

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 científicas 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-

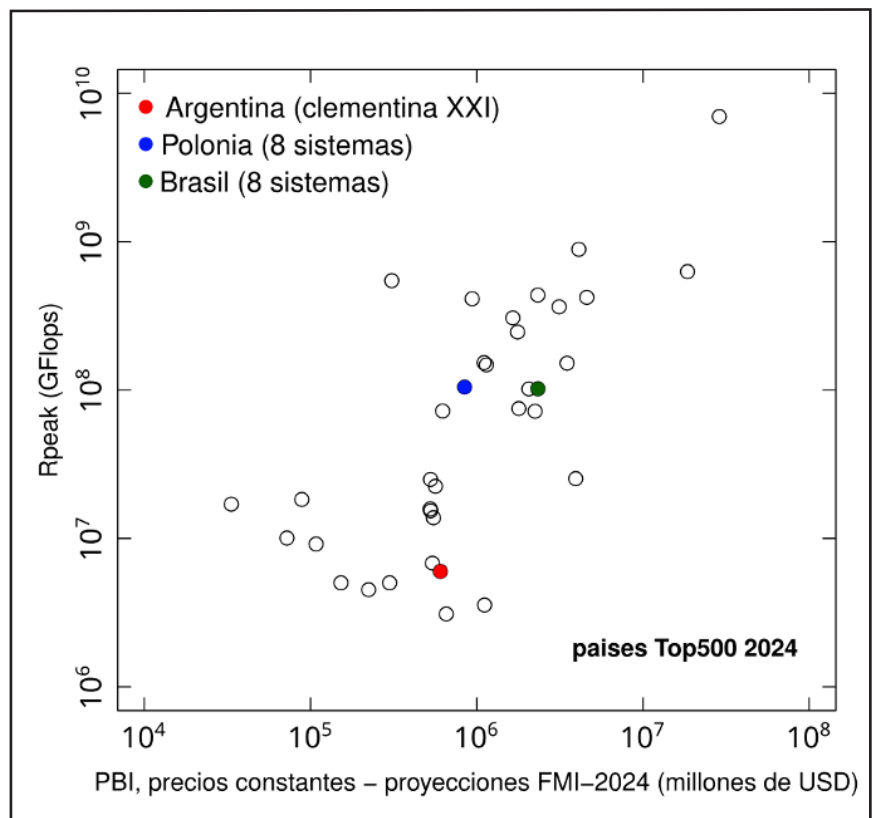


Figura 2: Relación entre el poder de cómputo (R_{peak}) de los países en el TOP500 y su Producto Bruto Interno (PBI) estimado para 2024 por el FMI. Existe una correlación natural entre la capacidad de supercomputación y el tamaño de la economía. Se destaca en rojo Argentina, con Clementina XXI, en azul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