

## Arqueología de otros mundos: en busca de vida extraterrestre – Revisión

**Gabriel Dorado<sup>1</sup>, Fernando Luque<sup>2</sup>, Francisco José Esteban<sup>3</sup>, Plácido Pascual<sup>4</sup>, Inmaculada Jiménez<sup>5</sup>, Francisco Javier S. Sánchez-Cañete<sup>6</sup>, Patricia Raya<sup>7</sup>, Teresa E. Rosales<sup>8</sup>, Víctor F. Vásquez<sup>9</sup>**

<sup>1</sup> Autor para correspondencia, Dep. Bioquímica y Biología Molecular, Campus Rabanales C6-1-E17, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3), Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba (España), correo electrónico: <bb1dopeg@uco.es>; <sup>2</sup> Laboratorio de Producción y Sanidad Animal de Córdoba, Ctra. Madrid-Cádiz km 395, 14071 Córdoba; <sup>3</sup> Servicio de Informática, Edificio Ramón y Cajal, Campus Rabanales, Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba; <sup>4</sup> Laboratorio Agroalimentario de Córdoba, Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, 14004 Córdoba; <sup>5</sup> IES Puertas del Campo, Avda. San Juan de Dios 1, 51001 Ceuta; <sup>6</sup> EE.PP. Sagrada Familia de Baena, Avda. Padre Viloslada 22, 14850 Baena (Córdoba); <sup>7</sup> Dep. Radiología y Medicina Física, Unidad de Física Médica, Facultad de Medicina, Avda. Menéndez Pidal s/n, Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba; <sup>8</sup> Laboratorio de Arqueobiología, Avda. Juan Pablo II s/n, Universidad Nacional de Trujillo, 13011 Trujillo (Perú); <sup>9</sup> Centro de Investigaciones Arqueobiológicas y Paleoecológicas Andinas Arqueobios, C/ Martínez de Compañón 430-Bajo 100, Urbanización San Andrés, 13008 Trujillo (Perú).

### Resumen

La curiosidad es un rasgo distintivo del ser humano moderno (*Homo sapiens sapiens*), que probablemente contribuyó a su supervivencia, evitando la extinción que sufrieron al menos otras ocho subespecies humanas, como los neandertales (*Homo sapiens neanderthalensis*) y los denisovanos (*Homo sapiens denisova*). Esta curiosidad humana trasciende el planeta Tierra y se adentra en el espacio profundo. Debido a las limitaciones relacionadas con la velocidad de las ondas electromagnéticas, los telescopios son máquinas del tiempo. Por ejemplo, la galaxia más distante (MoM-z14) se encuentra a ~3,5 millardos de años luz, lo que significa que lo que vemos es cómo era en aquel entonces. Por lo tanto, esta arqueología cosmológica permite observar cómo era el Universo en el pasado. Los contactos con supuestas civilizaciones alienígenas podrían ser interesantes, pero también potencialmente peligrosos, como la historia de nuestro planeta ha demostrado cuando las civilizaciones chocan. La ecuación de Drake estima una alta probabilidad de la existencia de civilizaciones alienígenas con capacidad de comunicación. Sin embargo, la paradoja de Fermi señala la falta de pruebas de tales civilizaciones. La razón es que el origen de la vida podría ser un evento tan excepcional como el Big Bang. Esto implicaría que la vida solo existe en la Tierra. Colonizar otros mundos podría ser una estrategia de copia de seguridad ante posibles extinciones. Sin embargo, las limitaciones físicas impiden que los humanos lleguen a mundos lejanos, a menos que se desarrollen tecnologías que superen el conocimiento científico actual. En cualquier caso, debemos prestar especial atención al cuidado de nuestro planeta Tierra, que, hasta donde sabemos, es el único planeta con vida del universo.

**Palabras clave:** Big Bang, biofirmas, cosmos, exobiología, universo conocido, biología molecular, velocidad de la luz, expansión del universo.

## Abstract

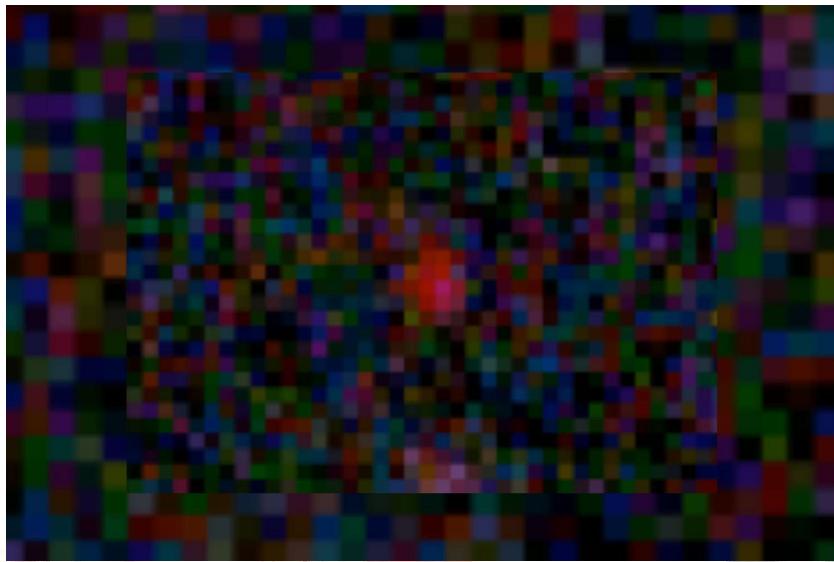
Curiosity is a hallmark of modern humans (*Homo sapiens sapiens*), which likely contributed to their survival, avoiding extinction that suffered at least eight other human sub-species like Neanderthals (*Homo sapiens neanderthalensis*) and Denisovans (*Homo sapiens denisova*). Such human curiosity goes beyond the planet Earth, into deep space. Due to limitations related to the speed of electromagnetic waves, telescopes are time machines. For instance, the most distant galaxy (MoM-z14) is ~13.5 milliard light-years away, which means that what we see is how it was at that time. Therefore, such cosmological archaeology allows to see how the Universe was in the past. Contacts with putative alien civilizations could be interesting, but also potentially dangerous, as history in our planet has shown when civilizations collide. The Drake equation estimates a high probability of alien communicative civilizations. Yet, the Fermi paradox points out the lack of evidence for such civilizations. The rationale is that the origin of life may be an event as rare as the Big Bang. That could mean that life only exists on planet Earth. Colonizing other worlds could represent backups against extinction events. But physical limitations prevent humans to reach far-away worlds, unless new technologies beyond current scientific knowledge could be developed. In any case, special attention should be taken to care for our planet Earth, which as far as we know is the only living planet in the Universe.

**Key words:** Big Bang, biosignatures, cosmos, exobiology, known Universe, molecular biology, light speed, universe expansion.

## Introducción

Como se ha demostrado en revisiones anteriores, la arqueología puede asociarse a la biología molecular (Dorado et al. 2007-2024). Esta investigación también puede aplicarse al estudio de mundos alienígenas (exobiología), como se analiza en este artículo. La razón es que la luz no es instantánea; tiene una velocidad finita de ~299.792.458 metros por segundo (casi 300.000 km/s) en el vacío. Si bien esta velocidad es muy alta para las posibilidades humanas, es extremadamente baja en escenarios cosmológicos. Esto tiene una consecuencia interesante: lo que vemos al observar el espacio exterior no es cómo es ahora, sino cómo era hace ~1,3 segundos para la Luna, ~8,3 minutos para el Sol, ~4,4 años para el sistema estelar Alfa Centauro y ~2,5 millones de años para la galaxia Andrómeda. Para ponerlo en perspectiva cosmológica, el Big Bang ocurrió hace ~13,8 millardos de años. Se estima que la Vía Láctea tiene ~13,6 millardos de años. Nuestro sistema solar se formó hace ~4,6 millardos de años. La galaxia más distante descubierta hasta ahora es MoM-z14 (figura 1). Su luz tarda unos 13,5 millardos de años en llegar a la Tierra. Pero, sorprendentemente, esta galaxia se encuentra ahora a ~33,8 millardos de años luz de la Tierra, debido a la expansión del universo. Dicha luz se originó ~280 millones de años después del Big Bang (Naidu et al. 2025). Por lo tanto, esto permite

observar (e intentar descifrar y comprender) el pasado, lo cual es la esencia de la arqueología. Se trata de arqueología cosmológica. Y es fascinante.



**Figura 1. La galaxia más distante conocida hasta la fecha es MoM-z14.** Fue descubierta el 16 de mayo de 2025 con el telescopio espacial James Webb (JWST; del inglés, “James Webb Space Telescope”). Los telescopios anteriores no contaban con espejos lo suficientemente grandes como para detectar la luz proveniente de distancias tan grandes. © 2015 Naidu et al. (2025), Wikimedia Commons <<http://commons.wikimedia.org>> y Creative Commons <<http://creativecommons.org>>.

Por otro lado, la curiosidad es un rasgo distintivo de la subespecie humana actual (*Homo sapiens sapiens*). Este comportamiento probablemente fue una característica clave que nos salvó de la extinción en varias ocasiones durante nuestra evolución biológica. Esto contrasta con otras subespecies humanas extintas (al menos ocho), como los neandertales (*Homo sapiens neanderthalensis*) y los denisovanos (*Homo sapiens denisova*). En resumen, esta curiosidad nos impulsó a preguntarnos, por ejemplo, cómo sería el paisaje más allá de una cordillera o al otro lado de mares y océanos. La consecuencia fue una importante dispersión de los humanos modernos por todo el planeta Tierra, colonizando prácticamente todos sus hábitats. Este comportamiento aumentó significativamente nuestras probabilidades de supervivencia cuando los entornos se modificaban drásticamente; por ejemplo, debido a cambios climáticos severos. Todo esto se relaciona con la curiosidad por conocer el planeta Tierra, pero hay mucho más cuando exploramos el planeta y el cielo con mayor profundidad, como se muestra en la siguiente sección de esta revisión.

Por el contrario, parece que otras subespecies humanas se mantuvieron en el mismo lugar, lo que redujo sus probabilidades de supervivencia en tales entornos cambiantes. Cabe destacar que pertenecían a la misma especie *sapiens*. Esto se descubrió

recientemente gracias a los avances tecnológicos que permitieron secuenciar sus genomas (Dorado et al. 2008, 2015, 2016, 2021a). Así, se constató que se reproducían entre sí, generando descendencia fértil, lo cual constituye la definición genética de individuos de la misma especie. Por lo tanto, no se trata de especies diferentes, sino de subespecies, aunque algunos humanos modernos parecen tener dificultades para reconocer este hecho genético-científico, por definición. Además, descubrimientos recientes han demostrado que los neandertales no eran tontos, sino tan sofisticados intelectual, emocional y espiritualmente como nosotros, o incluso más.

### **Curiosidad por conocer más allá del planeta Tierra**

Como se describió anteriormente, la curiosidad humana moderna no se limita a la superficie de la Tierra y el agua, sino que también abarca la exploración de mundos interiores y exteriores mucho más profundos, con un alcance mucho mayor que antes. Esto se puede lograr ahora mediante tecnologías que antes no estaban disponibles. Algunos ejemplos son la perforación de la corteza terrestre y la exploración de las profundidades oceánicas. Y –lo que es más importante– la observación y los viajes a las órbitas terrestres, la Luna y más allá. La importancia de esta curiosidad no reside únicamente en la adquisición de nueva información científica: el gozo del conocimiento (Beazley, 1977-1979). También tiene el potencial teórico de protegernos de futuras extinciones masivas. Ha habido seis grandes extinciones masivas en el planeta Tierra (Dorado et al. 2010, 2019). Entre ellas se incluyen la Gran Oxidación (GOE; del inglés, “Great Oxidation Event”) y las Cinco Grandes (BF; del inglés, “Big Five”). La pregunta no es si surgirá una nueva en el futuro, sino cuándo. Por lo tanto, sería conveniente colonizar otros mundos, además del nuestro. Estos representarían copias de seguridad en caso de una catástrofe crítica.

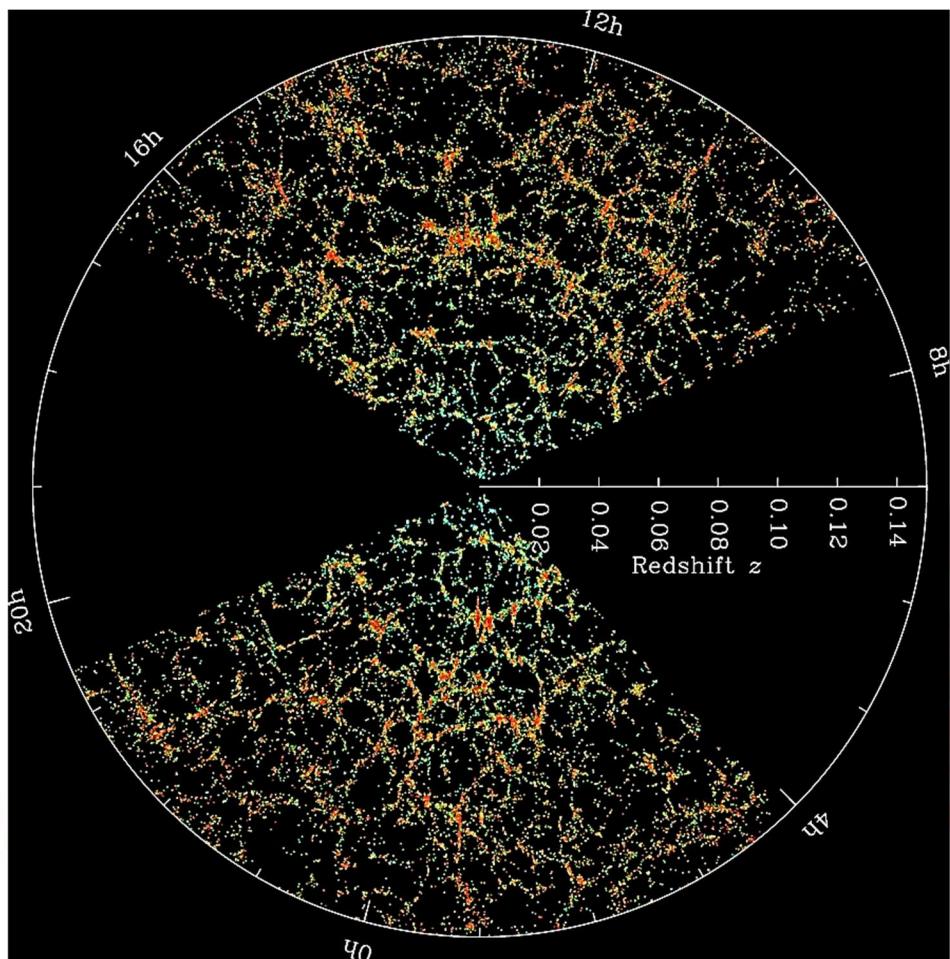
Sin embargo, conviene ser precavido en estos escenarios. Observar el espacio exterior es fascinante, pero enviar mensajes al exterior podría ser peligroso. Quizás anhelemos contactar con civilizaciones alienígenas, pero cuando dos civilizaciones se comunican, una puede dominar a la otra. Al menos, eso es lo que ha ocurrido a lo largo de la historia de la humanidad. En teoría, esto no debería ser necesariamente negativo; de hecho, la civilización humana, la prosperidad, el bienestar y el progreso se han logrado de esta manera en muchos casos. Pero también podría ser desastroso para la parte más débil, y eso es lo que ha sucedido generalmente en la historia. Por lo tanto, revelar nuestra presencia a una civilización mucho más avanzada en el Universo podría significar el fin de nuestra cultura e incluso de nuestra existencia. Sin embargo, como se explica a continuación, lo más probable es que tal peligro potencial no sea real, por una sorprendente razón científica.

## Posibles escenarios de extinción en el futuro

Existen diferentes escenarios que podrían conducir a la extinción de la humanidad, e incluso a la destrucción del planeta Tierra, basado en probabilidades, incluyendo el escenario seguro de que el Sol se enfríe y se expanda hasta convertirse en una gigante roja, en aproximadamente cinco millardos de años (Dorado et al. 2010). También incluyen la destrucción del oxígeno atmosférico en aproximadamente un millardo de años (Ozaki y Reinhard, 2021) y colisiones con la galaxia de Andrómeda en unos cinco millardos de años (Cowen, 2012; Sawala et al. 2025), aunque actualmente parece que otras colisiones con la Gran Nube de Magallanes son más probables durante los próximos 10 millardos de años (Sawala et al. 2025).

El universo conocido se reduce a aquel que podemos detectar con la tecnología disponible de telescopios de luz visible y radiotelescopios. Deben tenerse en cuenta las limitaciones de la velocidad de las ondas electromagnéticas (300.000 km/s) y el hecho de que las señales electromagnéticas son bloqueadas por la materia en nuestra galaxia (de ahí la forma de dos conos que se observa en las imágenes del universo conocido; figura 2). En dicho universo conocido existen  $>200$  millardos de galaxias con  $>200$  millardos de estrellas cada una. La ecuación de Drake intenta calcular la probabilidad de que existan civilizaciones extraterrestres comunicativas en planetas similares al nuestro. Debería ser muy alta en teoría, si dicha ecuación es correcta. Pero eso es un gran “sí” condicional. De hecho, la paradoja de Fermi señala la falta de pruebas de tales civilizaciones. Hasta donde sabemos, la vida solo existe en nuestro planeta Tierra. En otras palabras, existe un Gran Filtro que nos impide encontrar vida extraterrestre.

Esto incluye la autodestrucción de la civilización mediante contaminación, cambio climático y calentamiento global, así como una guerra nuclear global. De hecho, el célebre científico Carl Sagan propuso que no recibimos señales de inteligencia extraterrestre porque, probablemente, se aniquilaron en una guerra de ese tipo. Pero, como se describe a continuación, la explicación de este Gran Filtro puede ser mucho más básica y sencilla.



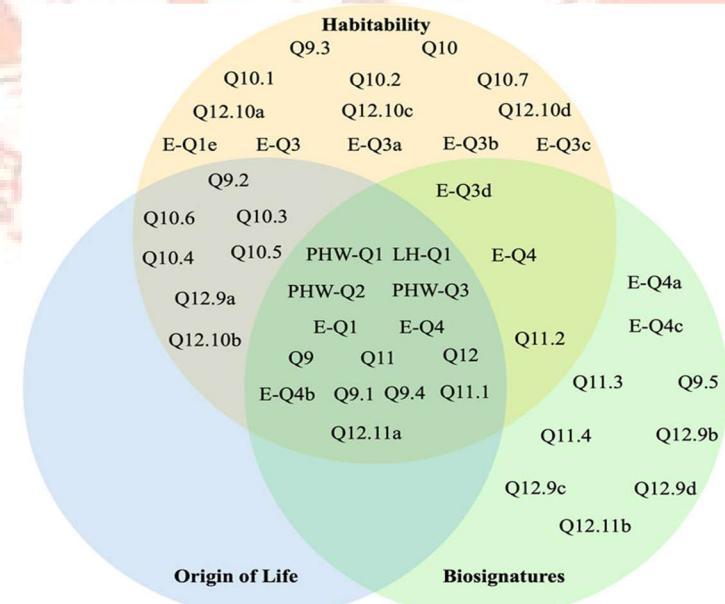
**Figura 2. Universo conocido.** La Tierra se encuentra en el centro, y cada punto representa una galaxia. Los dos conos vacíos no se cartografiaron, ya que objetos como estrellas, planetas y polvo en nuestra galaxia oscurecen la visión del universo distante en esas áreas. © 2010-2013 M. Blanton y Sloan Digital Sky Survey (SDSS)-III <[https://www.sdss3.org/science/gallery\\_sdss\\_pie2.php](https://www.sdss3.org/science/gallery_sdss_pie2.php)>.

### Biología molecular para explorar mundos exteriores

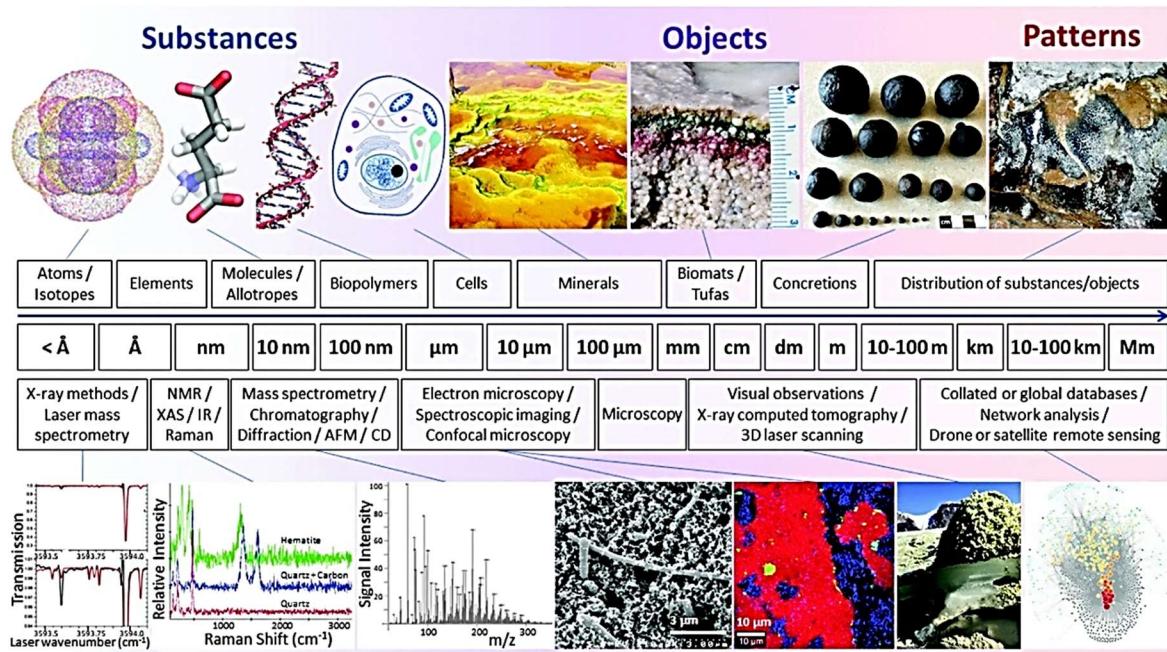
Hasta ahora, la búsqueda de vida extraterrestre se ha centrado principalmente en la identificación de biofirmas (signos detectables exclusivos de la vida), siendo consideradas características distintivas de la vida en la Tierra. Esto incluye moléculas biológicas o productos de la actividad biológica, como los que se encuentran en nuestro planeta. En cuanto a las posibles formas y estructuras de las entidades biológicas, la evolución darwiniana se considera un proceso dependiente de la trayectoria. Por lo tanto,

como se indica en el libro francés “Le Hasard et la Nécessité: Essai sur la Philosophie Naturelle de la Biologie Moderne” (en español, El azar y la necesidad: Ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna; Monod, 1970), las formas de vida y la evolución dependen de dichos dos factores. En consecuencia, cabría esperar que la evolución diera lugar a entidades biológicas con diferentes formas, estructuras y funciones (Grefenstette et al. 2024). Sin embargo, tanto la convergencia evolutiva como las restricciones deberían limitar el proceso. Por lo tanto, aunque puedan existir entidades biológicas “sorprendentes”, si tales restricciones son universales, se espera que la vida en cualquier lugar sea bastante similar a la que se conoce en el planeta Tierra (Sole et al. 2024). Por supuesto, ello presupone que dicha hipótesis es correcta.

Además, deben tenerse en cuenta conceptos como el origen de la vida (abiogénesis), la vida (sistema químico autosostenible, capaz de evolución darwiniana), la habitabilidad (supervivencia de la vida) y las biofirmas (descritas anteriormente), que pueden variar en diferentes escenarios (figura 3; Keller et al. 2025). Se han propuesto diversas biofirmas (y abiofirmas, formadas por procesos no vivos) (figura 4; Chan et al. 2019), incluyendo la herramienta denominada “escalera de detección de vida” (del inglés, “The Ladder of Life Detection”; Tabla 1; Neveu et al. 2018) y actividades orgánicas-catalíticas independientes (Georgiou et al. 2023). Estas biofirmas han sido objeto de revisiones recientes, incluyendo las tecnofirmas (Jia et al. 2023).



**Figura 3. Exploración del origen de la vida en la ciencia exoplanetaria.** El diagrama de Venn muestra las relaciones entre el origen de la vida (azul), la habitabilidad (naranja) y las biofirmas (verde). © Los autores, en Frontiers Media (Keller et al. 2025).

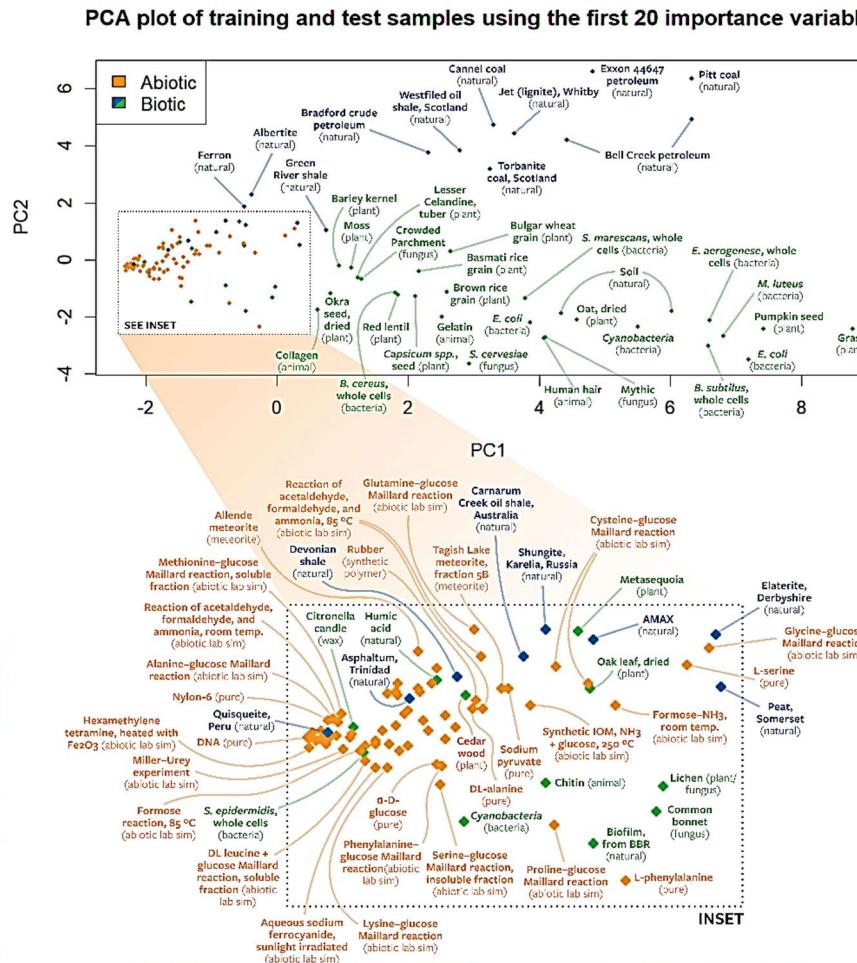


**Figura 4. Biofirmas propuestas.** Estos métodos de detección de vida abarcan desde átomos y moléculas (izquierda) hasta planetarios (derecha). © Los autores, en Mary Ann Liebert (Chan et al. 2019).

Por supuesto, en relación con esto, el descubrimiento de megaestructuras podría servir para identificar vida extraterrestre y, en tal caso, la existencia de vida inteligente. Sin embargo, hasta ahora no se ha identificado ninguna. Entre las biofirmas, recientemente se han propuesto productos de traducción (McKaign et al. 2024). Pero la vida extraterrestre podría ser diferente a la que conocemos en nuestro planeta (Cleaves et al. 2023; Grefenstette et al. 2024). Tanto es así que incluso se han desarrollado algoritmos de aprendizaje automático (ML; del inglés, “Machine Learning”) basados en inteligencia artificial (AI; del inglés, “Artificial Intelligence”) para identificar biofirmas moleculares agnósticas. Estos algoritmos se basan en la pirolisis-cromatografía de gases (GC; del inglés, “Gas Chromatography”) acoplada a la espectrometría de masas (MS; del inglés, “Mass Spectrometry”) (GC-MS) (figura 5; Cleaves et al. 2023).

**Tabla 1. Herramienta “escalera de detección de vida”.** Este es un procedimiento propuesto para diseñar experimentos de exobiología, que ayuden a determinar la posible presencia de vida microbiana en misiones espaciales. © Los autores, en Mary Ann Liebert (Neveu et al. 2018).

RUNG	FEATURE	MEASUREMENT TARGET	LIKELIHOOD	INSTRUMENTAL CRITERIA			CONTEXTUAL CRITERIA				
				Quantifiable	Contamination-free	Repeatable	Detectable	Survivable	Reliable	Compatible	
LIFE	Darwinian evolution	Changes in inheritable traits in response to selective pressures	Not practical under mission constraints	• In situ • Sample return	No	-	-	N/A (extant)	-	-	
	Growth & Reproduction	Concurrent life stages or identifiable reproductive form, motility	Cell(-like?) structures in multiple stages	• In situ • Sample return	Low	Hard	Low	Med (don't identify stages, timing off, sample size low)	High?	Ambiguous. What is a cell? What morphological differences exist?	
	Metabolism	Major element or isotope fractionations indicative of metabolism	Deviation from abiotic fractionation controlled by thermodynamic equilibrium and/or kinetics	• Remote sensing • In situ • Sample return	Low / Med	Easy	High	Medium	High	Hinges on understanding of context	
		Response to substrate addition	Waste output (compound, heat)	• In situ • Sample return	Low / Med	Easy	Low	High	N/A (extant)	Hinges on understanding of context	
	Molecules & Structures Confering Function	Co-located reductant and oxidant	Deviation from abiotic distribution controlled by thermodynamic equilibrium and/or kinetics	• Remote sensing • In situ • Sample return	Med / High	Med (linked to specificity of instrument)	Low / Med	Number of replicates depends on: • Characteristics of the instrument, • Heterogeneity of the sample,	Med / High	Mixed reactions, large inventory of chemistries	
		Polymers that support information storage and transfer for terran life (DNA, RNA)	Abundance	• In situ • Sample return	Low	Hard (instrument specificity must be high); RNA hard to measure on Earth	DNA: high; RNA: low (reactive)		Low (technology limited, only terran); RNA highly reactive	Low (hydrolysis in water)	
		Structural preferences in organic molecules (non-random and enhancing function)	Polymer with repeating charge	• In situ • Sample return	Low / Med	Need a lot of material and overprinting must be discernable	Low		Med / High	Reliable	
	Potential biomolecule components	Enantiomeric excess > 20% in multiple amino acid types	• In situ • Sample return	High	How much excess necessary?	Low	• Likelihood of systematic errors, • Required values of the relevant statistical parameters,	Low	Low (hydrolysis in water, diagenesis)	How much preference needed to detect?	
		Pigments as evidence of non-random chemistries (e.g. specific pathways)	Spectral feature and/or color, otherwise see "structural preferences"	• Remote sensing • In situ • Sample return	Low / Med	Easy (fluorescence)	Low	Medium	Mixed sample both processes present		
	Potential metabolic byproducts	Organics not found abiotically (e.g. hopanes, ATP, histidine)	Presence	• In situ • Sample return	Medium	Easy if enough material	Low	• Value and cost of information.	High	Low	
		Complex organics (e.g. nucleic acid oligomers, peptides, PAH)	Presence	• Remote sensing (PAH) • In situ • Sample return	High	Easy if enough material	Low		High	Earth?	
SUSPICIOUS BIOMATERIALS	Monomeric units of biopolymers (nucleobases, amino acids, lipids for compartmentalization)	Monomeric units of biopolymers (nucleobases, amino acids, lipids for compartmentalization)	Presence	• Remote sensing • In situ • Sample return	Med / High	Limit of detection, need a lot of material	High	High	Medium	Abiotic production known	
		Distribution of metals e.g. V in oil or Fe, Ni, Mo/W, Co, S, Se, P	Presence	• In situ • Sample return	Medium	Easy except background issue	Low		Med (diagenesis)	Abiotic pathways known	
	Biofabrics	Patterns of complexity (organics)	Deviation from equilibrium (Poisson distribution of pathway complexity) < 0.01? or abiotic kinetic distribution	• In situ • Sample return	High	Background issue, material limited	Low	High	High	Background known	
		Textures	Biologically mediated morphologies, preferably with co-located composition	• In situ • Sample return	Medium	Medium	Low		Medium?	Limited documentation of abiotic vs. biotic differences	
Habitability		Liquid water, building blocks, energy source, gradients	Redox, temperature, pH, energy, disequilibria				Medium	High?	Highly ambiguous	Earth	High



**Figura 5. Biofirmas agnósticas propuesta basada en inteligencia artificial y aprendizaje automático.** Conjuntos abióticos, biológicos y tafonómicos de moléculas orgánicas se agrupan en cúmulos. Se incluyen muestras abióticas (naranja) y de origen biológico (verde/azul). Las muestras biológicas modificadas tafonómicamente (azul) se distinguen de las muestras biológicas contemporáneas (verde). © Los autores, en National Academy of Sciences (Cleaves et al. 2023).

Además, un enfoque interesante propone el uso de la biología molecular para obtener información que podría revelar vida extraterrestre. De este modo, el potencial de las tecnologías de ácidos nucleicos podría utilizarse para identificar vida, incluso cuando no se base en ácidos nucleicos. La lógica reside en que los aptámeros (moléculas de ADN o ARN monocatenario que se pliegan en formas tridimensionales específicas) pueden unirse tanto a moléculas inorgánicas como orgánicas. Posteriormente, dichas moléculas podrían analizarse para distinguir las señales derivadas de sistemas vivos de las derivadas de sistemas no vivos. Asimismo, los aptámeros correspondientes podrían amplificarse y secuenciarse (Johnson et al. 2018). Pero, como se explica a continuación, tales biofirmas pueden no existir.

## Conclusiones y perspectivas futuras

La búsqueda de vida extraterrestre es emocionante. Sin embargo, la paradoja de Fermi plantea una advertencia. De hecho, no es sorprendente que no hayamos podido identificar vida extraterrestre. Deben considerarse todos los filtros mencionados anteriormente. Uno de ellos es la limitación de la velocidad de las ondas electromagnéticas. Esta restricción no solo se aplica a las señales o mensajes de comunicación, sino también a los viajes. Ninguna nave espacial puede alcanzar tal velocidad, e incluso si se lograra, no podríamos explorar la mayor parte del Universo. Este problema se agrava con el tiempo, debido a la expansión acelerada del Universo. A menos, claro está, que exista algún conocimiento científico aún desconocido que permita viajar a velocidades superiores, como sucede en las películas de ciencia ficción. Por ejemplo, la idea de que la física había alcanzado su máximo conocimiento era prevalente a finales del siglo XVIII y principios del XIX, poco antes del descubrimiento del electromagnetismo en 1820. En aquel entonces, se creía que la mecánica clásica proporcionaba un marco completo y definitivo para la física, lo que hacía muy improbable cualquier descubrimiento posterior. Como es sabido, el electromagnetismo abrió un asombroso campo de desarrollos y descubrimientos, en el que se basa gran parte de nuestra tecnología actual. Por lo tanto, debemos invertir muchos más recursos y tiempo en la investigación científica y menos en conflictos internos, contaminación, alteración del medio ambiente, incluido el clima, y, en última instancia, destrucción del planeta Tierra.

Pero hay más. De hecho, la explicación a la paradoja de Fermi podría ser mucho más sencilla. Probablemente, la generación de la primera célula (abiogénesis) sea tan improbable como el Big Bang que dio origen a nuestro Universo. Una vez que surge la primera célula, el resto es cuestión de tiempo, incluyendo la evolución de células procariotas a eucariotas. En otras palabras, la generación de la primera célula a partir de materia inerte sería casi imposible (aunque no imposible, como lo es el Big Bang). Dado que cada uno de estos eventos ocurrió una sola vez en 13,8 millardos de años. Y tenemos suerte de que hayan ocurrido, porque podrían requerir mucho más tiempo. Pero, de nuevo, solo la investigación científica puede determinar la veracidad de todas estas posibilidades. En cualquier caso, esto resalta la importancia de cuidar la Tierra, el único planeta con vida conocido en el Universo.

En resumen, lo increíblemente pequeño (el mundo de la mecánica cuántica), lo increíblemente grande (el universo en expansión acelerada) y la abiogénesis son tres de los misterios más fascinantes y provocadores de la naturaleza. Si bien en los últimos años hemos acumulado un conocimiento significativo sobre ellos, aún desconocemos las respuestas a preguntas fundamentales para descifrarlos por completo. No sabemos si

algún día las obtendremos, pero ese es el desafío científico, y lo que lo hace aún más provocador e interesante.

#### **Agradecimientos**

Financiado por el “Ministerio de Economía y Competitividad” (proyecto MINECO BIO2015-64737-R) y el “Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria” (MINECO e INIA RF2012-00002-C02-02); “Consejería de Agricultura y Pesca” (041/C/2007, 75/C/2009 y 56/C/2010), “Consejería de Economía, Innovación y Ciencia” (P11-AGR-7322) y “Grupo PAI” (AGR -248) de la “Junta de Andalucía”; y “Universidad de Córdoba” (“Ayuda a Grupos”), España.

#### **Referencias bibliográficas**

- Beazley M (ed) (1977-1979): “The Mitchell Beazley Encyclopaedia - The Joy of Knowledge”. 2<sup>a</sup> edición revisada. Mitchell Beazley Publishers (Londres). *Edición española: Enciclopedia Visual (1978-1981)*. Salvat Editores (Barcelona).
- Chan MA, Hinman NW, Potter-McIntyre SL, Schubert KE, Gillams RJ, Awramik SM, Boston PJ, Bower DM, Des Marais DJ, Farmer JD, Jia TZ, King PL, Hazen RM, Léveillé RJ, Papineau D, Rempfert KR, Sánchez-Román M, Spear JR, Southam G, Stern JC, Cleaves HJ (2019): Deciphering biosignatures in planetary contexts. *Astrobiology* 19: 1075-1102 (28 pp).
- Cleaves HJ 2nd, Hystad G, Prabhu A, Wong ML, Cody GD, Economos S, Hazen RM (2023): A robust, agnostic molecular biosignature based on machine learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 120: e2307149120 (7 pp).
- Cowen R (2012): Andromeda on collision course with the Milky Way. *Nature* <<https://doi.org/10.1038/nature.2012.10765>> (2 pp).
- Dorado G, Gálvez S, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2021a): Analyzing modern biomolecules: the revolution of nucleic-acid sequencing – Review. *Biomolecules* (section *Molecular Genetics*) 11: 1111 (18 pp).
- Dorado G, Jiménez I, Rey I, Sánchez-Cañete FJS, Luque F, Morales A, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2013): Genomics and proteomics in bioarchaeology - Review. *Archaeobios* 7: 47-63.
- Dorado G, Luque F, Esteban FJ, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2021b): Molecular biology to infer phenotypes of forensic and ancient remains in bioarchaeology – Review. *Archaeobios* 15: 49-64.

Dorado G, Luque F, Esteban FJ, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2023): Archaeology and phylogeny to ascertain the evolution of amniotic egg and viviparity – *Review. Archaeobios 18: 103-112.*

Dorado G, Luque F, Esteban FJ, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2024): Relevance of mobile genetic elements (MGE) on biology and evolution: from first hominids to modern humans – *Review. Archaeobios 19: 70-84.*

Dorado G, Luque F, Esteban FJ, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2022): Involvement of nucleic-acid methylation on biology and evolution: from first hominids to modern humans – *Review. Archaeobios 17: 104-116.*

Dorado G, Luque F, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Pérez-Jiménez M, Raya P, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2015): Second-generation nucleic-acid sequencing and bioarchaeology - *Review. Archaeobios 9: 216-230.*

Dorado G, Luque F, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Pérez-Jiménez M, Raya P, Sáiz J, Sánchez A, Martín J, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2016): Sequencing ancient RNA in bioarchaeology - *Review. Archaeobios 10: 103-111.*

Dorado G, Luque F, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF (2017): Clustered Regularly-Interspaced Short-Palindromic Repeats (CRISPR) in bioarchaeology - *Review. Archaeobios 11: 179-188.*

Dorado G, Luque F, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2018): Evolution from first hominids to modern humans: philosophy, bioarchaeology and biology - *Review. Archaeobios 12: 69-82.*

Dorado G, Luque F, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2019): Bioarchaeology to bring back scents from extinct plants - *Review. Archaeobios 13: 66-75.*

Dorado G, Luque F, Pascual P, Jiménez I, Sánchez-Cañete FJS, Raya P, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2020): Implications of non-coding RNA on biology and evolution: from first hominids to modern humans - *Review. Archaeobios 14: 107-118.*

- Dorado G, Rey I, Rosales TE, Sánchez-Cañete FJS, Luque F, Jiménez I, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Vásquez VF (2009): Ancient DNA to decipher the domestication of dog – *Review. Archaeobios 3*: 127-132.
- Dorado G, Rey I, Rosales TE, Sánchez-Cañete FJS, Luque F, Jiménez I, Morales A, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Hernández P, Vásquez VF (2010): Biological mass extinctions on planet *Earth* - *Review. Archaeobios 4*: 53-64.
- Dorado G, Rosales TE, Luque F, Sánchez-Cañete FJS, Rey I, Jiménez I, Morales A, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Vásquez VF, Hernández P (2011): Ancient nucleic acids from maize - *Review. Archaeobios 5*: 21-28.
- Dorado G, Rosales TE, Luque F, Sánchez-Cañete FJS, Rey I, Jiménez I, Morales A, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Vásquez VF, Hernández P (2012): Isotopes in bioarchaeology - *Review. Archaeobios 6*: 79-91.
- Dorado G, Sánchez-Cañete FJS, Pascual P, Jiménez I, Luque F, Pérez-Jiménez M, Raya P, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Rosales TE, Vásquez VF, Hernández P (2014): Starch genomics and bioarchaeology - *Review. Archaeobios 8*: 41-50.
- Dorado G, Vásquez V, Rey I, Luque F, Jiménez I, Morales A, Gálvez M, Sáiz J, Sánchez A, Hernández P (2008): Sequencing ancient and modern genomes - *Review. Archaeobios 2*: 75-80.
- Dorado G, Vásquez V, Rey I, Vega JL (2007): Archaeology meets Molecular Biology – *Review. Archaeobios 1*: 1-2.
- Georgiou CD, McKay C, Reymond JL (2023): Organic catalytic activity as a method for agnostic life detection. *Astrobiology 23*: 1118-1127.
- Grefenstette N, Chou L, Colón-Santos S, Fisher TM, Mierzejewski V, Nural C, Sinhadc P, Vidaurre M, Vincent L, Weng MM (2024): Chapter 9: life as we don't know it. *Astrobiology 24(S1)*: S186-S201.
- Jia TZ, Giri C, Aldaba A, Bahcivan I, Chandrasiri N, Elavarasan I, Gupta K, Khandare SP, Liaconis C, Saha A, Solórzano OJ, Tiranti PI, Vilutis A, Lau GE (2023): Applying novel techniques from physical and biological sciences to life detection. *Space Science & Technology 3*: 0040 (14 pp).
- Johnson SS, Anslyn EV, Graham HV, Mahaffy PR, Ellington AD (2018): Fingerprinting non-Terran biosignatures. *Astrobiology 18*: 915-922.

- Keller F, Kataria T, Barge LM, Chen P, Yung Y and Weber JM (2025): An exploration of origin of life for exoplanetary science. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 12: 1544426 (22 pp).
- McKaign JM, Kim M, Carr CE (2024): Translation as a biosignature. *Astrobiology* 24: 1257-1274.
- Monod J (1970): "Le Hasard Et La Nécessité; Essai Sur La Philosophie Naturelle De La Biologie Moderne". *Éditions du Seuil Paris, France* (197 pp).
- Naidu RP, Oesch PA, Brammer G, Weibel A, Li Y, Matthee J, Chisholm J, Pollock CL, Heintz KE, Johnson BD, Shen X, Hviding RE, Leja J, Tacchella S, Ganguly A, Witten CEC, Atek H, Belli S, Bose S, Bouwens RJ, Dayal P, Decarli R, Graaff Ad, Fudamoto Y, Giovinazzo E, Greene JE, Illingworth GD, Inoue AK, Kane SG, Labbé I, Leonova E, Marques-Chaves R, Meyer RA, Nelson EJ, Roberts-Borsani GW, Schaerer D, Simcoe RA, Stefanon M, Sugahara Y, Toft S, Wel Avd, Dokkum PGv, Walter F, Watson D, Weaver JR, Whitaker KE (2025): *A cosmic miracle: a remarkably luminous galaxy at  $z_{\text{spec}}=14.44$  confirmed with JWST.* arXiv preprint: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.11263>> (20 pp).
- Neveu M, Hays LE, Voytek MA, New MH, Schulte MD (2018): The Ladder of Life Detection. *Astrobiology* 18: 1375-1402 (28 pp).
- Ozaki K, Reinhard CT (2021): The future lifespan of Earth's oxygenated atmosphere. *Nature Geoscience* 14: 138-142 (22 pp).
- Sawala T, Delhomelle J, Deason AJ, Frenk CS, Hakkinen J, Johansson PH, Keitaanranta A, Rawlings A, Wright R (2025): No certainty of a Milky Way-Andromeda collision. *Nature Astronomy* 9: 1206-1217 (22 pp).
- Sole R, Kempes CP, Corominas-Murtra B, De Domenico M, Kolchinsky A, Lachmann M, Libby E, Saavedra S, Smith E, Wolpert D (2024): Fundamental constraints to the logic of living systems. *Interface Focus* 14: 20240010 (30 pp).