo de la estrella, se producirá un aumento de la energía que incide sobre el planeta. La transformación del hidrógeno en helio por medio de las reacciones termonucleares que proporcionan la energía del Sol, provocará la contracción del núcleo. Esta, a su vez, lleva asociado un aumento de la temperatura en el interior de la estrella por lo que el combustible se quemará más rápido aumentando la producción total de

energía. En los próximos 1200 millones de años la luminosidad de nuestra estrella aumentará un 10 % y es de esperar que el aumento de la energía radiada por el Sol tendrá consecuencias catastróficas para la atmósfera de nuestro planeta.

Un segundo problema al que se habrá de enfrentar la **vida** en el futuro del planeta está asociado a la tectónica de placas. Aquí la clave es determinar por cuánto tiempo seguirá funcionando en la Tierra. Desde que se formó se ha enfriado y el interior de la Tierra es cada vez más viscoso. A medida que la viscosidad del manto terrestre aumenta y la parte más alta de la litosfera se hace más gruesa, la tectónica de placas se vuelve problemática. En algún momento, en los próximos mil millones de años en el futuro del planeta cesará la tectónica de placas y con ella la regeneración atmosférica y los ciclos del carbono.

La evolución de la estrella provocará, además, una modificación de la órbita de los planetas del sistema solar. Este

proceso depende en gran medida de la pérdida de masa estelar, pero también de la interacción por **fuerzas de marea**. Los vientos estelares pueden desencadenar inestabilidades dinámicas y provocar que el sistema planetario que es estable en la etapa actual de vida de la estrella se transforme en inestable en su futuro evolutivo. Así esperamos que los planetas del sistema solar acaben siendo engullidos por la estrella (Mercurio, Venus, Tierra, **Marte**) tras la expansión de la envoltura de la estrella. También es probable que las órbitas de los planetas gigantes externos se vean modificadas, en concreto se expandirán por efecto de la pérdida de masa.

Los planetas cambiarán de órbita al tiempo que la zona de **habitabilidad** se desplaza hacia fuera a medida que la estrella se transforma en una gigante roja. Puede ocurrir que un planeta previamente habitable pueda abandonar la zona habitable o que un planeta anteriormente congelado pueda presentar **agua** líquida en su superficie al entrar en la zona de habitabilidad.

THE FUTURE OF THE EARTH

The future of the Earth as a planet is intimately linked to the evolution of the **Sun**. **Stellar evolution** involves several processes that affect the survival of all major and minor bodies in the **solar system**, including the Earth and its **biosphere**. Structural changes in the **star** will modify orbits and cause an increase in irradiation processes affecting the **atmosphere**. In addition, as a consequence of the internal cooling of the planet, it is likely that plate tectonics will stop.

In the short term future, as a consequence of a gradual change in the chemical composition of the star's core, there will be an increase in the energy incident on our planet. The transformation of hydrogen into helium through the thermonuclear reactions that provide the Sun's energy will cause a contraction of the core. This, in turn, is associated with an increase in the temperature inside the star, so that the fuel will burn faster, increasing the total energy output. In the next 1.2 billion years the luminosity of our star will increase by 10% and

it is to be expected that the increase in the energy radiated by the Sun will have catastrophic consequences for the atmosphere of our planet.

The slowdown of plate tectonics is the second problem that **life** on our planet will have to face in the future. The key here is to determine how long it will continue to work on Earth. Since our planet formed it has cooled and the interior of the Earth has become increasingly viscous. As the viscosity of the Earth's mantle increases and the uppermost part of the lithosphere thickens, plate tectonics becomes problematic. At some point in the next billion years in the planet's future plate tectonics will cease and with it atmospheric regeneration and the carbon cycle.

The evolution of the star will also cause a modification of the orbit of the planets of the solar system. This process depends to a large extent on the loss of stellar mass, but also on **tidal force** interaction. Stellar winds can trigger dynamical instabilities and cause a planetary system that is

stable in the current life stage of the star to become unstable in its evolutionary future. Thus we expect that the planets of the solar system will eventually be engulfed by the star (Mercury, Venus, Earth, **Mars**) after the expansion of the stellar envelope. It is also likely that the orbits of the outer giant planets will be modified, in particular they will expand due to mass loss.

As the star transforms into a red giant, the habitability zone will shift outward and the planets will change their orbits. It may happen that a previously habitable planet leaves the **habitability** zone or that a previously frozen planet has liquid **water** on its surface when it enters the habitability zone.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Peligros Cósmicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberó.

95. TORMENTA DE POLVO MARCIANA

En **Marte**, el ciclo del **polvo** tiene gran efecto en las temperaturas de la superficie del planeta y en la circulación atmosférica. Esto se debe a que la concentración de polvo en suspensión y su distribución afecta fuertemente a la **radiación** térmica y solar en la **atmósfera** y, por tanto, a la radiación recibida en la superficie. El papel del polvo en el clima y la meteorología del Marte moderno tienen por tanto implicaciones muy significativas en el diseño y en la seguridad de misiones tripuladas y no tripuladas enviadas a la superficie del planeta, así como en el potencial astrobiológico del mismo.

Las tormentas de polvo regionales y locales son comunes en Marte, particularmente en el verano del hemisferio sur. Sin embargo, cada cierto número de años, distintas tormentas a lo largo del planeta crecen y se fusionan convirtiéndose en una tormenta global (GDS, por sus siglas en inglés). Este término se define en general como una tormenta en la cual el polvo se expande hasta cubrir todas las longitudes sobre la mayor parte de ambos hemisferios. Asimismo,

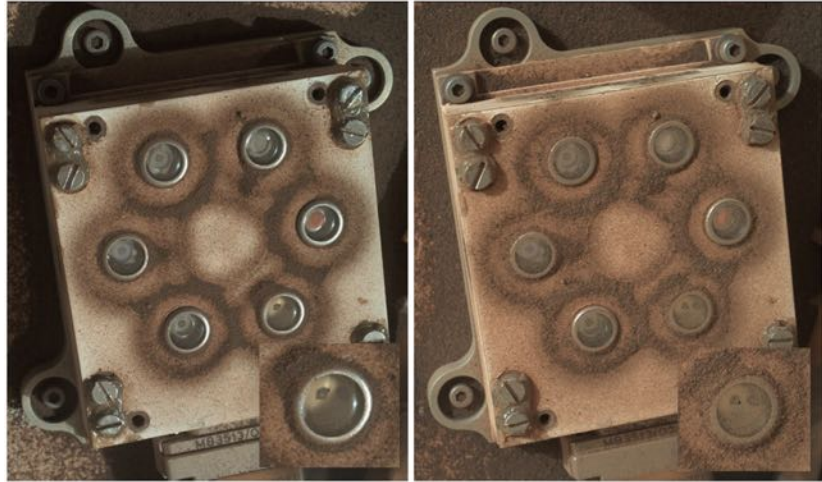


Figura 59:

Polvo en el sensor de un instrumento en Marte.

Dust on the sensor of an instrument on Mars.

La imagen muestra la deposición de polvo en el sensor de radiación ultravioleta del instrumento REMS, a bordo del rover Curiosity. Claramente se observa el efecto tras de unos años de operación en la superficie del planeta.

The image shows dust deposition on the ultraviolet radiation sensor of the REMS instrument aboard the Curiosity rover. The effect is clearly visible after a few years of operation on the planet's Surface.

Adaptado de Viúdez-Moreiras et al., 2019.

MARTIAN DUST STORM



Figura 60:

La superficie de Marte cubierta por una tormenta global de polvo.

The surface of Mars covered by a global dust storm.

Crédito: NASA, ESA y STScI.

On **Mars**, the **dust** cycle has a great effect both in the temperatures on the planetary surface and in atmospheric circulation. This is because the concentration of suspended dust and its distribution strongly affects the thermal and solar **radiation** in the **atmosphere** and,

therefore, the radiation received at the surface. The role of dust in the climate and meteorology of modern Mars therefore has huge implications for the design and safety of manned and unmanned missions sent to the surface of the planet, as well as for its astrobiological potential.



Figura 61:

Nube de polvo en Marte.

Dust cloud on Mars.

Ráfaga de viento barriendo el polvo a través de la llanura marciana el 18 de junio de 2021. La nube de polvo se estimó en 4 kilómetros cuadrados de tamaño; fue la primera nube de polvo marciano levantada por el viento de esta escala jamás captada en imágenes.

Wind gust sweeping dust across the Martian plain on June 18, 2021. The dust cloud was estimated to be 4 square kilometers in size; it was the first windblown Martian dust cloud of this scale ever captured in images.

Crédito: NASA / JPL-Caltech / SSI.

estas tormentas afectan directamente a las misiones de superficie, tanto por el nivel disponible de energía solar para las misiones que dependan de esta fuente de energía, así como posibles daños y efectos perniciosos por el impacto y/o acumulación del polvo en suspensión.

Se han realizado numerosos esfuerzos de modelado, pero este fenómeno engloba una gran cantidad de mecanismos con interacciones muy complejas, lo que dificulta el desarrollo de modelos y, por tanto, a día de hoy, estos fenómenos son impredecibles. Esto se debe en parte tanto a la rareza de estos eventos como a los pocos datos que tenemos de la superficie y la atmósfera de Marte, con los que validar los modelos.

Observaciones recientes tanto desde la superficie del planeta como desde su órbita están ayudándonos a avanzar en nuestro conocimiento de este fenómeno. En este sentido, los instrumentos **REMS**, **TWINS** y **MEDA** a bordo del rover Curiosity (misión NASA Mars Science Laboratory), el aterrizador NASA InSight, y el rover Perseverance (misión NASA Mars 2020), el primero en Marte desde el año 2012, han podido observar y caracterizar con un detalle sin precedentes la última tormenta de polvo global (ver término **Marte**), así como las tormentas regionales que ocurrieron posteriormente. Estos datos han permitido avanzar en el rol que juega la superficie del planeta y su interacción con la atmósfera, tanto en el intercambio de masa, energía y cantidad de movimiento.

Lecturas adicionales /Further reading

“El rover Perseverance de la NASA estudia los fuertes vientos del cráter Jezero”, [en línea] <<https://cab.inta-csic.es/noticias/el-rover-perseverance-de-la-nasa-estudia-los-fuertes-vientos-del-cra-ter-jezero/01/>>

GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.

GUZEWICH, S. D., LEMMON, M., SMITH, C. L., et al. (2019). “Mars Science Laboratory observations of the 2018/Mars year 34 global dust storm”, *Geophysical Research Letters*, 46, pp. 71-79.

LEOVY, C. B. & ZUREK, R. W. (1979). “Thermal tides and Martian dust storms: Direct evidence for coupling”, *Journal of Geophysical Research*, 84(B6), pp. 2956-2968.

Regional and local dust storms are common on Mars, particularly in southern summer. However, every few years, different storms across the planet grow and merge into a global dust storm (GDS). This term is generally defined as a storm in which dust expands to cover all longitudes over most of both hemispheres. Also, these storms directly affect surface missions, both in terms of the level of solar energy available to missions that rely on this energy source, as well as possible damage and detrimental effects from the impact and/or accumulation of suspended dust.

Numerous modeling efforts have been made, but this phenomenon encompasses a large number of mechanisms with very complex interactions, which makes model development difficult and therefore, to this day, these phenomena are unpredictable. This is due in part to both the rarity of these events and the

limited data we have from the surface and atmosphere of Mars with which to validate models.

Recent observations both from the planet's surface and from orbit are helping us to advance our understanding of this phenomenon. In this regard, the **REMS**, **TWINS**, and **MEDA** instruments aboard the Curiosity rover (NASA Mars Science Laboratory mission), the NASA InSight lander, and the Perseverance rover (NASA Mars 2020 mission), the first one on Mars since 2012, have been able to observe and characterize in unprecedented detail the last global dust storm (see term **Mars**), as well as the regional storms that occurred subsequently. These data have moved forward our understanding of the role played by the planetary surface and its interaction with the atmosphere, both in the exchange of mass, energy, and momentum.

96. TWINS, INSTRUMENTO EN LA SONDA INSIGHT

InSight (Interior exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport, **Exploración** del interior mediante investigaciones sísmicas, geodesia y transporte de calor) es una misión de la NASA del programa Discovery. Después de poco más de seis meses, el explorador geofísico aterrizó el 26 de noviembre de 2018 en el hemisferio norte de **Marte**, cerca del ecuador, en Elysium Planitia, con el objetivo de estudiar el interior del planeta. A bordo se encuentra el instrumento TWINS (Temperature and Wind Sensors for InSight misión, Sensores de presión y temperatura para la misión InSight) desarrollado en el Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA.

El objetivo de la misión es entender la formación y la **evolución** temprana de los planetas rocosos, incluido la **Tierra**, y determinar la actividad tectónica. Los dos instrumentos principales de la misión son un sismómetro SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure, Experimento sísmico para la estructura interior) y HP3 (Heat Flow and Physical Properties Package, Sensores para el es-

tudio del flujo de calor y propiedades físicas). Permitirán detectar eventos sísmicos, estudiar el flujo de calor, la rotación y estructura interior de Marte. Otros instrumentos son un magnetómetro y una sonda capaz de perforar el suelo hasta cinco metros de profundidad.

La plataforma utilizada está basada en un remanente de la misión Phoenix que llegó a Marte en 2008. Tiene dos paneles solares, más grandes que los utilizados en Phoenix. Como novedad, lleva un brazo robotizado cuya estructura principal fue originalmente construida para una misión a Marte. El lanzamiento estaba previsto en 2001, pero fue finalmente cancelado. El modo de aterrizaje de la astronave fue similar al utilizado en Phoenix, con la diferencia de poder aterrizar durante una tormenta de **polvo**.

Los detectores de **TWINS** son modelos de repuesto de los modelos de vuelo de **REMS** que fueron adaptados para la misión InSight: no llevan ni sensor de humedad, ni sensor de temperatura del suelo, lo que permite reducir la masa. El

instrumento TWINS consiste en dos brazos o *booms*, cada uno montado en una torreta y orientados en direcciones opuestas. Cada *boom* tiene un sensor de viento capaz de medir la velocidad y dirección, y un sensor de temperatura de la **atmósfera**. TWINS tiene una frecuencia de adquisición modificable y permite medir hasta un mínimo de una vez por segundo.

TWINS tiene dos objetivos principales en la misión. En una fase previa se utilizó para determinar el momento del día más favorable para el despliegue de otros instrumentos encima del **regolito** (capa de materiales no consolidados, como fragmentos de roca y granos minerales, que descansa sobre roca sólida inalterada) mediante un brazo robótico y la ayuda de dos cámaras, lo que representa una novedad en las misiones a Marte. En el resto de la misión, que es una fase operacional, permite descartar falsos eventos sísmicos. En ambas fases TWINS obtiene datos medioambientales que se pueden correlacionar con datos de otros instrumentos como es el caso de REMS en la misión MSL.

TWINS, INSTRUMENT ON INSIGHT PROBE

InSight (Interior **exploration** using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) is a NASA mission of the Discovery program. After just over six months, the geophysical explorer landed on November 26, 2018 in the northern hemisphere of **Mars** near the equator at Elysium Planitia with the goal of studying the planet's interior. On board is the TWINS instrument (Temperature and Wind Sensors for InSight mission, Temperature and Pressure Sensors for InSight mission) developed at the Center for Astrobiology (CAB), CSIC-INTA.

The objective of the mission is to understand the formation and early **evolution** of rocky planets, including **Earth**, and to determine tectonic activity. The two main instruments of the mission are a SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) seismometer and HP3 (Heat Flow and Physical Properties Package). They will allow to detect seismic events,

study heat flow, rotation and interior structure of Mars. Other instruments are a magnetometer and a probe capable of drilling into the ground up to five meters deep.

The platform used is based on a remnant of the Phoenix mission that reached Mars in 2008. It has two solar panels, larger than those used on Phoenix. As a novelty, it carries a robotic arm whose main structure was originally built for a Mars mission. The launch was planned for 2001, but was eventually cancelled. The spacecraft's landing mode was similar to that used on Phoenix, with the difference of being able to land during a **dust** storm.

The **TWINS** detectors are replacement models of the **REMS** flight models that were adapted for the InSight mission: they carry neither a humidity sensor nor a soil temperature sensor, allowing for reduced mass. The TWINS instrument

consists of two arms or booms, each mounted on a turret and oriented in opposite directions. Each boom has a wind sensor capable of measuring wind speed and direction, and an **atmosphere** temperature sensor. TWINS has a modifiable acquisition rate and can measure up to a minimum of once per second.

TWINS has two main mission objectives. In a previous phase, it was used to determine the most favorable time of day for deployment of other instruments on top of the **regolith** (a layer of unconsolidated materials, such as rock fragments and mineral grains, resting on unaltered solid rock) using a robotic arm and the help of two cameras, a first for Mars missions. In the rest of the mission, which is an operational phase, it allows false seismic events to be ruled out. In both phases TWINS obtains environmental data that can be correlated with data from other instruments such as REMS in the MSL mission.

97. UTILIZACIÓN DE RECURSOS IN SITU

El transporte de productos desde la **Tierra** al espacio es muy costoso y por ello cuanto más lejos llegue la exploración robótica y tripulada, más importante será generar los productos críticos con recursos locales. Las misiones de reabastecimiento a destinos que se alcanzan tras varios meses de vuelo, como sería el caso de **Marte**, son además de onerosas, arriesgadas. La dependencia exclusivamente de ellas podría poner en riesgo a los astronautas. En la exploración espacial (ver **Exploración espacial: preparación para la exploración humana**) la utilización de recursos *in situ* o ISRU (por sus siglas en inglés *In Situ Resource Utilization*) es el conjunto de métodos asociados a la recolección, procesado, transformación y almacenamiento de materiales o productos encontrados o fabricados en objetos del espacio exterior tales como la Luna, Marte, los asteroides, etc. Un ejemplo de ISRU que lleva aplicándose con éxito en el espacio desde hace varias décadas es el uso de la energía solar captada localmente a través de paneles solares.

La investigación en el desarrollo de nuevos sistemas ISRU está repuntando en esta última década impulsada por los planes futuros de exploración sostenida, tripulada, de la Luna con bases permanentes y la posible exploración humana de Marte. El uso de estos métodos permitirá generar localmente productos críticos tales como fuentes de energía, combustible, materiales de construcción, alimentos, **agua**, oxígeno, etc.

Para plantear la exploración humana de Marte o la Luna es necesario generar primero un sistema sostenible de soporte vital: una pequeña **biosfera** con una **atmósfera** controlada, y aporte de agua, en la que se produzcan alimentos y acumule oxígeno respirable para los astronautas y en la cual se transformen los desechos de los seres vivos en nuevos nutrientes y se retire el CO₂ eliminado en la respiración. El agua es un elemento clave para la **vida** y por ello los primeros pasos de demostración de ISRU sostenible en el espacio están asociados con la localización de reservas de agua (en la Luna, en Marte, en asteroides etc.), su ex-

tracción y almacenamiento. En la Luna y en Marte existen reservas de agua helada acumuladas en el suelo, por lo que los primeros esfuerzos se centrarán en taladrarlo y extraer el agua. Otro producto crítico es el oxígeno, que se puede extraer de los óxidos presentes en los minerales de las rocas (por un proceso que requiere elevar la roca a mucha temperatura), también se puede obtener por hidrólisis del agua o por ruptura de las moléculas de CO₂. Este último es el caso del proceso que actualmente está realizando MOXIE, en el vehículo Perseverance, en Marte el primer instrumento demostrador de ISRU que extrae oxígeno a partir del CO₂ atmosférico (ver **Mars 2020, misión de exploración de Marte**).

Los recursos disponibles en el espacio dependen del destino de exploración. Por ejemplo, se piensa que los asteroides contienen abundantes elementos valiosos para la tecnología en la Tierra. Estos materiales deberían extraerse y purificarse *in situ* antes de traerlos de retorno a la Tierra para su aplicación industrial, este campo de investigación se conoce como

IN-SITU RESOURCE UTILIZATION

Transporting products from **Earth** to space is very expensive, so the farther robotic and manned exploration goes, the more important it is to generate critical products with local resources. Resupply missions to destinations that are reached after several months of flight, such as **Mars**, are not only expensive, but also risky. Exclusive reliance on them could put astronauts at risk. In space exploration (see **Space Exploration: Preparing for Human Exploration**), *In Situ* Resource Utilization (ISRU) is the set of methods associated with the collection, processing, transformation and storage of materials or products found or manufactured on objects in outer space such as the Moon, Mars, asteroids, etc. An example of ISRU that has been successfully applied in space for several decades is the use of solar energy captured locally through solar panels.

Research in the development of new ISRU systems is picking up in the last decade driven by future plans for sus-

tained, manned exploration of the Moon with permanent bases and the possible human exploration of Mars. The use of these methods will allow critical products such as energy sources, fuel, building materials, food, **water**, oxygen, etc. to be generated locally.

To consider human exploration of Mars or the Moon, it is first necessary to generate a sustainable **life** support system: a small **biosphere** with a controlled **atmosphere** and water supply, in which food is produced and breathable oxygen is accumulated for the astronauts, and in which the waste of living beings is transformed into new nutrients and the CO₂ eliminated in respiration is removed. Water is a key element for **life** and therefore the first steps in demonstrating sustainable ISRU in space are associated with locating water reserves (on the Moon, Mars, asteroids, etc.), extracting and storing them. On the Moon and Mars there are frozen water reservoirs accumulated in the soil, so the first

efforts will focus on drilling it and separating the water. Another critical product is oxygen, which can be extracted from the oxides present in rock minerals (by a process that requires raising the rock to a very high temperature), it can also be obtained by hydrolysis of water or by breaking down CO₂ molecules. The latter is the process currently being carried out by MOXIE on the Perseverance rover on Mars, the first ISRU demonstrator instrument to extract oxygen from atmospheric CO₂ (see **Mars 2020, Mars exploration mission**).

The resources available in space depend on the destination. For example, asteroids are thought to contain abundant elements valuable for technology on Earth. These materials should be extracted and purified *in situ* before being brought back to Earth for industrial application. This field of research is known as asteroid mining. Drilling, handling and processing rocks in conditions of reduced gravity, or when the soils

minería de asteroides. Taladrar, manipular y procesar rocas en condiciones de gravedad reducida, o cuando los suelos están mezclados con agua helada, a muy baja temperatura, es un reto tecnológico extremadamente complejo. Otro proceso ISRU que se investiga en la actualidad es el uso del **regolito** (el suelo formado por pequeños fragmentos de roca y **polvo**) de la Luna o Marte como material que permita, utilizando impresión 3D, elaborar ladrillos para construir estructuras que protejan a las tripulaciones de la **radiación** espacial y solar.

Figura 62:

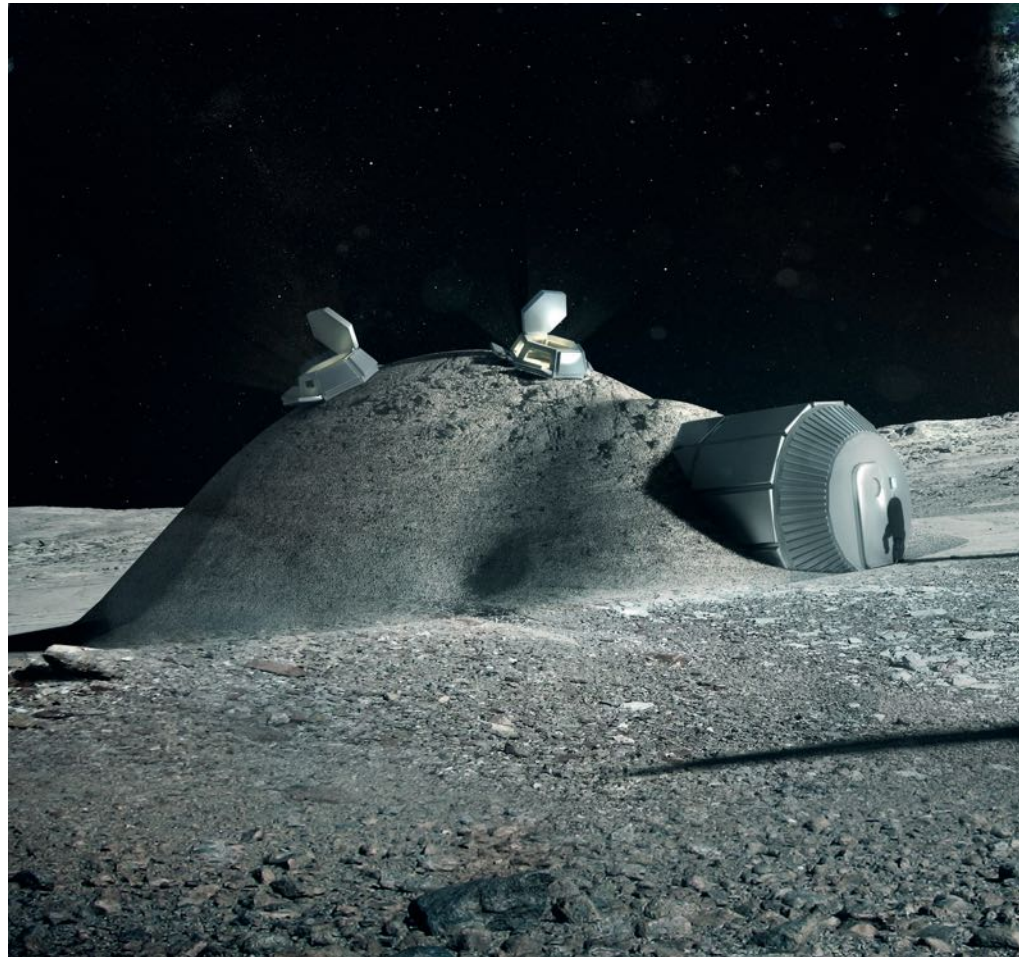
Representación artística de un hábitat lunar.

Artistic representation of a lunar habitat.

La construcción se realizaría con impresión 3D y regolito lunar.

The construction would be made with 3D printing and lunar regolith.

Crédito: ESA/Foster + Partners.





are mixed with water ice, at very low temperature, is an extremely complex technological challenge. Another ISRU process currently being investigated is the use of **regolith** (the soil formed by small fragments of rock and **dust**) from the Moon or Mars as a material that allows, using 3D printing, to make bricks to build structures to protect crews from space and solar **radiation**.

98. VIDA, ACTIVIDAD BIOLÓGICA

La NASA define la vida como un sistema químico automantenido capaz de **evolución** darwiniana. Posteriormente se volverá sobre esta definición, pero antes se introducirán unos breves apuntes sobre las razones que hacen tan difícil definir algo que, sin embargo, parece tan fácil de distinguir del resto de la materia.

Cuando se comparan las especies que pueblan la **Tierra**, se comprueba que, a pesar de su aparente diversidad, todas son extraordinariamente similares a nivel molecular, algo que demuestra que la vida terrestre tiene su origen en un antepasado común que, a lo largo de la evolución, se ha diversificado hasta ocupar todos los nichos ecológicos. En consecuencia, es imposible definir la vida en base a lo que podría parecer más sencillo, la comparación de las características comunes a todas las especies, ya que estas similitudes podrían simplemente representar rasgos heredados del progenitor común a todas ellas. Para identificar las características fundamentales y necesarias que debe poseer la vida, algo imprescindible para elaborar una definición, sería necesario disponer



LIFE, BIOLOGICAL ACTIVITY



Figura 63:

Imagen de la doble hélice del ADN, la molécula que almacena la información en la vida terrestre.

Image of the DNA double helix, the molecule that stores information in terrestrial life.

Crédito: Joseluissc3 (Wikipedia) - Own work, CC BY-SA 4.0

NASA defines life as a self-maintaining chemical system capable of Darwinian **evolution**. We will return to this definition later, but first we will introduce a few brief notes on the reasons that make it so difficult to define something that, nevertheless, seems so easy to distinguish from the rest of matter.

When comparing the species that populate the **Earth**, it is found that, despite their apparent diversity, they are all extraordinarily similar at the molecular level, something that shows that terrestrial life has its origin in a common ancestor that, throughout evolution, has diversified to occupy all ecological niches. Consequently, it is impossible to define life on the basis of what might seem simpler, the comparison of characteristics common to all species, since these similarities might simply represent traits inherited from their common progenitor. In order to identify the fundamental and necessary characteristics that life must possess, something essential to elaborate a definition, it would be necessary to have another example that has a different origin from terrestrial life.

de otro ejemplo que tuviera un origen diferente de la vida terrestre.

La definición introducida al inicio implica que la vida debe ser un sistema aislado del entorno que cumple tres propiedades. La primera es el **metabolismo**, es decir, la capacidad para transformar la materia y energía del medio en materia y energía utilizable para los procesos vitales. La segunda es la existencia de un sustrato genético (ver término **Gen**) que permita almacenar y transmitir a la descendencia las instrucciones para realizar dicho metabolismo, así como para originar nuevas formas de vida semejantes a las parentales. Por último, se menciona la **evolución**, que surge como consecuencia de que la información genética debe ser copiada para que no desaparezca al ser transmitida, lo que inevitablemente conduce a la producción de errores o **mutaciones**. Esos errores han permitido que la vida pueda adaptarse a un medio en continuo cambio. En la actualidad existe un amplio consenso entre los científicos sobre que cualquier forma de vida, terrestre o extraterrestre, debe reunir esas tres características.

Por último, la invención del ordenador ha propiciado el estudio de las propiedades de la vida desde un punto de vista digital. La vida artificial es un campo de investigación que estudia sistemas artificiales que poseen algunas cualidades propias de los seres vivos, a los que se conoce como organismos digitales. Su utilidad se apoya en: i) los organismos digitales proporcionan una forma de generalizar la vida más allá de los organismos vivos; ii) permiten realizar, ampliar y repetir experimentos a una escala inalcanzable con organismos vivos. Los primeros pasos de esta disciplina se deben a los autómatas celulares de John Von Neumann (1940) y posteriormente al *Juego de la vida* de John Conway (1970), donde se muestra que la **complejidad** y la autoorganización pueden emerger de un sistema muy simple. Ejemplos de organismos digitales más recientes y complejos son el entorno *Coreworld*, *Tierra* y *Avida* (el más utilizado actualmente), donde programas de ordenador se autorreplican, mutan y se adaptan por selección natural.

The definition introduced at the beginning implies that life must be a system isolated from the environment that fulfills three properties. The first is **metabolism**, that is, the ability to transform matter and energy from the environment into usable matter and energy for life processes. The second is the existence of a genetic substrate (see **Gene**) that makes it possible to store and transmit to offspring the instructions to carry out this metabolism, as well as to give rise to new forms of life similar to the parental ones. Finally, **evolution**, which arises as a consequence of the fact that genetic information must be copied so that it does not disappear when transmitted, which inevitably leads to the production of errors or **mutations**. These errors have allowed life to adapt to a constantly changing environment. Today, there is a broad consensus among scientists that any form of life, terrestrial or extraterrestrial, must have these three characteristics.

Finally, the invention of the computer has led to the study of the properties of life from a digital point of view. Artificial life is a field of research that studies artificial systems that possess some of the qualities of living beings, which are known as digital organisms. Its usefulness is based on: i) digital organisms provide a way to generalize life beyond living organisms; ii) they allow us to perform, scale up and repeat experiments on a scale unattainable with living organisms. The first steps in this discipline are due to John Von Neumann's *Cellular Automata* (1940) and later John Conway's *Game of Life* (1970), showing that **complexity** and self-organization can emerge from a very simple system. Examples of more recent and complex digital organisms are the environment *Coreworld*, *Tierra* and *Avida* (the most widely used today), where computer programs self-replicate, mutate and adapt by natural selection.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

99. VIRUS

Un virus es una entidad biológica microscópica (su tamaño medio es del orden de nanómetros, la millonésima parte de un milímetro), que carece de estructura celular, y que solo puede multiplicarse dentro de las **células** de otros organismos. Estructuralmente, los virus son mucho más simples que las células. Simplificando, constan de un fragmento de ácido nucleico (**ADN o ARN**), que contiene el material genético viral, protegido por una cubierta de **proteínas** denominada cápsida que, en algunos casos, está rodeada por una envuelta de lípidos similar a la membrana celular. A pesar de su simplicidad, los virus son las entidades biológicas más abundantes en la **biosfera**. Se calcula que existen del orden de 10^{31} virus (un uno seguido de 31 ceros), la mayoría que pertenecen a especies desconocidas. De todos ellos, los que causan enfermedades son solo una mínima parte, existiendo otras muchas formas en las que los virus se relacionan con la **vida**.

Aunque hay grandes diferencias en el tamaño del material genético viral, en ningún caso este contiene la información necesaria para obtener energía del medio

externo y dar lugar a todas las proteínas y estructuras que se precisarían para generar una progenie. Por esta razón, los virus solo están en fase activa cuando infectan células capaces de proporcionarles todo

lo necesario para completar su ciclo infeccioso. Fuera de las células son incapaces de realizar ninguna función. A pesar de ello, los virus no son como la materia inerte: están compuestos por las mismas

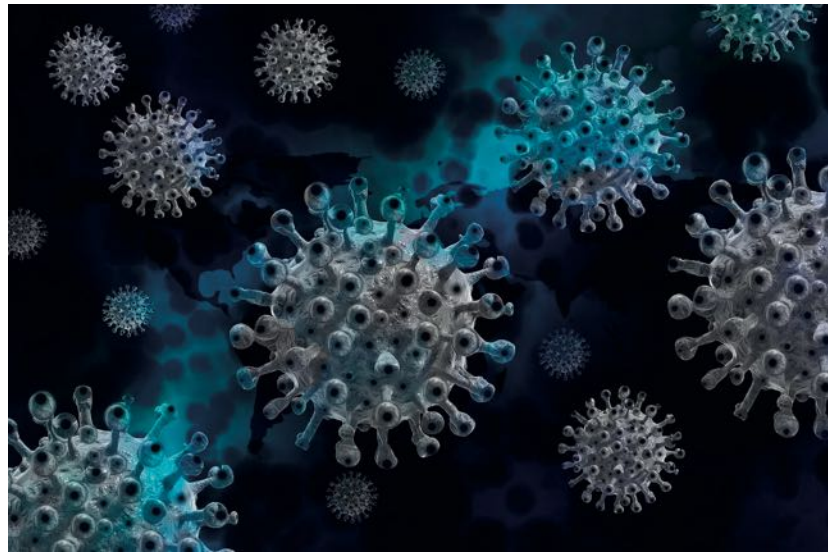


Figura 64:
Recreación de una estructura vírica.
Recreation of a viral structure.
Crédito Creative Commons.

VIRUS

A virus is a microscopic biological entity (its average size is on the order of nanometers, one millionth of a millimeter), which lacks cellular structure, and can only multiply within the **cells** of other organisms. Structurally, viruses are much simpler than cells. Simplistically, they consist of a fragment of nucleic acid (**DNA or RNA**), containing the viral genetic material, protected by a **protein** shell called capsid, which in some cases is surrounded by a lipid envelope similar to the cell membrane. Despite their simplicity, viruses are the most abundant biological entities in the **biosphere**. It is estimated that there are about 10^{31} viruses, most of which belong to unknown species. Of these, disease-causing viruses are only a small fraction, and there are many other ways in which viruses are related to **life**.

Although there are great differences in the size of the viral genetic material, in no case does it contain the information necessary to obtain energy from the external environment and give rise to all the proteins and structures that would be required to generate a progeny. For this reason, viruses are only in active

phase when they infect cells capable of providing them with everything they need to complete their infectious cycle. In the extracellular environment, they are unable to perform any function. Nevertheless, viruses are not like inert matter: they are composed of the same biomolecules as living matter and are capable of evolving according to the rules of Darwinian **evolution**. Their origin is an unresolved question, for which there are several hypotheses. The most accepted one indicates that they are descendants of the first molecules with genetic information that probably arose on primitive **Earth** before the appearance of cellular life.

From the point of view of Astrobiology, viruses are very interesting entities for the following reasons:

- Viruses, especially RNA viruses, have **mutation** rates several orders of magnitude higher than those of cellular DNA. This fact, together with their short generation times and large population sizes, leads to the generation of a very wide genetic diversity, on which natural selection acts, thus accelerating adaptation to environmental changes. This makes them an excellent system for studying the evolutionary process and to establish relationships between the environment, genetic changes and the effect of these changes.
- In the extracellular environment, viruses can withstand much more extreme conditions than cells. Therefore, their discovery in a place outside Earth could be an indicator of past life on it.
- Viruses regulate the diversity and composition of ecosystems. They also influence biogeochemical cycles by contributing to the recycling of material that is included in cells.
- Unlike what happens in the cellular world, where the genetic material is always DNA, in viruses it can also be RNA, something that brings them closer to the period prior to life emergence known as “RNA world”, in which genetic information and function resided in the same molecule.

biomoléculas que la materia viva y son capaces de evolucionar siguiendo las reglas de la **evolución** darwiniana. Su origen es una cuestión no resuelta, para la que hay varias hipótesis. La más aceptada indica que son descendientes de las primeras moléculas con información genética que probablemente surgieron en la **Tierra** primitiva antes de la aparición de la vida celular.

Desde el punto de vista de la Astrobiología, los virus son entidades muy interesantes por las razones que se reseñan a continuación:

- A diferencia de lo que sucede en el mundo celular, cuyo material genético siempre está formado por ADN, en los virus este también puede estar formado por ARN, algo que los acerca al periodo previo a la emergencia de la vida conocido como “mundo del ARN”, en el que la información genética y la función residían en la misma molécula.
- Los virus, sobre todo los virus de ARN, tienen tasas de **mutación** varios órdenes de magnitud más elevadas que las del ADN celular. Este hecho, unido a sus cortos tiempos de generación y al elevado tamaño de sus

poblaciones, conduce a la generación de una diversidad genética muy amplia, sobre la cual actúa la selección natural, acelerándose así la adaptación a los cambios ambientales. Esto los convierte en un sistema excelente para estudiar el proceso evolutivo y poder establecer relaciones entre el ambiente, los cambios genéticos y el efecto de esos cambios.

- En el ambiente extracelular, los virus pueden soportar condiciones mucho más extremas que las células. Por tanto, su hallazgo en un lugar fuera de la Tierra podría ser un indicador de vida pasada en él.
- Los virus regulan la diversidad y composición de los ecosistemas. También influyen en los ciclos biogeoquímicos, contribuyendo al reciclaje del material que está incluido en las células.
- Los virus constituyen un gran motor evolutivo, debido a su capacidad para actuar como presión selectiva en el mundo celular. Además, actúan como agentes generadores de diversidad genética, favoreciendo el intercambio de genes entre especies y contribuyendo así a la aparición de cambios evolutivos de gran magnitud.

- Viruses constitute a great evolutionary engine, due to their capacity to act as selective pressure in the cellular world. In addition, they act as genetic diversity generating agents, favoring the exchange of genes between species and thus contributing to the appearance of evolutionary changes of great magnitude.

Lecturas adicionales /Further reading

BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica.

GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC.

LÁZARO, E. (2020). "Virus: mucho más que simples patógenos", *The conversation*, [en línea] <<https://theconversation.com/virus-mucho-mas-que-simples-patogenos-147033>>.

LÁZARO, E. (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro.

100. XERÓFILOS

La xerofilia (del griego *kheros*, “seco”, y *philos*, “amigo”) se refiere a la adaptación de los seres vivos para vivir preferentemente en ambientes secos. De esta forma, existen plantas (los cactus, siendo una de las más conocidas plantas xerófilas), pero también microorganismos xerófilos. También existen las formas de **vida** xerotolerantes, es decir, aquellas formas de vida que pueden tolerar los ambientes secos, pero que crecen mejor en ambientes que no lo son. El estudio de los xerófilos es de gran interés astrobiológico porque permite entender las adaptaciones de la vida a ambientes como los desiertos, y cómo tales formas de vida son capaces de vivir con muy poca **agua**. Por otro lado, entender las adaptaciones de los xerófilos en el planeta **Tierra** permite explorar las posibilidades de encontrar otras formas de vida en lugares extremadamente secos del **sistema solar** como el planeta **Marte**, y las potenciales implicaciones que tendríamos que considerar para vivir en tales lugares. De hecho, una de las formas de aproximarse a la pregunta de si es posible que la vida exista en luga-

res muy secos como Marte es a través de estudiar los modelos análogos (ver **Análogos terrestres**) que existen en

la Tierra, es decir, aquellos lugares que en factores como la extrema desecación se parecen al planeta rojo.



Figura 65:

María Elena Sur, el lugar más seco del Desierto de Atacama en el norte de Chile.

María Elena Sur, the driest place in the Atacama Desert in northern Chile.

Es uno de los modelos análogos de Marte más conocidos y lugar donde se han encontrado una variedad de plantas xerotolerantes y microorganismos xerófilos.

It is one of the best known Mars analogues and a place where a variety of xerotolerant plants and xerophilic microorganisms have been found.

Créditos: Armando Azua-Bustos

XEROPHILES

Xerophilia (from the Greek *xheros*, “dry”, and *philos*, “friend”) refers to the adaptation of living beings to live preferentially in dry environments. Thus, there are plants (cacti, being one of the best known xerophilic plants), but also xerophilic microorganisms. There are also xerotolerant **life forms**, i.e., those life forms that can tolerate dry environments, but grow better in environments that are not dry. The study of xerophytes is of great astrobiological interest because it allows us to understand the adaptations of life to environments such as deserts, and how such life forms are able to live with very little **water**. On the other hand, understanding the adaptations of xerophiles on planet **Earth** allows us to explore the possibilities of finding other life forms in extremely dry places in the **solar system** such as the planet **Mars**, and the potential implications we would have to consider for living in such places. In fact, one of the ways to approach the question of whether it is possible for life to exist in very dry

places like Mars is through studying the model analogs (see **Terrestrial analogs**) that exist on Earth, i.e. those places that in factors such as extreme desiccation resemble the red planet.

Lecturas adicionales /Further reading

- AZUA-BUSTOS, A. et al., (2019). “Aeolian transport of viable microbial life on a Mars analog environment. Implications for Mars.” *Scientific Reports* 9: 1-11.
- AZUA-BUSTOS, A. et al., (2022). “The Atacama Desert in Northern Chile as an Analog Model of Mars.” *Frontiers in Space Sciences* 8: 810426.
- AZUA-BUSTOS, A. et al., (2018). “Unprecedented rains decimate surface microbial communities in the hyperarid core of the Atacama Desert.” *Scientific Reports* 8: 1-10.
- AZUA-BUSTOS, A. (2018). “Desierto de Atacama podría albergar microorganismos marcianos” *National Geographic* en español
- AZUA-BUSTOS, A., GONZÁLEZ-SILVA, C., (2020). “Buscando vida en el Atacama”. *Investigación y Ciencia*.
- CARNES, A. (2018). “Ask the Dust. What the driest place on Earth can tell us about climate change”. *Sierra, The magazine of the Sierra Club*.
- RABIE, P., (2019). “Like Desert Microbes, Martian Life May Hitch Rides on Arid Dust”. *Space.com* [en línea] <<https://www.space.com/microbial-life-possibility-on-mars.html>>

101. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA

En una escala planetaria, la zona de **habitabilidad** alrededor de una **estrella** se define como aquella región alrededor de un astro en la que, bajo unas ciertas condiciones atmosféricas, un planeta podría albergar **agua** líquida en su superficie. Este compuesto es esencial para la **vida** tal y como se conoce en la **Tierra** por sus amplias propiedades fisicoquímicas. Aunque su presencia no asegura la existencia de vida, sí proporciona las condiciones idóneas para que esta pueda desarrollarse.

En sistemas extrasolares, con planetas orbitando alrededor de otras estrellas las cuáles se pueden explorar de forma directa, esta zona de habitabilidad circunestelar se define como una forma de delimitar la región en la que se podría detectar actividad biológica de forma remota. Ello no implica que la vida exista como tal en dicha región.

Hay muchos otros factores que afectan a la habitabilidad de un planeta y al desarrollo de vida en él. Algunos de ellos están determinados por la región de la **galaxia** en la que estos planetas se hayan formado. Así, se define la zona de habitabilidad galáctica

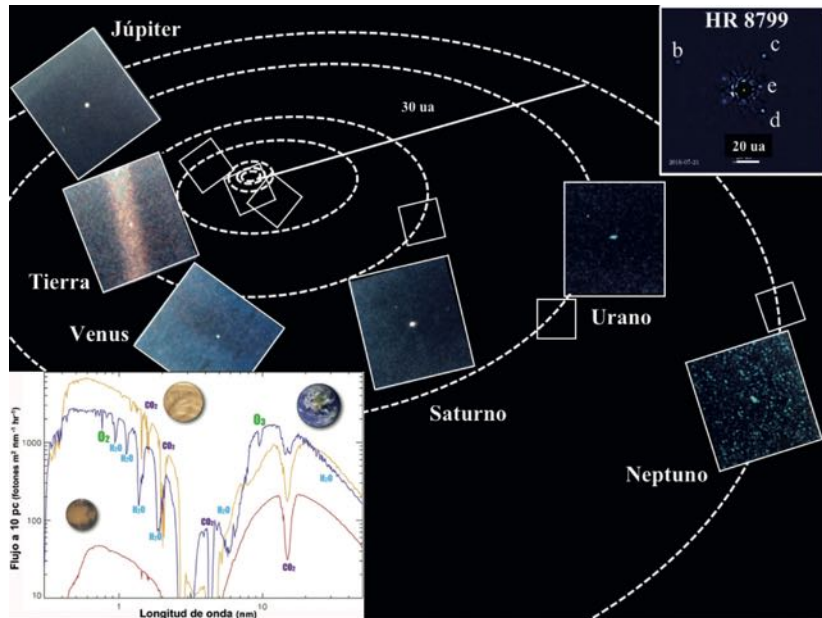


Figura 66:

El sistema solar y espectros de los planetas rocosos.

The solar system and the spectra of the rocky planets.

El diagrama es una fotocomposición con imágenes tomadas por la misión Voyager, de NASA. Por comparación, el sistema planetario de la estrella HR8799. La detección remota de ambientes habitables es posible con espectroscopía de baja resolución.

The figure is a photocomposition with images taken by NASA's Voyager Mission. By comparison, the planetary system of the star HR8799. Remote sensing of habitable environments is possible with low-resolution spectroscopy.

HABITABILITY ZONE, GALACTIC HABITABILITY ZONE

On a planetary scale, the **habitability** zone around a star is defined as an area around a **star** in which, under certain atmospheric conditions, a planet could harbor liquid **water** on its surface. This compound is essential for **life** as we know it on **Earth** because of its broad physico-chemical properties. Although its presence does not ensure the existence of life, it does provide the ideal conditions for it to develop.

In extrasolar systems, with planets orbiting other stars which can be directly explored, this circumstellar habitability zone is defined as a way to delimit the region in which biological activity could be remotely detected. This does not imply that life exists as such in this region.

There are many other factors that affect the habitability of a planet and the development of life on it. Some of these are determined by the region of

the **galaxy** in which these planets have formed. Thus, the galactic habitability zone is defined as the region of a galaxy in which the optimal conditions exist for the development and survival of life on planets located within it. These conditions are mainly four: i) the presence and variety of chemical elements in a certain proportion (**metallicity**) is essential for chemistry to develop and for **abiogenesis**, i.e. the generation of life from inert matter, to take place; ii) the existence of catastrophic events nearby a planetary system, such as supernovae (very violent explosions that characterize the end of very massive stars or compact stars accompanied by a red giant star), can wipe out any sign of complex life on a planet; iii) the frequency of star formation in a region of the galaxy is also relevant to have a significant number of planetary systems; and iv) time is the last key factor - the age of a planetary system is critical for the chemistry

como la región de una galaxia en la que se dan las condiciones óptimas para el desarrollo y supervivencia de la vida en planetas situados en ella. Estas condiciones son principalmente cuatro: i) la presencia y diversidad de elementos químicos en una proporción determinada (la **metalicidad**) es fundamental para que la química pueda desarrollarse y para que la **abiogénesis**, es decir, la generación de vida a partir de materia inerte, pueda producirse; ii) la existencia de eventos catastróficos cercanos a un sistema planetario, como es el caso de las supernovas (explosiones muy violentas que caracterizan el final de las estrellas muy masivas o estrellas compactas que se encuentran acompañadas por una estrella gigante roja), puede borrar cualquier signo de vida compleja en un

planeta; iii) la frecuencia en la formación de estrellas en una región de la galaxia es también relevante para poder disponer de un número importante de sistemas planetarios; iv) el tiempo es el último factor fundamental, la edad de un sistema planetario es crítica para que la química haya podido evolucionar a formas biológicas. Así, estos cuatro factores definen una región alrededor de una galaxia en la que las probabilidades de encontrar vida son mayores que en otras regiones. En la Vía Láctea esta región está comprendida en un anillo de unos 3 kilopársec de ancho (1 kilopársec equivale a 3262 años luz) y a una distancia del centro galáctico de unos 8 kilopársec, prioritariamente para estrellas con edades comprendidas entre los 4000 y los 8000 millones de años.

to have evolved into biological forms. Thus, these four factors define a region around a galaxy in which life is more likely to be found than in other regions. In the Milky Way, this region lies within

a ring about 3 kiloparsec wide (1 kiloparsec equals 3262 light years) and at a distance from the galactic center of about 8 kiloparsec, primarily for stars between 4 and 8 billion years old.

Lecturas adicionales /Further reading

BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata. ISBN 978-84-1352-190-9.

BARRADO, D. (2021). *Peligros Cósmicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberón, ISBN-10-8441543518.

LINEWEAVER, FENNER & GIBSON (2004). "The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way", *Science*, 303, 5654, 59-62.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA, *Glosario*, [en línea] <https://www.sea-astronomia.es/glosario/>.

LECTURAS ADICIONALES

FURTHER READING

- AGUILERA, A., SOUZA-EGIPSY, V., GONZÁLEZ TORIL, E., (2020). *La vida en Río Tinto*. INTA.
- ALBERDI, A: LÓPEZ DE LACALLE, S. (Coords.) (2007). *Un viaje al Cosmos en 52 semanas*. CSIC.
- ALFONSO GARZÓN, J., GALADÍ ENRIQUEZ, D., MORALES DURÁN (Coords.) (2009). *100 Conceptos básicos de Astronomía*, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, [en línea] <https://cab.inta-csic.es/libros/100-conceptos-basicos-de-astronomia%e2%80%8b/>.
- AMILS, R. (2010). *Río Tinto... Viaje a Marte*. Alfar. (español/English).
- BARRADO, D. (2021). *Exoplanetas y astrobiología: plus ultra*. Editorial Catarata. ISBN 978-84-1352-190-9.
- BARRADO, D. (2021). *Peligros Cósmicos. El incierto futuro de la humanidad*. Editorial Oberón, ISBN-10-8441543518.
- BOVOLENTA, P., MANZANARES, M., BUCETA, J. (Coords.) (2021). *Origins, (Co)Evolution, Diversity & Synthesis of Life*, CSIC Scientific Challenges: Towards 2030, Vol. 2, [en línea] <https://cab.inta-csic.es/libros/origins-coevolution-diversity-synthesis-of-life/>.
- BRIONES, C., FERNÁNDEZ SOTO, A., BERMÚDEZ DE CASTRO, J. M. (2015). *Orígenes. El universo, la vida, los humanos*. Ed. Crítica, Barcelona. ISBN: 978-95-84-24873-2.
- BRIONES, C. (2020). *¿Estamos solos? En busca de otras vidas en el Cosmos*. Editorial Crítica. ISBN: 978-84-9199-221-9.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. *Images* <<https://esahubble.org/images/>>
- GARGAUD, M. (ed.) (2015, 2ª edición). *Encyclopedia of Astrobiology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4>.
- GIMÉNEZ CAÑETE, A., GÓMEZ-ELVIRA, J., MARTÍN MAYORGA, D. (eds.) (2011). *Astrobiología: Sobre el origen y evolución de la vida en el universo*. Catarata y CSIC. ISBN: 978-84-00-09383-9.
- GÓMEZ GÓMEZ, F., (2020). *Del Ártico a la Antártida: buscando Marte en la Tierra*. INTA.
- HUERTAS, O., RUIZ HUESO, P., PORCEL, ET AL. (2021). *GENES. Escribiendo el guion de la vida*, Ed. Almuzara Libros. ISBN: 978-84-17547-62-2.
- LÁZARO, E., (2019). *La vida: Un viaje hacia la complejidad en el Universo*. Editado por Fundación Sicomoro. ISBN: 978484651441.
- VILLAYER, E. (2019). *Las mil caras de la Luna*, Ed. Harper Collins. ISBN: 9788491393689.

CRÉDITOS INDIVIDUALES / INDIVIDUAL CREDITS

Cada concepto ha sido desarrollado principalmente por los autores listados a continuación

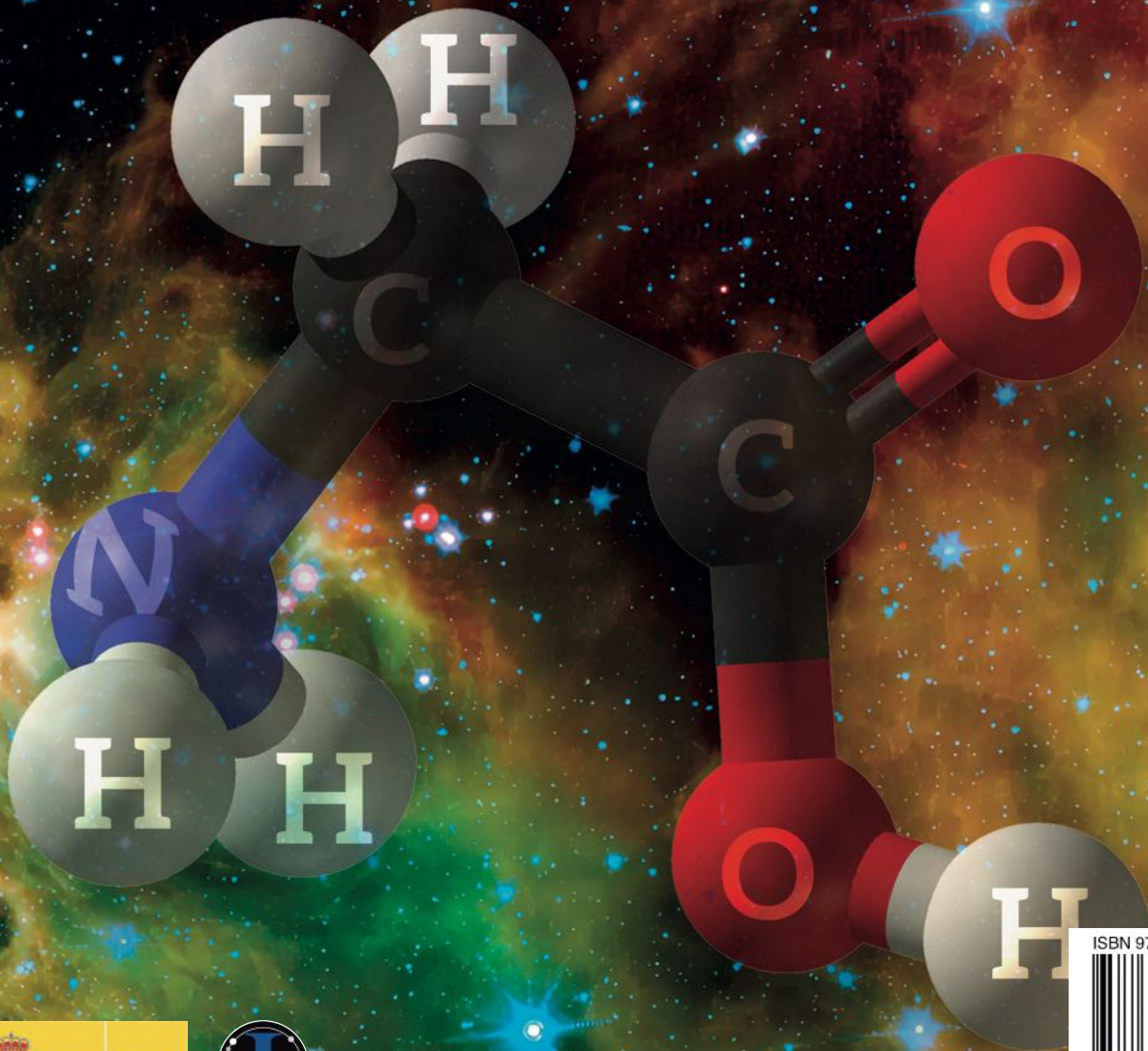
Each concept has been developed primarily by the authors listed below:

Prologo: David Barrado; **Astrobiología:** Víctor Parro; **#01** Nuria Huélamo; **#02** Marta Ruiz Bermejo; **#03** José Eduardo González-Pastor; **#04** Olga Prieto Ballesteros; **#05** Felipe Gómez; **#06** David Barrado; **#07** Miguel Arribas-Tiemblo, Felipe Gómez y Jorge Pla-García; **#08** Cristina Cid; **#09** Laura Sánchez-García; **#10** Salvador Mirete; **#11** Laura Sánchez-García; **#12** Eduardo Cueto-Díaz; **#13** Ángeles Aguilera; **#14** Eduardo Sebastián; **#15** Eva Mateo-Martí; **#16** Eduardo Alonso-Pintado; **#17** Jesús Sobrado; **#18** David Barrado; **#19** Benjamín Montesinos y Guillermo M. Muñoz Caro; **#20** Jacobo Aguirre; **#21** Jorge Sanz Forcada; **#22** Jens Ormó; **#23** Antonio Molina; **#24** Ester Lázaro Lázaro; **#25** Patricia Cruz y Héctor Vives-Arias; **#26** Victoria Muñoz Iglesias; **#27** Nuria Huélamo y Benjamín Montesinos; **#28** Elena González-Toril; **#29** Felipe Gómez; **#30** David Barrado; **#31** Cristóbal Bordiú; **#32** Carmen Sánchez Contreras y Benjamín Montesinos; **#33** Carmen Sánchez Contreras y Benjamín Montesinos; **#34** Laura García-Descalzo; **#35** Ángeles Aguilera; **#36** Ester Lázaro Lázaro; **#37** Carmen Sánchez Contreras; **#38** David Barrado; **#39** Carlos Cifuentes; **#40** Jesús Sobrado; **#41** Felipe Gómez; **#42** Elena González-Toril; **#43** Daniel Carrizo; **#44** Eva Villaver; **#45** Montserrat Villar; **#46** Cristina Cid; **#47** Felipe Gómez; **#48** Antonio Molina; **#49** Guillermo M. Muñoz Caro; **#50** Eduardo Sebastián; **#51** David Barrado; **#52** Miguel Arribas-Tiemblo y Felipe Gómez; **#53** Carolina Martín-Rubio; **#54** Carlos Briones; **#55** José Antonio Rodríguez-Manfredi; **#56** José Antonio Rodríguez-Manfredi; **#57** Antonio Molina; **#58** Antonio Molina; **#59** Roser Urquí O'Callaghan; **#60** Yolanda Blanco y Mercedes Moreno-Paz; **#61** Carlos Cifuentes y Emilio Gómez Marfil; **#62** Daniel Viúdez-Moreiras; **#63** Guillermo M. Muñoz Caro; **#64** Jorge Pla-García; **#65** Carolina Martín-Rubio; **#66** Daniel Viúdez-Moreiras; **#67** José Antonio Rodríguez-Manfredi; **#68** Miguel Arribas-Tiemblo; **#69** Carlos Briones; **#70** David Barrado; **#71** Isabel Herreros; **#72** Jorge Pla-García; **#73** Cristóbal Bordiú; **#74** José Antonio Rodríguez-Manfredi; **#75** Antonio Molina; **#76** Antonio Molina; **#77** Carlos Briones; **#78** Guillermo M. Muñoz Caro; **#79** María Paz Zorzano; **#80** María Ángeles Lezcano y Rita Severino; **#81** Daniel Viúdez-Moreiras; **#82** Jesús Martín-Pintado y Víctor M. Rivilla; **#83** Marta Ruiz Bermejo; **#84** Laura García-Descalzo; **#85** David Hochberg; **#86** María Paz Zorzano; **#87** Eduardo Sebastián; **#88** Felipe Gómez; **#89** Alain Lepinette Malvitte; **#90** Benjamín Montesinos; **#91** Benjamín Montesinos; **#92** Eva Mateo-Martí; **#93** David Barrado; **#94** Eva Villaver; **#95** Daniel Viúdez-Moreiras; **#96** Alain Lepinette Malvitte; **#97** María Paz Zorzano; **#98** Jacobo Aguirre y Ester Lázaro Lázaro; **#99** Ester Lázaro Lázaro; **#100** Armando Azua-Bustos; **#101** Jorge Lillo-Box.

La región de formación estelar de Barnard 30. Imagen adquirida con el observatorio infrarrojo Spitzer. Superpuesta, una molécula de glicina, el aminoácido estable más simple, molécula detectada en el espacio.

The Barnard 30 star-forming region. Image acquired with the Spitzer infrared observatory. Superimposed, a molecule of glycine, the simplest stable amino acid molecule detected in space.

Crédito: NASA / IPAC / D. Barrado.



ISBN 978-84-9091-727-5

