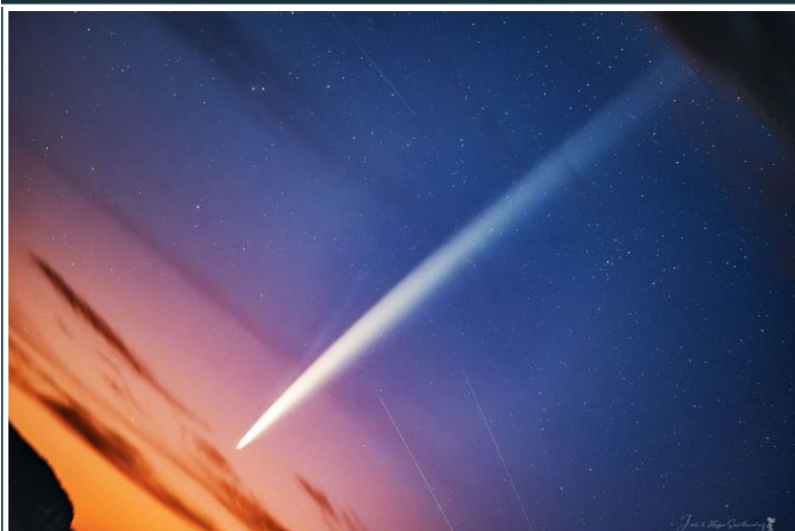


Ciencia e Investigación

Primera revista argentina de información científica / Fundada en enero de 1945



COMETAS: un acercamiento panorámico a estos viajeros cósmico

■ Romina S. Garcia



EL IMPACTO DE LA COMPUTACIÓN DE ALTO DESEMPEÑO EN LA ASTRONOMÍA ARGENTINA: desafíos, avances y perspectivas

■ Dante Paz, Antonio J. Russo, Nicolás Wolovick y Maximiliano Bozzoli

EL OBSERVATORIO LLAMA: Un Nuevo Horizonte para la Radioastronomía en Sudamérica

■ Silvina Cichowolski

Nota Cienciométrica de la Editorial: Posición y evolución de la astronomía y astrofísica argentinas respecto a las de otros países

■ Luis A. Quesada Allué

EL ARREGLO INTERFEROMÉTRICO MULTIPROPÓSITO (MIA): Primer Radiointerferómetro Argentino

■ Gustavo E. Romero

Amigos y colaboradores de la AAPC



Contribuciones de años anteriores

HEXAGON



EDITOR RESPONSABLE
Asociación Argentina para el
Progreso de las Ciencias (AAPC)

COMITÉ EDITORIAL
Editor: Luis A. Quesada Allué
Editora Adjunta: Paula Regina
Alonso
Editores asociados
Dr. Gerardo Castro
Dra. Lidia Herrera
Dr. Roberto Mercader
Dra. Alicia Sarce
Dr. Juan R. de Xammar Oro
Dr. Norberto Zwirner

ASISTENCIA TÉCNICA
Gabriel Martín Gil (diagramación y
administración web)

**CIENCIA E
INVESTIGACIÓN**
Primera Revista Argentina
de información científica.
Fundada en Enero de 1945.
Es el órgano oficial de difusión de
La Asociación Argentina para el
Progreso de las Ciencias.
A partir de 2012 se publica en dos
series, Ciencia e Investigación
y Ciencia e Investigación Reseñas.

Av. Alvear 1711, 4° piso,
(C1014AAE) Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina.
Teléfono: (+54) (11) 4811-2998
Registro Nacional de la
Propiedad Intelectual
N° 82.657. ISSN-0009-6733.

Lo expresado por los autores o
anunciantes, en los artículos o
en los avisos publicados es de
exclusiva responsabilidad de los
mismos.

Ciencia e Investigación se
edita on line en la página web
de la Asociación Argentina
para el Progreso de las
Ciencias (AAPC)
www.aargentinapciencias.org

La reciente visita (10-13 Octubre
2024) del "Cometa del siglo", el
Tsuchinshan-Atlas, C/2023-A3;
que pasa cada 32 .000 años



SUMARIO

EDITORIAL		
Latidos cósmicos: ciencia y visión desde Argentina Gabriela Castelletti	3	
ARTÍCULOS		
COMETAS: un acercamiento panorámico a estos viajeros cósmicos Romina S. Garcia	5	
El Impacto de la Computación de Alto Desempeño en la Astronomía Argentina: Desafíos, Avances y Perspectivas Dante Paz, Antonio J. Russo, Nicolás Wolovick y Maximiliano Bozzoli	18	
El Observatorio LLAMA: Un Nuevo Horizonte para la Radioastronomía en Sudamérica Silvina Cichowolski	31	
El Arreglo Interferométrico Multipropósito (MIA): Primer Radiointerferómetro Argentino Gustavo E. Romero	43	
NOTA CIENCIOMÉTRICA DE LA EDITORIAL:		
Posición y evolución de la astronomía y astrofísica argentinas respecto a las de otros países Luis A. Quesada Allué	54	
INSTRUCCIONES PARA AUTORES		58

... La revista aspira a ser un vínculo de unión entre
los trabajadores científicos que cultivan disciplinas
diversas y órgano de expresión de todos aquellos que
sientan la inquietud del progreso científico y de su
aplicación para el bien.

Bernardo A. Houssay

Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

COLEGIADO DIRECTIVO

Presidente
Ester Susana Hernández

Vicepresidente
César Belinco

Secretaria
Alicia María Sarce

Prosecretaria
Ana María Puyó

Tesorero
Alberto Antonio Pochettino

Protesorera
Graciela Noemí Balerio

Miembros Titulares
Paula Alonso
Miguel Angel Blesa
Lidia Herrera
Mario A.J- Mariscotti
Ursula María Molter
Ernesto Podestá
Luis Alberto Quesada Allué
Fernando Stefani

Miembros Institucionales:
Asociación Argentina de Astronomía (AAA)
Gabriela Castelleti

Asociación Argentina de Investigación Físicoquímica (AAIFQ)
Florencia Fagalde

Sociedad Argentina de Genética (SAG)
Angela R. Solano

Miembros Fundadores
Bernardo A. Houssay – Juan Bacigalupo – Enrique Butty
Horacio Damianovich – Venancio Deulofeu – Pedro I. Elizalde
Lorenzo Parodi – Carlos A. Silva – Alfredo Sordelli – Juan C. Vignaux –
Adolfo T. Williams – Enrique V. Zappi

AAPC
Avenida Alvear 1711 – 4° Piso
(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina
www.aargentinapciencias.org

LATIDOS CÓSMICOS: CIENCIA Y VISIÓN DESDE ARGENTINA



Gabriela Castelletti

Evolución estelar y medio interestelar
IAFE. INSTITUTO DE ASTRONOMÍA Y FÍSICA DEL ESPACIO
(Conicet-uba)

E-mail: gcastell@iafe.uba.ar

¿Quién no ha sentido emoción al contemplar el cielo nocturno, preguntándose qué misterios se ocultan en su vastedad y cómo funciona esa compleja máquina que llamamos Universo? En esos momentos, nos percatamos de la pequeñez de nuestro planeta frente a la inmensidad cósmica, dejándonos llevar por una ola de asombro. Comprendemos que esas preguntas requieren mentes curiosas, ávidas por investigar. Cuando era niña mi padre me obsequió un libro de Astronomía con una dedicatoria que nunca olvidaré: *“Por el amor y la ciencia que nos une.”* Con el tiempo, tuve la fortuna de compartir esa pasión con colegas entusiastas, con quienes soñamos, diseñamos y llevamos adelante proyectos, convencidos de que lo imaginado podía convertirse en realidad.

Este nuevo número de la revista Ciencia e Investigación es una representación significativa de esos esfuerzos. Los artículos aquí reunidos, reflejan tanto la diversidad como la profundidad del trabajo astronómico realizado en Argentina. La Dra. García R., nos ofrece una revisión singular sobre los cometas, describiendo cómo estos cuerpos helados, viajeros del Sistema Solar, pudieron haber sembrado los ingredientes fundamentales para la vida en la Tierra. El Dr. Paz D. y sus colaboradores abordan el uso de la computación de alto desempeño como herramienta indispensable para procesar los enormes volúmenes de datos obtenidos por los observatorios astronómicos y para realizar simulaciones de fenómenos cósmicos aún inexplorados. Este artículo es un llamado de atención que subraya la necesidad de ampliar las capacidades computacionales en nuestro país e invita a reflexionar sobre la importancia de crear nuevos espacios y recursos computacionales al servicio de la investigación científica.

Además, esta edición incluye dos contribuciones centradas en el desarrollo de observatorios astronómicos en Argentina. La Dra. Cichowolski S. y equipo presentan la colaboración entre Argentina y Brasil para la instalación del Large Latin American Millimeter Array (LLAMA) en el norte de la región andina argentina. Este potente observatorio facilitará la exploración del Universo, abriendo nuevas perspectivas para el estudio de galaxias, estrellas en formación y el medio interestelar. Su artículo ofrece una descripción clara de la génesis del proyecto, sus objetivos científicos y su estado actual. Por otro lado, el Dr. Romero G. E., director del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), presenta el arreglo interferométrico multipropósito MIA, un proyecto innovador que combina capacidades de observación astronómica únicas en Sudamérica y marca un hito en la instrumentación científica desarrollada en el país. MIA ilustra el importante rol que el IAR ha cumplido y continúa desempeñando en la Astronomía argentina.

Los artículos aquí reunidos son una muestra tangible del potencial de la investigación científica en Argentina. A menudo, la ciencia básica se malinterpreta como un fin en sí misma; sin embargo, su verdadero impacto tras-

ciende esta visión. Al expandir las fronteras del saber, la investigación impulsa avances tecnológicos que benefician directamente a nuestra sociedad. En este sentido, el crecimiento de Argentina no debería entenderse como una competencia entre las ciencias duras y la tecnología, sino como un camino colaborativo en el que ambas disciplinas se complementan y enriquecen mutuamente. Para que este esfuerzo prospere y surjan nuevas iniciativas, el apoyo y estímulo del gobierno nacional son esenciales. Respaldo la investigación científica no es sólo invertir en conocimiento, sino también en herramientas que fortalezcan nuestra capacidad como país. Los trabajos presentados en este número ilustran cómo la ciencia profundiza nuestra comprensión del Universo, al tiempo que refuerza la infraestructura tecnológica nacional, contribuyendo al desarrollo y crecimiento sostenido de Argentina.

Por último, quiero agradecer profundamente a los autores por sus valiosas contribuciones. Su dedicación y compromiso no sólo hacen posible esta edición, sino que también inspiran a seguir avanzando en la búsqueda del conocimiento. Cada artículo refleja el esfuerzo colectivo de nuestra comunidad científica y es un testimonio del camino que aún queda por recorrer.

COMETAS: UN ACERCAMIENTO PANORÁMICO A ESTOS VIAJEROS CÓSMICOS

Palabras clave: Cometas, Reservorios, Estructura cometaria, Actividad cometaria, C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS).
Key words: Comets, Reservoirs, Cometary structure, Cometary activity, C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS).

Los cometas han fascinado a la humanidad desde la antigüedad, siendo observados y estudiados por las principales civilizaciones a lo largo de milenios. Aunque inicialmente se les atribuyeron significados supersticiosos, el desarrollo de la astronomía permitió comprender que los cometas son cuerpos celestes que orbitan alrededor del Sol. Actualmente, el estudio de los cometas, facilitado por los avances tecnológicos y las diferentes misiones espaciales, es relevante porque podrían aportar información clave sobre el origen de la vida en la Tierra y la formación del sistema solar. Se cree que los cometas podrían haber traído agua y compuestos orgánicos durante el intenso bombardeo que ocurrió en los primeros estadios del sistema solar, contribuyendo a las condiciones necesarias para el surgimiento de la vida.

Los cometas se clasifican en dos grupos principales según sus períodos orbitales: cometas de corto y largo período. Esta clasificación refleja sus orígenes, siendo los cometas de largo período provenientes de la Nube de Oort, mientras que los de corto período se originan en el cinturón de Kuiper.

Estructuralmente, un cometa se compone de un núcleo helado, una coma de gas y polvo, y colas que se forman a medida que se acerca al Sol. El núcleo, que tiene entre 1 y 20 km de diámetro, expulsa material al sublimarse el hielo que lo compone, creando la coma y las colas. Un ejemplo notable es el cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS), que tiene una distancia perihélica de 0,39 unidades astronómicas.

Comets: A Panoramic Approach to These Cosmic Travelers

Comets have fascinated humanity since ancient times, being observed and studied by major civilizations over millennia. Although initially attributed with superstitious meanings, the development of astronomy allowed us to understand that comets are celestial bodies that orbit the Sun.

Today, the study of comets—facilitated by technological advancements and various space missions—is important because they may provide key information about the origin of life on Earth and the formation of the solar system. It is believed that comets might have brought water and organic compounds during the intense bombardment that occurred in the early days of the solar system, contributing to the conditions necessary for the emergence of life.

Comets are classified into two main groups based on their orbital periods: short-period and long-period comets. This classification reflects their origins, with long-period comets coming from the Oort Cloud, while short-period comets originate from the Kuiper Belt.

Structurally, a comet consists of a frozen nucleus, a coma of gas and dust, and tails that form as it approaches the Sun. The nucleus, which ranges from 1 to 20 km in diameter, releases material as its ices sublimate, creating the coma and tails. A notable example is the comet C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS), which has a perihelion distance of 0.39 astronomical units.

■ LOS COMETAS EN LA HISTORIA

Debido a sus apariciones inesperadas y, a veces, espectaculares, los cometas han despertado la atención de sus observadores desde tiempos inmemoriales. Muy a menudo, las personas miraban a los cometas con miedo, creyendo que estos visitantes

cósmicos eran presagios de plagas, desastres naturales y muerte. Aunque su estructura, composición e incluso su catalogación dentro de la esfera celeste han sido objeto de análisis y controversia, los cometas fueron observados y estudiados por las civilizaciones más importantes desde hace milenios.

Romina S. Garcia

Grupo de Ciencias Planetarias, Dpto. de Geofísica y Astronomía,
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Universidad Nacional de San Juan - CONICET
Av. J. I. de la Roza 590 oeste, Rivadavia,
J5402DCS, San Juan, Argentina

E-mail: garcia.romina.222@gmail.com

La palabra “cometa” proviene del griego antiguo y significa “estrella con cabello”, aunque también existen registros en el Antiguo Egipto, Mesopotamia y la Antigua China (figura 1).



Figura 1: Detalle de un manuscrito astrológico en tinta sobre seda, siglo II a. C., perteneciente a la dinastía Han. Desenterrado de la tercera tumba de Mawangdui en Changsha, provincia de Hunan, China. Museo de la provincia de Hunan. Crédito: dominio público, a través de Wikimedia Commons.

Gilgamesh, rey sumerio que vivió alrededor de 2600 a.C., definió los cometas como estrellas que caen. Tiempo después, alrededor del 330 a.C., Aristóteles opinó que los cometas eran nada menos que vapores exhalados de la Tierra que se elevaban a la atmósfera superior, relegándolos a un simple fenómeno meteorológico. Una razón para esta creencia es que los cometas brillantes, observables a simple vista, están generalmente cerca del Sol, por lo que sólo se pueden observar en la mañana temprano o al anochecer, cerca del horizonte. Las colas cometarias, apuntando lejos del Sol, aparecen en este caso más bien perpendiculares al horizonte, dando así la impresión al observador de que los cometas están subiendo desde la Tierra.

El filósofo Séneca, alrededor del 30 d.C., comprobó que los cometas no se veían afectados por la dirección del viento; esto es, tenían un

comportamiento típico de un cuerpo celeste. Sin embargo, el pensamiento aristotélico era muy fuerte y quedó arraigado por muchos siglos.

En el Imperio Romano, y siglos después en la época medieval, la superstición creada alrededor de estos cuerpos llevó a pensar, por poner algunos ejemplos, que un cometa tuvo una influencia maligna sobre las decisiones tomadas por Nerón (alrededor del 50 d.C.) o la muerte de Carlomagno o de Luis I de Francia (en la primera mitad del siglo IX).

La asociación de cometas con fenómenos atmosféricos prevaleció durante toda la Edad Media y, por lo tanto, no es sorprendente encontrar una falta de registros científicos de estos objetos en el mundo occidental durante ese tiempo.

Johannes Kepler, a principios del siglo XVII, fundamentalmente conocido por sus leyes sobre el movi-

miento de los planetas en su órbita alrededor del Sol, paradójicamente dijo que los cometas eran emanaciones de la Tierra, volviendo a colocarlos como parte de la meteorología.

La aparición de un cometa muy brillante en 1577 dio a Tycho Brahe la oportunidad de observarlo con el mejor instrumento astronómico disponible en ese momento. Al comparar las observaciones hechas desde dos lugares diferentes, no pudo encontrar ningún cambio de paralaje perceptible, por lo que infirió que el cometa debería encontrarse a mucha más distancia que la Luna. Este descubrimiento colocó a los cometas dentro de la categoría de los cuerpos celestes y fue, sin duda, un punto de inflexión en la historia de la ciencia, sentando las bases para el estudio moderno de estos viajeros cósmicos.

Más allá del espectacular fenómeno que supone la observación

de cometas desde la Tierra, estos objetos también merecen atención porque podrían responder preguntas claves y proporcionar información importante sobre cuestiones tan trascendentales como el origen de la vida en la Tierra o la formación y evolución del sistema planetario. La vida en la Tierra solo pudo haber comenzado después de un evento que habría sucedido al finalizar la etapa de formación del Sistema Solar, hace aproximadamente 3,8 mil millones de años. Durante este proceso dinámicamente caótico, denominado “late heavy bombardment” en inglés, caracterizado por un intenso bombardeo de planetesimales hacia el Sistema Solar interior, la temperatura era extrema para la presencia de material orgánico o de agua. Además, los fósiles más primitivos que se han encontrado en el planeta tienen un registro de antigüedad de alrededor de unos 3,5 mil millones de años. Entonces surge la pregunta: ¿De dónde salió el agua y el carbono necesarios para la vida, si en la Tierra no se daban las condiciones para la presencia de estos ele-

mentos? La respuesta a esta pregunta podría ser una colisión entre la Tierra y uno o varios cometas, ya que los recorridos orbitales de ambos pueden circunstancialmente cruzarse y, además, en muchos de ellos se ha observado la presencia de agua y moléculas basadas en carbono. La misión Rosetta de la Agencia Espacial Europea, que estudió el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, proporcionó evidencia de aminoácidos y otros materiales orgánicos, lo que refuerza la teoría de que los cometas podrían haber traído los elementos necesarios para la vida en la Tierra.

Por otro lado, los cometas también podrían brindarnos información sobre la formación y evolución del Sistema Solar. Si los consideramos como residuos o remanentes de la formación planetaria, es decir, “planetesimales” que no fueron incorporados a los planetas ni expulsados del Sistema Solar por las fuerzas gravitatorias existentes, entonces podrían dar pistas sobre la composición química de los planetas.

■ RESERVORIOS Y TIPOS DE COMETAS

Dadas las diversas características orbitales de los cometas observados a lo largo del tiempo, tanto en forma, como en posición y orientación, es natural suponer que no todos ellos provienen de la misma región. En el Sistema Solar existen dos reservorios de estos cuerpos helados (Figura 2).

La Nube de Oort, propuesta por Oort en 1950, es una nube esférica teórica compuesta por pequeños cuerpos helados que rodean el Sistema Solar, con un radio de ~100 a 200 mil unidades astronómicas (ua) (Smoluchowski & Torbett, 1984), y con una densidad de objetos que disminuye a medida que aumenta la distancia heliocéntrica -o distancia al Sol- (Fernandez & Brunini, 2000). Aunque la existencia de la Nube de Oort aún no ha sido probada por observación directa, es ampliamente aceptada por la comunidad científica debido a la observación de cometas que parecen provenir de esa región. Para que los objetos de

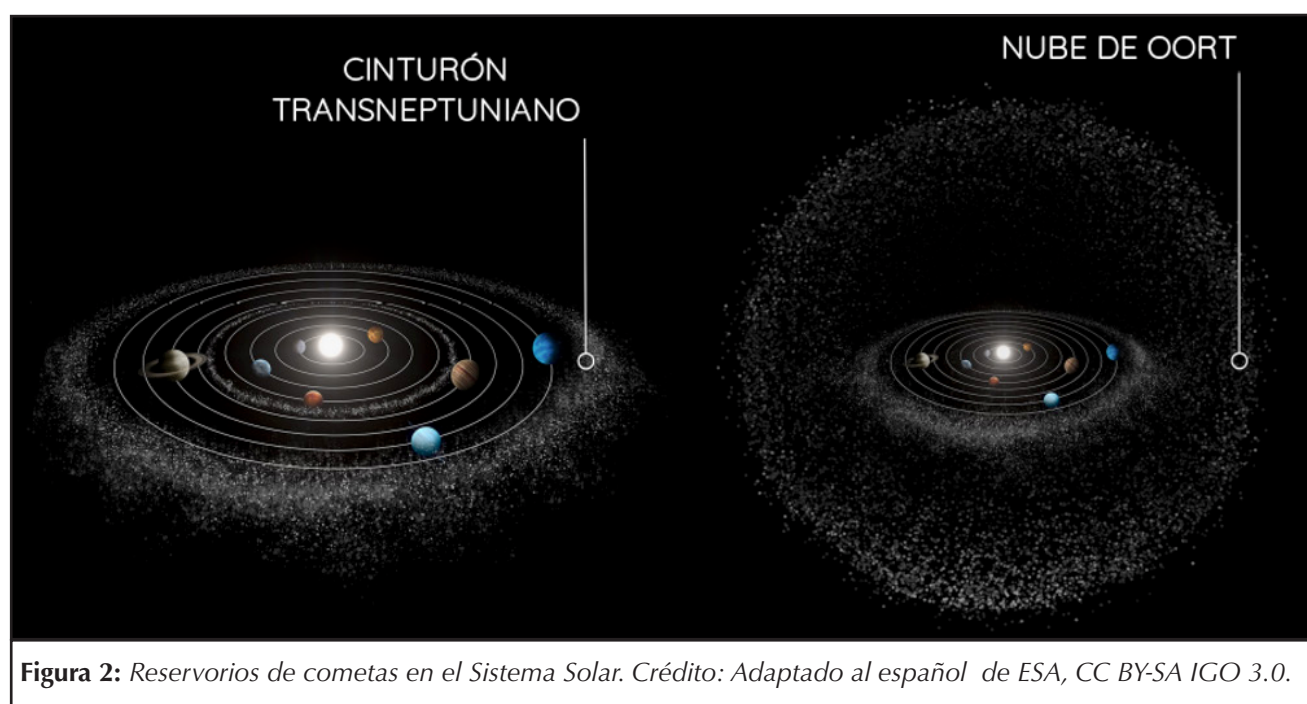


Figura 2: Reservorios de cometas en el Sistema Solar. Crédito: Adaptado al español de ESA, CC BY-SA IGO 3.0.

la Nube de Oort ingresen en la región interna del Sistema Solar, es necesario algún tipo de perturbación; siendo los posibles perturbadores el disco galáctico, las estrellas que pasan cerca del Sol, o incluso las nubes moleculares:

Existe otro grupo de cometas que tiene una baja inclinación orbital, lo cual indicaba que la fuente de estos objetos debía ser distinta a la Nube de Oort y estar próxima al plano eclíptico. Aunque Edgeworth en 1949 y Kuiper en 1951 postularon la existencia de un disco más allá de la órbita de Neptuno, fue Fernández en 1980 quien demostró su existencia estudiando el flujo de cometas. La confirmación observacional de la existencia del cinturón transneptuniano -también llamado cinturón de Kuiper- llegó con la detección del objeto (15760) 1992 QB1 Albion (Jewitt & Luu, 1993), el primer objeto observado más allá de la órbita de Neptuno, además de Plutón y Caronte. A medida que se fueron descubriendo más objetos en la región transneptuniana, se identificaron distintos comportamientos dinámicos, lo que permitió caracterizar diversas poblaciones en la región.

Los cometas han sido clasificados usualmente en dos grupos según sus períodos orbitales, los cuales están estrechamente relacionados con su ubicación en el Sistema Solar.

Los cometas de largo período (LPC, por sus siglas en inglés) son aquellos con ciclos orbitales mayores a 200 años, y los cometas de corto período (abreviado en inglés como SPC) son los que poseen ciclos menores a 200 años. Este criterio surgió en una época en la que la capacidad de cálculo era más limitada, y 200 años era el período orbital máximo para el que era relativamente fiable determinar si el objeto ya había sido avistado con

anterioridad, estableciendo así su periodicidad. Por lo tanto, esta clasificación no responde a cuestiones físicas o dinámicas, sino más bien históricas. Los LPC pueden ser cometas dinámicamente nuevos si los objetos ingresan a la región planetaria por primera vez, o cometas que regresan ("returning comets" en inglés) si en algún momento de su vida dinámica ya han ingresado al sistema solar interior.

Los SPC, por otro lado, pueden dividirse en dos grupos: los cometas de la familia de Júpiter, con períodos menores a 20 años, y los cometas tipo Halley, con períodos mayores a 20 años. La dinámica de los primeros está fuertemente dominada por Júpiter (de ahí su denominación), y el plano de sus órbitas no se aleja mucho del plano eclíptico. Por otro lado, los cometas tipo Halley tienen una distribución de inclinaciones

más heterogénea, con una media de 41° , e incluso algunos tienen órbitas retrógradas. Aunque estos grupos de cometas se encuentran dentro del grupo de los SPC, tienen poco en común y, muy probablemente, tienen orígenes distintos. Este tipo de disyuntivas, ha llevado a algunos investigadores a buscar una clasificación basada en propiedades dinámicas más rigurosas (Levison, 1996; Tancredi, 2014), pero eso va más allá de lo que se pretende abordar en este artículo.

■ ESTRUCTURA COMETARIA

La estructura típica de un cometa se compone de cuatro partes básicas, como se muestra en la Figura 3.

El núcleo cometario es la parte central del cometa. Desde este aglomerado de hielo y polvo se expulsan los componentes que forman las de-

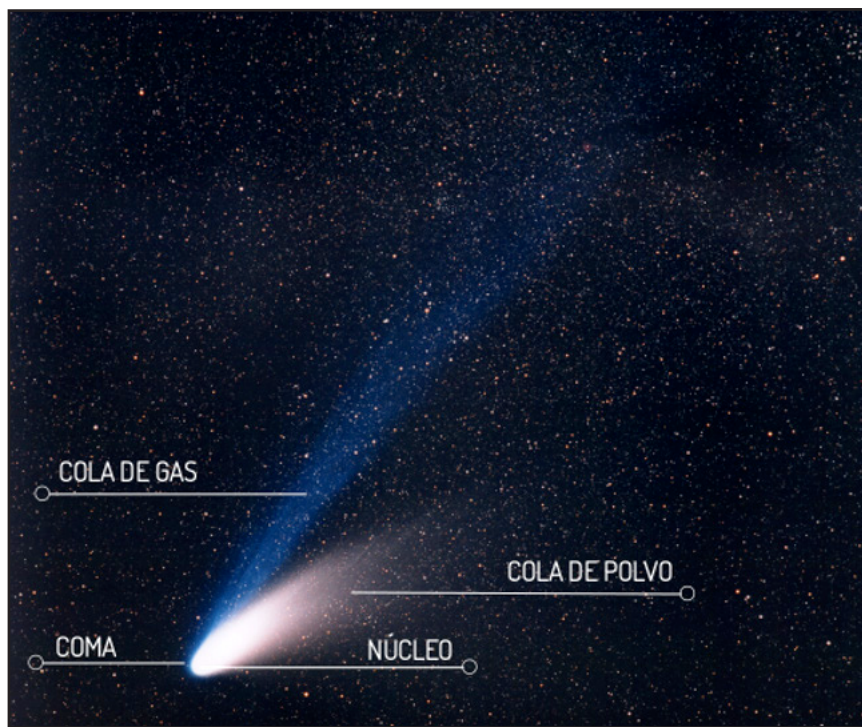


Figura 3: Estructura básica de cuatro partes de un cometa. Cometa C/1995 O1 Hale-Bopp, 14 de marzo de 1997. Crédito: Adaptado de ESO/E. Slawik, CC-BY 4.

más estructuras cuando el cometa se activa, es decir, cuando se acerca lo suficiente al Sol para que comience la sublimación de los hielos que lo componen, arrastrando en su movimiento a las partículas de polvo.

La teoría más aceptada y extendida sobre el origen de estos objetos fue propuesta por Weidenschilling (2004). Esta teoría sugiere que los núcleos cometarios se formaron en el disco protoplanetario mediante una coagulación lenta de material orgánico, hielos y silicatos, asentados en el plano de dicho disco. Esta aglomeración inicial dio lugar a cuerpos de tamaños kilométricos. Se cree que dichos núcleos se formaron en la zona de los planetas gigantes y luego fueron dispersados hacia los diferentes reservorios, donde han conservado su estado original. Por esta razón, se supone que los núcleos cometarios proveen información sobre las condiciones termofísicas del disco protoplanetario y sobre el mecanismo de formación de los planetesimales helados que dieron origen a los núcleos de los planetas exteriores.

Dado este escenario de formación, los núcleos cometarios están compuestos tanto por materiales refractarios como por hielos. Si bien el hielo de agua (H_2O) es el componente más abundante observado, también se han detectado otros tipos de hielos como CO , CO_2 , y CH_4 . En el caso del hielo de agua, el proceso de sublimación se vuelve importante a distancias heliocéntricas menores de ~ 3 ua (Biver et al., 2002), aunque se han observado cometas activos a distancias mucho mayores, lo que confirmaría que algunos núcleos contienen hielos más volátiles en su composición.

Históricamente, ha habido mucha controversia sobre la naturaleza de los núcleos cometarios, ya que

estos están ocultos tras una “nube” de gas y polvo cuando el cometa está activo, y además son objetos muy oscuros y tenues, lo que dificulta su observación. Debido a esto, el tamaño del núcleo ha sido una variable difícil de determinar, pero algunos estudios estiman tamaños típicos que oscilan entre 1 y 20 km.

Dadas estas dificultades, la mejor manera de estudiar estos objetos es proponiendo diversos modelos que puedan ajustarse a las mediciones indirectas tomadas por telescopios terrestres. También se han obtenido datos importantes acerca de los núcleos cometarios con el uso de grandes telescopios que permiten observarlos cuando se alejan del Sol y tienen baja o nula actividad. De esta manera, se evita que el polvo y gas que los rodea interfiera en su observación, aunque esto presenta grandes desafíos en cuanto a las técnicas observacionales.

Otro método es observar cometas con muy poca actividad cuando se acercan mucho a la Tierra; esto puede dar buenos resultados, pero solo es aplicable a unos pocos objetos.

Los núcleos cometarios han podido ser estudiados en detalle con la llegada de sondas espaciales a algunos cometas, desde las visitas de las sondas Giotto y Vega al cometa 1P/Halley, hasta la misión Rosetta y su encuentro con el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (Figura 4). Esta es la mejor manera de obtener información detallada, pero está necesariamente limitada a un número muy pequeño de objetos y no puede ser utilizada para determinar las propiedades de los núcleos cometarios como una población.

Dicho esto, cuando observamos un cometa activo desde la Tierra, lo que realmente estamos viendo es el halo de gas y polvo que se genera al-

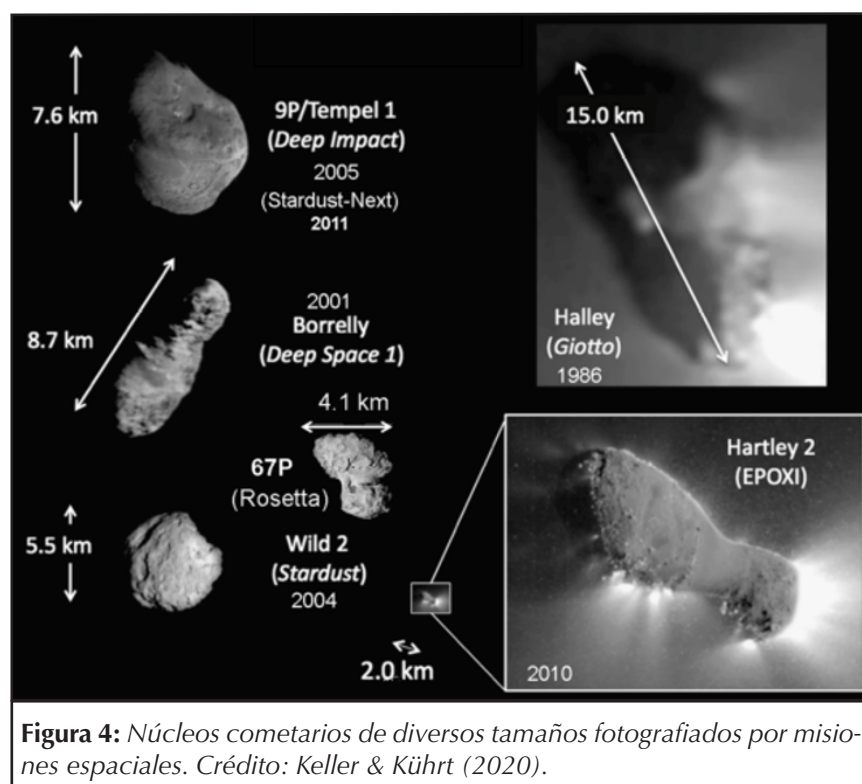


Figura 4: Núcleos cometarios de diversos tamaños fotografiados por misiones espaciales. Crédito: Keller & Kührt (2020).

rededor del núcleo, llamado coma. Por esta razón, los estudios sobre la composición de los cometas suelen referirse a mediciones realizadas sobre la coma y no sobre el núcleo.

La coma no está unida gravitacionalmente al núcleo; más bien, es un fenómeno de transición. Se forma aproximadamente cuando el cometa está a una distancia del Sol menor de 3 ua, y su tamaño y brillo se incrementan al aumentar la radiación térmica a medida que el cometa se acerca a su perihelio.

Debido al proceso de sublimación que ocurre en la superficie del núcleo, se producen eyecciones de gas a gran velocidad que arrastran el polvo depositado en la superficie, el cual se desacopla del gas a unos pocos radios de distancia.

La coma generalmente puede parecer esférica y estable, pero los cambios repentinos en su brillo y estructura son bastante comunes, con rasgos que cambian rápidamente en cuestión de horas o con estructuras espaciales que pueden aparecer tanto en la coma de gas como en la de polvo.

Las especies de iones expulsados por el núcleo hacia la coma son posteriormente acelerados por el viento solar en una dirección que difiere muy poco de la dirección antisolar, formando la cola iónica (o cola de gas) del cometa. Estas estructuras pueden extenderse millones de kilómetros y están presentes en todos los cometas, aunque a veces son demasiado débiles para ser observadas fácilmente.

Alfvén (1957) sugirió que el espacio interplanetario está inmerso en un campo magnético creado por el Sol. Bajo esta hipótesis, cuando un cometa se mueve a través del medio interplanetario, su ionosfera

barre las líneas del campo magnético. Debido a este arrastre, los iones cometarios son encauzados en la dirección radial, facilitando así una transferencia eficiente de momento entre el plasma del viento solar y los iones cometarios.

Por otro lado, las partículas de polvo que fueron arrastradas hacia afuera por el gas en expansión seguirán una trayectoria diferente a la de las especies iónicas. Más allá de unos pocos radios de distancia del núcleo, la presión de radiación del Sol y la fuerza gravitatoria solar colocarán las partículas en distintas zonas del espacio, dependiendo principalmente de su masa y tamaño. Esto forma la llamada cola de polvo, una estructura extensa que puede alcanzar longitudes del orden de 10.000 km en la mayoría de los casos, e incluso más en algunas experiencias espectaculares. Todas las colas de polvo residen en un sector del espacio detrás de la región nuclear, aunque debido a su proyección en el plano del cielo, pueden verse fuertemente deformadas por la perspectiva de visión. En general, estas estructuras siguen la dirección antisolar debido a que el polvo que las compone se ve afectado por la presión de radiación solar y se curvan siguiendo la dirección del movimiento del núcleo en su órbita alrededor del Sol, a diferencia de lo que sucede con la cola de gas.

■ COMA DE POLVO: ALGUNAS PERSPECTIVAS DE ESTUDIO

Los diferentes escenarios de formación para los cometas de largo y corto período tienen fuertes consecuencias en las abundancias y composición del gas y el polvo, y por lo tanto, en su actividad cometaria (Meech et al., 2009).

Uno de los métodos para estudiar la actividad de los cometas es

mediante el análisis fotométrico de su coma. Enfocándonos en el estudio del polvo, también conocido como material refractario, se utiliza particularmente el filtro fotométrico R para esta técnica de análisis. Este filtro está caracterizado por una longitud de onda efectiva de $\lambda_{ef} = 6407 \text{ \AA}$ y un ancho de $\Delta\lambda = 1580 \text{ \AA}$, lo que le permite abarcar menos características de emisión de gases y ser más sensible al polvo (Schleicher y Farnham, 2004). En ausencia de esta alternativa, como ocurre en algunos casos, también se puede utilizar el filtro fotométrico V, ya que las diferencias entre ambos filtros son menores.

Mediante esta técnica, se pueden obtener las magnitudes totales de los cometas, que representan el brillo combinado del núcleo y la coma, y que se calculan para determinar cuán brillante es un cometa. Esta cantidad, además, está estrechamente relacionada con un parámetro denominado Af_p, introducido por A'Hearn et al. (1984), que se utiliza para medir la actividad cometaria. A menudo se emplea para comparar la tasa de producción de polvo entre cometas, pero es importante tener en cuenta que implica parámetros de observación y físicos que pueden variar en los diferentes casos. Aunque no entraremos en el detalle de la matemática que implica el cálculo de este valor, como regla general, se asume que un valor grande de Af_p indica una alta actividad de polvo (Mazzotta Epifani et al., 2014b).

En la literatura se concluye que, dado que los cometas de largo período son objetos que nunca o rara vez han pasado por el Sistema Solar interior, suelen ser intrínsecamente más activos (valores de Af_p mayores) que los cometas de corto período (García et al., 2020; García et al., 2021). Los SPC, que han experimen-

tado varios pasajes por el Sistema Solar interior, tienen menos material disponible para sublimar debido a que este se ha ido agotando en acercamientos previos.

Debido a su menor actividad, la observación de los cometas de corto período fue históricamente menos interesante que la de los LPC: son más débiles, y las observaciones a simple vista solo podían revelar comas circulares, simples y colas cortas sin estructuras. Sin embargo, esto ha cambiado en la última década con la mejora de las técnicas observacionales y el instrumental disponible.

Las estructuras usualmente existentes en la coma cometaria están a menudo ocultas detrás de su distribución de brillo. En general, su presencia, ausencia, o incluso un cambio en su morfología, es el resultado de procesos físicos que actúan en el núcleo y de la interacción del cometa con su ambiente. Esta estrecha relación entre las estructuras vistas en la coma y el núcleo, cuyo análisis

conforma en sí mismo uno de los métodos de estudio de estos cuerpos celestes, puede ayudarnos a revelar propiedades del núcleo que no son fáciles de conocer al estar oculto, como el estado de rotación, su nivel de actividad, las propiedades del polvo y el gas, y otras características fundamentales acerca del cometa (Farnham, 2009).

Estas estructuras no son fácilmente distinguibles en las imágenes sin procesos de realce y mejora. Por ello, existen varias técnicas de procesamiento disponibles para este tipo de trabajo (por ejemplo, Samarasinha et al., 2006 y sus referencias). Sin embargo, dado que las estructuras presentes en las imágenes de cometas son de diversas clases, un mismo método de filtrado no siempre da el mismo resultado cuando se aplica a distintos objetos.

Un ejemplo del efecto del filtrado de imágenes de cometas puede verse en la Figura 5. En este caso, la imagen ha sido procesada con un filtro de renormalización azimutal

que, como su nombre lo indica, renormaliza el brillo de la imagen en cualquier punto con el valor medio de un anillo centrado en el núcleo del cometa. La imagen resultante tiene un contraste mejorado y permite detectar estructuras teniendo en cuenta el cambio general de brillo a medida que aumenta la distancia al núcleo cometario.

La imagen procesada del cometa C/2013 US10 muestra una estructura en forma de abanico (fan) producida por una amplia extensión de la coma proyectada radialmente hacia afuera desde el núcleo en una dirección aproximadamente opuesta al Sol. Según Sekanina (1991), estas estructuras están asociadas a un núcleo cuya oblicuidad es cercana a los 90° , lo que significa que el eje de giro está cerca del plano orbital del cometa. Debido a esto, su actividad se restringe a áreas de distancias angulares de no más de $\sim 45^\circ$ desde el polo iluminado por el Sol. La amplitud de dicha estructura podría estar relacionada con el tamaño del área activa en el núcleo y la distancia en-

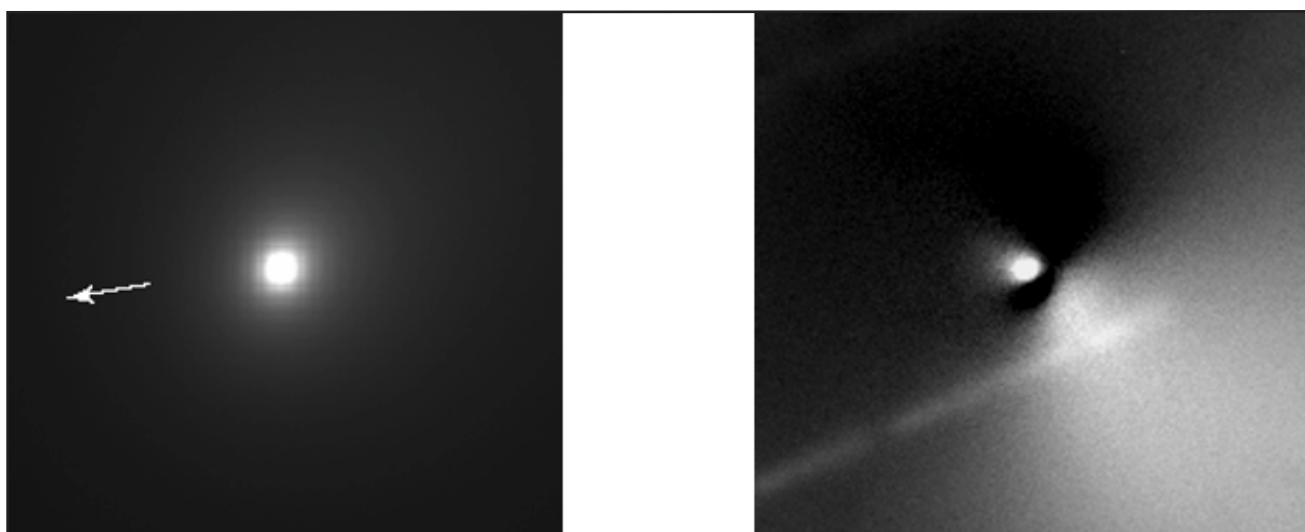


Figura 5: C/2013 US10 Catalina. Izquierda: imagen del cometa tras el proceso de reducción básica, que elimina defectos instrumentales. El Norte está hacia arriba y el Este a la izquierda. La flecha indica la dirección hacia el Sol. Derecha: imagen obtenida tras el proceso de filtrado para realzar el contraste de las estructuras de polvo ocultas. Se distingue una estructura en forma de abanico en dirección aproximadamente opuesta al Sol, además de una eyección colimada de material hacia abajo.

tre la fuente y el eje rotacional. Además, es posible distinguir también una eyección colimada de material (*jet*) hacia abajo.

Con el análisis morfológico, se obtiene entonces una idea de lo que podría estar sucediendo en el núcleo cometario, pero hasta este punto no es más que un análisis descriptivo. Es por ello que la información recaudada de este proceso de análisis de la actividad cometaria puede ser utilizada para obtener resultados más cuantitativos mediante lo que se denomina un modelado numérico. A continuación, se detallará a grandes rasgos qué implica este método de estudio de los cometas.

Como se mencionó anteriormente, las partículas de polvo son emitidas por el núcleo del cometa con una cierta distribución de tamaños y se ven afectadas por una gravedad efectiva reducida como resultado de la presión de radiación, siguiendo cierta ecuación de movimiento. Conociendo cómo se mueven las partículas de polvo, fue posible desarrollar un modelo que permita determinar la posición teórica de estas en el espacio, con el objetivo de simular numéricamente su comportamiento para obtener información valiosa sobre el núcleo cometario y su actividad a partir de una imagen generada sintéticamente.

A grandes rasgos, el modelo desarrollado permite calcular la posición y la intensidad de la luz dispersada por un conjunto de partículas eyectadas del núcleo del cometa para finalmente situarlas en una imagen simulada que se comparará con imágenes astronómicas reales.

Si bien es cierto que varios autores, como Fulle (2004) y Moreno et al. (2003) por mencionar algunos, han realizado con anterioridad códigos de simulación similares al que

se describirá a continuación -detallado en García et al. (2024a)-, la importancia de este modelo numérico para el modelado de comas y colas de polvo cometarias radica en que es el primero, y hasta ahora el único, elaborado en América Latina.

Para reproducir la imagen real del cometa es necesario tener en cuenta una gran variedad de parámetros. A varios de ellos se les asignan valores fijos al inicio del proceso de integración, pero otros tantos deben ajustarse adecuadamente para poder reproducir la imagen real.

Teniendo en cuenta esto, el modelo es capaz de calcular la geometría orbital del sistema cometa-Sol-Tierra. Se emiten partículas desde las regiones activas y se proyectan sus posiciones en un plano del cielo simulado. Las posiciones de las partículas se convierten luego en intensidad a través de un modelo de dispersión de Mie simple, que consi-

dera a los granos de polvo como esferas perfectas. La imagen simulada se produce finalmente de acuerdo con los parámetros de observación (tamaño, campo de visión, resolución) de la imagen real tomada desde Tierra utilizada como referencia.

A modo de ejemplo, en la Figura 6 se muestra el mejor modelo numérico logrado para el cometa C/2013 US10 (Catalina). Lo que se observa son las isofotas observadas (negro) y modeladas (rojo) del cometa.

A grandes rasgos, el resultado de la Figura 6 se logró al considerar un tiempo de integración (lapso de tiempo transcurrido desde la emisión de las partículas por el núcleo cometario hasta su posición en la imagen) de 64 días, con una velocidad de eyección de 200 m/s. El polvo se consideró que provenía mayormente de una emisión isotrópica, más la contribución de dos áreas activas con coordenadas (-60°, 160°) y

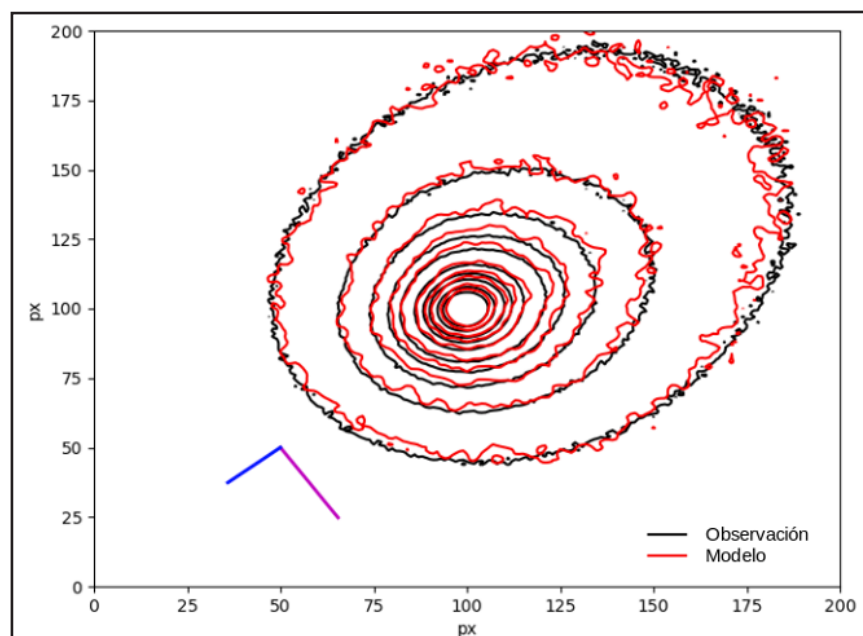


Figura 6: Modelado de la coma del cometa C/2013 US10 (Catalina). En color negro se muestra lo observado y en rojo el modelo calculado. La línea azul corresponde a la dirección al sol y la magenta es la dirección de movimiento.

(80°, 340°), correspondientes a las regiones observadas en la Figura 5.

Otro trabajo del mismo estilo fue realizado para el cometa C/2017 K2 (PanStarrs) y publicado recientemente por García et al. (2024b). En este caso, se pudo determinar el período de rotación del cometa, algo que resulta de gran complejidad para un cometa activo, y que además es un parámetro físico muy poco conocido para esta población de objetos del Sistema Solar.

■ EL PARTICULAR CASO DEL COMETA C/2023 A3 (TSUCHINSHAN-ATLAS)

C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) (Figura 7) es un cometa descubierto el 9 de enero de 2023 en el Obser-

vatorio de la Montaña Púrpura, en Nankín, al este de China. El nombre “Tsuchinshan” es la transcripción del chino mandarín para “Montaña Púrpura”. Sin embargo, 13 días más tarde, el programa de vigilancia ATLAS (las siglas en inglés de “Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System”) con su telescopio ubicado en Sutherland, Sudáfrica, lo “redescubrió” sin saber que ya había sido observado por los astrónomos chinos. Es por esto que el cometa también lleva las siglas “ATLAS” en su nombre. Su denominación completa incluye la letra “C”, que indica que es un cometa, y el año en que se observó por primera vez. “A3” hace referencia al orden de descubrimiento dentro de ese año: “A” por la primera quincena de enero y “3” por ser el tercer objeto observado en esa quincena.

C/2023 A3 es originario de la Nube de Oort y es un cometa hiperbólico, lo que significa que la excentricidad de su órbita es mayor a 1, por lo que su trayectoria es abierta. Esta es la primera y única vez que visita la región planetaria. Además, la inclinación de su órbita es de 139°, lo que lo convierte en un cometa retrógrado: su trayectoria alrededor del Sol es en sentido contrario al de los planetas. Un diagrama de su órbita puede verse en la Figura 8.

Este cometa, de aproximadamente 10 kilómetros de tamaño, ha sido apodado “el cometa del siglo” porque se cree que podría ser el más brillante del siglo XXI. La razón de esto es que su perihelio será a tan solo 0,39 (ua) del Sol. Además, el cometa realizará su máxima aproxi-



Figura 7: Cometa C/2023 A3 /Tsuchinshan-ATLAS) el 1 de Agosto de 2024 Credito: Con permiso de Pepe Cham-bó (<https://cometografia.es>).

mación a la Tierra, pasando a solo 0,56 (ua) de nuestro planeta, lo que significa que pasará a casi la mitad de la distancia que separa la Tierra del Sol.

Las predicciones sobre su brillo máximo varían considerablemente. Algunos modelos sugieren que podría llegar a ser 100 veces más brillante que el famoso cometa Hale-Bopp de 1997 (mostrado en la figura 3). Incluso las estimaciones más conservadoras consideran que podría superar el brillo de la mayoría de las estrellas del cielo nocturno.

■ COMETAS EN LA EXPLORACIÓN ESPACIAL

Antes de la era de las misiones espaciales, el estudio de los cometas se basaba principalmente en observaciones telescópicas desde la Tierra y en el análisis de sus efectos visibles en el cielo nocturno. Durante este período, el proceso de acumulación de observaciones y teorías permitió a los astrónomos comprender mejor las órbitas, la composición y las características de estos cuerpos celestes.

En el siglo XVIII, el matemático y astrónomo Pierre-Simon Laplace y el matemático Joseph-Louis Lagrange realizaron importantes contribuciones a la predicción de las órbitas de los cometas, utilizando las ecuaciones de movimiento de Newton para prever sus trayectorias. A medida que la tecnología de los telescopios mejoró en el siglo XIX, los astrónomos comenzaron a identificar cometas que regresaban con regularidad. Uno de los cometas más famosos, el cometa Halley, fue identificado por Edmond Halley en 1705. Halley notó que el cometa observado en 1682 tenía una órbita que se repetía cada 76 años, y su predicción de la próxima aparición del cometa en 1758 fue confirmada,

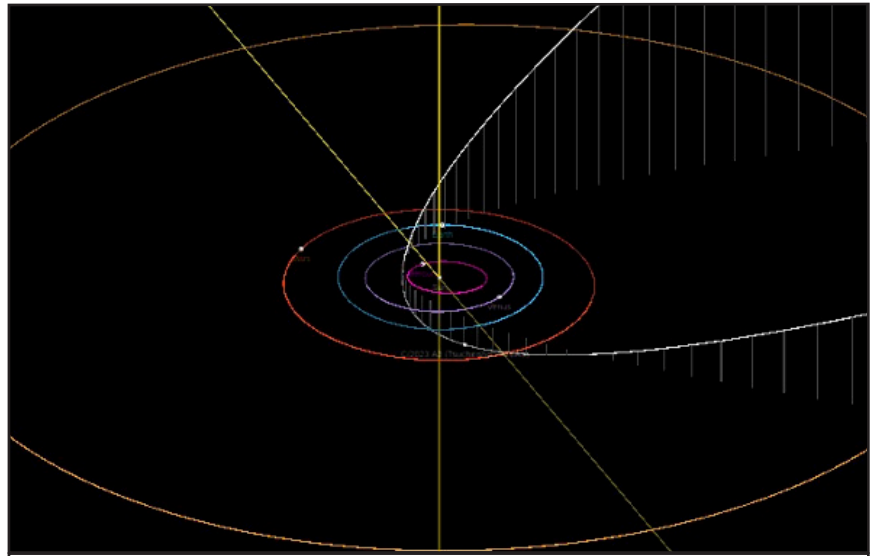


Figura 8: Órbita del cometa C/2023 A3 (en blanco) seguida en su paso por el Sistema Solar Interior. Los círculos de colores representan las órbitas de los planetas Mercurio, Venus, Tierra, Marte y Júpiter desde el centro hacia afuera. Fuente: JPL-Horizons - NASA.

estableciendo el primer caso conocido de un cometa periódico.

No fue sino hasta finales del siglo XX, que el comienzo de la era de las misiones espaciales transformó nuestra comprensión de los cometas, revelando detalles sobre su estructura, composición y comportamiento que antes eran inalcanzables. La misión Giotto de la Agencia Espacial Europea (ESA), lanzada en 1985, marcó un hito al ser la primera en estudiar directamente un cometa. Su objetivo principal, el cometa Halley, fue sobrevolado por la sonda el 13 de marzo de 1986, a una distancia de aproximadamente 596 kilómetros. Este acercamiento proporcionó las primeras imágenes de alta resolución del núcleo del cometa, revelando una superficie irregular y activa con géiseres de gas y polvo, lo que revolucionó la comprensión de estos cuerpos celestes al demostrar que son más complejos de lo que se pensaba.

Continuando con la exploración

de los cometas, la misión Stardust de la NASA, lanzada en 1999, se enfocó en el estudio del cometa Wild 2. En enero de 2004, Stardust realizó un sobrevuelo cercano, recogiendo muestras de polvo cometario y partículas del entorno interplanetario, que luego fueron traídas de vuelta a la Tierra en 2006. Este retorno de material permitió a los científicos analizar directamente los componentes de un cometa en laboratorio, ofreciendo información crucial sobre la composición de estos cuerpos y el origen de los compuestos orgánicos que podrían haber influido en la formación del Sistema Solar.

Una de las misiones más ambiciosas en la exploración de cometas fue la Rosetta de la ESA, lanzada en 2004. Tras un extenso viaje de 10 años, Rosetta llegó al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014. La misión no solo orbitó este cometa, sino que también desplegó un módulo de aterrizaje, Philae, que logró posarse en su superficie en noviembre de 2014. A pesar de

las complicaciones del aterrizaje, Rosetta proporcionó una enorme cantidad de datos valiosos, desde imágenes detalladas de la superficie hasta información sobre las emisiones y la actividad del cometa. Además, permitió estudiar la evolución del cometa mientras se acercaba al Sol, ofreciendo una visión sin precedentes de los procesos cometarios.

En 2005, la NASA lanzó la misión Deep Impact con el propósito de estudiar el cometa Tempel 1. Esta misión innovó al lanzar una sonda de impacto que colisionó con el núcleo del cometa, creando un cráter y liberando material del interior. El análisis de este material proporcionó nueva información sobre la estructura interna y la composición del cometa, ayudando a los científicos a entender mejor cómo se formaron y evolucionaron estos cuerpos celestes.

Finalmente, la misión NEOWISE de la NASA, lanzada en 2009, aunque originalmente diseñada para buscar asteroides y cometas cercanos a la Tierra, ha realizado observaciones significativas de numerosos cometas a lo largo del proyecto. Esta misión ha sido crucial en la identificación y seguimiento de cometas que se acercan a la Tierra, contribuyendo a la vigilancia de objetos potencialmente peligrosos y proporcionando datos valiosos sobre las características y comportamientos de estos viajeros cósmicos.

Si algo está claro, es que aún nos falta mucho por conocer de estos misteriosos objetos del sistema solar. A medida que la tecnología avanza, se espera que futuras misiones continúen explorando estos fascinantes cuerpos celestes, desvelando aún más secretos del cosmos.

Å (Angstrom): Unidad de medida de longitud igual a 10^{-10} metros, utilizada para medir longitudes de onda de radiación electromagnética y el tamaño de átomos y moléculas.

Campo de Visión: El área del espacio que un telescopio o instrumento de observación puede capturar en una sola imagen.

CH₄ (Metano): Un hidrocarburo simple compuesto por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno. Es un gas importante en la química atmosférica de algunos planetas y lunas.

CO (Monóxido de Carbono): Una molécula compuesta por un átomo de carbono y uno de oxígeno, común en el medio interestelar y en atmósferas planetarias.

CO₂ (Dióxido de Carbono): Un gas compuesto por un átomo de carbono y dos de oxígeno, importante en procesos como el efecto invernadero en planetas con atmósfera.

Disco Protoplanetario: Un disco de gas y polvo que rodea a una estrella joven, donde se forman los planetas y otros cuerpos del sistema solar.

Dispersión de Mie: Un tipo de dispersión de luz que ocurre cuando el tamaño de las partículas en un medio es comparable a la longitud de onda de la luz que atraviesa ese medio.

Excentricidad: Un parámetro que describe la desviación de una órbita respecto a un círculo. Una excentricidad de 0 indica una órbita circular, mientras que valores más altos indican órbitas más elongadas.

Filtro fotométrico: Dispositivo óptico utilizado en astronomía para se-

leccionar y medir la intensidad de la luz en un rango específico de longitudes de onda del espectro electromagnético. Los filtros fotométricos permiten a los astrónomos observar y analizar la luz emitida por los objetos celestes en diferentes bandas de color, lo que ayuda a obtener información detallada sobre sus propiedades físicas, composición y estructura.

Fuerza Gravitatoria Solar: La atracción gravitacional ejercida por el Sol sobre los cuerpos del sistema solar, que mantiene sus órbitas.

Iones: Átomos o moléculas que han perdido o ganado uno o más electrones, adquiriendo una carga eléctrica. Son comunes en plasmas y en las atmósferas de cuerpos celestes.

Inclinación Orbital: El ángulo entre el plano de la órbita de un cuerpo celeste y el plano de referencia, como el plano eclíptico en el caso de los planetas en el sistema solar.

Ionosfera: La capa de la atmósfera de un planeta que contiene una alta concentración de iones y electrones libres, afectada por la radiación solar.

Isofota: Línea en una imagen que conecta puntos de igual brillo o intensidad luminosa. Las isofotas se utilizan para analizar y representar la distribución de luz en objetos astronómicos, como galaxias, estrellas y cometas. Al trazar estas líneas en una imagen, es posible visualizar cómo varía el brillo en diferentes regiones del objeto, lo cual es útil para estudiar su estructura, morfología y características físicas. Las isofotas son análogas a las líneas de contorno en un mapa topográfico, pero en lugar de representar altura, representan niveles de brillo constante.

Longitud de Onda: La distancia entre dos puntos equivalentes en ciclos sucesivos de una onda, como de cresta a cresta o de valle a valle. Se utiliza para describir la naturaleza de las ondas electromagnéticas, sonoras y de otros tipos. Se mide generalmente en metros (m), aunque para ondas de luz, es común usar nanómetros (nm) o angstroms (Å).

Longitud de Onda Efectiva: La longitud de onda específica a la que un instrumento o detector es más sensible, utilizada para caracterizar la radiación electromagnética.

Materiales Refractarios: Sustancias que resisten temperaturas extremadamente altas sin descomponerse. En el contexto espacial, se refiere a los componentes que no se evaporan fácilmente en las condiciones del sistema solar primitivo.

Momento: Magnitud vectorial que describe el efecto de una fuerza aplicada a un objeto en términos de su capacidad para causar rotación o movimiento alrededor de un punto o eje.

Nubes Moleculares: Regiones del espacio donde el gas y el polvo se agrupan en densas concentraciones, permitiendo la formación de estrellas y planetas. Están compuestas principalmente de hidrógeno molecular (H₂).

Órbitas Retrógradas: Órbitas en las que un cuerpo celeste se mueve en dirección opuesta a la rotación principal del sistema, como ocurre con algunos satélites o cometas.

Paralaje: Desplazamiento aparente en la posición de un objeto cuando se observa desde dos puntos diferentes. En astronomía, se refiere al cambio aparente en la posición de una estrella u otro objeto celeste debido

al movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Este efecto se utiliza para medir distancias a estrellas cercanas, basado en el ángulo de desplazamiento observado.

Perihelio: El punto en la órbita de un cuerpo celeste en el que está más cerca del Sol. Es opuesto al afelio, el punto más alejado.

Planetesimales: Pequeños cuerpos sólidos que se formaron en el disco protoplanetario alrededor de una estrella joven. Son los bloques de construcción de los planetas, ya que, a través de colisiones y acreción, estos planetesimales se agrupan y forman protoplanetas y, eventualmente, planetas completos. Su tamaño varía desde unos pocos metros hasta varios kilómetros de diámetro.

Plano Eclíptico: El plano que contiene la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Sirve como referencia para medir las inclinaciones orbitales de otros cuerpos del sistema solar.

Presión de Radiación del Sol: La fuerza ejercida por la radiación solar sobre los cuerpos en el espacio, que puede afectar la trayectoria de partículas y cometas.

Radiación Térmica: La energía emitida por un cuerpo debido a su temperatura, en forma de ondas electromagnéticas. Es fundamental en el estudio de la temperatura y composición de cuerpos celestes.

Resolución: La capacidad de un sistema óptico para distinguir detalles finos y separar objetos cercanos en una imagen.

Silicato: Un tipo de mineral compuesto de silicio y oxígeno, comúnmente encontrado en la corteza terrestre y en cuerpos rocosos del sistema solar.

Unidades Astronómicas (ua): Unidad de medida que equivale a la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, aproximadamente 149,6 millones de kilómetros. Se utiliza para expresar distancias dentro del sistema solar.

Viento Solar: Un flujo continuo de partículas cargadas, principalmente protones y electrones, emitido por la corona solar. Influye en la magnetosfera de la Tierra y en la formación de colas cometarias.

■ REFERENCIAS

A'Hearn, M.F., Schleicher, D.G., Millis, R.L., Feldman, P.D., Thompson, D.T., 1984. Comet Bowell 1980b. *Astronomical Journal* 89, 579–591.

Alfvén, H., 1957. On the theory of comet tails. *Tellus* 9, 92.

Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Colom, P., Crovisier, J., Henry, F., Lellouch, E., Winnberg, A., Johansson, L.E.B., Gunnarsson, M., Rickman, H., Rantakyö, F., Davies, J.K., Dent, W.R.F., Paubert, G., Moreno, R., Wink, J., Despois, D., Benford, D.J., Gardner, M., Lis, D.C., Mehringer, D., Phillips, T.G., Rauer, H., 2002. The 1995 2002 Long-Term Monitoring of Comet C/1995 O1 (HALE BOPP) at Radio Wavelength. *Earth Moon and Planets* 90, 5–14.

Edgeworth, K.E., 1949. The origin and evolution of the Solar System. *Monthly Notices of the RAS* 109, 600–609.

Farnham, T.L., 2009. Coma morphology of Jupiter-family comets. *Planetary Space Science* 57, 1192–1217.

Fernandez, J.A., 1980. On the exis-

- tence of a comet belt beyond Neptune. *Monthly Notices of the RAS* 192, 481–491.
- Fernández, J.A., Brunini, A., 2000. The Buildup of a Tightly Bound Comet Cloud around an Early Sun Immersed in a Dense Galactic Environment: Numerical Experiments. *Icarus* 145, 580–590.
- García, R.S., Gil-Hutton, R., García-Migani, E., 2020. Observational results for five short-period and five long-period comets. *Planetary Space Science* 180, 104779.
- García, R.S., Gil-Hutton, R., 2021. Photometry of four long-period comets. *Planetary Space Science* 206, 105308.
- García, R.S., Fernández-Lajús, E., Di Sisto, R.P., Gil-Hutton, R.A., 2024a. Photometric and numerical study of comet C/2021 A1 (Leonard) near its estimated disruption date. *Icarus* 420, 116206.
- García, R.S., Fernández-Lajús, E., Di Sisto, R.P., Gil-Hutton, R.A., 2024b. Photometry, rotation period determination and dust coma numerical study of comet C/2017 K2 (PanStarrs). *Icarus* 422, 116267.
- Jewitt, D., Luu, J., 1993. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB 1. *Nature* 362, 730–732.
- Keller, H.U., Kührt, E., 2020. Cometary Nuclei—From Giotto to Rosetta. *Space Sci Rev* 216, 14.
- Levison, H.F., 1996. Comet Taxonomy, in: Rettig, T., Hahn, J.M. (Eds.), *Completing the Inventory of the Solar System*, pp. 173–191.
- Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Di Fabrizio, L., Dall’Ora, M., Palumbo, P., Snodgrass, C., Licandro, J., Della Corte, V., Tozzi, G.P., 2014b. Observational results for eight long-period comets observed far from the Sun. *Astronomy and Astrophysics* 561, A6. Doi:10.1051/0004-6361/201321290.
- Meech, K.J., Pittichová, J., Bar-Nun, A., Notesco, G., Laufer, D., Hainaut, O.R., Lowry, S.C., Yeomans, D.K., Pitts, M., 2009. Activity of comets at large heliocentric distances pre-perihelion. *Icarus* 201, 719–739.
- Oort, J.H., 1950. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bulletin Astronomical Institute of the Netherlands* 11, 91–110.
- Samarasinha, N.H., Larson, S., Besore, E., 2006. Application of Image Enhancement Techniques to Comets: A Critical Analysis, in: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #38*, p. 537.
- Schleicher, D.G., Farnham, T.L., 2004. Photometry and imaging of the coma with narrowband filters. pp. 449–469.
- Sekanina, Z., 1991. Randomization of Dust-Ejecta Motions and the Observed Morphology of Cometary Heads. *Astronomical Journal* 102, 1870.
- Smoluchowski, R., Torbett, M., 1984. doi:10.1038/311038a0.
- Tancredi, G., 2014. A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters. *Icarus* 234, 66–80. doi:10.1016/j.icarus.2014.02.013.
- Weidenschilling, A.H., 2004. Collisional and Dynamical Evolution of Planetary Systems. NASA STI/Recon Technical Report N.

EL IMPACTO DE LA COMPUTACIÓN DE ALTO DESEMPEÑO EN LA ASTRONOMÍA ARGENTINA: Desafíos, Avances y Perspectivas

Palabras clave: Astronomía Computacional, Computación de Alto Desempeño (CAD), Desarrollo científico y económico.

Key words: Computational Astronomy, High-Performance Computing (HPC), Scientific and Economic Development.

En Argentina, numerosos grupos de investigación en astronomía se dedican al análisis de grandes volúmenes de datos observacionales y a la formulación de modelos teóricos que requieren el uso de la Computación de Alto Desempeño (CAD). La astronomía computacional ha sido un motor clave en el avance de esta disciplina en las últimas décadas. Este artículo analiza el impacto fundamental de la CAD en la astronomía argentina, destacando los avances logrados, los desafíos actuales y las perspectivas futuras. Se analizan los problemas que enfrentan los grupos de investigación dado el acceso limitado a equipos avanzados y la rápida obsolescencia del hardware disponible. Se subraya la necesidad urgente de inversiones sostenidas en infraestructura de CAD para garantizar la competitividad científica a nivel internacional y maximizar el retorno económico y científico. Además, se examina cómo la astronomía computacional contribuye al desarrollo económico a través de la transferencia de tecnologías avanzadas y la formación de talento. También se discuten desafíos críticos como la imprevisibilidad de inversiones y la dificultad para retener personal altamente capacitado. Estos problemas limitan la competitividad y la autonomía científica del país. Finalmente, se destaca la adquisición de la supercomputadora Clementina XXI como un avance clave, cuyo éxito dependerá de las políticas adoptadas por las comunidades científica para asegurar su uso óptimo y su renovación continua.

■ **Dante Paz**^{*1,2,3},
Antonio J. Russo ^{**4},
Nicolás Wolovick^{3,5},
Maximiliano Bozzoli^{***6}

1: Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, Universidad Nacional de Córdoba (UNC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

2: Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC

3: Centro de Computación de Alto Desempeño, UNC 4: École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

5: Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC

6: Centro de Investigaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades, UNC – CONICET

E-mail: * dpaz@unc.edu.ar

** antonio.russo@epfl.ch

*** maxibozzoli@ffyh.unc.edu.ar

The Impact of High-Performance Computing on Argentine Astronomy: Challenges, Advances, and Perspectives

In Argentina, numerous research groups in astronomy are dedicated to analyzing large volumes of observational data and formulating theoretical models that require the use of High-Performance Computing (HPC). Computational astronomy has been a key driver in the advancement of this discipline over the past decades. This article examines the fundamental impact of HPC on Argentine astronomy, highlighting the achievements, current challenges, and future prospects. The issues faced by research groups due to limited access to advanced equipment and the rapid obsolescence of available hardware are analyzed. The urgent need for sustained investments in HPC infrastructure is emphasized to ensure scientific competitiveness at an international level and to maximize economic and scientific returns. Additionally, the article explores how computational astronomy contributes to economic development through the transfer of advanced technologies and talent formation. Critical challenges, such as the unpredictability of investments and the difficulty in retaining highly skilled personnel, are also discussed. These issues limit the country's competitiveness and scientific autonomy. Finally, the acquisition of the Clementina XXI supercomputer is highlighted as a key advancement, whose success will depend on the policies adopted by the scientific community to ensure its optimal use and continuous renewal.

■ 1.ASTRONOMÍA COMPUTACIONAL EN ARGENTINA

Uno de los aspectos en los que la astronomía argentina se destaca a nivel internacional es su contribución a la Astrofísica teórica. En Argentina, existe un número notable de grupos de investigación dedicados a la formulación de modelos y al desarrollo de teorías que permiten comprender la naturaleza de diversos fenómenos astrofísicos e interpretar observaciones de una amplia variedad de objetos en el universo. Dada la complejidad de estos fenómenos y la gran cantidad de datos disponibles, durante los últimos cincuenta años la astronomía computacional ha sido un motor clave en el avance de las investigaciones teóricas, tanto en Argentina como a nivel mundial. Aunque la astronomía computacional comenzó como una herramienta complementaria al cálculo analítico en el desarrollo de teorías, en la actualidad es difícil concebir la observación astronómica sin el uso intensivo de recursos computacionales. De esta manera, podríamos decir que la computación es una disciplina fundamental que abarca todas las prácticas astronómicas.

Nuestra perspectiva desde Argentina, y particularmente desde la provincia de Córdoba, ha sido profundamente influenciada por la visión pionera del Dr. José Luis Sérsic. A principios de los años ochenta, el Dr. Sérsic comenzó a incorporar experimentos numéricos en sus investigaciones, lo que culminó en la fundación del Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (IATE). El término *experimental* resalta, de manera algo controvertida, un aspecto epistemológico distintivo de la astronomía: a diferencia de disciplinas como la física y la química, la astronomía no dispone de una noción de experimentación en el sentido tradicional.

En astronomía, por un lado, la experimentación *débil* o no estricta se limita a la manipulación de señales provenientes de los fenómenos astrofísicos (observación astronómica), como así también a la intervención en los instrumentos y piezas de equipo disponibles. En la actualidad, estos últimos intermedian notablemente entre el sujeto epistémico y su objeto de estudio. Por otro lado, tales prácticas interventivas están presentes en un espacio teórico de parametrización, mediante lo que se conoce como experimentos numéricos y simulaciones computacionales. Esto resulta de crucial importancia, ya que realizar experimentos directos o estrictos para chequear teorías sobre la formación y evolución de objetos astronómicos, como planetas, estrellas o galaxias, está fuera del alcance humano. En otras palabras: *la experimentación galáctica es una cuestión inherente a la ciencia ficción, mientras que la experimentación extragaláctica podría considerarse un mal chiste* [5].

Cabe destacar que los experimentos numéricos y las simulaciones permiten, entre otras funciones epistémicas, interpretar las observaciones convencionales en el contexto de diversas teorías y modelos astrofísicos. Además de ayudar a comprender cómo las señales emitidas por estos objetos interactúan con los diversos sistemas de observación, las simulaciones permiten validar y esclarecer la situación o escenario observacional ante un problema astrofísico concreto. En las últimas décadas, las simulaciones se han desarrollado considerablemente y han dejado de ser meras "tritadoras de números" para convertirse en herramientas insustituibles de la práctica observacional. La computación desempeña así un papel fundamental en los laboratorios astronómicos actuales. Las simulaciones establecen enlaces claves en el procesamiento

de la información astrofísica disponible, propiciando una interacción entre datos observacionales y datos simulados. La observación mediante instrumentos tradicionales y las simulaciones computacionales resultan más que complementarias en las prácticas recientes de la astronomía. De esta manera, podría considerarse que cierto tipo de observaciones serían posibles a través de simulaciones particulares [2].

Antes de profundizar más, ofrecemos un breve contexto histórico. Cabe destacar que no pretendemos ofrecer un relato exhaustivo ni contamos con una formación especializada en historia; por lo tanto, nuestro enfoque se basa en experiencias locales y no abarca un compendio integral de la historia de ésta disciplina. Esta práctica computacional en astronomía tiene sus raíces en la aproximación numérica del movimiento de cuerpos celestes, crucial para la navegación y el cálculo de efemérides. Desde entonces, ha evolucionado significativamente, especialmente con la introducción de computadoras electrónicas digitales durante la Segunda Guerra Mundial, que rápidamente se aplicaron a la Astrofísica. En la década de 1950, estas tecnologías permitieron los primeros modelos de estructura estelar y el desarrollo de métodos numéricos para simular fluidos y capturar choques, fundamentales para comprender fenómenos astrofísicos complejos. En la década del ochenta, con la introducción de las microcomputadoras, el campo se revolucionó a nivel mundial. En el Observatorio de Córdoba, el uso de equipos de cómputo fue un proceso gradual y clave para el avance de la astronomía en la región, que coincidió de manera muy oportuna con el desarrollo de la comunidad internacional, siendo Argentina uno de los países pioneros en estas nuevas líneas de investigación. Bajo la

visión de José Luis Sérsic, se promovió fuertemente la innovación tecnológica. El primer equipo adquirido por el Dr. Sérsic que jugó un rol importante fue la Apple II (ver panel izquierdo Figura 1), que permitió la visualización gráfica de datos astronómicos, un recurso invaluable para la época. Luego, se incorporaron sistemas operativos como CP/M, adaptados para mejorar las capacidades de la Apple II, lo que representó un paso adelante en la flexibilidad y potencia de estas máquinas. Posteriormente, el IBM 4331 del Centro de Cálculo de la Universidad Nacional de Córdoba [1], permitió a los investigadores correr simulaciones complejas, cuyos datos luego se transportaban físicamente al observatorio para su procesamiento. La adquisición de la Olivetti M20 marcó otro hito, facilitando cálculos básicos, mientras que la llegada del IBM PC XT supuso una mejora significativa en la capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos. Finalmente, la compra de la MicroVAX II (ver panel derecho Figura 1), apoyada por la persistente gestión

del Dr. Sérsic y otros miembros del equipo, como el Dr. Diego García Lambas, revolucionó la capacidad de simulación del observatorio, permitiendo estudios avanzados de colisiones de galaxias y la dinámica de cuerpos múltiples. Con estos avances, el Observatorio de Córdoba se posicionó como un centro pionero en la computación astronómica en Argentina, siempre impulsado por la visión estratégica del Dr. Sérsic y el entusiasmo del equipo que lideraba.

De este modo, se podría afirmar que el Dr. Sérsic fue uno de los primeros en vislumbrar la importancia que la computación adquiriría con el tiempo en astronomía, anticipándose incluso décadas antes de que la Unión Astronómica Internacional (UAI) reconociera explícitamente la relevancia de esta área. En agosto de 2015, la UAI estableció la Comisión B1, denominada *"astrofísica computacional"*, en reconocimiento a la importancia crucial que la computación ha asumido en las diversas ramas de la astronomía moderna. Su papel es tan preponderante que

resulta prácticamente impensable concebir un proyecto astronómico de gran envergadura que no requiera un uso intensivo de técnicas y recursos de computación de alto desempeño. La astronomía computacional ha emergido como una herramienta indispensable para el desarrollo de modelos teóricos complejos, tales como simulaciones cosmológicas, estudios de la dinámica de sistemas planetarios, simulaciones magnetohidrodinámicas del medio interestelar y de la atmósfera solar y estelar, entre otros. Asimismo, es una herramienta invaluable para la adquisición, procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos observacionales.

En relación con esto, cabe destacar ejemplos notables como la obtención de la primera imagen de un agujero negro supermasivo por el Event Horizon Telescope (EHT), en el núcleo de la galaxia M87. Las simulaciones numéricas jugaron un papel fundamental en la observación y construcción de la imagen de este objeto. Utilizando teorías ba-



Figura 1: Izquierda: Una de las Apple II de Sérsic, antes (inserto) y después de ser restauradas por Victor Renzi y Horacio Rodríguez (IATE). Un niño disfruta de Pac-Man durante la Noche de los Museos 2019 de la UNC (aunque, seguramente, no se usaban para eso en su época). Derecha: Uno de los autores (Paz) posa, no por vanidad, sino para dar una escala humana, con la MicroVAX II (curiosamente, no hallamos fotos históricas de este equipo) al lado de una terminal DEC-VT220 en el IATE (agosto 2024). En el inserto se muestran detalles del panel de este mainframe y de la terminal VT220 usada para accederlo.

sadas en la relatividad general y la magnetohidrodinámica de plasmas, se realizaron simulaciones que permitieron modelar el disco de acreción alrededor del agujero negro y su emisión, así como las distorsiones en las señales que detectaría el EHT provocadas por la intensa gravedad. Este enfoque proporcionó un marco teórico para la interpretación de los datos observacionales recogidos por las diferentes antenas del EHT distribuidas por todo el mundo. Al comparar las imágenes generadas por simulaciones con las observaciones reales, se pudo validar y ajustar los parámetros necesarios para reconstruir la imagen observada del agujero negro. Este proceso ilustra claramente la interacción y dependencia mutua entre la observación y las simulaciones computacionales en la astrofísica moderna [10, 3].

Otro ejemplo notable es el relevamiento del cielo que llevará a cabo el Observatorio Vera Rubin mediante el Large Synoptic Survey Telescope (LSST). Este instrumento generará aproximadamente 20 terabytes de datos cada noche, lo que equivale a más de 200,000 imágenes al año. Esta masiva cantidad de datos será procesada en tres etapas: alertas en tiempo real, productos diarios y productos anuales. Se estima que los requisitos informáticos para gestionar esta información alcanzarán los 250 TFLOPS¹ de capacidad de procesamiento y 100 petabytes² de almacenamiento.

La importancia de la astronomía computacional en Argentina puede ilustrarse a través del análisis de la producción científica. En los últimos cinco años (desde enero de 2020 hasta agosto de 2024), al buscar autores afiliados a instituciones argentinas en la base de datos Astrophysics Data System (ADS)³, se identificaron más de 1.700 artículos publicados en revistas internacio-

nales con referato. Al examinar las palabras clave, seleccionadas por los autores para describir y clasificar estos trabajos científicos, se observa que el término más utilizado es *métodos numéricos* (107), seguido de términos relacionados con áreas fundamentales de la astronomía, como cúmulos de galaxias (86), astronomía de rayos X (81), entre otros. Si además en la búsqueda se añaden trabajos que mencionen en el resumen las palabras *numérico* o *simulaciones* obtenemos 548 trabajos (un 30 % de toda la producción nacional).

Este patrón no es exclusivo de Argentina. A nivel mundial, durante el mismo período, se registraron 150,000 artículos en la base de datos ADS. Nuevamente el término más frecuentemente utilizado para describir a estos trabajos es *métodos numéricos* (5,800), seguido luego por tópicos de importancia central para la astronomía como el sistema solar (4,700), astronomía de rayos X (4,200), galaxias activas (3,700) y análisis de datos (3,700), entre otros. Nuevamente si se pide investigaciones en cuyo resumen aparezca los términos *numérico* o *simulaciones* obtenemos 47,000 publicaciones, nuevamente un 30 %. Este pequeño análisis estadístico pone de relieve la relevancia fundamental que tiene el análisis numérico respecto a temas fundamentales de esta ciencia. Es por ello que podemos concluir que la computación es la herramienta fundamental para la producción científica, tanto en Argentina como en la comunidad astronómica internacional.

■ 2. IMPACTO DE LA ASTRONOMÍA COMPUTACIONAL EN LA ECONOMÍA

La astronomía computacional, una disciplina que integra la física teórica, la astronomía y la computación

para simular, modelar y analizar fenómenos del universo, puede parecer, a primera vista, alejada de los desafíos inmediatos de una economía como la Argentina, caracterizada por una fuerte dependencia de los bienes primarios. Sin embargo, su impacto en el desarrollo productivo y económico del país puede ser significativo en diversos aspectos. En el contexto actual, donde existe un consenso creciente en la sociedad sobre la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos públicos con miras a un desarrollo sustentable que contribuya a elevar los niveles de vida, es importante destacar las siguientes ventajas de la astronomía computacional:

- **Tecnología avanzada:** La astronomía computacional impulsa el desarrollo de tecnologías de alta complejidad, que pueden transferirse a otros sectores de la economía, como la industria petrolera (las simulaciones geofísicas utilizan métodos numéricos desarrollados en el ámbito de las ciencias básicas como la astronomía, e.g. métodos de elementos finitos [7], la inteligencia artificial y la ciencia de datos [6], fomentando la innovación y diversificación de la matriz productiva).
- **Formación de talento:** La investigación en astronomía computacional requiere la formación de científicos altamente capacitados, lo que contribuye al fortalecimiento del capital humano en áreas clave como la ingeniería, la física y la matemática. Este conocimiento especializado puede ser aprovechado por otros sectores estratégicos del país (minería, meteorología, biotecnología).
- **Atracción de inversiones:** La participación en proyectos

científicos de envergadura internacional, donde la astronomía computacional juega un rol fundamental, puede posicionar a la Argentina como un actor relevante en el ámbito científico global, atrayendo inversiones y promoviendo la cooperación en ciencia y tecnología con otras naciones desarrolladas [9].

- **Agricultura Sustentable:** Los métodos desarrollados en astronomía computacional para simular sistemas complejos también pueden ser aplicados a problemas globales como la gestión eficiente del agua en agricultura permitiendo optimizar el riego y la fertilización, lo que reduce el uso excesivo de recursos y minimiza el impacto ambiental [11].
- **Economía del conocimiento:** Las metodologías y herramientas desarrolladas en astrofísica computacional, como los algoritmos de simulación y análisis de grandes volúmenes de datos, son aplicables a la economía del conocimiento (y a la industria financiera), un sector en expansión a nivel mundial [4].
- **Seguridad nacional:** El análisis de fenómenos espaciales también puede contribuir a la defensa nacional y la seguridad espacial, como la predicción de tormentas solares que podrían afectar las comunicaciones y la infraestructura de un país⁴.

En resumen, la astrofísica computacional influye en el desarrollo de un país al impulsar la innovación tecnológica, formar capital humano avanzado, diversificar la economía, promover la colaboración internacional y enriquecer la cultura científica. Su impacto en la moderniza-

ción de la infraestructura científica y tecnológica del país puede llegar a ser considerable. Analizando los ejemplos presentados en esta sección es claro que esta disciplina tiene un gran potencial para generar beneficios a largo plazo en diversas áreas. Con una inversión inicial relativamente baja, se contribuiría de manera significativa a la construcción de una economía más moderna y basada en el conocimiento.

■ 3. COMPUTACIÓN DE ALTO DESEMPEÑO: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

En 2016, el informe “*Computación de Alto Desempeño: Estado del Arte en Argentina y en los Países del G20*”, elaborado por Antonio J. Russo para el Centro de Computación de Alto Desempeño de la Universidad Nacional de Córdoba (CCAD-UNC)⁵, presenta un análisis detallado sobre el estado de esta disciplina en Argentina en comparación con el resto de los países del G20, y propone estrategias para fortalecer el sector en el país. El informe destacaba la importancia de las supercomputadoras (término que vamos a definir en esta sección) para mantener la competitividad científica y económica, subrayando la necesidad urgente de realizar inversiones estratégicas que permitan cerrar la brecha tecnológica en Argentina. Aunque desde entonces se han producido ciertos avances, muchos de los conceptos y perspectivas planteados en ese documento siguen siendo relevantes y han influido significativamente en el enfoque que presentamos en este artículo.

Para comenzar, es útil tomar la definición del término *Computación de Alto Desempeño* (CAD, o HPC por sus siglas en inglés). Según Russo, este término abarca tanto ciertas prácticas en ingeniería de software como la descripción de ti-

pos específicos de infraestructuras de hardware. En otras palabras, *la computación de alto rendimiento generalmente se refiere a la práctica de combinar poder de cómputo de manera que ofrezca un rendimiento mucho mayor que el de una computadora de escritorio o estación de trabajo típica, con el objetivo de resolver grandes problemas en ciencia, ingeniería o negocios* (Dr. Dongarra, premio Turing 2021 por sus contribuciones a la CAD).

Ampliando esta definición, Russo sugiere que la CAD es una práctica que implica concebir, desarrollar e instalar sistemas de computación especializados en el tratamiento de problemas industriales o académicos complejos. A estos sistemas los llamaremos clústeres computacionales, los cuales deben poseer la capacidad de:

1. Realizar miles de millones de operaciones de coma flotante por segundo (operaciones aritméticas por segundo, FLOPS).
2. Almacenar varios terabytes de datos y acceder a ellos rápidamente, con un rendimiento comparable al de un dispositivo de almacenamiento masivo en un ordenador personal.
3. Paralelizar tareas entre los procesadores disponibles y comunicar los cambios de estado en tiempo real de manera eficiente y escalable.
4. Opcionalmente, visualizar representaciones tridimensionales de los resultados obtenidos a partir de los cálculos.

De esta manera, un clúster computacional, o clúster de cálculo, se define como una infraestructura informática que reúne las capacidades mencionadas anteriormente.

Si analizamos la definición anterior, vemos que esta dada en términos cuantitativos, es decir en cantidades de cálculos que el sistema debe realizar en paralelo y por unidad de tiempo, así como la cantidad de datos que los clústeres deben manejar y almacenar. Es por esto, que la definición de clúster tiene sentido dentro de un contexto de desarrollo tecnológico específico. Lo que hoy en el mercado informático es un equipamiento muy poderoso, en unos años ya no lo será. Es por esta razón que en general se reserva el término "supercomputadora" para aquellos sistemas que en un determinado año, son los más poderosos del mercado en términos de capacidad de cómputo y manejo de volúmenes de datos. En este sentido, se ha establecido a nivel internacional la lista Top500⁶, la cual clasifica los 500 clústeres computacionales más rápidos del mundo, evaluándolos mediante la ejecución de una única prueba de rendimiento que mide la cantidad de FLOPS alcanzados. En un sentido estricto podríamos decir que una supercomputadora es alguno de estos 500 sistemas en un dado año. Por supuesto uno podría relajar este criterio y llamar supercomputadora a sistemas con potencias de cómputo similares a las de esta lista, no obstante a ello, el listado del Top500 nos sirve como una referencia móvil del estado de arte en CAD y cuan competitivo es un recurso de cómputo.

Teniendo en cuenta lo que hemos discutido hasta ahora, podríamos preguntarnos si la única diferencia entre los sistemas hogareños y los equipos de cómputo científico de alto desempeño radica únicamente en la escala. Es decir, ¿un equipo de CAD es simplemente una PC rápida y grande o un simple arreglo de PCs poderosos interconectados? Para responder a esta pregunta, hay detalles importantes que debemos desta-

car y que son fundamentales para la práctica científica.

En general, los clústeres computacionales están contruidos con hardware diseñado para soportar un uso constante e intensivo. Estos equipos deben operar al 100 % de su capacidad las 24 horas del día, los 365 días del año, durante varios años, y deben ser tolerantes a fallos. Están equipados con fuentes de alimentación redundantes y, aunque su consumo eléctrico es más eficiente que el de un equipo doméstico, la potencia consumida es considerablemente mayor que la de cualquier PC de escritorio. Además, cuentan con sistemas de refrigeración interna (en el chasis de los equipos) y en las salas donde se instalan (refrigeración por aire o por agua). Estos sistemas de refrigeración son críticos, es decir, no pueden fallar y, por ello, también deben ser redundantes.

La precisión numérica de los cálculos en estos sistemas es generalmente de doble precisión (los números se representan en variables de coma flotante de 64 bits), algo innecesario en equipos domésticos. Las memorias RAM en estos sistemas incluyen tecnología de corrección de errores, una característica que no es esencial en equipos de escritorio. Los sistemas de almacenamiento utilizan múltiples unidades de discos duros para incrementar la velocidad de almacenamiento de datos, al tiempo que los datos se almacenan de forma redundante, lo que permite reemplazar las unidades defectuosas sin perder información. También se diferencian en el ancho de banda de acceso a memoria, ya que un equipo de CAD permite tener entre 8 y 12 canales de comunicación a RAM, mientras que una PC solo llega a 2.

Considerando todos estos aspectos, es decir, la robustez y durabilidad del hardware, la confiabilidad

de almacenamiento, fiabilidad numérica y potencia de cálculo, se hace evidente la importancia del CAD para disciplinas científicas como la astronomía.

Una analogía que podríamos utilizar para ilustrar lo que hemos intentado explicar hasta ahora es la de una empresa de logística. Imaginemos que nuestra investigación científica, ya sea la realización y análisis de una simulación cosmológica del universo o el estudio de la dinámica de la atmósfera solar, es un problema que requiere miles de millones de cálculos, para miles de millones de elementos, representando partículas de materia oscura o elementos del plasma solar, por ejemplo.

Nuestra empresa de logística necesita transportar cada una de las operaciones matemáticas, que podríamos visualizar como paquetes, desde un origen, que podríamos llamar "Ciudad Condición Inicial", hasta un destino a varios kilómetros de distancia en el tiempo de usuario, que sería la "Ciudad Dato Final". Nuestra intención es recorrer el camino (realizar nuestra simulación) lo más rápido posible, y podría parecer tentador comprar un Ferrari o un Lamborghini u otro automóvil deportivo que alcance altas velocidades. Sin embargo, en un biplaza descapotable caben pocas cajas, y existe el riesgo de que se caigan en el camino. Además, es sabido que estos motores deportivos están diseñados para desarrollar alta potencia en los ratos de ocio de algún millonario propietario, pero no están pensados para realizar largos viajes como de Córdoba a Mar del Plata con toda la familia cada año, y menos aun el transporte de cargas.

De manera análoga, podríamos considerar que la "PC gamer" más potente que podamos conseguir es como un automóvil deportivo. Para

no extendernos más en esta analogía, la elección obvia de cualquier empresa de logística sería comprar uno o más camiones. Un camión es un hardware confiable, resistente a fallas y eficiente, donde se pueden acumular muchas cajas, transportarlas de manera segura y operar durante muchos más kilómetros que un Ferrari o un Lamborghini⁷.

Finalmente, el último aspecto que debemos considerar es la obsolescencia del equipamiento de CAD. Quizás a muchos les resulte familiar la Ley de Moore, una observación formulada por Gordon Moore, cofundador de Intel, en 1965. Esta ley establece que el número de transistores en un microprocesador se duplica aproximadamente cada dos años, lo que generalmente se traduce en un aumento en el poder de procesamiento y una disminución en el costo relativo del hardware. Durante muchos años, el avance en la tecnología de litografía de microprocesadores permitió multiplicar la cantidad de componentes dentro de un chip. Si bien actualmente se está alcanzando un límite físico para esta tecnología, la Ley de Moore ha moldeado tanto las políticas comerciales de las compañías de microprocesadores como las expectativas del mercado. Como consecuencia, la ley continúa manteniéndose de manera aproximada, y es un aspecto importante para la CAD. Algo que ha ocurrido de manera indefectible es que los clústeres de computadoras han avanzado al mismo ritmo que la tecnología de microchips. En particular, el número de TeraFLOPS que estos sistemas alcanzan se multiplica año tras año. Por otro lado, la eficiencia en el consumo eléctrico de estos equipos también mejora anualmente; en otras palabras, el consumo eléctrico de cada chasis de un nodo en un clúster computacional se mantiene aproximadamente constante a medida que la tecnolo-

gía avanza.

Como consecuencia, el consumo eléctrico de estos equipos, después de 6 o 7 años de uso, tiende a amortizar su valor. Por lo tanto, no resulta aconsejable utilizarlos durante mucho más tiempo, y en todo caso, es preferible aprovechar el ahorro energético de las nuevas tecnologías para justificar nuevas inversiones.

4. DESAFÍOS DE LOS GRUPOS DE INVESTIGACIÓN ASTRONÓMICOS EN EL PAÍS

En el año 2021, tuvimos la oportunidad de reunir a la comunidad astronómica que utiliza cómputo intensivo en las Jornadas de Astronomía Computacional Argentina⁸ (JACA), con la participación de investigadores de unas 20 instituciones de todo el país. Se presentaron diversas líneas de investigación en astronomía computacional, evidenciándose algunos aspectos comunes a todas ellas. El primero fue la gran variedad de aplicaciones que el cómputo intensivo tiene en todas las áreas de la astronomía, y cómo el uso de simulaciones numéricas y el cálculo intensivo se aplicaban tanto en aspectos teóricos como en el análisis de datos observacionales. El segundo aspecto destacado fue cómo el limitado acceso a equipos de cómputo afectaba seriamente los alcances y objetivos científicos de todas las investigaciones, lo cual se ponía en contexto al presentar los resultados de otros grupos de investigación internacionales. La falta de competitividad de los recursos locales era compensada con el planteo de líneas de investigación originales, que muchas veces estaban desatendidas en la comunidad internacional. Si bien esta capacidad e ingenio es vista como una característica positiva, a menudo limita el impacto de las investigaciones locales en la comunidad internacional.

También se relevó la disponibilidad de equipamiento: la mayoría de los grupos accedían a hardware al borde de la obsolescencia o directamente obsoleto (equipos de más de 6 años). En las próximas secciones explicaremos los criterios para este diagnóstico. El problema principal era la disminución del poder adquisitivo de los subsidios de investigación: acceder a equipamiento de cómputo intensivo requiere superar cierto umbral mínimo de dinero. Algunos grupos de investigación trataban de superar estas limitaciones adquiriendo equipamiento de tipo hogareño, es decir, computadoras personales de escritorio con el mayor poder de cómputo posible. Si bien esto permite solo en parte paliar las necesidades de cómputo, como se discutió en la sección anterior, el hardware de uso hogareño generalmente no permite acceder a la escala necesaria de algunos problemas científicos. Además, dicho hardware no ha sido diseñado para ser robusto ante fallas. Su durabilidad ante el uso intensivo y prolongado es mucho menor que la de los servidores de cómputo.

Otro desafío común en la comunidad es la disponibilidad de recursos humanos altamente capacitados para el mantenimiento y la administración del equipamiento. Los bajos salarios de los miembros de la carrera de personal de apoyo del CONICET (CPA) y de los trabajadores no docentes en las universidades nacionales dificultan la competencia por talento con empresas de base tecnológica. Aunque esta situación también se presenta, aunque en menor medida, en otros países además de Argentina, los esquemas de inversión constantes y previsibles en estos países resultan más atractivos para el personal especializado en computación de alto desempeño. El acceso a nuevo hardware, su puesta a punto y las oportunidades de cre-

cimiento profesional y estabilidad laboral permiten a los centros de supercomputación en Europa retener parte de su personal altamente capacitado aún ofreciendo menores salarios que el sector privado. En contraste, en Argentina, atraer y retener a estos profesionales es un desafío considerable debido a las limitaciones en inversión y en las condiciones laborales.

Por otro lado, durante la JACA, varios grupos de investigación presentaron sus colaboraciones con equipos internacionales. Estas alianzas no solo enriquecen la ciencia de los proyectos en cuestión, sino que también mejoran el acceso a recursos de investigación en otros países. Como ejemplo, numerosos grupos en Argentina mantienen colaboraciones fluidas con equipos en Europa, donde la mayoría de los países disponen de instalaciones de supercómputo que se comparten entre diversas disciplinas científicas. El Max Planck Computing and Data Facility (MPCDF), por ejemplo, proporciona recursos de cómputo a todos los institutos de la Fundación Max Planck, mientras que el Centro de Supercómputo de Barcelona (BSC) ofrece servicios a grupos de investigación en campos como medicina, biología, física, química y astronomía, entre otros. Además, existen centros de supercómputo especializados en astronomía y física, como el centro COSMA de la Universidad de Durham en el Reino Unido. Aunque estas colaboraciones son muy beneficiosas para las investigaciones astronómicas en nuestro país, también crean cierta dependencia de las líneas de investigación locales respecto a los recursos de los países que albergan estas instalaciones. El acceso a estas facilidades está limitado a las líneas de investigación que son aprobadas y financiadas con tiempo de cómputo por estos países. Este fenómeno podría sugerir

que, en cierto modo, las decisiones sobre la dirección científica en astronomía en Argentina están siendo moldeadas más por las oportunidades y prioridades internacionales que por las necesidades o intereses puramente nacionales, planteando así un desafío significativo para la autonomía de nuestra investigación científica.

■ 5. ESTADO ACTUAL DE LA COMPUTACIÓN DE ALTO DESEMPEÑO EN ARGENTINA

A partir de lo mencionado en las secciones previas, se desprende que en Argentina el acceso de los grupos de investigación a recursos de computación de alto desempeño es bastante limitado. Durante muchos años, la máquina más potente del país fue “Huayra Muyu”, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Este equipo posee un poder de cómputo teórico no medido (denotado como Rpeak) de 370.4 TFLOPS (10^{12} FLOPS) en doble precisión. Sin embargo, este recurso no es accesible para los investigadores pertenecientes al Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología (SNCyT), ya que desde su puesta en funcionamiento en el año 2018, se dedica exclusivamente a la producción diaria de pronósticos meteorológicos.

Por otro lado, el Centro de Computación de Alto Desempeño de la Universidad Nacional de Córdoba (CCAD-UNC) presta servicios de cómputo de manera abierta a todo el SNCyT a través de varios clústeres. El sistema “Mendieta Fase 2” fue puesto en funcionamiento en 2022 y entrega una potencia teórica pico de cómputo (Rpeak) de 453.2 TFLOPS en simple precisión y 228.8 TFLOPS en doble precisión. El siguiente sistema en antigüedad es “Serafín”, puesto en funcionamiento en 2021, con una potencia máxima estimada de 147 TFLOPS

en doble precisión. Finalmente, el clúster “Mulatona”, adquirido por el Instituto de Astronomía Teórica y Experimental y puesto en funcionamiento en el CCAD-UNC durante 2018, presta servicios con prioridad para astronomía, pero también para otras ramas de la ciencia. Este sistema entrega, en teoría, una potencia pico de 6.1 TFLOPS. Estos tres últimos son los equipos con mayor poder de cómputo utilizados a la fecha de este artículo en astronomía. En estos 3 equipamientos durante 2023 se prestaron servicios a poco más de 200 usuarios de todas las ramas de la ciencia, provenientes de todo el territorio nacional (ver informe del 2023 del CCAD-UNC⁹).

Para tener una dimensión real de la relevancia de estos equipos y de cualquier otro equipamiento de CAD, la vara utilizada a nivel internacional es el mencionado ranking Top500. El sistema con menor poder de cómputo en la lista publicada en junio de 2024, es decir, el sistema número 500, es un clúster en Alemania de la Universidad Helmut-Schmidt, con una potencia pico de cómputo medida (Rmax) de 2.13 PFLOPS (1 PFLOPS equivale a 1000 TFLOPS o, equivalentemente, 10^{15} FLOPS), es decir, poco más de 4 veces más potente que Mendieta Fase 2, el equipo más potente disponible hasta el momento para la comunidad científica en Argentina. La potencia de Mendieta Fase 2 proviene principalmente de las unidades de procesamiento gráfico (GPU), lo cual limita su utilización real a software científico que haga uso específico de este tipo de hardware.

Finalmente, a finales de 2023, se inauguró la computadora “Clementina XXI” en el SMN. A diferencia de Huayra Muyu, esta computadora estará disponible para todo el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología (SNCyT). Sin embargo, al momento

de redactar este artículo, el equipo aún no se encuentra prestando servicios de manera abierta a los usuarios. Se prevé que, en los próximos meses, después de superar algunos inconvenientes con la empresa proveedora de energía eléctrica, el equipo comenzará a funcionar a plena capacidad. A pesar de que algunos nodos estuvieron inactivos debido a los problemas eléctricos mencionados, Clementina XXI logró, por primera vez en la historia, colocar a la Argentina en la lista Top500, ubicándose en el puesto 224 del ranking, con una potencia medida pico (R_{max}) de 3.88 PFLOPS. Para más detalles, puede consultarse el comunicado de prensa del Departamento de Computación de la Universidad Nacional de Buenos Aires¹⁰. Hasta el momento, no se ha comunicado oficialmente cómo se asignarán las horas de cómputo a los proyectos de investigación. Por lo pronto, solo ha trascendido que se espera una primera etapa de prueba en la que un conjunto reducido de usuarios avanzados evaluará las capacidades del equipo y el software necesario para su funcionamiento.

La llegada de Clementina XXI no podría haber sido más oportuna. Como se desprende de los datos mencionados anteriormente, muchos de los equipos actualmente en uso ya se encuentran acercándose a la obsolescencia. Dado que la vida útil del equipamiento de computación de alto desempeño (CAD) es típicamente de un período de seis años, estos recursos no deben pensarse como un bien de capital, sino como un consumible, un bien perecedero que agota su vida útil rápidamente y de manera independiente de su uso. La compra de una computadora como Clementina XXI no debe compararse con la adquisición de equipamiento de laboratorio, como un microscopio o, en el caso de la astronomía, un telesco-

pio. Aunque el avance tecnológico es significativo en todas las áreas, los descubrimientos realizados en, por ejemplo, la Estación Astrofísica de Bosque Alegre (EABA) o el Complejo Astronómico El Leoncito (CAS-LEO), han sido logrados de manera ininterrumpida a lo largo de décadas y esto seguro seguirá siendo así por algún tiempo. Los valores intrínsecos y potencial de este tipo de instrumentales científicos se degradan muy lentamente con el tiempo, no así el equipo de CAD.

Así como sabemos que la inversión en instrumental para astronomía y su mantenimiento deben sostenerse en el tiempo, en el caso del hardware de CAD, esto es aún más

crítico. Los equipos que adquirimos hoy perderán relevancia en 5 o 6 años, por lo que es fundamental que los equipamientos de CAD se pongan rápidamente a disposición de toda la comunidad científica, asegurando su utilización al 100 % de su capacidad, las 24 horas del día y los 365 días del año. Solo de esta manera es posible maximizar el valor que estos equipos pueden ofrecer. Una inversión como la realizada con Clementina XXI no debe considerarse un lujo ni algo que ocurra una sola vez en la historia del país. Un ejemplo de lo natural que debería ser para un país como Argentina contar de manera sostenida con al menos una supercomputadora se puede apreciar en la Figura 2. En esta figu-

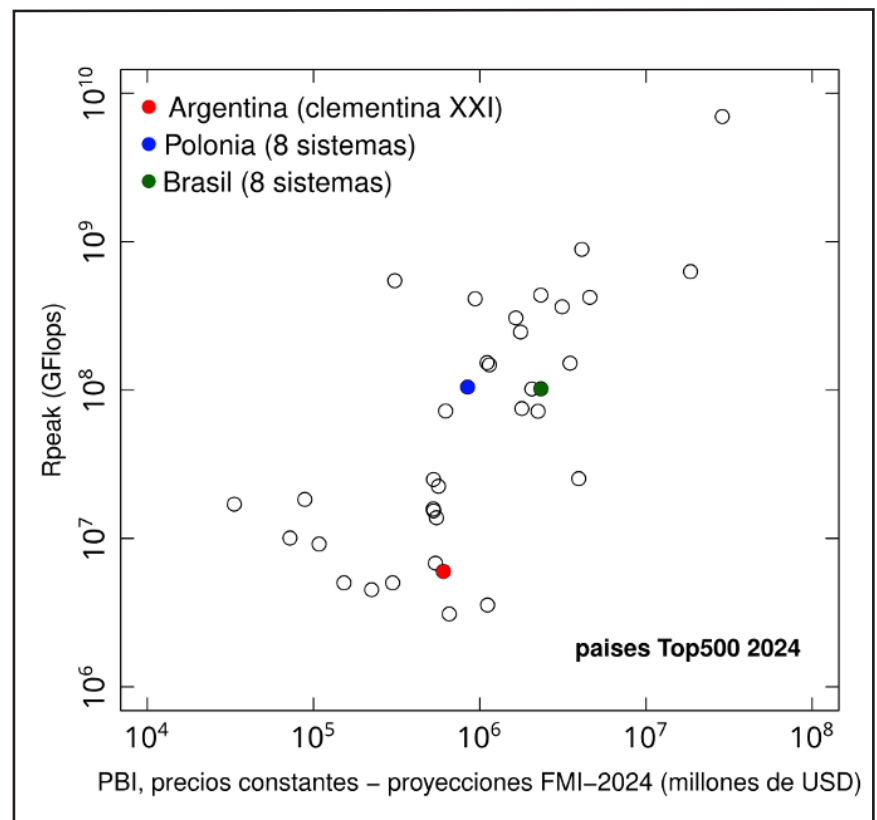


Figura 2: Relación entre el poder de cómputo (R_{peak}) de los países en el TOP500 y su Producto Bruto Interno (PBI) estimado para 2024 por el FMI. Existe una correlación natural entre la capacidad de supercomputación y el tamaño de la economía. Se destaca en rojo Argentina, con Clementina XXI, en azul Polonia y en verde Brasil, estos últimos con 8 supercomputadoras cada uno.

ra mostramos la suma del poder de cómputo de cada país, es decir, la suma de los Rpeak de sus supercomputadoras (eje de las ordenadas), y el producto bruto interno del país (eje de las abscisas, PBI) estimado por el Fondo Monetario Internacional para 2024 a precios constantes. Como se puede observar, existe una correlación natural entre el poder de cómputo de un país y el tamaño de su economía (PBI). Por supuesto, en el extremo superior derecho tenemos países como Estados Unidos y China, pero resulta muy interesante comparar con un país como Polonia, que históricamente ha tenido un PBI y PBI per cápita similares a los de Argentina (hoy superiores debido a la caída de Argentina) y cuenta con 8 supercomputadoras. Por otro lado, Brasil también tiene 8 equipos en el Top500. En el caso de Argentina, con un PBI en retroceso (históricamente mucho mayor), un equipo del tamaño de Clementina XXI es algo mínimo (estamos ubicados en la envolvente inferior de la nube de países), y debería sostenerse en el tiempo. De hecho, si aspiramos a aumentar la productividad de nuestro país, deberíamos invertir aún más y aumentar nuestras capacidades de cómputo.

Con este último análisis, demostramos como las principales economías del planeta invierten de manera sostenida en CAD. Si bien se podría argumentar que “correlación no es causalidad” y que nuestro razonamiento podría incurrir en esta falacia, en la siguiente sección mostraremos los “mecanismos” (por decirlo en términos de las ciencias naturales) que generan esta correlación. En otras palabras, la inversión en CAD no solo genera un aumento en la competitividad de un país, sino que también se recupera muy rápidamente y produce dividendos como pocas otras actividades económicas (aumentando el PBI). Pro-

fundizaremos en este tema y presentaremos argumentos al respecto en la siguiente sección.

■ 6. INVERSIÓN EN COMPUTACIÓN PARA CIENCIA Y TECNOLOGÍA

En esta sección abordaremos porque es crucial que los sistemas científicos y tecnológicos de los países desarrollados y en vías de desarrollo inviertan en Computación de Alto Desempeño (CAD). El retorno de inversión (comúnmente ROI) en la compra de hardware de CAD puede variar significativamente según la industria y la aplicación específica. En general, se ha observado que en sectores como la investigación científica, la manufacturera, la energía y las finanzas, el ROI de invertir en CAD puede ser considerablemente alto debido a la aceleración de procesos, la mejora en la precisión de modelos y simulaciones, y la capacidad de manejar grandes volúmenes de datos.

Por ejemplo, el impacto de Huya Muyu en la calidad del Servicio Meteorológico Nacional ha resultado ser incalculable¹¹. En un país como Argentina, donde el principal ingreso de divisas proviene de la agricultura, el poder predecir sequías y fenómenos meteorológicos, así como analizar el impacto de estos en esta actividad económica, produce sin lugar a dudas mucho más ahorro de divisas que las invertidas en la compra de este equipamiento.

Otro ejemplo fundamental es la industria del petróleo y gas, tan importante para nuestro país, donde el uso de CAD para simulaciones geofísicas ha ayudado a reducir los costos de exploración y aumentar las tasas de éxito, lo que justifica la inversión ampliamente.

En la industria manufacturera, la simulación de productos y procesos mediante herramientas CAD acelera significativamente el desarrollo y reduce los costos asociados a las pruebas físicas. Un ejemplo destacado se encuentra en la industria farmacéutica y en la investigación científica. Durante la pandemia, los clústeres del CCAD-UNC se volcaron exclusivamente en realizar simulaciones de dinámica molecular para estudiar la interacción del virus SARS-CoV-2 con todos los medicamentos aprobados para uso humano. Estas simulaciones permitieron disminuir de manera considerable los costos de estudios en laboratorio para la reutilización de medicamentos, conocida en inglés como “*Drug repurposing*”. Además, en el contexto crítico de la pandemia, cualquier avance que ayudara a reducir la mortalidad tuvo un valor incalculable [8].

Tomando como fuente el estudio realizado por Hyperion Research en 2020¹², cada dólar invertido en CAD devuelve en un año:

- 13.50 en industrias manufactureras europeas.
- 35.7 en laboratorios de investigación y desarrollo europeos.
- 37.7 en promedio para todas las actividades analizadas en Estados Unidos (tasa media).
- 66.10 para bancos europeos.
- ■ 68 promedio para todas las actividades en Europa (tasa media).
- 266.70 en industrias petroleras.

Estos valores de retorno son extremadamente altos. Para tener una real dimensión uno puede comparar el ROI obtenido si una persona hubiese invertido un dólar en el índi-

ce de empresas tecnológicas de la bolsa de Nueva York, el índice NASDAQ Composite, en enero de 2023. Según los valores históricos de ganancias obtenidos de [nasdaq.com](https://www.nasdaq.com)¹³ el valor de esa inversión a agosto de 2024 habría crecido aproximadamente a 1.7 dólares estadounidenses.

Si bien las cifras anteriores claramente muestran lo importante que es invertir en CAD dado el retorno de la inversión en el sector privado y de investigación, es crucial reconocer el valor estratégico de esta inversión en ciencia básica. Invertir en CAD no solo facilita el desarrollo científico y tecnológico, sino que, como se mencionó, también reduce los costos asociados a las pruebas experimentales al permitir simulaciones precisas y eficientes. Además, el uso de CAD es transversal a todas las ciencias, lo que amplifica su impacto y expande las oportunidades de aplicación. La infraestructura de CAD, al ser compartida entre diversas disciplinas científicas, no solo optimiza los recursos, sino que también fomenta la colaboración interdisciplinaria y apoya el desarrollo de emprendimientos público-privados en ciencia y tecnología.

Mucho del conocimiento desarrollado en astronomía computacional puede aplicarse en una gran variedad de campos, así como la investigación en esta área puede beneficiarse del conocimiento de otras disciplinas. Este enfoque integrador no solo maximiza los beneficios económicos de la inversión en CAD, sino que también acelera la innovación y fortalece las capacidades nacionales en investigación y desarrollo.

■ 7. RESUMEN, CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

En este artículo hemos subrayado la crítica importancia de la Computa-

ción de Alto Desempeño (CAD) en la astronomía, como así también en el sistema científico nacional. La CAD se ha convertido en una herramienta indispensable para la investigación astronómica tanto teórica como observacional, permitiendo la simulación y el análisis de fenómenos complejos que no pueden ser experimentados de manera directa. Además, se hizo hincapié en la situación de la astronomía computacional en Argentina, mostrando cómo la falta de acceso a recursos computacionales avanzados limita la competitividad de los investigadores locales en el ámbito internacional. Ello obliga a estos últimos a depender de colaboraciones internacionales e ingeniar alguna manera para superar las limitaciones e impedimentos tecnológicos locales.

En particular hemos abordado algunos de los desafíos específicos que enfrentan los grupos de investigación en Argentina, como la obsolescencia del hardware y la fuga de talento capacitado en CAD debido a las condiciones laborales desfavorables del sistema científico tecnológico. Sin embargo la reciente adquisición de la supercomputadora Clementina XXI, promete marcar un avance significativo para el país, con lo cual el acceso a este equipamiento resulta crítico en el estado actual.

Finalmente argumentamos que a pesar de la rápida obsolescencia del hardware CAD, la inversión en este tipo de infraestructura es crucial no solo por su alto retorno económico, sino también por su impacto estratégico en el desarrollo científico y tecnológico. El uso compartido de la infraestructura de CAD entre diversas disciplinas no solo optimiza los recursos, sino que también fomenta la colaboración interdisciplinaria, lo que es esencial para avanzar en el conocimiento y en la innovación científica.

A partir de lo expuesto podemos sacar las siguientes conclusiones:

1. Es fundamental para el desarrollo de la astronomía Argentina, contar con equipamiento de CAD que permita no solo realizar simulaciones y modelos teóricos en todas las escalas del Universo, sino además analizar el llamado data tsunami producido por los grandes telescopios y relevamientos masivos del cielo como el mencionado Vera Rubin LSST, entre otros.
2. La Argentina, como país, necesita para ser competitivo invertir en infraestructura de cómputo, en una proporción acorde al tamaño de su economía.
3. Es necesario que las autoridades nacionales en ciencia y tecnología tomen cartas en el asunto, asegurando una inversión sostenida y previsible que no nos lleve a la periódica obsolescencia de recursos cada cinco años.
4. La manera más eficiente de utilizar los recursos es uniendo la demanda, aunando fuerzas entre las diferentes ramas de la ciencia. Esto asegura la mayor utilización del perezoso recurso de CAD.
5. Finalmente es importante reflexionar desde una perspectiva histórico-epistemológica, sobre aspectos sensibles a las prácticas y al desarrollo del conocimiento científico de nuestro país.

Como comunidad científica, debemos asumir la responsabilidad de optimizar y racionalizar el uso de los recursos computacionales disponibles, especialmente en un contexto donde enfrentamos limitaciones presupuestarias y equipos en

proceso de obsolescencia. No es necesario esperar cambios en las políticas o decisiones de las autoridades nacionales; podemos organizarnos internamente para maximizar la eficiencia y el impacto de nuestras investigaciones. Recursos clave, como Clementina XXI, junto con las políticas que se implementen para su uso, serán fundamentales para aprovechar esta nueva oportunidad. Ampliar la base de usuarios de supercómputo, facilitar el acceso a los recursos minimizando la burocracia, y asegurar que los equipos se utilicen al 100 % todos los días del año puede mejorar significativamente la calidad de la ciencia que producimos y fomentar la inversión en CAD. Al hacerlo, no solo fortalecemos la ciencia que actualmente producimos, sino que también nos preparamos para futuros desafíos, asegurando que nuestras contribuciones científicas sigan siendo relevantes y competitivas a nivel internacional.

■ AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra. Mariana Cécere por revisar el manuscrito y por sus recomendaciones para mejorar su claridad y fluidez. Asimismo, agradecemos al Dr. Diego García Lambas por verificar algunos de los aspectos históricos mencionados.

■ REFERENCIAS

- [1] Bartó, C. (2021). *Reseña Histórica del Centro de Cálculo de la Universidad Nacional de Córdoba, 1979-1992*. III Simposio Argentino de Historia, Tecnologías e Informática (SAHTI 2021).
- [2] Bozzoli, M. (2019). *El rol de los instrumentos y la simulación en la observación astronómica contemporánea: un enfoque epistemológico*. pp. 320. Córdoba: Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba. ISBN: 978-950-33-1558-3.
- [3] Bozzoli, M.; Paz, D. (2023). *Validación de observaciones y de simulaciones astrofísicas: Un enfoque epistemológico*. Revista Disertaciones, Vol. 12 Núm. 1.
- [4] Cockcroft, S. (2016). *Big data in Financial Management a structured literature review and Opportunities for IS research*. ACIS 2016 Proceedings, 14. <https://aiselaisnet.org/acis2016/14>.
- [5] Hacking, I. (1989). *Extragalactic Reality: The Case of Gravitational Lensing*. Philosophy of Science. 56, IV, 555-581. Chicago: The University of Chicago Press.
- [6] Jordan, M.; Mitchell, T. (2015). *Machine learning: Trends, perspectives, and prospects*. Science, Vol. 349, Issue 6245, pp. 255.
- [7] Liu, W.; Li, S.; Park, H. (2022). *Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future*. Archives of Computational Methods in Engineering, vol. 29, 4431–4453.
- [8] Ribone, S.; Paz, A.; Abrams, C.; Villarreal, M. (2022). *Target identification for repurposed drugs active against SARS-CoV-2 via high-throughput inverse docking*. Journal of Computer Aided Molecular Design, 36(1):25-37. doi: 10.1007/s10822-021-00432-3.
- [9] Schneegans, S.; Straza, T.; Lewis, J. (2021). *UNESCO Science Report: the race against time for smarter development*. ISBN:978-92-3-100450-6. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000377433.locale=en>.
- [10] The EHT Collaboration et al. (2019). *First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole*. The Astrophysical Journal Letters, Vol. 875, No. 1.
- [11] Umutoni, L.; Samadi, V. (2024). *Application of machine learning approaches in supporting irrigation decision making: A review*. Agricultural Water Management, vol. 294, pp. 108710.

■ NOTAS

1. Un TFLOP equivale a 10^{12} FLOPS, la cual es la unidad de potencia de cómputo equivalente a una operación aritmética por segundo. Un típico procesador de una PC de escritorio puede alcanzar hasta unos 90 GFLOPS 10^9 FLOPS.
2. Un petabyte equivale a 10^6 gigabytes, un disco duro de una PC tiene típicamente entre 500 y 1000 gigabytes
3. Estos datos pueden ser incompletos debido a posibles omisiones del país en el campo de afiliación que los autores suben a las revistas.
4. ver por ejemplo <https://www.swpc.noaa.gov/>
5. <https://ccad.unc.edu.ar/files/estado-del-hpc.pdf>
6. <https://top500.org/>
7. Pocos de estos motores alcanzan los 50,000 km de uso sin requerir un mantenimiento importante.
8. <https://jaca.iate.conicet.unc.edu.ar>
9. <https://ccad.unc.edu.ar/files/Informe-de-gestion-2023.pdf>

10. https://www.dc.uba.ar/clementina-xxi-una-supercomputadora-argentina-entre-las-mas-poderosas-del-mundo	cas donde se describe los resultados de este equipamiento, https://repositorio.smn.gob.ar/	Scientific Innovation In Europe. Hyperion Research HPC Investments Bring High Returns.
11. Para convencerse basta con buscar “Huayra Muyu” en el repositorio digital del SMN y ver las notas técnicas	12. EESI-2 Special Study To Measure And Model How Investments In HPC Can Create Financial ROI And	13. ver https://www.nasdaq.com/market-activity/index/comp/historical

EL OBSERVATORIO LLAMA: UN NUEVO HORIZONTE PARA LA RADIOASTRONOMÍA EN SUDAMÉRICA

Palabras clave: Telescopio LLAMA, radioastronomía, desarrollo tecnológico.

Key words: LLAMA telescope, radioastronomy, technological development.

El proyecto Large Latin American Millimeter Array (LLAMA) es una iniciativa científica y tecnológica conjunta entre Argentina y Brasil, cuyo objetivo es instalar y operar un radiotelescopio para realizar estudios del Universo en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas.

Actualmente en construcción, LLAMA se ubicará a 4850 metros sobre el nivel del mar en la Puna Salteña, en el noroeste de Argentina. La instalación contará con una antena de 12 metros de diámetro similar a las del Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) equipada con dos cabinas Nasmyth, y seis receptores tipo ALMA que cubrirán las bandas 1, 2+3, 5, 6, 7 y 9, abarcando un rango de frecuencias de 35 a 720 GHz.

En este artículo, describiremos el estado actual del proyecto y presentaremos las oportunidades científicas que LLAMA ofrecerá en diversos campos de la astronomía.

LLAMA promete avances significativos en nuestra comprensión del cosmos a través de observaciones en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas.

Silvina Cichowolski en representación de la Colaboración LLAMA

Instituto de Astronomía y Física del Espacio,
CONICET-UBA, Argentina.

E-mail: scicho@iafe.uba.ar

The LLAMA Observatory: A New Horizon for Radioastronomy in South America

The Large Latin American Millimeter Array (LLAMA) is a joint scientific and technological initiative between Argentina and Brazil, aimed at installing and operating a radio telescope to conduct studies of the Universe at millimeter and submillimeter wavelengths. Currently under construction, LLAMA will be located at 4850 meters above sea level in the Puna Salteña region, in northwestern Argentina. The facility will have a 12-meter diameter antenna similar to those of the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), equipped with two Nasmyth cabins, and six ALMA-type receivers covering bands 1, 2+3, 5, 6, 7, and 9, spanning a frequency range from 35 to 720 GHz.

In this article, we will describe the current status of the project and discuss the scientific opportunities that LLAMA will offer across various fields of astronomy. LLAMA promises significant advancements in our understanding of the cosmos through observations at millimeter and submillimeter wavelength.

■ HISTORIA Y DESARROLLO DEL PROYECTO

La colaboración entre Argentina y Brasil para llevar adelante el proyecto LLAMA se remonta a la década del 2000, cuando comenzó la búsqueda de un sitio adecuado para observaciones en el rango milimétrico y submilimétrico del espectro electromagnético.

Las campañas de búsqueda de sitio fueron realizadas por el IAR (Instituto Argentino de Radioastronomía) e incluyeron la recolección de datos meteorológicos, especialmente mediciones de opacidad atmosférica, y topológicos.

Tras seis años de exploración en el noroeste argentino, buscando áreas con niveles bajos de opacidad atmosférica, se seleccionó Alto Cho-

rrillos, ubicado a 4850 metros sobre el nivel del mar y a 16 km de San Antonio de los Cobres, en la provincia de Salta (ver Figura 1).

En el año 2010, el proyecto ya denominado LLAMA se presentó al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCyT) de la República Argentina, que al año siguiente lo declaró prioritario entre los proyectos de instrumentación astronómica



Figura 1. Ubicación de LLAMA en Alto Chorrillos, cerca de San Antonio de los Cobres, en la provincia de Salta.

en el país. En paralelo, investigadores de Brasil obtuvieron financiamiento para la adquisición de la antena a través de la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo (FAPESP), en una propuesta liderada por el Dr. Jacques Lépine. En 2014 se formalizó el acuerdo entre el MinCyT, FAPESP y la Universidade de São Paulo (Brasil), en el que se comprometieron a realizar inversiones destinadas a la fabricación e instalación de la antena, así como al desarrollo del observatorio radioastronómico en Salta.

La antena para LLAMA fue encargada a la empresa alemana Vertex Antennentechnik, GmbH. Esta antena comparte el mismo diseño que



Figura 2. Edificio de LLAMA en San Antonio de los Cobres.

las antenas fabricadas por la misma empresa para ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), un importante interferómetro localizado en el desierto de Atacama.

LLAMA es por lo tanto un proyecto de desarrollo tecnológico binacional argentino-brasileño de gran envergadura, que actualmente involucra investigadores e ingenieros de

instituciones públicas y privadas de ambos países.

■ DESCRIPCIÓN GENERAL DE LLAMA

El observatorio LLAMA contará con tres instalaciones en puntos estratégicos de la provincia de Salta. La sede en la ciudad de Salta será el centro desde donde se realizarán las

observaciones de manera remota. En San Antonio de los Cobres LLAMA tiene un edificio construido en colaboración con el gobierno de Salta (ver Figura 2), que albergará laboratorios, oficinas y alojamiento, para brindar la infraestructura necesaria para el mantenimiento básico del telescopio. Finalmente, en Alto Chorrillos, donde el radiotelescopio está en proceso de instalación (ver Figura 3). La Figura 4 muestra el camino de acceso a Alto Chorrillos, construido como parte de la colaboración dentro del proyecto LLAMA.

El instrumento principal de LLAMA es una antena parabólica de 12 metros de diámetro, cuyos elementos principales se indican en la Figura 5.

La antena cuenta con un foco Cassegrain y dos cabinas Nasmyth, cabinas A y B, lo que permitirá la integración de una amplia variedad de instrumentos periféricos.

Inicialmente, LLAMA estará equipado con receptores similares a los de ALMA, enfocándose especialmente en las bandas 5 (163- 211 GHz) y 9 (602 - 720 GHz). Estos receptores estarán instalados en un crióstato adquirido en el National Astronomical Observatory of Japan



Figura 3. El sitio en Alto Chorrillos, con los componentes de la antena dentro de los containers, antes de su armado.



Figura 4. Acceso al sitio LLAMA desde la Ruta Nacional 51. Alto Chorrillos, Departamento Los Andes Provincia de Salta.

(NAOJ). La Tabla 1 detalla los distintos receptores que tendrá LLAMA.

El sistema óptico-electromecánico para guiar la radiación desde el foco principal de la antena hacia las diferentes cabinas y receptores, conocido como NAsmyth Cabin Optical System (NACOS), representa un desarrollo innovador de la colaboración LLAMA.

Como se ilustra en la Figura 6, NACOS se subdivide en dos partes: CASS, una estructura mecánica para la cabina Cassegrain, que alojará las cargas de calibración, y un sistema de espejos para dirigir la luz a las dos cabinas Nasmyth (NASS-A y NASS-B). Cada una de las estructuras NASS albergará un crióstato donde se instalarán tres receptores enfriados a 4 K (-269 grados Celsius).

El reflector principal del radiotelescopio está compuesto por 264 paneles de aluminio distribuidos en 8 anillos. Estos paneles serán alineados utilizando la técnica de holografía. En este caso se utilizará la aproximación de campo cercano, colocando un transmisor en la parte superior de una torre de unos 60 metros de altura y a unos 360 metros de distancia del radiotelescopio (ver Figura 7). La antena entregada por VERTEX tendrá una precisión inicial de la superficie del plato de 25 µm, la cual será mejorada y mantenida a través de la holografía en valores de entre 15 y 20 µm.

Además, los paneles han sido grabados químicamente para dispersar la radiación visible e infrarroja, permitiendo así realizar observaciones diurnas.

A continuación se presentan varias fotografías que ilustran el desarrollo del proyecto, desde el armado de la base donde se montará el radiotelescopio hasta su estado actual (Figuras 8 a 15).

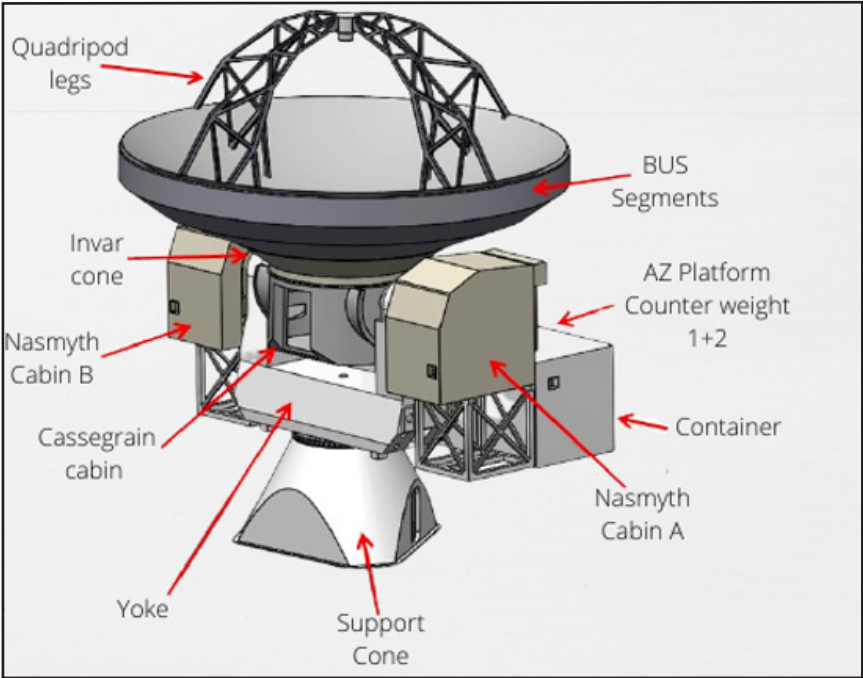


Figura 5. Esquema general de la antena LLAMA con los nombres de sus componentes principales.

Tabla 1: Receptores de LLAMA

Banda	Frecuencia (GHz)
1	35 - 50
2+3	67 - 116
5	163 - 211
6	211 - 275
7	275 - 373
9	602 - 720



Figura 6. Arriba: Descripción general de dónde estarán ubicadas las partes del sistema mecánico NACOS. Abajo: Las componentes CASS y NASS, desarrolladas en las instalaciones de ALFA Engenharia (Araraquara, Brasil).

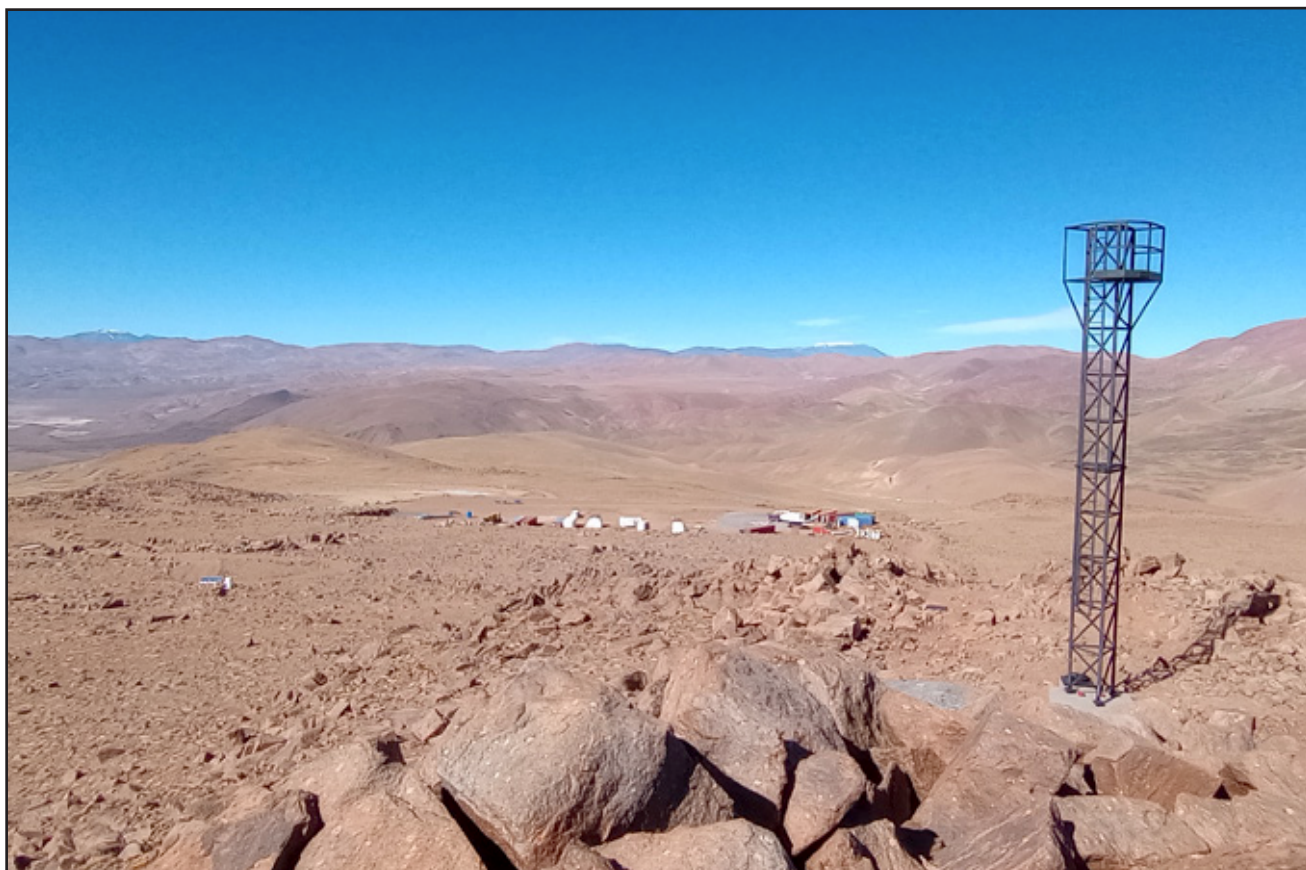


Figura 7. Torre de holografía.

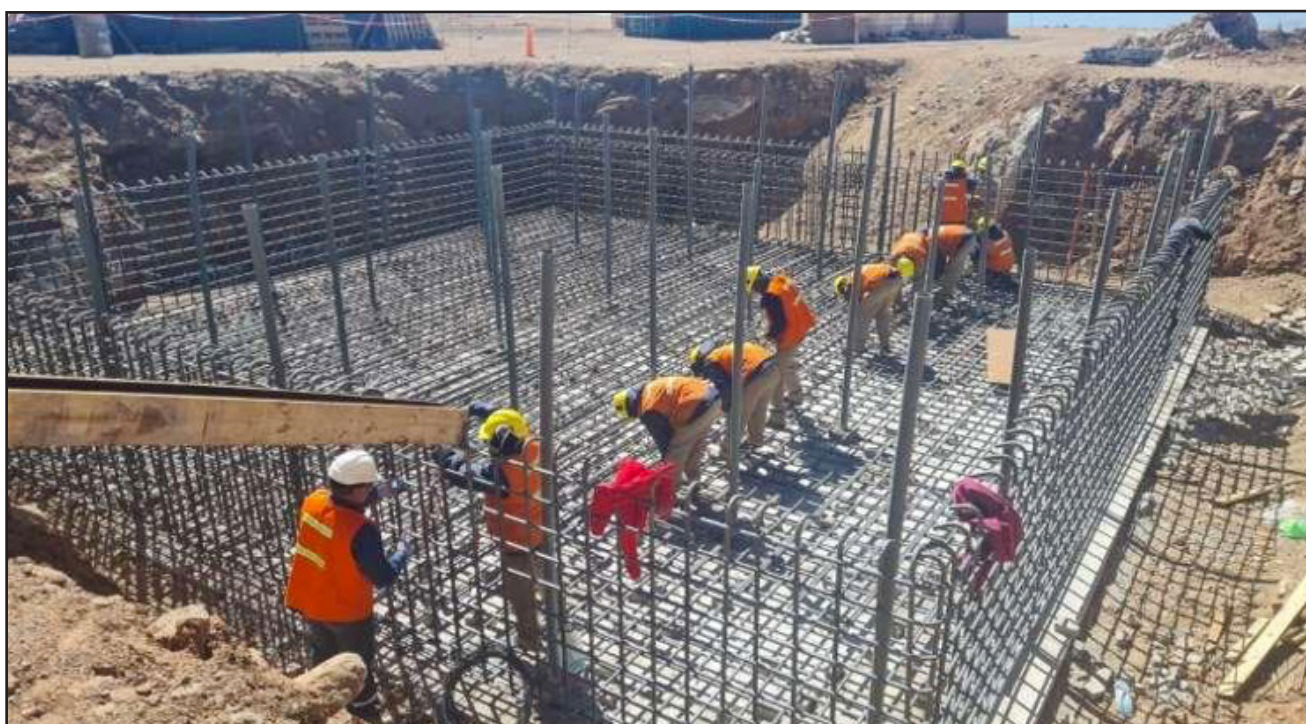


Figura 8. Armado de los cimientos para la base de la antena.



Figura 9. Encofrado final de la fundación de apoyo de la antena.

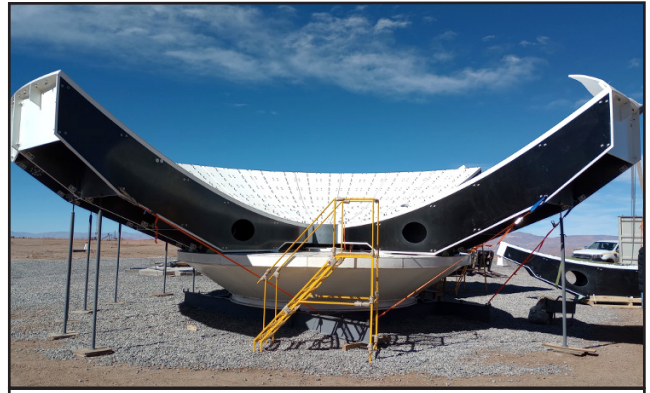


Figura 10. Armado del reflector principal.

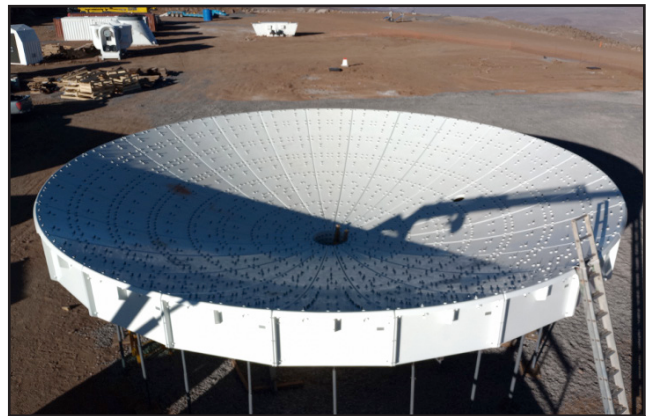


Figura 11. Reflector principal armado y apoyado en tierra previo a su izaje final.

■ SALTA VENTANA AL UNIVERSO

En la Provincia de Salta se desarrollan diversas iniciativas vinculadas con las Ciencias del Universo, aprovechando las condiciones geográficas y climáticas favorables para la instalación de grandes observatorios en altura. Entre las instalaciones científicas de mediano y gran porte que se han instalado, o están en proceso de hacerlo, se encuentran el radio-telescopio LLAMA, el Observatorio QUBIC (<https://www.qubic.org.ar/>) y la Colaboración SWGO (<https://www.swgo.org/SWGOWiki/doku.php>), todas ubicadas en Alto Chorrillos en las cercanías de la localidad de San Antonio de los Cobres; y los Observatorios TOROS (<https://cam.unc.edu.ar/toros/>) y ABRAS (<https://cam.unc.edu.ar/abras/>), localizados

en el Cerro Macón, vecino a la localidad de Tolar Grande.

Para coordinar y facilitar el desarrollo de estas instalaciones, se ha creado el programa "Salta Ventana al Universo". Este programa se ocupa de gestionar y optimizar los recursos necesarios, incluyendo infraestructura adecuada para energía eléctrica, acceso a redes de comunicación y vialidad. La presencia de estos emprendimientos astronómicos en Salta no solo impulsa actividades científicas avanzadas, sino que también se espera que fomente el turismo científico en San Antonio de los Cobres, Tolar Grande y la ciudad de Salta. En esta última, se está construyendo un centro de interpretación y divulgación del conocimiento generado por estos observatorios.

■ GESTIÓN DEL PROYECTO

Actualmente la gestión de LLAMA está a cargo de un Comité Directivo binacional, del que forman parte tres investigadores de Argentina y tres investigadores de Brasil, los cuales son designados por las instituciones firmantes de ambos países, el MinCyT (actualmente SeCyT) por Argentina, y la Universidad de San Pablo y FAPESP, por Brasil. Este comité se encarga de supervisar las decisiones estratégicas y asegurar la coordinación entre ambos países.

Desde noviembre del año 2020, la ejecución técnica del proyecto está a cargo de INVAP. Esta empresa tecnológica con sede en Bariloche se dedica al diseño, integración, y construcción de plantas, equipa-



Figura 12. Colocación del quadrapod de la antena.



Figura 13. Montaje de la base del pedestal de la antena.



Figura 14. Vista aérea de la antena con su quadrapod. A la derecha se localiza el pedestal. A lo lejos puede verse la antena de holografía y la cúpula del telescopio de QUBIC.

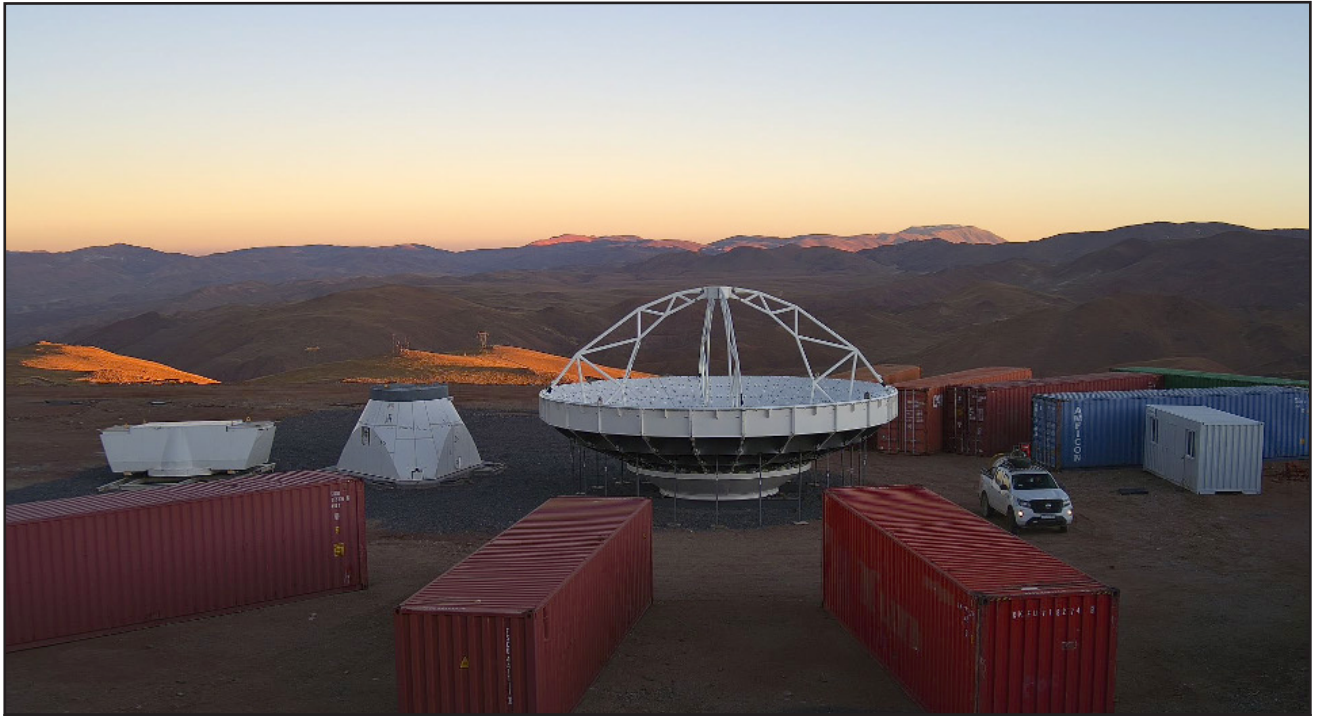


Figura 15. Estado actual del proyecto. Todo listo para continuar con la instalación del radiotelescopio.

mientos y dispositivos en áreas de alta complejidad como energía nuclear, tecnología espacial, tecnología industrial y equipamiento médico y científico. INVAP está a cargo del desarrollo de la infraestructura del sitio (suministro de energía, comunicaciones, obra civil) y del montaje de la antena siguiendo los procedimientos establecidos por VERTEX. Se prevé que también se encargue de la integración de los receptores.

El Comité Directivo cuenta con el apoyo de un Grupo Científico, del cual forman parte investigadores de las comunidades astronómicas de Argentina y Brasil.

■ ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO

En el año 2023 se firmó un nuevo convenio entre Argentina y Brasil para continuar con el proyecto LLAMA, que incluye actividades para alcanzar el hito de la primera luz en

los próximos años. El estado actual del armado de la antena en el sitio es el que se muestra en la Figura 15. Los integrantes del Comité Directivo seguimos manteniendo reuniones periódicas. Sin embargo, el futuro de LLAMA es incierto debido a los cambios de gestión en el gobierno argentino, el MinCyT es ahora la SeCyT, quien al momento no ha confirmado la continuidad del proyecto ni asegurado los fondos para poder avanzar con las tareas en el corto plazo.

Por este motivo los trabajos en el sitio están detenidos, a la espera de contar con el presupuesto necesario para avanzar con la instalación de la antena.

■ CIENCIA CON LLAMA

Como se mencionó anteriormente, LLAMA estará equipado con seis receptores (ver Tabla 1), ubicados en las cabinas Nasmyth. Esta configu-

ración permitirá a LLAMA realizar observaciones simultáneas en dos o más bandas, abarcando un amplio rango de longitudes de onda. Además, LLAMA será capaz de llevar a cabo observaciones en continuo, espectrales, polarimétricas y solares.

Esta versatilidad en las observaciones abre la puerta a una amplia gama de investigaciones científicas. LLAMA permitirá realizar estudios en diversos campos, algunos de los cuales se describen a continuación.

➤ **Atmósferas planetarias:** LLAMA será una herramienta clave para estudiar las atmósferas de los planetas de nuestro Sistema Solar. Utilizando espectroscopía de alta resolución en longitudes de onda milimétricas podremos investigar la composición y dinámica de estas atmósferas con una precisión sin precedentes. Estos estudios nos permitirán avanzar en el entendimiento de la formación

- y evolución del Sistema Solar. El estudio de los planetas gigantes es fundamental debido a su gran masa y su influencia significativa en la formación y estructura del Sistema Solar. Medir su composición y estructura térmica en tres dimensiones y a lo largo del tiempo nos ayudará a entender mejor estos procesos, especialmente considerando los cambios estacionales y la influencia de materiales exógenos como cometas.
- Física solar: LLAMA será una herramienta valiosa para el estudio del Sol, permitiéndonos realizar una variedad de investigaciones, tales como:
 - Observaciones del Sol en distintas longitudes de onda (sub) milimétricas: Esto nos permitirá estudiar las condiciones físicas de la cromósfera, que es la capa situada entre la fotósfera y la corona, proporcionando información sobre su estructura y dinámica (e.g. Nindos et al. 2022).
 - Resolución de estructuras solares: LLAMA tendrá la capacidad de resolver espacialmente la umbra y la penumbra de las manchas solares en la baja cromósfera, dependiendo del límite de difracción de la banda utilizada. Esto ayudará a entender mejor la formación y evolución de estas manchas (e.g. Loukitcheva et al. 2017).
 - Medición de campos magnéticos: A través de observaciones de polarización, LLAMA podrá contribuir a las mediciones de los campos magnéticos solares (e.g. Loukitcheva et al. 2020), lo cual es fundamental para comprender los fenómenos solares como las fulguraciones y las eyecciones de masa coronal.
 - Estudio de fulguraciones solares: Combinando las observaciones de LLAMA con otros instrumentos (como el SST, AR30T y HATS), se podrán obtener espectros precisos de las fulguraciones a altas frecuencias, determinar la naturaleza de la radiación emitida y estimar la relevancia de los mecanismos que la generan.
 - Estudios del Medio Interestelar: LLAMA será una herramienta esencial para estudiar diversas estructuras y fenómenos en el medio interestelar, incluyendo:
 - Formación estelar: Utilizando espectroscopía de alta resolución en longitudes de onda (sub) milimétrica podremos investigar la composición química y la dinámica del gas en regiones como los Núcleos Moleculares Calientes (HMCs), que son densas nubes de gas y polvo donde se forman las estrellas (e.g. Csengeri et al. 2014, Koenig et al. 2017). Estos estudios proporcionarán una comprensión profunda de cómo se forman y evolucionan las estrellas y los sistemas planetarios.
 - Efectos de la expansión de las regiones HII: Las estrellas masivas, consideradas así a las que tienen más de 8 masas solares, ionizan el gas circundante creando una región de gas ionizado (región HII) a su alrededor. Debido a la diferencia de presiones entre el gas ionizado y el neutro, la región HII se expande y modifica la estructura de la nube molecular en la que la estrella se formó. Esta interacción genera zonas muy densas y puede llegar a inducir la formación de nuevas estrellas (e.g. Cichowolski et al. 2015, Cárdenas et al. 2022). LLAMA nos permitirá estudiar estos efectos observando las emisiones de distintas moléculas, como el monóxido de carbono (CO), para entender cómo la expansión de la región HII puede afectar el gas molecular.
 - Colisión de supercáscaras: Las supercáscaras son grandes estructuras, de más de 200 parsecs de diámetro, probablemente creadas por la acción de estrellas masivas y explosiones de supernovas (e.g. Suad et al. 2014, Suad et al. 2019). Se cree que la colisión de estas estructuras podría generar zonas densas donde potencialmente se formarían nuevas nubes moleculares gigantes. LLAMA nos permitirá investigar estas colisiones y sus efectos, a través de observaciones de moléculas que indican la presencia de choques.
 - Remanentes de supernova: LLAMA ayudará a investigar cómo interactúan los remanentes de supernova con las nubes moleculares cercanas, identificando lugares donde podría estar ocurriendo la aceleración de partículas y la producción de rayos cósmicos (e.g. Petriella et al. 2021, Duvidovich & Petriella 2023).
 - Astroquímica: LLAMA será crucial en astroquímica para detectar nuevas moléculas y mejorar la sensibilidad en estudios del medio interestelar. Podrá realizar observaciones de líneas moleculares en nubes y estrellas evolucionadas, explorando frecuencias submilimétricas menos estudiadas como las bandas 3, 5, 7 y 9. LLAMA también podrá realizar relevamientos de trazadores moleculares clave y estudiar detalladamente las propiedades físicas y químicas de estructuras como los núcleos moleculares calientes y

las nubes oscuras (e.g. Kurtz et al. 2000, Cesaroni et al. 2005).

➤ Galaxias:

- **Nubes de Magallanes:** Las Nubes de Magallanes son dos galaxias satélites de nuestra Vía Láctea, caracterizadas por tener una baja metalicidad y una alta proporción de gas HI respecto al gas molecular. LLAMA permitirá mapear extensas áreas de estas galaxias en diferentes transiciones moleculares como CO, HCO⁺, CS, o SiO, con una resolución espacial que nos permitirá estudiar regiones de formación estelar y nubes moleculares. Estudiando estas galaxias, podremos comprender mejor cómo se forman las estrellas en entornos menos enriquecidos en elementos pesados, similares a las condiciones del Universo temprano (e.g. Saldaño et al 2024, Stanke et al. 2022).
- **Galaxias Cercanas:** Se podrá mapear la distribución del gas molecular en galaxias cercanas, identificando regiones de gas de alta densidad donde se forman las estrellas. Las líneas de emisión de CO son fundamentales para trazar la cantidad y distribución del gas molecular frío. Las observaciones con LLAMA permitirán estudiar la dinámica del gas molecular, lo cual es crucial para entender la formación y evolución de estructuras galácticas como los brazos espirales, las barras y los núcleos galácticos. LLAMA permitirá observar regiones específicas dentro de galaxias cercanas, como los núcleos galácticos y nebulosas, para estudiar la formación estelar en diferentes ambientes galácticos. La capacidad de LLAMA para detectar una

amplia gama de moléculas en el rango submilimétrico posibilita estudios detallados de la composición química del gas en estas galaxias. Los Núcleos Galácticos Activos (AGN) emiten en el rango de frecuencias que cubrirá LLAMA, lo que permitirá estudiar el disco de acreción del agujero negro supermasivo y la dinámica del material en acreción. Además, los AGN frecuentemente presentan jets relativistas que emiten fuertemente en este rango, lo que permitirá entender su composición, velocidad e interacción con el medio circundante (e.g. Jones et al. 2015).

Para obtener más detalles sobre los proyectos científicos que se podrán realizar con LLAMA, se pueden consultar las presentaciones del ciclo de Seminarios LLAMA-IAFE, llevados a cabo en modo virtual en el año 2021 (<https://www.llamaobservatory.org/seminars2021/>).

También están disponibles los trabajos presentados en el evento internacional "Science with LLAMA", organizado en Salta en septiembre de 2022 (<https://www.llamaobservatory.org/ws2022/>).

■ COLABORACIONES INTERNACIONALES

Uno de los usos científicos más prometedores para LLAMA es su posible integración en el proyecto "Next Generation Event Horizon Telescope" (ngEHT). Este proyecto, dirigido por el Observatorio Astrofísico Smithsoniano del Harvard-Smithsonian en Estados Unidos, es la continuación del exitoso Event Horizon Telescope (EHT). El EHT fue responsable de capturar la primera imagen de la sombra de un agujero negro, un hito publicado en 2019 que marcó un

avance significativo en la astrofísica.

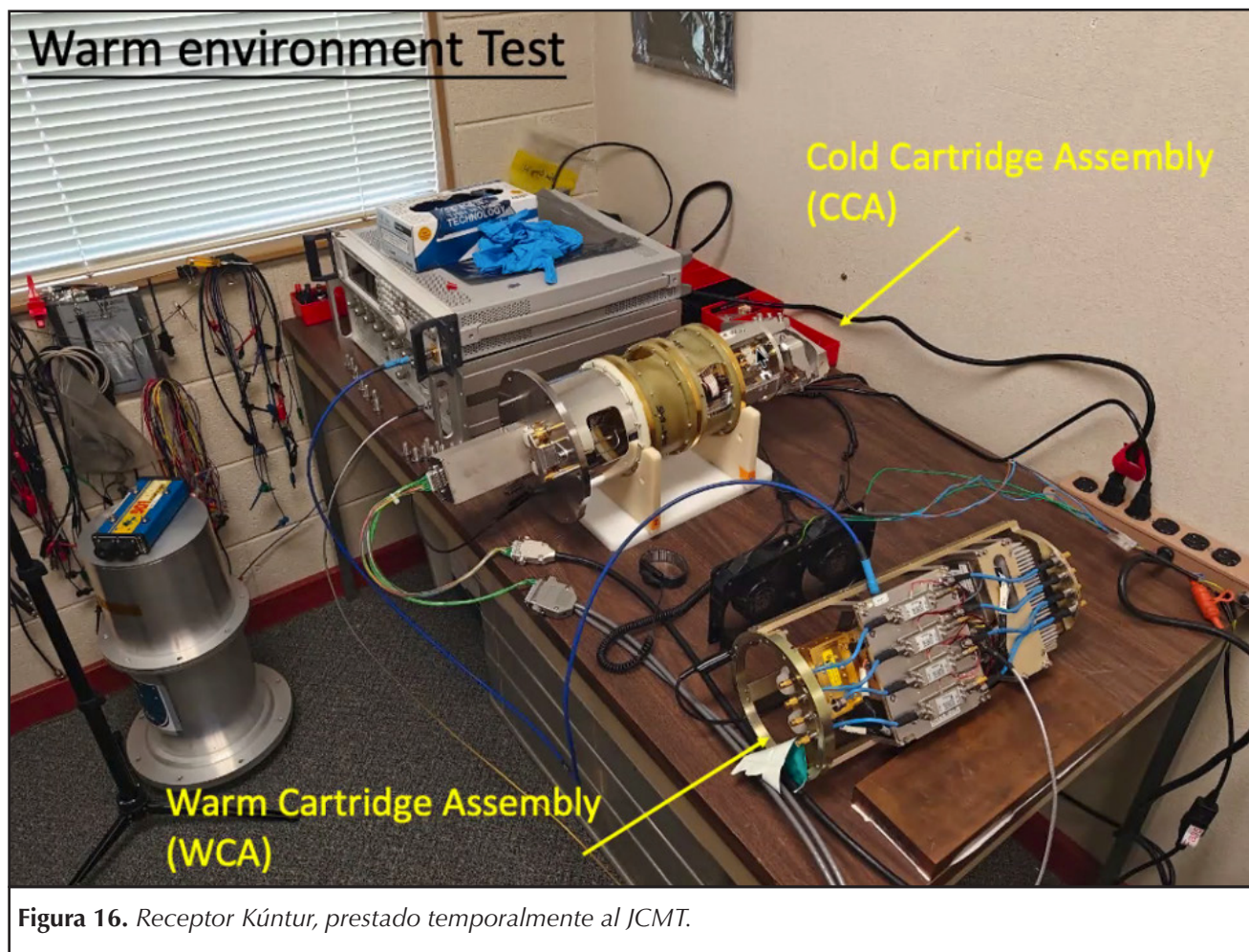
La colaboración de LLAMA con la red internacional de radiotelescopios del ngEHT podría ser crucial para alcanzar nuevos objetivos científicos, como la creación de la primera película que muestre el comportamiento dinámico de un agujero negro. Esta participación no solo destacará la capacidad técnica y científica de LLAMA, sino que también contribuirá significativamente al avance de nuestra comprensión del universo.

Por otro lado, actualmente LLAMA está realizando el préstamo temporal del receptor de Banda 9, denominado Kúntur (que significa Cóndor en Quechua y se muestra en la Figura 16), que opera a 650 GHz, al telescopio del hemisferio norte JCMT (James Clerk Maxwell Telescope), ubicado en Mauna Kea, Hawaii. Este préstamo permitió ensayar el receptor en condiciones de operación similares a las que tendrá en LLAMA.

A su vez, este intercambio ha permitido a las comunidades astronómicas de Brasil y Argentina acceder a tiempo de observación en el JCMT, un telescopio submilimétrico operado por Taiwán. De este modo, esta colaboración ha facilitado el uso del JCMT por parte de investigadores argentinos y brasileños, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo conjunto de instrumental tecnológico avanzado y promoviendo nuevas colaboraciones científicas internacionales.

■ PERSPECTIVAS FUTURAS

En conclusión, LLAMA representa un avance significativo en la investigación astronómica, impulsado por una robusta inversión en ciencia y tecnología, así como por la colaboración estratégica entre Argentina y



Brasil. Este proyecto no solo contribuirá a la expansión de nuestro conocimiento del Universo, sino que también potenciará la capacidad de ambos países para realizar investigaciones de vanguardia. La integración de tecnologías avanzadas y el enfoque en múltiples áreas científicas aseguran que LLAMA tendrá un impacto duradero en el campo de la astronomía y en el desarrollo de capacidades científicas en la región.

Agradecimientos: El proyecto LLAMA es posible principalmente gracias al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCyT, Argentina) y la Fundación de Investigación de São Paulo (FAPESP, Brasil, a través de las subvenciones 2011/51676-9, 2015/50360-9 y 2015/50359-0).

También cuenta con inversión del CNPq/Finep/MCTIC/BRICS-STI (beca 402966/2019-8), Gobierno de Salta, Consejo Holandés de Investigación (NWO, Países

Bajos) y FONDEF/Conicyt (Chile). En el desarrollo del proyecto en Argentina participan CONICET, Gobierno de Salta, INVAP, IAR, IAFE, OAC y UNSa. En Brasil, la Universidad de São Paulo, CRAAM/Mackenzie e INPE/MCTI forman parte de la colaboración.

El proyecto LLAMA reconoce el privilegio de establecer sus instalaciones y observar el Universo desde un sitio natural y cultural único en la Puna Argentina.

■ REFERENCIAS:

- Cárdenas, S. B., Cichowolski, S., Suad, L. A., Molina Lera, J. A., Gamen, R., Rizzo, L. (2022) A multiwavelength study of the H II region G347.600 + 00.211 and its effects on the surrounding medium. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 509, 3395.
- Cesaroni, R. (2005) in *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, 227, eds. R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, & M. Walmseley, 59
- Cichowolski, S., Suad, L. A., Pineault, S., Noriega-Crespo, A., Arnal, E. M., Flagey, N. (2015)

- The infrared and molecular environment surrounding the Wolf-Rayet star WR 130. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 450, 3458.
- Csengeri, T., Urquhart, J. S., Schuller, F., et al. (2014) *Astronomy & Astrophysics* 565, A75
- Duvidovich, L., Petriella, A. (2023) Radio and infrared study of the supernova remnant candidate HESS J1912+101, *Astronomy and Astrophysics* 672, 195
- Jones, S. F., Blain, A. W., Lonsdale, C., Condon, J., Farrah, D., Stern, D., Tsai, C., Assef, R. J., Bridge, C., Kimball, A., Lacy, M., Eisenhardt, P., Wu, J., Jarrett, T. (2015) Submillimetre observations of WISE/radio-selected AGN and their environments, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 448, 3325
- König, C., Urquhart, J. S., Csengeri, T., et al. (2017) *Astronomy & Astrophysics* 599, A139
- Kurtz, S., Cesaroni, R., Churchwell, E., Hofner, P., & Walmsley, C. M. (2000) in *Protostars and Planets IV*, eds. V. Mannings, A. P. Boss, & S. S. Russell, 299
- Loukitcheva, M. A., Iwai, K., Solanki, S. K. White, S. M., Shimojo, M. (2017) Solar ALMA Observations: Constraining the Chromosphere above Sunspots, *Astrophysical Journal* 850, 35
- Loukitcheva, M.A.(2020) Measuring magnetic field with Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 7, 45
- Nindos, A., Patsourakos, S., Jafarzadeh, S., Shimojo, M. (2022) The dynamic chromosphere at millimeter wavelengths, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 9
- Petriella, A., Duvidovich, L., Giacani, E. (2021) Radio study of HESS J1857+026: Gamma-rays from a superbubble?, *Astronomy and Astrophysics* 652, 142
- Saldaño, H. P., Rubio, M., Bolatto, A. D., Sandstrom, K., Swift, B. J., Verdugo, C., Jameson, K., Walker, C. K., Kulesa, C., Spilker, J., Bergman, P., Salazar, G. A. (2024) SuperCAM
- CO(3-2) APEX survey at a 6 pc resolution in the Small Magellanic Clouds, *Astronomy & Astrophysics* 687, 26
- Stanke, Th., Arce, H. G., Bally, J., Bergman, P., Carpenter, J., Davis, C. J., Dent, W., Di Francesco, J., Eislöffel, J., Froebrich, D., Ginsburg, A., Heyer, M., Johnstone, D., Mardones, D., McCaughrean, M. J., Megeath, S. T., Nakamura, F., Smith, M. D., Stutz, A., Tatematsu, K., Walker, C., Williams, J. P., Zinnecker, H., Swift, B. J., Kulesa, C., Peters, B., Duffy, B., Kloosterman, J., Yıldız, U. A., Pineda, J.L., De Breuck, C., Klein, Th. (2022) The APEX Large CO Heterodyne Orion Legacy Survey (ALCOHOLS). I. Survey overview. *Astronomy and Astrophysics* 658, 178
- Suad, L. A., Caiafa, C. F., Arnal, E. M., Cichowolski, S. (2014) A new catalog of HI supershell candidates in the outer part of the Galaxy, *Astronomy & Astrophysics* 564, 116
- Suad, L. A., Caiafa, C. F., Cichowolski, S., Arnal, E. M. (2019) Galactic H I supershells: kinetic energies and possible origin, *Astronomy and Astrophysics* 624, 43

EL ARREGLO INTERFEROMÉTRICO MULTIPROPÓSITO (MIA): Primer Radiointerferómetro Argentino

Palabras clave: radioastronomía, instrumentación, desarrollo tecnológico, grandes equipamientos, interferómetros.

Key words: radio astronomy, instrumentation, technological development, large equipments, interferometers.

En este artículo presento el proyecto del primer arreglo interferométrico multipropósito desarrollado en la Argentina. Se trata de un instrumento completamente diseñado y construido en el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) donde se está instalando el prototipo del instrumento. La interferometría combina diversos radiotelescopios pequeños para lograr una sensibilidad y un poder resolvente para la detección y estudio de fuentes extraterrestres mucho mayor que la que se puede obtener con grandes antenas. El nuevo instrumento será modular, con receptores digitales de gran ancho de banda (hasta 1 GHz) y operará a bajas frecuencias, en el rango de 2 GHz. El instrumento será idóneo para la investigación de fuentes transitorias muy rápidas (del orden del milisegundo), pulsares, y otros sistemas astrofísicos rápidamente variables. Podrá sumarse a la detección de ondas gravitacionales monitoreando pulsares del milisegundo. En su configuración final el instrumento contará con unas 64 antenas de unos 4.1 m de diámetro, localizadas en una región de baja interferencia del oeste de la República Argentina.

Gustavo E. Romero

Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR – CONICET/CIC/UNLP), C.C. 5, 1894 Villa Elisa, PBA, Argentina.
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAyG), Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque s/n, 1900 La Plata, PBA, Argentina.

E-mail: gustavo.esteban.romero@gmail.com

The Multipurpose Interferometric Array (MIA): First Argentine Radiointerferometer

In this article I present the project of the first multipurpose interferometric array developed in Argentina. It is an instrument designed and built entirely at the Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), where the prototype of the instrument is being installed. Interferometry combines several small radio telescopes to achieve much higher sensitivity and resolving power for the detection and study of extraterrestrial sources than can be achieved with large antennas. The new instrument will be modular, with high-bandwidth digital receivers (up to 1 GHz) and will operate at low frequencies, in the 2 GHz range. The instrument will be suitable for the study of very fast transient sources (on the order of milliseconds), pulsars, and other rapidly changing astrophysical systems. It will be able to contribute to the detection of gravitational waves by monitoring millisecond pulsars. In its final configuration, the instrument will have about 64 antennas, each about 4.1 m in diameter, located in a low-interference region of western Argentina.

■ ANTECEDENTES

Los orígenes de la radioastronomía en Sudamérica y del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), el primer observatorio dedicado a esta rama de la astronomía en esta parte del mundo, están asociados al nombre de Merle Anthony Tuve

(27 de junio de 1901 - 20 de mayo de 1982). Tuve fue un geofísico estadounidense pionero en el uso de ondas de radio pulsadas. Sus descubrimientos allanaron el camino para el desarrollo del radar y la física nuclear. Merle A. Tuve fue director del Departamento de Magnetismo

Terrestre (DTM) de la Institución Carnegie para la Ciencia (1946-66), y desde ese puesto desempeñó un papel clave en la creación del IAR.

El 7 de diciembre de 1961, Tuve envió una carta al Dr. Bernardo Houssay, presidente del Consejo

Nacional de Investigaciones Científicas de Argentina (CONICET), en la que proponía la creación de una estación de radioastronomía en Argentina, junto con un memorándum en el que se describía el instrumento principal de la instalación: un radiotelescopio de 30 m de diámetro con montura ecuatorial. El instrumento podría cubrir desde el polo sur celeste hasta -10 grados de declinación y de -2 a $+2$ horas de ascensión recta. Esto le permitiría observar todo el plano de la Galaxia y mapear la distribución del hidrógeno neutro galáctico por medio de la detección de la línea de transición hiperfina de 21 cm de longitud de onda. El DTM proporcionaría todos los materiales para la construcción del telescopio. La carta inicial de Tuve inició una serie de intercambios con Houssay que acabarían desembocando en la creación de la IAR.

El 27 de abril de 1962, el CONICET creó el Instituto Nacional de Radioastronomía (INRA). Posteriormente, se firmó un convenio con la Universidad de Buenos Aires, la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) y la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la provincia de Buenos Aires, por el que se establecía que todas estas instituciones colaborarían en el sostenimiento del nuevo instituto. Finalmente, se cambió el nombre por el de Instituto Argentino de Radioastronomía, para evitar confusiones con otro instituto dedicado a las tecnologías agropecuarias, pero con las mismas siglas. La historia del IAR ha sido presentada en detalle por Bajaja (2009) y por Romero (2024), por lo que no la repetiremos aquí. El lector interesado puede consultar los trabajos mencionados. Aquí nos limitaremos a mencionar que luego de muchos años de servicio, el radiotelescopio del IAR y un gemelo que fue construido durante los años 1970, habían dejado de funcionar para el año 2018. Cuando una nueva gestión se

hizo cargo del instituto ese año, encontró un panorama desolador: los dos instrumentos principales habían estado fuera de servicio por 20 años, desde 1998. Además, las capacidades de generar tecnología y transferirla por parte del instituto estaban completamente sin aprovechar, y se carecía de una política institucional en lo referido a la observación radioastronómica (para más detalles ver Romero 2024).

La nueva gestión encontró fuerte apoyo por parte del CONICET para reorganizar la institución. Se presentó un proyecto de recuperación de los radiotelescopios y en poco tiempo los mismos pudieron ser relanzados con una completa modernización de su electrónica. En septiembre de 2019 los instrumentos fueron bautizados como Radiotelescopio Carlos Varsavsky (la primera antena) y Radiotelescopio Esteban Bajaja (la segunda antena), en honor a dos directores del IAR. Dado que el tamaño de los radiotelescopios, si bien importante para los años en que fueron construidos, hoy es modesto, el énfasis de la modernización reca-

yó sobre la electrónica, incorporándose fibra óptica para la transmisión de datos, usando nuevos receptores digitales basados en placas de electrónica programable --lo que permite controlar el ancho de banda en forma instantánea. Además se incorporaron diversas bases de tiempo (GPS, GNSS, reloj atómico), y se aumentó la sensibilidad con el incremento del ancho de banda desde los antiguos 50 MHz hasta los 400 MHz. El nuevo sistema permite remover en forma electrónica las interferencias de origen humano y logra la detección de pulsos de radio de origen astrofísico significativamente más breves que un milisegundo, con microestructura detectable hasta el nivel del microsegundo. Estos avances fueron posibles gracias al enorme esfuerzo de los ingenieros y técnicos del IAR, la introducción de un nuevo organigrama de trabajo, la mejora de los laboratorios, y la colaboración de varias instituciones como el *Rochester Institute of Technology* (RIT), el Observatorio de Parkes, y el *Harvard-Smithsonian Observatory*, entre otros. La Figura 1 muestra al IAR el día del bautismo de los radiotelescopios.



Figura 1. Vista parcial del Instituto Argentino de Radioastronomía el día en que se bautizaron los dos radiotelescopios de 30 m, completamente renovados. Septiembre de 2019.

Los nuevos telescopios se dedicaron al estudio de pulsares y a la detección de los llamados *glitches* que ocurren en ellos. Éstos son el resultado de movimientos en la corteza y en el interior de las estrellas de neutrones que cuando rotan generan los pulsos medidos desde la tierra. Por tanto, su estudio es útil para investigar el estado de la materia dentro de estas estrellas ultra-compactas. También se están investigando las fulguraciones que presentan los llamados *magnetares*, estrellas compactas muy magnetizadas (son los objetos más magnetizados del universo), y se observan pulsares del milisegundo (estrellas de neutrones que rotan 1000 veces por segundo) para colaborar con la detección y medición de ondas gravitacionales gigantes que con su paso pueden afectar la velocidad de rotación (ver, por ejemplo, Gancio et al. 2020; Sosa Fiscella et al. 2021; Zubieta et al. 2023, 2024; Lousto et al. 2024).

Para el año 2020, sin embargo, era evidente que por más productivos que fuesen los radiotelescopios existentes, el IAR necesitaba de un nuevo proyecto instrumental que le permitiera realizar nuevos desarrollos y alcanzar objetivos que aún no eran posibles desde Sudamérica. Esto, estimó la nueva dirección, era una herramienta fundamental para seguir posicionando al instituto a nivel internacional y en la vanguardia científico-tecnológica del país. El proyecto que propuso el IAR para su futuro se llamó *Multipurpose Interferometric Array* (MIA). Ese mismo año se obtuvo un subsidio del CONICET para dar comienzo al mismo.

■ CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO

MIA está diseñado para ser un instrumento de bajo coste en su fase inicial, con capacidad para ampliarse y actualizarse con el tiempo. El

instrumento constará de varias radioantenas conectadas a un ordenador central que procesará los datos y generará las imágenes de los objetos observados y las curvas temporales de sus variaciones. La configuración final podrá incluir hasta 64 antenas dispuestas en un arreglo tal que se logre una resolución angular importante. La misma viene dada por la máxima separación entre los discos de las unidades de observación, que serán fijas.

MIA tendrá una gran sensibilidad, permitiendo a los investigadores detectar radiofuentes débiles con gran precisión. El instrumento será capaz de operar en frecuencias entre 1 GHz y 2,3 GHz con la capacidad de añadir un subarreglo de antenas de baja frecuencia, posibilitando un amplio rango de aplicaciones científicas y tecnológicas. El potencial científico de MIA abarcará un amplio abanico de áreas de investigación en astrofísica (ver Benaglia 2024). Entre ellas, la detección de transitorios homólogos en radio frecuencias a los estallidos de rayos gamma, el estudio de los destellos de radio rápidos (conocidos en inglés como *fast radio bursts* o FRBs), el cronometraje de púlsares y la observación de fulguraciones en magnetares y otros objetos compactos. Además, MIA permitirá el estudio del radio espectro y su evolución temporal de binarias de rayos X y microcuásares, así como la identificación de la contraparte de fuentes de rayos gamma no identificadas. Éstas últimas se espera que abunden en las próximas décadas debido a la entrada en servicio, en Chile, del *Cherenkov Telescope Array* (CTA), un instrumento revolucionario para la detección de rayos gamma. Otras áreas de investigación en las que MIA puede hacer contribuciones significativas incluyen los estudios de variabilidad multifrecuencia de núcleos galácticos activos, el estudio

de la morfología y la distribución espectral de remanentes de supernova y la cartografía de fuentes continuas no térmicas. La sensibilidad de MIA también permitirá el estudio de la línea hidrógeno neutro (HI) a distancias cosmológicas para caracterizar la época de reionización del Universo, así como el estudio del medio interestelar con alta resolución angular (ver, para más detalles, Benaglia 2024 y Gancio 2024).

La ubicación de MIA, único instrumento en su tipo en ser instalado en Sudamérica, le permitirá monitorear una gran variedad de fuentes una vez que las mismas hayan dejado de ser observables desde Australia y Sudáfrica, posibilitando, por vez primera, obtener un seguimiento continuo de numerosos fenómenos que son altamente dependientes del tiempo. En ese sentido, MIA desempeñará un papel importante en la expansión de la investigación astrofísica en Argentina y contribuirá a los esfuerzos de la comunidad científica mundial para profundizar nuestra comprensión del Universo. En la Figura 2 mostramos una simulación de cómo se vería una radiogalaxia con un arreglo inicial de sólo 16 antenas.

■ DISEÑO BÁSICO DE MIA

El diseño de MIA es modular y expansivo por medio de diferentes fases a las cuales se les va agregando unidades de observación (antenas) y se va incrementando en forma correspondiente la potencia computacional y el almacenamiento para el procesamiento de los datos. En su Fase 1 MIA incluye un total de 16 antenas, cada una con un diámetro de 5 m y una montura alto-azimutal, lo que le da una cobertura total del cielo austral. En esta configuración el interferómetro tiene una resolución angular mínima de 1,5 segundos de arco en el cielo trabajando

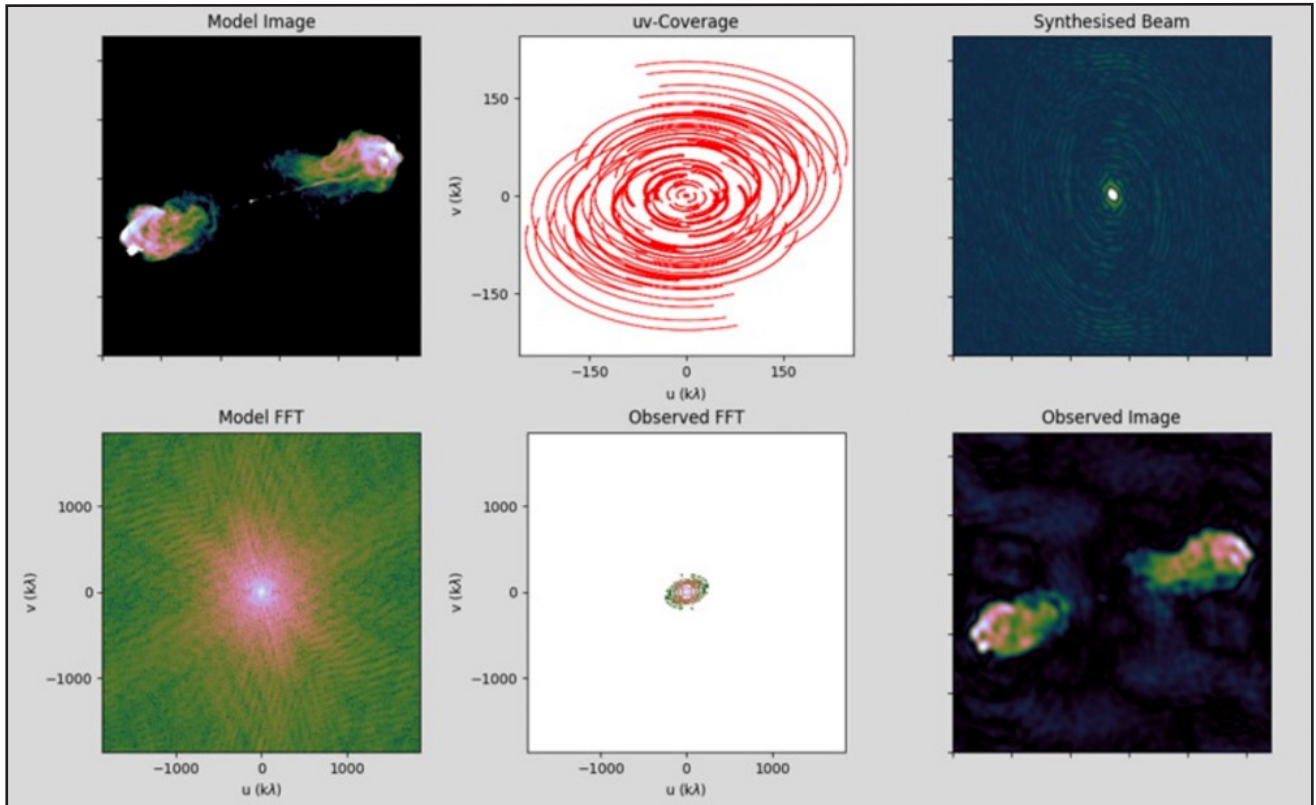


Figura 2. Resultado de una simulación de cómo se vería una radio galaxia con el arreglo de 16 antenas extendido sobre una distancia de 50 km. En el ángulo superior izquierdo se ve la imagen modelo y en el inferior derecho cómo se vería la misma imagen con el instrumento.

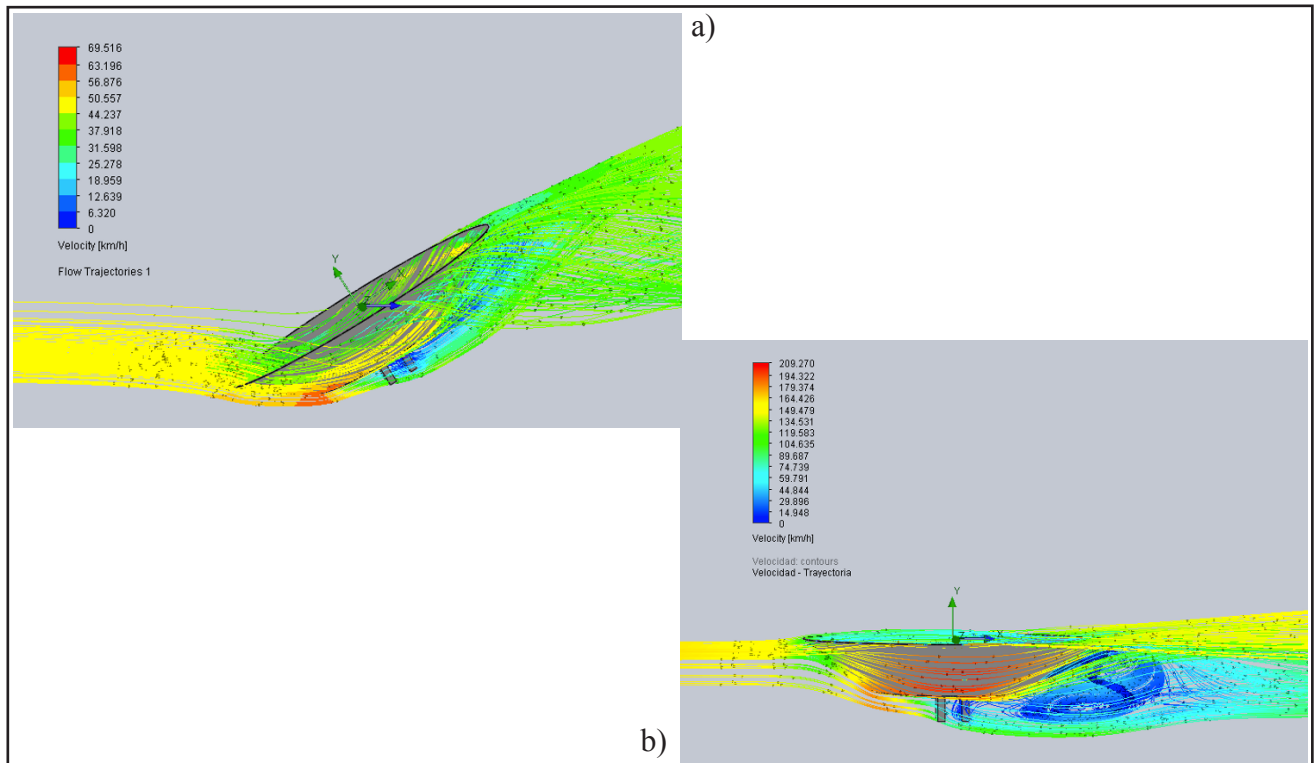


Figura 3. Simulaciones numéricas de fluidodinámica del comportamiento de la antena ante vientos de 50 km/h. a) Viento incidente con la antena inclinada. b) Viento incidente con la antena en posición de descanso. Los colores indican la velocidad local del aire.

Tabla 1. Parámetros básicos de MIA Fase 1.

Número de antenas	16
Diámetro de cada antena	5 m
Tipo de montura	Alto-Azimutal
Línea de base mínima	50 km
Línea de base máxima	55 km
Resolución angular	1,5 segundos de arco a 1420 MHz con separación de 50 km
Temperatura del receptor	50 K
Rango operativo inicial de frecuencias	1 a 2,3 GHz
Modo de digitalización	En cada antena
Ancho de banda	1000 MHz
Correlación	En el nodo central
Fuente de potencia para las antenas	Solar
Polarización	Modos Q, U, y V

en una frecuencia de 1420 MHz y una separación de las antenas de 50 km. Para comparación, los telescopios de 30 metros actuales del IAR tienen una resolución de 30 minutos de arco (aproximadamente el equivalente del tamaño de la luna llena en el cielo) y una montura ecuatorial que sólo les permite seguir una fuente en el cielo por 4 horas.

La temperatura de los receptores en esta primera fase será ligeramente inferior a 50 K y el arreglo operará en el rango de frecuencias de 1 a 2,3 GHz, digitalizando las señales recibidas en forma independiente en cada antena, de manera que se paralelizará la digitalización disminuyendo los requerimientos de procesamiento central. El ancho de banda final del sistema se espera sea de 1000 MHz (más del doble del de los radiotelescopios a actuales del IAR) y la correlación de las señales tendrá lugar en un nodo central. Además, el interferómetro en esta fase está diseñado para aumentar su capacidad hacia la Fase 2 por medio de la adición de antenas, tanto al núcleo central como a las ramas externas, lo que permite una expansión flexi-

ble del sistema y el desarrollo de su potencial en diferentes direcciones. El arreglo central posibilitará incrementar sensibilidad, mientras que las unidades externas servirán para expandir la resolución. Al estar dedicado en parte a análisis de variaciones temporales rápidas, la estación central contará con bases de tiempo variadas como GPS, GNSS (con sus correspondientes antenas para baja de la señal satelital) así como con reloj atómico.

Las estaciones individuales serán altamente autónomas, alimentadas por un sistema de baterías y paneles solares localizados a un lado de cada una. Un sumario de las características de MIA en su Fase 1 se presenta en la Tabla 1. La Fase 2, por otro lado, contempla la extensión hasta 64 antenas, con el consiguiente aumento de sensibilidad y resolución. Además, en esta fase, se espera poder operar a frecuencias aún más bajas, a partir de los 300 MHz. Para ello se agregarán antenas adecuadas (de formato muy sencillo) cerca de cada estación.

■ DEMOSTRADOR Y DESARROLLO DE SU TECNOLOGÍA

La fase inicial del proyecto, denominada Fase 0, consiste en desarrollar la tecnología del instrumento, e integrar sus diversos subsistemas en un demostrador tecnológico que operará en el IAR. Esta fase contempla el diseño e implementación de varios de los subsistemas básicos del instrumento: 1) las antenas parabólicas; 2) la mecánica de su movimiento y control; 3) el receptor que transforma las ondas electromagnéticas libres en guiadas; 4) el receptor digital y el correlador que utiliza la información proveniente de las unidades y las procesa para obtener los datos de uso científico; 5) las unidades de almacenamiento de la información de cada observación; 6) el paquete de programas que se usa para el control del instrumento y el procesamiento de los datos.

Describiremos brevemente estos componentes a continuación.

1. Las antenas. Se trata de paraboloïdes que reflejan las ondas electromagnéticas que llegan desde el espacio y las concen-

tran en el receptor. Deben estar diseñados para soportar los vientos e inclemencias del tiempo en el lugar donde se ubiquen las antenas. Son estructuras de aluminio, con una superficie reflectante para las ondas de las

longitudes a estudiar. En la Figura 3 se muestran algunas de las simulaciones que se hicieron al diseñarlas para evaluar la respuesta a vientos. En las Figuras 4 y 5, se muestra la construcción del primer prototipo en los talle-

res del IAR y el resultado, colocado junto a los grandes telescopios del IAR. Es la primera vez que una antena de estas características se diseña y construye íntegramente en Argentina.



Figura 4. Construcción de la primera antena (modelo de ingeniería) en los talleres del IAR.



Figura 5. Antena terminada, junto a los dos grandes radiotelescopios del IAR.

2. El sistema de movimiento consiste en dos motores que controlan el movimiento en altura y el movimiento azimutal en forma independiente. Dado el balance de la antena, los esfuerzos que deben realizar los motores y su consumo eléctrico, son mínimos. En la Figura 6 se muestra el diseño de estos.
3. El receptor de cabecera, conocido como *front-end*, va localizado en el foco del paraboloide de la antena. Consiste en una antena Vivaldi desarrollada y testeada en el IAR (ver Figuras 7 y 8), junto a una serie de amplificadores. El diseño de esta parte del instrumento puede verse en la Figura 9, junto con los equipos construidos.

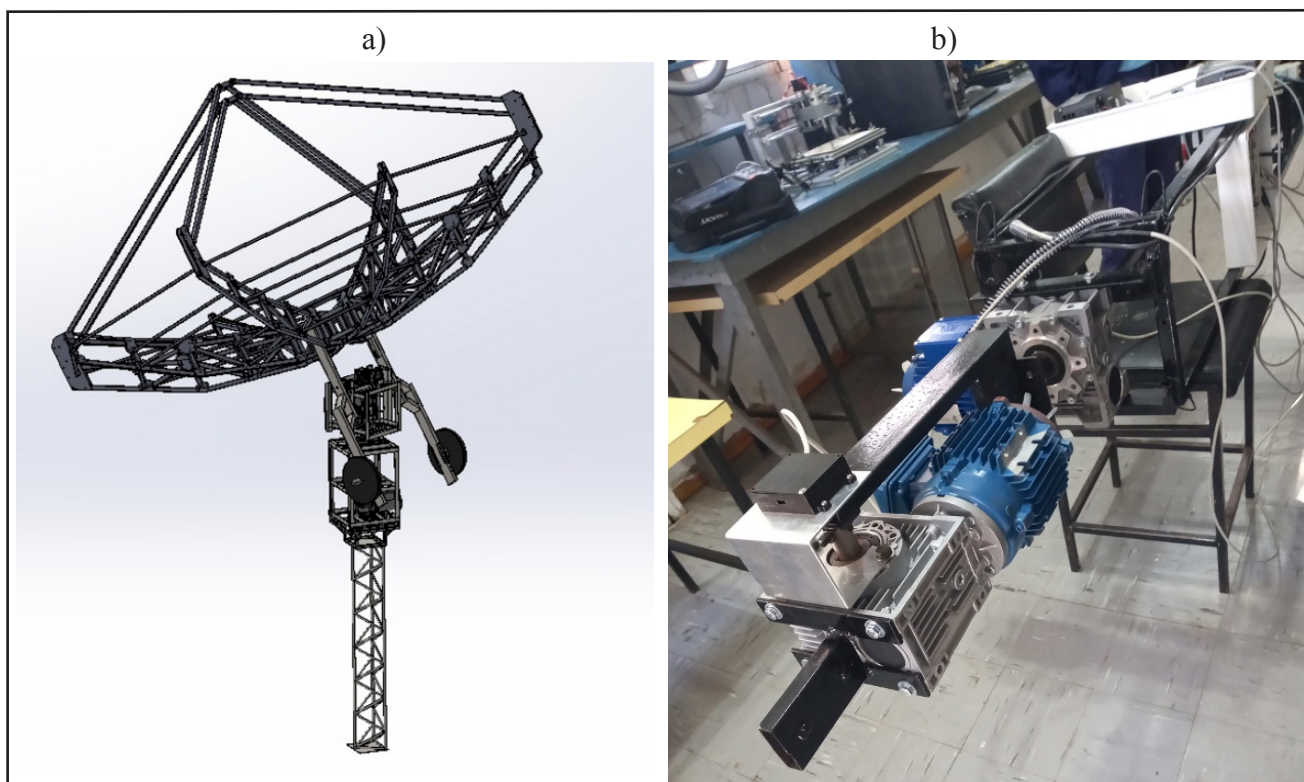


Figura 6. Sistema de movimiento de los radiotelescopios individuales. a) Diseño. b) Implementación.

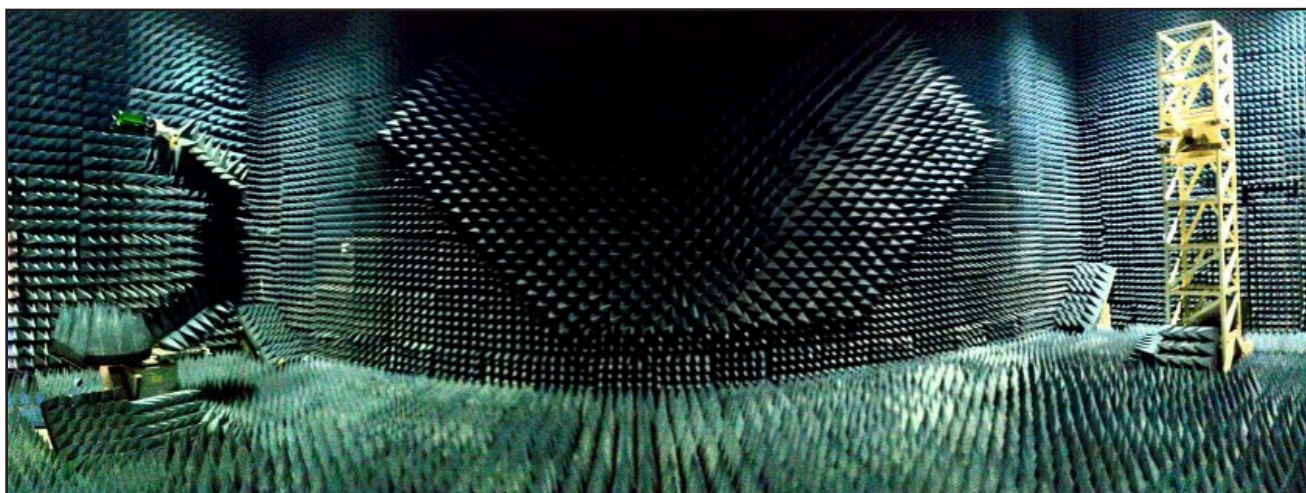


Figura 7. Antena Vivaldi desarrollada en el IAR para alimentar el front-end de los discos parabólicos individuales, durante sus pruebas en la cámara anecoica del instituto.

4. El receptor digital (*back-end*) y el correlador están conformados sobre la base de una placa SNAP CASPER, diseñada especialmente para uso radioastronómico por la *Collaboration for Astro-*

nomical Signal Processing and Electronics Research (CASPER)¹. Este sistema consiste en un *Field Programmable Gate Array* (FPGA) programado para realizar el procesamiento digital de señales en

tiempo real sobre los datos entrantes. La tarjeta puede programarse mediante las herramientas desarrolladas por CASPER, que proporciona un lenguaje de programación de alto nivel para configurar la FPGA. Este lenguaje permite diseñar e implementar algoritmos de procesamiento de señales personalizados para satisfacer los requisitos específicos del sistema de MIA. En la Figura 10 se muestra el receptor digital ya instalado en el IAR.

5. La información se guarda luego en un sistema de almacenamiento modular expandible de discos de estado sólido. Cada sesión de observación puede producir, dependiendo del modo, hasta 1 TB de datos. Ver Figura 11.
6. Finalmente, los programas usados van desde los que programan los modos de funcionamiento del *hardware* hasta los programas de control remoto de las antenas y el software de pro-

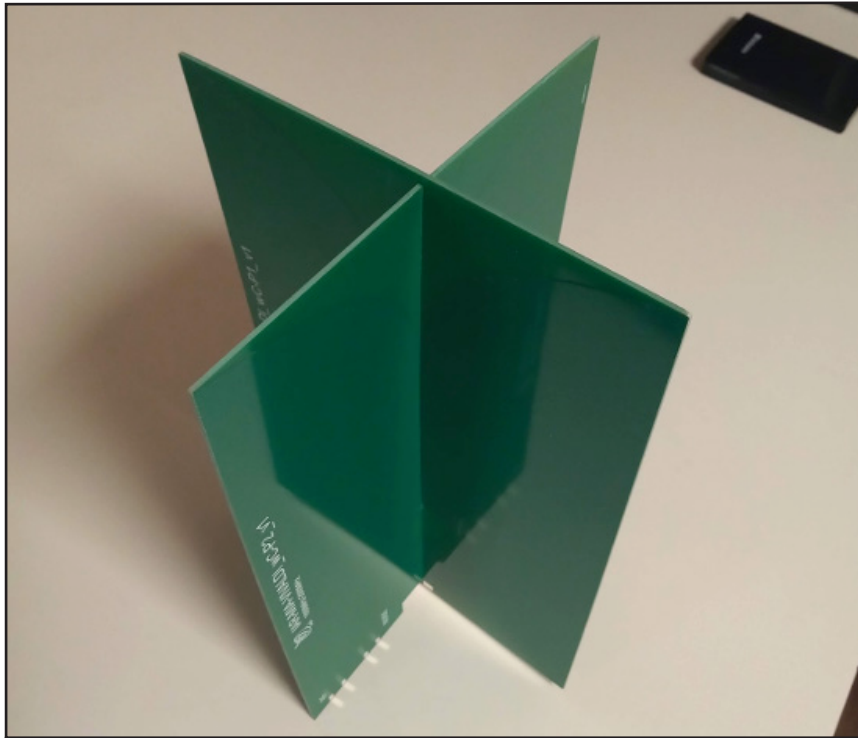


Figura 8. Antena Vivaldi construida en el IAR.

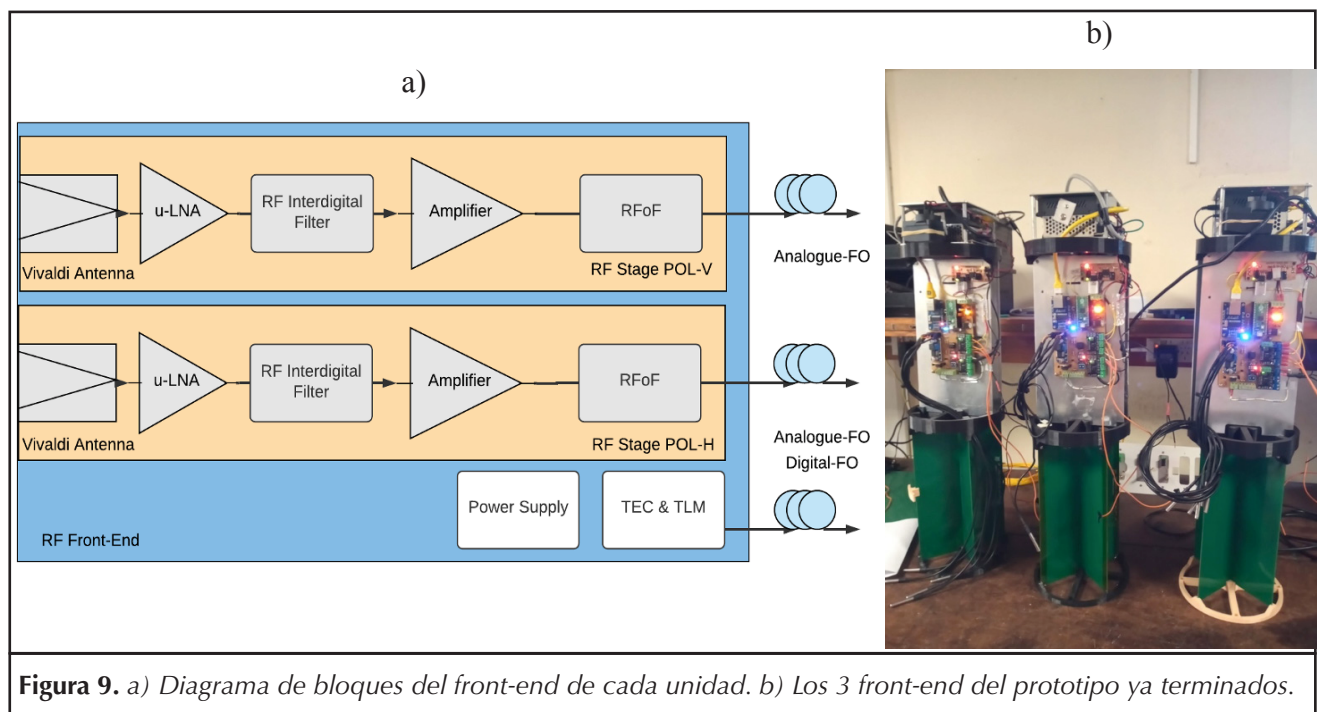


Figura 9. a) Diagrama de bloques del front-end de cada unidad. b) Los 3 front-end del prototipo ya terminados.

cesamiento. Buena parte de este paquete de programas está ya en funcionamiento en el IAR desarrollado por el Departamento de Sistemas del instituto.

En la Figura 12 mostramos el diagrama de bloques del demostrador, y en la Figura 13 las antenas finales ya instaladas en el predio del IAR.

■ EL FUTURO

Buena parte de la tecnología desarrollada por el IAR para construir el demostrador tiene inmediata aplicación en otras áreas. En particular, el instituto y su Sector de Transferencia de Tecnología están aplicando parte de esta tecnología para construir un prototipo de estación terrena de bajo costo para bajada de datos satelitales, tanto producidos por satélites geoestacionarios como de órbita baja. La experiencia adquirida en la detección de ondas de bajas frecuencias, por otro lado, ha permitido formular una nueva iniciativa

que complementa a MIA en el rango de 30 MHz a 300 MHz. Se trata de LARA², el *Lunar Antenna for Radio Astronomy*: una antena desplegable por energía elástica sensible en el rango de frecuencias mencionado, inaccesible desde la Tierra y órbitas bajas debido a la enorme cantidad de radio interferencias de origen humano (radios FM, entre otras). LARA está pensado para operar en órbita lunar, para observar desde el lado oscuro de la Luna, donde el propio satélite natural apantalla todas las interferencias. Este rango de frecuencias es importante por varias razones. Entre otras, porque permite monitorear la emisión sincrotrónica de electrones relativistas acelerados por el Sol en el campo magnético de Júpiter. Esto puede proveer información no sólo sobre Júpiter y su magnetosfera, sino también sobre el clima espacial de todo el sistema solar. En estas frecuencias, además, la línea de hidrógeno neutro primordial, fuertemente desplazada hacia el rojo por la expansión del univer-

so, debería manifestarse permitiendo investigar el proceso conocido como "reionización cósmica".

En lo que a MIA se refiere, hay a continuación dos grandes pasos a tomar, una vez que todas las pruebas se hayan concluido con el prototipo: 1) expandir el modelo de ingeniería en un radiointerferómetro que opere en el IAR incorporando las antenas de 30 m como unidades adicionales, así como otras 16 antenas más pequeñas, y 2) escoger un sitio adecuado en el oeste de la República Argentina donde desarrollar, junto a un socio internacional aún no definido, el instrumento completo con una línea de base mínima de 50 km.

Nunca el futuro de la radioastronomía argentina se ha mostrado tan promisorio ni con tantos planes en desarrollo. Es de esperar que en los próximos años esta disciplina no sólo vuelva a ocupar un lugar de excelencia como el que ocupó a mediados de la década de 1960, sino



Figura 10. Receptor digital y correlador del prototipo de tres antenas instalado en el IAR. El sistema se basa en una placa programable SNAP CASPER.



Figura 11. Unidades de almacenamiento de memoria en la sala del IAR

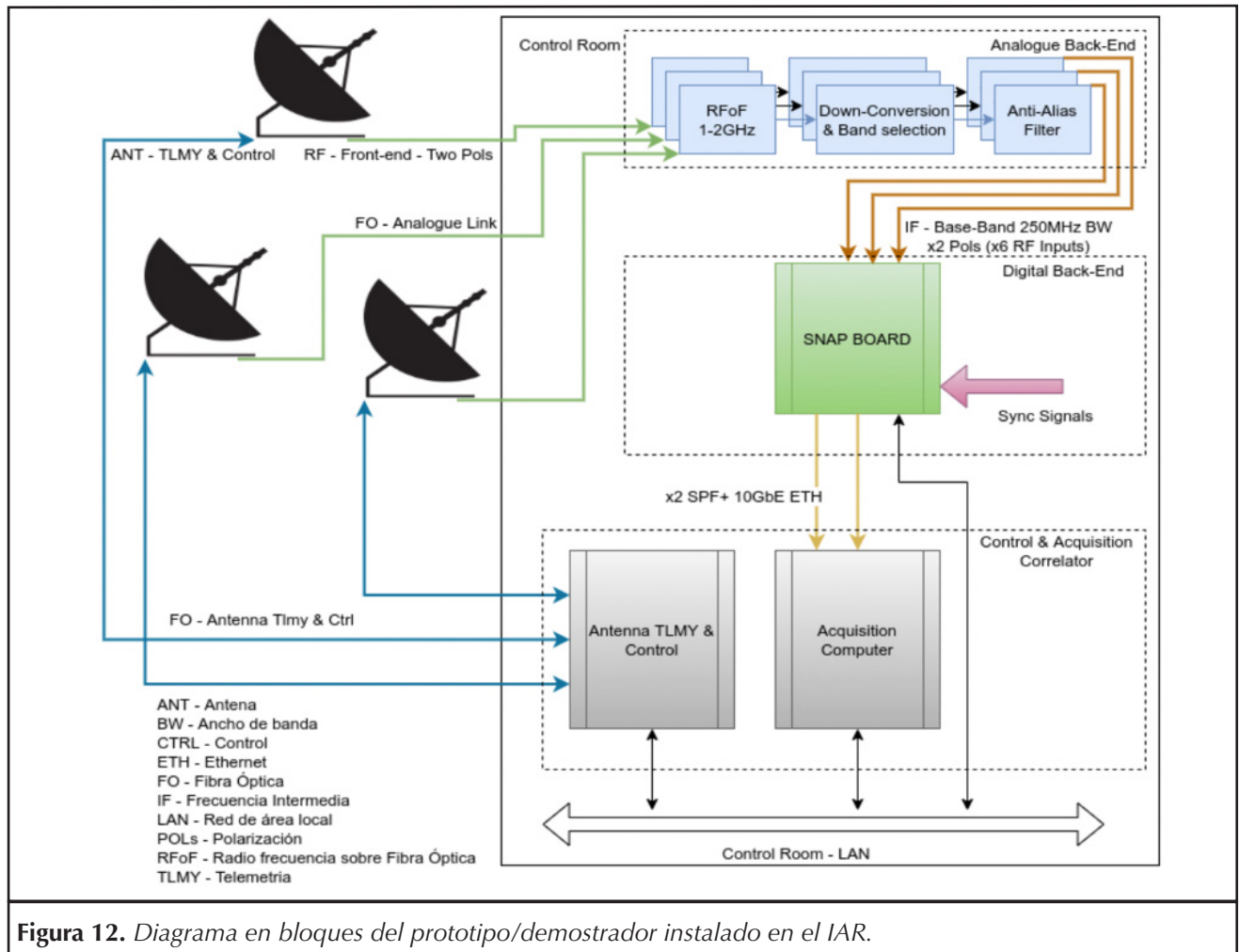


Figura 12. Diagrama en bloques del prototipo/demostrador instalado en el IAR.



Figura 13. Las tres primeras antenas en su posición en el IAR (agosto 2024).

que abra nuevos horizontes para la próxima generación de astrónomos, astrofísicos, y tecnólogos del país.

■ GLOSARIO

Antena: Parte de un radiotelescopio que colecta las ondas electromagnéticas libres.

Back-end: Parte del receptor que digitaliza las señales recibidas desde el *front-end* y las entrega para su correlación y análisis.

Binaria de rayos X: Sistema astrofísico compuesto por una estrella normal y un objeto compacto (estrella de neutrones o agujero negro) que recibe materia desde la estrella.

Byte (B): Unidad mínima de información. TB: un billón de bites.

Correlador: Instrumento que correlaciona las detecciones de varios radiotelescopios haciéndolos funcionar como un único telescopio.

Front-end: Parte del receptor que usualmente se ubica en el foco de la antena y transforma las ondas electromagnéticas libres en guiadas, amplificándolas, y luego enviándolas al *back-end*.

Hertz (Hz): Unidad de medida de la frecuencia de una onda. Es la longitud de un ciclo de la onda dividida la velocidad. MHz: un millón de Hz. GHz: 1000 MHz.

Microcuásar: Binaria de rayos X que produce chorros de plasma relativista que se propagan por el espacio.

Placa: Soporte para unidades de procesamiento de datos.

Púlsar: estrella muy compacta (radio de unos 10 km) con una masa mayor que la del Sol. Su densidad es similar a la densidad nuclear del átomo. Rota rápidamente emitiendo pulsos

electromagnéticos como si fuese un faro en el espacio.

Magnetar: Púlsar joven con un campo magnético gigantesco que puede llegar a los 10^{15} Gauss (unos 10 mil millones de veces mayor que los campos magnéticos generados artificialmente en la Tierra).

Radiotelescopio: instrumento diseñado para recibir ondas electromagnéticas en el rango de radio desde el espacio. Consta de una superficie colectora reflectante, un receptor, que a su vez tiene un cabezal comúnmente en el foco de la antena y una unidad de digitalización que procesa las señales.

Receptor: Parte electrónica de un radiotelescopio que detecta, amplifica, digitaliza y mide las ondas electromagnéticas que llegan a la antena.

AGRADECIMIENTOS: Agradezco profundamente a todo el personal del IAR por su trabajo y profesionalismo en la implementación de éste y otros muchos proyectos. En especial, agradezco a Paula Benaglia, Leandro García, y Guillermo Gancio por sus roles decisivos en la elaboración e implementación de MIA. También agradezco al CONICET por haber financiado parcialmente nuestro trabajo por medio de un PUE y varios aportes especiales, así como a la UNLP y a la CIC (PBA) por su apoyo.

■ REFERENCIAS

Bajaja, E. (2009), Historia del IAR, en: Historia de la Astronomía Argentina, Eds. G. E. Romero, S. A. Cellone & S. A. Cora, La Plata: AAA Book Series Vol. 2, pp. 217-296.

Benaglia, P. (2024), Science Research from the Instituto Argen-

tino de Radioastronomía, RMxAAC 56: 117-123.

Gancio, G., Lousto, C. O., Combi, L., et al. (2020), Upgraded antennas for pulsar observations in the Argentine Institute of Radio Astronomy, A&A 633, id. A84: 12 pp.

Gancio, G., Romero, G. E., Benaglia, P., et al. (2024), The Multipurpose Interferometric Array and the Development of its Technological Demonstrator, RMxAAC 56: 63-70.

Lousto, C. O., Missel, R., Zubieta, E., et al. (2024), Pulsar Observations at Low Latitudes and Low Frequencies, RMxAAC 56: 134-144.

Romero, G. E. (2024), The Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR): Past, present, and future, RMxAAC 56: 2-16.

Sosa Fiscella, V., del Palacio, S., Combi, L., et al. (2021), PSR J0437-4715: The Argentine Institute of Radioastronomy 2019-2020 Observational Campaign, ApJ 908(2), id.158: 14 pp.

Zubieta, E., Missel, R., Sosa Fiscella, V., et al. (2023), First results of the glitching pulsar monitoring programme at the Argentine Institute of Radio Astronomy, MNRAS 521(3): 4504-4521.

Zubieta, E., del Palacio, S., García, F., et al. (2024), Updates on the Glitching Pulsar Monitoring Campaign Performed from IAR, RMxAAC 56: 161-165.

■ NOTAS

1. <https://casper-astro.github.io/>
2. Proyecto colaborativo con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

NOTA CIENCIOMÉTRICA DE LA EDITORIAL: POSICIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA ARGENTINAS RESPECTO A LAS DE OTROS PAÍSES

Palabras clave: Cienciometría, Astronomía, Astrofísica.

Key words: *Scientometrics, Astronomy, Astrophysics from 1996 to 2022.*

Resumen: Evolución del “tamaño científico” de Astronomía y Astrofísica argentinas de 1996 a 2022.

Scientometrics note:

Abstract: Position and evolution of Argentine Astronomy and Astrophysics compared to those from other countries.

Luis A. Quesada Allué

Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires
Asociación Argentina para el Progreso de las
Ciencias (AAPC)
Editor Ciencia e Investigación

* E-mail: lualque@gmail.com

Resulta importante comparar la posición internacional relativa y la evolución entre 1996 y el 2022 de las disciplinas argentinas Astronomía y Astrofísica (AS+AF) a las cuales pertenecen los artículos presentes en este número de Ciencia e Investigación (74-3, 2024). El criterio cuantitativo que se adopta en esta ocasión para la comparación entre países es el internacionalmente aceptado de “Tamaño Científico” de disciplina, estimado por el número de documentos citables generado por cada país. La delimitación de la suma de ambas disciplinas, el Ranking y la categorización de ambas es el establecido y tabulado por Scopus-Scimago-SJR-Journal. Todos los datos se han tomado de este banco de datos en su sección Countries, al 10 de Septiembre de 2024. Este banco incorpora datos continuamente y ocasionalmente puede haber cambios de posición en los Rankings de países, disciplinas y sub-disciplinas

Se incluyen datos correspondientes a 2023 a pesar de considerárselo prematuro; por lo que probablemente durante los próximos meses haya algún posible cambio en las posiciones del Ranking correspondiente a ese año.

Lo más notorio de la Figura 1 es comprobar que las disciplinas argentinas Astronomía y Astrofísica (AS+AF), a pesar de haber perdido 9 posiciones en el ranking cuantitativo internacional entre 2008 y 2012, luego lograron recuperarse parcialmente. En el 2023 siguen en mucho mejor posición (31) que la que ocupa Argentina en el ranking de producción científica total por todas las disciplinas (“Tamaño Científico” de Argentina, puesto 51). Debe tenerse en cuenta que, para mantenerse la posición relativa de un país, los datos cienciométricos de posiciones en rankings dependen tanto o más de los resultados de otros países que de los propios.

En general, casi todos los países crecen en producción científica, pero varios, como por ejemplo India, China, Irán, Portugal y otros, han realizado grandes esfuerzos para incrementar la investigación científica. Se asume que actualmente para tratar de mantenerse en similar posición en los rankings, un país debería dedicar no menos de 1,0-1,2 % de su PBI a la investigación científico-tecnológica real. Pero si otros países realizan esfuerzos con mayores presupuestos y/o eficiencia de investigación, pueden superarlo en generación de conocimiento, tanto en cantidad como calidad.

Para tratar de entender el empeño global de Argentina en el período analizado aquí, deben considerarse varios factores. Por empezar, nunca se superó el 0,58% del PBI dedicado a ciencia y tecnología. Incluso, algunos de los datos económicos oficiales corresponden a pre-

supuestos que reflejan el esperado desempeño técnico de organismos ministeriales, donde no existe exigencia de originalidad; y no a real investigación en instituciones como Universidades, institutos de CONICET, INTA, CONAE y otras.

La Tabla 1 muestra que la tasa de crecimiento de Argentina en producción de documentos en AS+AF (13,9% anual promedio entre 1996 y 2023) es relativamente baja. En los países que ya eran muy desarrollados científicamente en 1996, la necesidad de crecimiento (con respecto a su población y/o a su PBI) suele ser menor que en los países atrasados. Por ejemplo, en la Tabla 1 se aprecia que la tasa de crecimiento promedio anual de un país de alto nivel como Canadá (12,25%) fue en esos años menor a la de Argentina; similar a lo ocurrido en un país científicamente importante como Brasil (12,29%). Pero España y Australia exhiben una tasa promedio algo mayor (17,92%, 16,25% anuales respectivamente) mientras que países con fuertes políticas de expansión científica han generado mucho más conocimiento (Chile 33,81%, Portugal 26,37% e Irlanda 25,77% anuales promedio). El caso de México (13,51%) es peculiar porque, a pesar de su tamaño poblacional y su PBI, no superó a la Argentina en la tasa de crecimiento de estas disciplinas. En el caso de Chile, sus números reflejan --además de su esfuerzo--, un alto nivel de colaboración internacional en estas disciplinas, como consecuencia de la ubicación de importantes observatorios astronómicos.

Impresiona la comparación entre un país como España, de similar población al nuestro, que en los '70 estaba por debajo de Argentina y que generó 2050 documentos en AS+AF en 2023, mientras que nosotros solo generamos 1311 (Tabla 2). A pesar de todo, Astronomía y Astro-

física han logrado mantener una posición mundial razonable, aunque no acorde con la población del país. Argentina es muy peculiar ya que, por razones históricas de un pasado con educación y desarrollo universitario-científico muy significativos, se han logrado mantener muy notorios éxitos puntuales. En muchos casos, instituciones e investigadores

de la élite científica han sobrevivido presupuestariamente gracias a colaboraciones y/o eventuales subsidios con grupos extranjeros. Desde el punto de vista estructural, Argentina tiene una "cabeza científica" de excelencia, internacionalmente significativa, pero un "cuerpo" raquítrico, debido a la mencionada crónica falta de recursos y falta de políticas

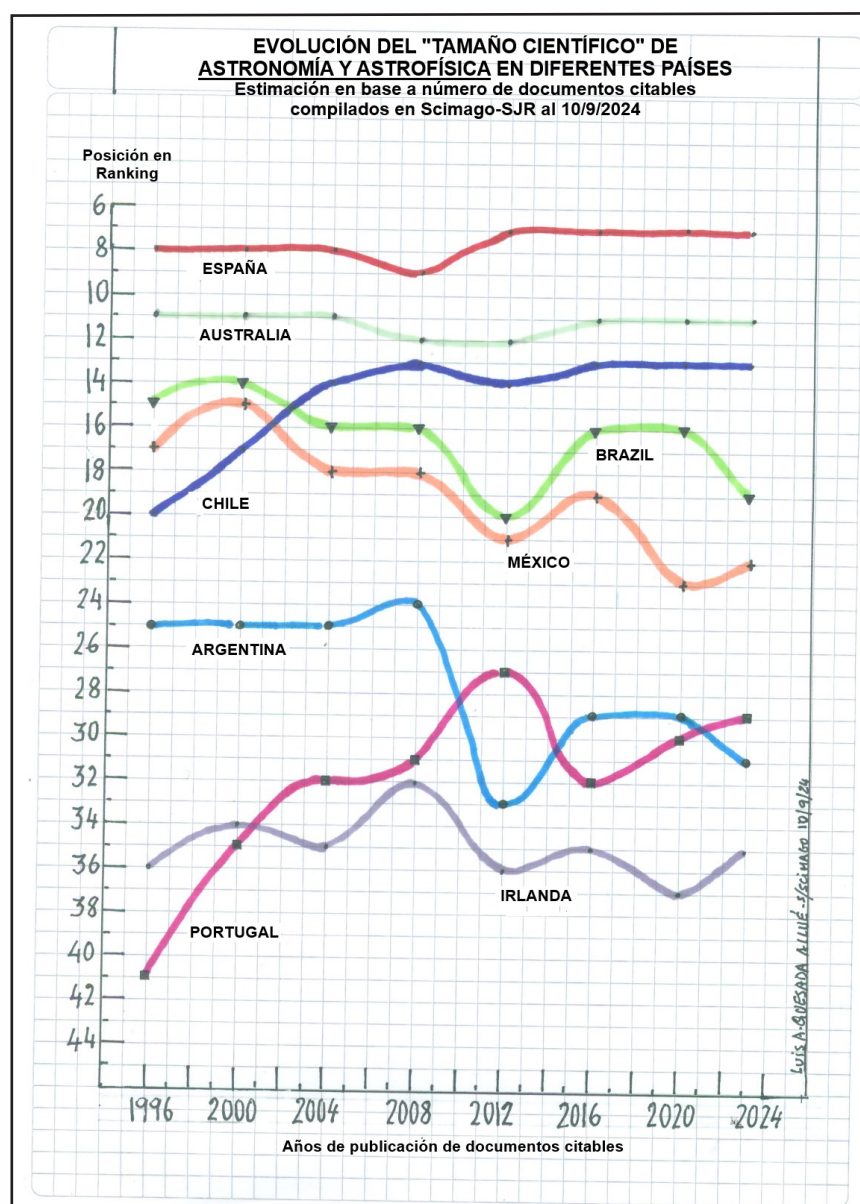


Figura 1. Posiciones comparadas de Astronomía y Astrofísica argentinas en Rankings cuantitativos generados por cantidad de documentos citables publicados desde 1996 hasta 2023

Tabla 1: Tasas de crecimiento de Publicaciones citables en Astronomía y Astrofísica; en los países graficados en la Figura 1 y Canadá; de 1996 a 2023

PAÍS	Cantidad de publicaciones		Aumento en 27 años (veces)	Tasa anual promedio (%)
	1996	2023		
ARGENTINA	77	290	3,76	13,9
AUSTRALIA	298	1311	4,39	16,25
BRASIL	175	581	3,32	12,29
CANADÁ	394	1306	3,31	12,25
CHILE	127	1160	9,13	33,81
ESPAÑA	423	2050	4,84	17,92
IRLANDA	29	202	6,96	25,77
MÉXICO	146	533	3,65	13,51
PORTUGAL	41	292	7,12	26,37

Tabla 2: Posiciones de “Astronomía más Astrofísica” en ranking cuali-cuantitativo basado en índice H de disciplina (número de trabajos que tienen igual número de citaciones o más, 1996-2023); comparadas con posición en Ranking cuantitativo en 2023 (ver Figura 1)

PAÍS	Índice H de disciplina	POSICIÓN EN RANKINGS DE PAÍSES		
		Pos. índice H	Pos. N° Docs. 2023	Diferencia
ARGENTINA	127	34	31	- 3
AUSTRALIA	316	9	11	+ 2
BRASIL	188	21	19	- 2
CANADÁ	342	6	12	+ 6
CHILE	257	12	13	+ 1
ESPAÑA	327	8	7	- 1
IRLANDA	148	30	35	+ 5
MÉXICO	179	23	22	- 1
PORTUGAL	169	26	29	+ 3

ambiciosas y eficientes. Se incluyen al pie dos referencias propias donde se analizó la situación general para todas las disciplinas.

En lo que respecta a la producción de trabajos internacionalmente destacados, un estimador de calidad vigente para una disciplina de un país (obviamente relacionado con

la cantidad de documentos generados) es el índice H de disciplina, que compila citas acumuladas a lo largo de los años; en el banco de datos Scimago-SJR desde 1996. El índice H (inventado por el argentino Jorge Hirchs) registra el número de trabajos que reciben igual número o más de citaciones. Para los países considerados en la Figura 1 existe

bastante correlación entre lo cuantitativo y lo cuali-cuantitativo de los trabajos más destacados, reflejados en el ranking del índice H (Tabla 2). Si una disciplina de un país aumenta la calidad de su producción científica y/o tecnológica se esperaría que se reflejara positivamente en la posición en el ranking basado en el índice H; y que eventualmente, superara

la posición en el ranking basado en generación de documentos. Como se aprecia comparando la Figura 1 y la Tabla 2, Irlanda mantuvo su posición en producción, pero mejoró la calidad aparente de su élite, como Australia y como Portugal (que también subió mucho en el ranking de documentos). Sucede lo mismo con Canadá que no ha sido incluido en la figura. Argentina y Brasil aparecen con tendencia al descenso en el número de trabajos más citados.

En resumen, a pesar de las dificultades, Astronomía y Astrofísica se cuentan entre las disciplinas de mejor desempeño internacional de Argentina. Esto se encuadra en una permanente carencia presupuestaria, que explica en gran parte el continuo retroceso relativo observado desde 1996 en la mayoría de disciplinas argentinas en relación a las de otros países; mostrando grandes

diferencias entre las mismas que no se han mostrado aquí. El comentario habitual, en relación a este tipo de situaciones, es que los gobiernos, los organismos estatales y los medios solo suelen destacar el incremento en documentos y citas (que es inferior al de muchos otros países relevantes) y los éxitos puntuales de nivel y repercusión internacional. En general, en todos los países crece la generación de conocimiento; pero la tasa de crecimiento argentino en casi todas las disciplinas es menor que las de otros países comparables. En Astronomía y Astrofísica el crecimiento se ha mantenido razonable, obviamente inferior a lo deseado y necesario.

■ REFERENCIAS

- (2023) "Argentina: un cuarto de siglo de retroceso en ciencia y tecnología, con respecto a los

demás países". <https://www.ciencias.org.ar/user/INTERACADEMICA/Capitulo%20ANCBA%20para%20el%20libro%20interacad%C3%A9mico%202024%20KPL%20DBV%20kpl3.pdf>

- (2019). "Comparación cienciométrica de Argentina con otros países" https://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2019/05/Documento_Quesada.pdf
- (2016). "Situación de la ciencia argentina" Anales de la Academia de Ciencias de Buenos Aires (2016) Tomo L: pags. 113-126. <https://www.ciencias.org.ar/categoria.asp?id=533>

AGRADECIMIENTO: *Se agradece a la Dra. Yesica G. Ponte la lectura crítica y ayuda técnica.*

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista CIENCIA E INVESTIGACION

El tenor de la revista Ciencia e Investigación es de divulgación a nivel superior, para investigadores, docentes, estudiantes, profesionales colegiados y otros, así como estudiosos e interesados de áreas muy diversas, periodistas, políticos, etc. O sea un nivel intermedio entre la Revisión formal para especialistas y la divulgación para el gran público.

Todos los artículos serán arbitrados y una vez aprobados, los autores enviarán la versión final teniendo en cuenta las sugerencias de los árbitros y de los editores. El artículo se presentará vía correo electrónico, como documento adjunto, escrito en Word (extensión «doc») en castellano, en hoja tamaño A4, a doble espacio, con márgenes de por lo menos 2,5 cm en cada lado y letra Times New Roman tamaño 12. Por tratarse de artículos de divulgación científica aconsejamos incluir en el trabajo un glosario, para los lectores no especialistas en el tema.

Salvo excepciones, la extensión de los artículos no excederá las 10.000 palabras, (incluyendo título, autores, resumen, glosario y bibliografía) y las notas breves no deberían excederse de 4.000 palabras. La cantidad de figuras (deseables) y tablas no se limita. Las páginas deben numerarse (arriba a la derecha) en forma corrida, incluyendo el texto, glosario, bibliografía y leyendas de las figuras. Colocar las ilustraciones (figuras y tablas) al final, en páginas sin numerar.

La primera página (VER EJEMPLO) deberá contener: Título del trabajo, nombre de los autores, institución a la que pertenecen indicada con superíndices, correo electrónico de un solo autor correspondiente (indicado con asterisco); y al menos tres palabras clave en castellano y key words en inglés.

EJEMPLO/MODELO de primer página

Título en castellano.

Autor, AS 1, Autor, DE 2, Autor, TY 1*

1 Instituto Universidad (IUC), Try 451, CPA:C1033AAP, Córdoba, Prov. Córdoba, Argentina. 2 Facultad (FE), Gal 451, CPA: B1902DGF, La Plata, Prov. Buenos Aires, Argentina.

*tyautor@iuc.gov.ar

Palabras clave: nanotecnología, suelos, arcillas.

Key words: nanotechnology, soils, clays

La segunda página incluirá un resumen en castellano y un Título y Abstract en inglés; con un máximo de 250 palabras para cada idioma.

El texto del trabajo finalizará con el posible glosario, la bibliografía y las leyendas de las figuras. La lista bibliográfica de trabajos citados (Bibliografía, o Citaciones y/o Referencias, deberá ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor de acuerdo a los siguientes formatos:

Benin L. W., Hurste J. A., Eigenel P. (2008) The non Lineal Hypercycle. Nature 277: 108 – 115.

Lonychamp, P. (1998) “The Theory Of Everything”. Longmans Ltd. London

Shortchamp, K. (2024) Theoretical Assumptions. Chapter 2 in “Evolution of cockroaches”; Cockie, P. and Longie, K. E eds. Crazymans Ltd. London

El material gráfico se presentará como: a) Figuras (dibujos e imágenes en formato JPG) que se numerarán correlativamente y b) Tablas, numeradas en forma correlativa independiente de las figuras. En el caso de las ilustraciones que no sean propias u originales, deberá aclararse en la leyenda correspondiente el origen (cita bibliográfica o de página web) y mención de permiso concedido si fuera necesario). Indicar en el texto el lugar tentativo donde el autor desea ubicar cada figura y cada tabla.

PUBLICACIONES NO SOLICITADAS POR LOS EDITORES

Se deberán acompañar con una nota dirigida indistintamente a los Editores de la revista Ciencia e Investigación o a la presidencia de AAPC o a cualquiera de los miembros del Colegiado Directivo. Dirigirla a secretaria@aargentinapciencias.org, solicitando su posible publicación (conteniendo correo electrónico y teléfono celular). La solicitud se elevará al Comité Editorial que evaluará las posibilidades de publicación.