

Nuevo acercamiento al origen y replicación del ácido ribonucleico (ARN) en la Tierra primitiva, desde la perspectiva de la teoría de la complejidad

Un nuevo paso hacia el origen de la vida: Las arcillas y la Luna, claves para la formación del ARN.

12' sep.'25.- Un reciente trabajo liderado por el **Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA)** plantea un nuevo acercamiento al origen y replicación del ácido ribonucleico (ARN) en la Tierra primitiva, desde la perspectiva de la teoría de la complejidad. Los investigadores han desarrollado un modelo teórico y computacional llamado *EarlyWorld* que ayuda a desentrañar uno de los mayores enigmas de la ciencia: el origen de la vida. El estudio —publicado en la revista *Communications Chemistry*— sugiere que la interacción entre moléculas de ARN primitivo y superficies de arcilla, bajo la influencia de las mareas, pudo facilitar la aparición de los primeros sistemas *autorreplicantes* en nuestro planeta.

En el ámbito del origen de la vida, la hipótesis del «Mundo de ARN» sostiene que este tipo de ácido nucleico fue anterior al ADN y a las proteínas. Así, las formas de vida primitivas se habrían basado en moléculas de ARN capaces de almacenar información y de catalizar reacciones bioquímicas. Pero, ese modelo plantea una gran incógnita: ¿cómo se formaron las primeras cadenas de ARN sin la ayuda de moléculas catalíticas (enzimas)? ¿Y cómo pudieron replicarse de manera fiable (requisito imprescindible para su posterior evolución)?

«El gran desafío conceptual y metodológico era entender cómo unas moléculas simples —como los nucleótidos— pudieron unirse para formar polímeros de ARN capaces de replicarse, dando así los pasos iniciales en el camino hacia la vida» —explica **Carla Alejandre**, primera firmante del estudio.

LA VIDA COMO UN SISTEMA COMPLEJO

El equipo ha desarrollado un marco computacional llamado *EarlyWorld* que no solo reproduce procesos físico-químicos —donde los nucleótidos interactúan con una superficie arcillosa en presencia de agua—, sino que los concibe como parte de un sistema complejo en evolución. Utilizando herramientas de la teoría de la complejidad, los investigadores han modelado cómo la polimerización y replicación del ARN pudo emerger de la interacción entre componentes simples (nucleótidos, arcillas, agua) sometidos a dinámicas fluctuantes.

Nota de prensa

«Hoy tenemos claro que el estudio científico del origen de la vida —en marcha desde el trabajo pionero de Oparin hace más de un siglo— requiere la coordinación de diversas disciplinas. Con este artículo hemos conectado la química prebiótica, la evolución molecular y la teoría de la complejidad para intentar arrojar luz sobre la red de interacciones que dio lugar a la emergencia de la vida en la Tierra, hace unos 4 000 millones de años», señala Jacobo Aguirre, coordinador de este trabajo y del grupo de Complejidad y Astrobiología del CAB.

MAREAS QUE IMPULSARON LA VIDA

El hallazgo más llamativo de este estudio es la demostración de que la eficiencia en la polimerización y replicación del ARN aumenta en ambientes que fluctúan, como los ciclos de inundación y desecación causados por mareas, frente a los que mantienen condiciones constantes. Además, se deduce que los periodos de oscilación más favorables para el aumento de la complejidad molecular coinciden con los de las mareas vivas, producidos por el alineamiento de la Luna, el Sol y la Tierra primitiva.

«Este trabajo muestra la importancia para el origen (u orígenes) de la vida de los medios heterogéneos, como podían ser los fondos de pequeños charcos cercanos a las costas. En ellos, el agua, las sales minerales, las arcillas, los nucleótidos y las cadenas de ARN pudieron interaccionar de forma periódica gracias a la acción de las mareas vivas» —apunta Carlos Briones, coautor del estudio.

¿POR QUÉ EL ARN ACTUAL TIENE CUATRO «LETRAS»?

Otra aportación del trabajo es que compara distintos alfabetos genéticos posibles (con dos, cuatro o hasta seis nucleótidos), lo que resulta esencial para entender las capacidades del ARN como archivo de información heredable.

«Nuestro análisis muestra que el alfabeto de cuatro “letras” del ARN actual —con la flexibilidad de permitir pares de bases no canónicos como G-U, además de los canónicos A-U y G-C— ofrece el equilibrio óptimo entre velocidad de replicación y diversidad potencial de secuencias» —añade Adrián Aguirre-Tamaral, coautor del estudio.

IMPLICACIONES PARA ENTENDER LA VIDA DENTRO Y FUERA DE LA TIERRA

Estos resultados no solo ayudan a reconstruir los primeros pasos de la proto-biología terrestre, sino que también orientan la búsqueda de vida en otros

planetas, lo que resulta clave en astrobiología. Así, según este estudio, la presencia de otras formas de vida fuera del sistema solar podría verse favorecida en planetas con grandes lunas, agua líquida, arcillas en su superficie y dinámicas fluctuantes.

«El origen de la vida no fue un hecho aislado y fortuito, sino el resultado de condiciones físico-químicas muy concretas que favorecieron el salto de la química a la biología. Comprender esa transición —desde la perspectiva de la complejidad— nos acerca a responder a la pregunta de si estamos solos en el Universo» —concluye Jacobo Aguirre.

SOBRE EL CAB

El [Centro de Astrobiología \(CAB\)](#) es un centro mixto de investigación del **INTA** y del **CSIC**. Creado en 1999, fue el primer centro del mundo dedicado específicamente a la investigación astrobiológica y el primer centro no estadounidense asociado al NASA *Astrobiology Institute* (NAI), actualmente *NASA Astrobiology Program*. Se trata de un centro multidisciplinar cuyo principal objetivo es estudiar el origen, presencia e influencia de la vida en el universo mediante una aproximación transdisciplinar. El **CAB** fue distinguido en 2017 por el Ministerio de Ciencia e Innovación como Unidad de Excelencia «María de Maeztu».

El **CAB** ha liderado el desarrollo de los instrumentos [REMS](#), [TWINS](#) y [MEDA](#), operativos en Marte desde agosto de 2012, noviembre de 2018 y febrero de 2021, respectivamente; así como la ciencia de los instrumentos raman [RLS](#) y RAX, que serán enviados a Marte a finales de esta década como parte de la misión ExoMars y a una de sus lunas en la misión MMX, respectivamente. Además, desarrolla el instrumento [SOLID](#) para la búsqueda de vida en exploración planetaria. Asimismo, el **CAB** *colidera*, junto con otras tres instituciones europeas, el desarrollo del telescopio espacial PLATO y participa en diferentes misiones e instrumentos de gran relevancia astrobiológica, como MMX, [CARMENES](#), [CHEOPS](#), [BepiColombo](#), [DART](#), [Hera](#), los instrumentos [MIRI](#) y [NIRSpec](#) en [JWST](#) y el instrumento [HARMONI](#) en el [ELT](#) de [ESO](#).

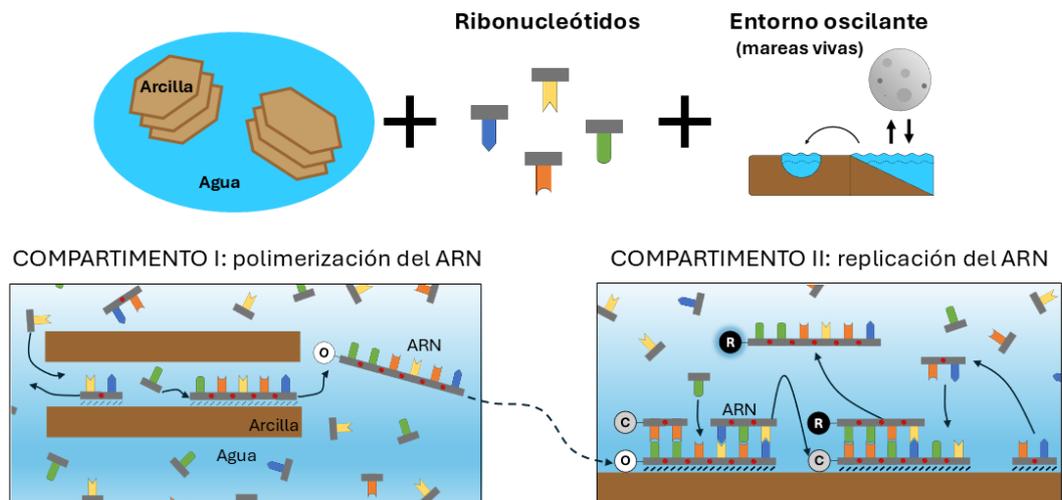


Figura: Los resultados de esta investigación sugieren que entornos oscilantes en la Tierra primitiva —como los fondos de charcos cercanos a las costas llenados regularmente por las mareas vivas— facilitaron la polimerización y replicación no enzimática del ARN en las interfases agua-arcilla de los diferentes compartimentos del mineral.

MÁS INFORMACIÓN

Artículo científico en: *Communications Chemistry*.

REFERENCIA Y DOI

C. Alejandre, A. Aguirre-Tamaral, C. Briones and J. Aguirre. *Polymerization and replication of primordial RNA induced by clay-water interface dynamics*. *Commun Chem* 8, 236 (2025). <https://doi.org/10.1038/s42004-025-01632-w>

CONTACTO

Jacobo Aguirre Araujo:

jaguirre@cab.inta-csic.es

Carla Alejandre Villalobos:

calejandre@cab.inta-csic.es

Carlos Briones Llorente:

cbriones@cab.inta-csic.es

Adrián Aguirre-Tamaral: (desarrolló parte de este trabajo en el CAB, pero actualmente es investigador de la Universidad de Graz, en Austria).

FINANCIACIÓN

Proyecto financiado por varias entidades:

Proyectos *PID2021-122936NB-I00*, *PID2022-139908OB-I00* y *MDM-2017-0737* Unidad de Excelencia «María de Maeztu»-Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), financiados por *MCIN/AEI /10.13039/501100011033/* y por FEDER “Una manera de hacer Europa”; proyectos *PIE2024ICT085* del CSIC, *PEJ-2021-AI/TIC-22450* y *PIPF-2023/TEC29607* de la Consejería de Educación, Ciencia y Universidades de la Comunidad de Madrid y «*Complexity of life in basic research and innovation*», de la Universidad de Graz.



UNIDAD DE CULTURA CIENTÍFICA DEL CENTRO DE ASTROBIOLOGÍA (INTA-CSIC)

divulgación@cab.inta-csic.es

(+34) 915202107



Instituto
Nacional
de Técnica
Aeroespacial