

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA LA ADOPCIÓN DE LA PROTONTERAPIA EN AMÉRICA LATINA

Palabras clave: protonterapia, oncología, investigación e innovación tecnológica, pediatría, tumores complejos.

Key words: proton therapy, oncology, research and technological innovation, pediatrics, complex tumors.

Resumen: La protonterapia constituye una de las modalidades más avanzadas de radioterapia que, gracias a la particular curva de dosis en profundidad de los protones, también llamada “Pico de Bragg”, permite concentrar la dosis en el tumor con baja exposición a la radiación en tejidos sanos. Sus ventajas clínicas incluyen reducción significativa de eventos adversos, menor riesgo de segundos cánceres radioinducidos y potencial de mejorar la calidad de vida, con especial impacto en oncología pediátrica y tumores de localización compleja. A nivel global, más de 140 centros operan en Norteamérica, Europa y Asia, mientras que en América Latina la adopción es incipiente. En Argentina y en una estrecha colaboración entre la Comisión Nacional de Energía Atómica, la Universidad de Buenos Aires y la compañía INVAP, el Centro Argentino de Protonterapia (CeArP) será el primero de la región y representa un modelo de colaboración científico-tecnológico con fuerte componente de investigación y formación de capital humano. Sin embargo, la brecha entre la necesidad estimada —más de 50.000 pacientes candidatos por año en Sudamérica— y la capacidad instalada es aún enorme.

Los principales desafíos para la implementación incluyen los altos costos de inversión y operación, la escasez de personal especializado, la complejidad regulatoria, la necesidad de contar con modelos de financiamiento sostenibles y las barreras geográficas de acceso. En contraposición, existen oportunidades estratégicas: mejorar resultados clínicos en poblaciones vulnerables, reducir derivaciones al extranjero, impulsar polos de investigación e innovación tecnológica y fortalecer la formación de profesionales altamente especializados.

La adopción responsable de la protonterapia en la región requerirá planificación nacional integrada, evaluación rigurosa de costo-efectividad, inversión sostenida en capital humano y políticas de acceso equitativo. En este contexto, la protonterapia se perfila como una herramienta con potencial transformador para la oncología latinoamericana, aunque su expansión será gradual y selectiva, con un foco específico en pediatría y tumores complejos.

Challenges and Opportunities for the Adoption of Proton Therapy in Latin America

Abstract: Proton therapy is one of the most advanced forms of radiation therapy; thanks to the unique depth dose curve of protons—also known as the “Bragg peak”—it allows the dose to be concentrated on the tumor while minimizing radiation exposure to healthy tissues. Its clinical advantages include a significant reduction in adverse events, a lower risk of radiation-induced secondary cancers, and the potential to improve quality of life, with a particular impact in pediatric oncology and tumors in complex locations.

Globally, more than 140 centers are in operation across North America, Europe, and Asia, while adoption in Latin America is still in its early stages. In Argentina, through close collaboration between the National Atomic Energy Commission, the University of Buenos Aires, and the company INVAP, the Argentine Center for Proton Therapy (CeArP) will be the first of its kind in the region and represents a model of scientific-technological collaboration with a strong focus on research and human capital development. However, the gap between the estimated need—more than 50,000 eligible patients per year in South America—and installed capacity remains enormous.

The main challenges to implementation include high investment and operating costs, a shortage of specialized personnel, regulatory complexity, the need for sustainable financing models, and geographical barriers to access. On the other hand, there are strategic opportunities: improving clinical outcomes for vulnerable populations, reducing the need for overseas referrals, fostering centers for research and technological innovation, and strengthening the training of highly specialized professionals. The responsible adoption of proton therapy in the region will require integrated national planning, rigorous cost-effectiveness assessments, sustained investment in human capital, and policies ensuring equitable access. In this context, proton therapy is emerging as a tool with the potential to transform Latin American oncology, although its expansion will be gradual and selective, with a specific focus on pediatric cases and complex tumors.

Gustavo A. Santa Cruz^{1*}

¹ Departamento Protonterapia, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Nazca 3429, C1417 Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

* E-mail: gustavosantacruz@cnea.gob.ar

■ I. PROTONTERAPIA: FUNDAMENTOS Y VENTAJAS CLÍNICAS

A. DEFINICIÓN, VENTAJAS DOSIMÉTRICAS Y TECNOLOGÍA ASOCIADA

La protonterapia se define como una modalidad avanzada de radioterapia que utiliza haces de protones de altas energías para administrar dosis de radiación con el objetivo de inactivar células tumorales y de esa manera, en conjunto con otras estrategias de abordaje del cáncer (cirugía, quimioterapia, etc.), ejercer un grado importante de control tumoral. Representa una alternativa a la radioterapia convencional, la cual emplea predominantemente fotones (rayos X de altas energías o rayos gamma). Los protones son partículas subatómicas con carga positiva y masa mucho mayor que la del electrón (la partícula que, a partir de la interacción de los fotones con el tejido, es la responsable final de la entrega de dosis en la radioterapia convencional).

A diferencia de los fotones, que depositan energía gradualmente a medida que atraviesan los tejidos y continúan depositando una dosis significativa más allá del blanco tumoral (dosis de salida), los protones tienen un rango de penetración bien definido y depositan la mayor parte de su energía al final de su trayectoria, en una región limitada, llamada "Pico de Bragg". Esta característica permite concentrar una alta dosis de radiación directamente en el volumen tumoral, mientras se minimiza drásticamente la dosis recibida por los tejidos sanos ubicados distalmente (más allá) del tumor. La profundidad a la que ocurre este pico de deposición de energía puede ser controlada con precisión ajustando la energía inicial del haz de protones, permitiendo adaptar la distribución de dosis a la localización específica del tumor.

El funcionamiento técnico de un centro de protonterapia involucra varios componentes de alto desarrollo tecnológico los que, en conjunto, conforman el sistema de entrega del tratamiento de Protonterapia:

- **Aceleración:** mediante máquinas llamadas ciclotrones o sincrotrones, los protones obtenidos a partir de la ionización de hidrógeno gaseoso son acelerados hasta alcanzar energías clínicamente relevantes (típicamente entre 70 y 250 Megaelectronvolts, o MeV) utilizando campos eléctricos alternantes de alta frecuencia (que los aceleran) y campos magnéticos de alta intensidad (que los confinan en trayectorias espirales). Los ciclotrones, como el modelo C230® de IBA (*Ion Beam Applications*) que se ha instalado en el Centro Argentino de Protonterapia (CeArP), permiten generar un haz continuo de protones de energía fija máxima, correspondiente a un alcance máximo en tejido de alrededor de 32 cm. Para tratar tumores a menor profundidad, se requiere el uso de sistemas degradadores de energía. Los sincrotrones, por otro lado, pueden variar la energía del haz pulso a pulso, eliminando la necesidad de degradadores.
- **Transporte del Haz:** una vez acelerado, el haz de protones es guiado a través de una línea de vacío mediante una serie de electroimanes (dipolos para desviar el haz y cuadrupolos para enfocar) hasta la sala de tratamiento designada.
- **Entrega de Dosis:** la irradiación del paciente se realiza típicamente mediante un portal rotatorio o gantry, una gran estructura (que puede pesar más de 100 toneladas) equipada con

electroimanes, que permite dirigir el haz hacia el tumor desde múltiples ángulos alrededor del paciente y rotar con precisión milimétrica. Algunos centros también disponen de salas con haces fijos (horizontales o verticales). El componente final de la línea de haz, conocido como cabezal (*nozzle*), es responsable de conformar y modular dinámicamente el haz de protones para que se ajuste tridimensionalmente a la forma del tumor.

- **Técnicas de Entrega:** la tecnología de entrega de dosis ha progresado significativamente. Las técnicas iniciales de dispersión pasiva (*passive scattering*) y doble dispersión (*double scattering*) utilizaban elementos físicos (dispersores, colimadores, compensadores) para ensanchar y conformar el haz. La técnica más avanzada y actualmente preferida es el escaneo con haz delgado tipo lápiz (*Pencil Beam Scanning* - PBS). PBS utiliza un haz de protones de sección de apenas uno milímetros (como la punta de un lápiz) que es dirigido mediante campos magnéticos dinámicos para entregar la dosis en el tumor punto por punto, capa por capa, ajustando la energía para cada capa de profundidad. Esto permite la Protonterapia de Intensidad Modulada (IMPT), ofreciendo una conformalidad dosimétrica superior y mayor precisión, especialmente para tumores de forma compleja. Esta evolución hacia PBS/IMPT es fundamental, ya que no solo maximiza el beneficio del Pico de Bragg al eliminar la dosis de salida, sino que también permite una conformación del haz comparable a las técnicas de fotones más avanzadas (IMRT/VMAT), abordando limitaciones de precisión de las técnicas de protones más

antiguas y ampliando su aplicabilidad clínica.

- **Planificación, Verificación y Adaptación:** la planificación del tratamiento es un proceso complejo que requiere imágenes de alta calidad, incluyendo Tomografía Computarizada 4D (tres dimensiones espaciales y línea de tiempo registrando procesos temporales como la respiración) para evaluar y adaptar la dinámica del haz al movimiento del volumen tumoral debido a desplazamientos anatómicos, ya que la distribución de dosis de protones es particularmente sensible a estos cambios. A partir del estudio tomográfico los especialistas en física médica realizan cálculos muy complejos mediante sistemas computacionales dedicados (planificadores de tratamiento), que permiten ejecutar la “prescripción” del tratamiento, solicitada por el médico o médica radiooncólogo/a.

En la sala de tratamiento y antes de cada sesión, se realiza una verificación exhaustiva de la posición del tumor relativa al paciente utilizando sistemas de imágenes de tomografía de haz cónico, permitiendo corregir o adaptar el tratamiento diario para cumplir la prescripción original. Las sesiones de tratamiento pueden durar entre 20 y hasta 60 minutos en total dependiendo del caso clínico y su complejidad (por ejemplo, el uso de sedación), incluyendo el posicionamiento y la verificación, aunque el tiempo neto de irradiación suele ser muy corto, a menudo inferior a un par de minutos.

B. VENTAJAS CLÍNICAS DIFERENCIALES FRENTE A LA RADIOTERAPIA CONVENCIONAL

Las propiedades físicas únicas de los protones se traducen en varias ven-

tajas clínicas potenciales en comparación con la radioterapia basada en fotones:

- **Reducción Superior de Dosis en Tejidos Sanos:** la ventaja más fundamental es la capacidad de depositar la dosis máxima en el tumor con una caída abrupta de la dosis más allá del volumen blanco (gracias al Pico de Bragg), minimizando así la radiación innecesaria a los tejidos sanos circundantes y distales (más allá del tumor). Se ha estimado que esta reducción de dosis a tejido sano puede ser de hasta un 50% o 60% en comparación con haces de fotones. La Figura 1 ilustra esta propiedad.
- **Menor Toxicidad Temprana y Tardía:** como consecuencia directa de la mejor preservación del tejido sano, la protonterapia tiene el potencial de reducir la incidencia y severidad de los efectos adversos, tanto agudos (que ocurren durante o poco después del curso del tratamiento, como inflamación de mucosas, reacciones cutáneas, fatiga) como tardíos (que pueden manifestarse meses o años después, como fibrosis, daño a órganos críticos -corazón, pulmón-, déficits neurocognitivos, disfunción sexual).
- **Potencial para la Escalada de Dosis:** al reducir la dosis en los órganos sanos cercanos al tumor (órganos en riesgo), la protonterapia puede, en teoría, permitir administrar una dosis de radiación más alta y potencialmente más efectiva al tumor, sin exceder los límites de tolerancia de los tejidos normales. Esto podría mejorar las tasas de control local del cáncer y las posibilidades de curación en ciertos escenarios clínicos.

- **Reducción del Riesgo de Cánceres Secundarios Radioinducidos:** la menor dosis integral de radiación depositada en el cuerpo con protones, comparada con fotones, y la menor producción de neutrones secundarios (especialmente con técnicas PBS), sugiere un menor riesgo a largo plazo de desarrollar segundos tumores malignos inducidos por la radiación. Esta ventaja es particularmente relevante para pacientes pediátricos y adultos jóvenes que tienen una larga expectativa de vida por delante.
- **Mejora de la Calidad de Vida:** la combinación entre un buen control tumoral y la menor toxicidad aguda y tardía puede conducir a una mejor calidad de vida para los pacientes, tanto durante el tratamiento como a largo plazo, permitiéndoles mantenerse en buenas condiciones físicas y retomar sus actividades cotidianas más rápidamente.
- **Efectividad Biológica Relativa:** si bien en la práctica clínica a menudo se asume que los protones son un 10% más efectivos biológicamente que los fotones para la misma dosis absorbida, existe evidencia preclínica y modelos de acción de la radiación que sugieren que su efectividad no es constante, sino que aumenta cerca del final del rango del haz de protones, en la región del Pico de Bragg. Esta efectividad variable podría conferir una ventaja biológica adicional en el grado de control tumoral, aunque su cuantificación precisa y aplicación clínica rutinaria aún son objeto de investigación activa y debate.

Es importante comprender que la principal ventaja clínica demos-

trada de la protonterapia no radica necesariamente en una mayor capacidad intrínseca para eliminar las células cancerosas en comparación con las modalidades avanzadas de radioterapia con haces de fotones, sino en su capacidad para ampliar la ventana terapéutica. Es decir, permite administrar dosis eficaces para el control tumoral, minimizando el daño colateral a los tejidos sanos. Esta reducción de la toxicidad es el beneficio más consistentemente reportado y es especialmente valiosa en situaciones clínicas donde la preservación de la función de órganos críticos o la minimización de secuelas a largo plazo son primordiales. La posibilidad de mejorar el control tumoral mediante la escalada de dosis segura o por la mayor efectividad intrínseca de los protones representa un potencial adicional que requerirá mayor validación a través de ensayos clínicos prospectivos para indicaciones con desarrollo de evidencia.

C. INDICACIONES CLÍNICAS CLAVE

La literatura científica mundial es ahora suficientemente abundante como para justificar el uso del tratamiento con protones para una serie de indicaciones basadas en evidencia, estimándose que globalmente **120 pacientes por millón de habitantes por año** se beneficiarían sustancialmente con la protonterapia.

Si bien la protonterapia puede considerarse como tratamiento para una amplia gama de tumores localizados (es decir, excluyendo los del sistema circulatorio, como leucemias o linfomas), existen indicaciones donde su beneficio es más claro y ampliamente aceptado por la comunidad oncológica:

- Oncología Pediátrica: esta es, quizás, la indicación más fuerte y menos controvertida para la protonterapia. Los niños son particularmente susceptibles a los

efectos deletéreos a largo plazo de la radiación debido a que sus tejidos y órganos están aún en desarrollo¹. La radiación puede afectar el crecimiento óseo, el desarrollo neurocognitivo y la función endocrina. Además, tienen un riesgo basal más alto de desarrollar segundos cánceres a lo largo de su vida, riesgo que se incrementa con la exposición a la radiación. La capacidad de la protonterapia para minimizar la dosis en tejidos sanos es crucial para reducir estas secuelas tardías, preservar la función cognitiva, disminuir la toxicidad hematológica y endocrina y reducir el riesgo de malignidades secundarias radioinducidas.

- Tumores de Localización Anatómica Compleja: se benefician de la alta precisión de los protones aquellos blancos de tratamiento situados en proximidad inmediata a estructuras críticas

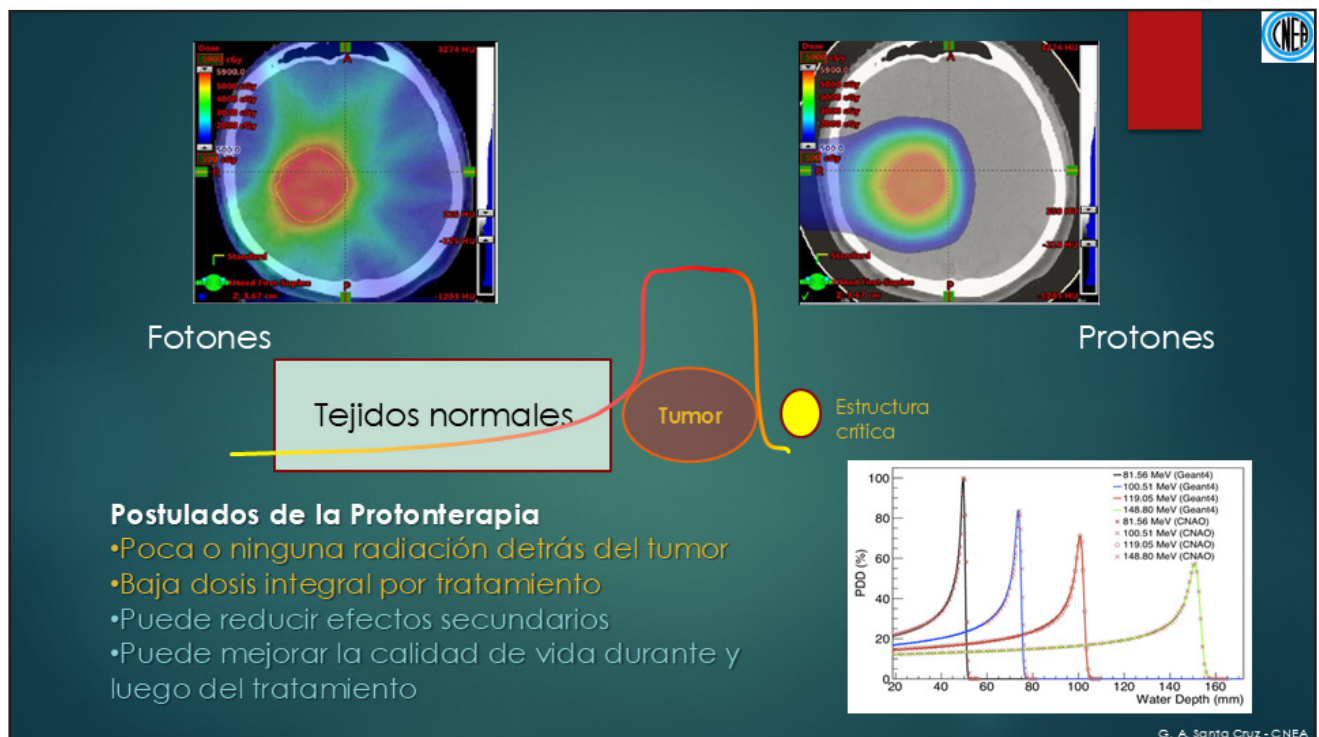


Figura 1. Comparación de dosis en tejido sano frente a radioterapia convencional (fotones).

sensibles a la radiación, donde incluso pequeñas dosis pueden causar déficits funcionales significativos. Ejemplos paradigmáticos incluyen:

- Tumores de la Base del Cráneo: como cordomas y condrosarcomas, que a menudo envuelven nervios craneales y el tronco encefálico.
- Tumores Cerebrales y de la Médula Espinal: donde la preservación del tejido neural sano es vital.
- Cánceres de Cabeza y Cuello: para minimizar la dosis en glándulas salivales (reduciendo xerostomía), estructuras ópticas (nervio óptico, quiasma, retina), oído interno, y mucosa oral/faríngea (reduciendo mucositis y disfagia).
- Melanoma Ocular: históricamente, una de las primeras indicaciones para protonterapia, permitiendo entregar altas dosis al tumor con preservación del globo ocular y la visión en muchos casos.
- Cáncer de Pulmón: especialmente tumores centrales o apicales, para reducir la dosis al pulmón sano contralateral, corazón, esófago y médula espinal.
- Tumores Hepáticos (Carcinoma Hepatocelular): para tratar el tumor minimizando la dosis al hígado sano remanente, crucial en pacientes con cirrosis subyacente.
- Cáncer de Esófago y Páncreas: tumores a menudo rodeados por múltiples órganos sensibles.

- Cáncer de Próstata: aunque más controvertido por la existencia de alternativas de fotones muy precisas (IMRT/VMAT, SBRT), la protonterapia puede reducir la dosis en recto y vejiga, potencialmente disminuyendo toxicidades gastrointestinales y genitourinarias.
- Sarcomas: especialmente los localizados cerca de estructuras críticas.
- Cáncer de Mama: particularmente en el lado izquierdo o en casos que requieren irradiación de ganglios linfáticos internos mamarios, para reducir la dosis al corazón y pulmón.
- Casos de Reirradiación: en pacientes que han recibido previamente radioterapia en una misma región anatómica, los tejidos sanos ya han acumulado una dosis significativa de radiación, limitando la posibilidad de un segundo tratamiento con fotones. La alta conformalidad y la ausencia de dosis de salida de los protones pueden hacer factible una reirradiación segura en casos seleccionados, ofreciendo una opción curativa o paliativa que de otro modo no estaría disponible.

A pesar de estas indicaciones, es crucial reconocer las limitaciones y controversias. Si bien las ventajas dosimétricas (distribución física de la dosis) son innegables, la traducción de estas ventajas en beneficios clínicos demostrables (mejor supervivencia, mejor control tumoral, reducción significativa de toxicidades clínicamente relevantes) requiere evidencia de alta calidad, proveniente de ensayos clínicos aleatorizados los cuales no son frecuentes,

esencialmente por cuestiones éticas (dado que, generalmente, las distribuciones de dosis de protones son superiores, como ya se ha comentado). Para muchas indicaciones en adultos, esta evidencia que compara protonterapia con las técnicas de fotones más avanzadas (como IMRT o VMAT) aún es limitada, está en curso o ha arrojado resultados no concluyentes. Por lo tanto, la selección de pacientes debe ser cuidadosa y basada en criterios bien definidos. No todos los pacientes con cáncer son candidatos idóneos para protonterapia y, en muchos casos, la radioterapia de fotones avanzada puede ofrecer resultados clínicos equivalentes con un costo considerablemente menor. La justificación clínica más robusta sigue centrada en aquellos escenarios donde la reducción de la dosis a tejido sano es críticamente importante, ya sea por la vulnerabilidad intrínseca del paciente (niños o niñas) o por la localización tumoral (proximidad a órganos vitales). La extensión a indicaciones más prevalentes en adultos requiere una evaluación continua y rigurosa de la evidencia clínica y una evaluación de la relación costo-beneficio, en comparación con las alternativas terapéuticas establecidas.

■ II. PANORAMA DE LA PROTONTERAPIA: AMÉRICA LATINA EN EL CONTEXTO GLOBAL

A. ESTADO ACTUAL EN AMÉRICA LATINA

La adopción de la protonterapia en América Latina se encuentra en una fase extremadamente temprana, marcando un contraste significativo con otras regiones del mundo. A la fecha, no existen centros de protonterapia clínicamente operativos en ningún país de la región. El panorama actual se caracteriza por un único proyecto en fase avanzada de puesta en marcha (Argentina) y

algunas iniciativas o propuestas en etapas preliminares en otros países.

LA PROTONTERAPIA Y AMÉRICA LATINA

La situación actual revela una brecha considerable entre la necesidad potencial estimada y la capacidad instalada o proyectada. Estimaciones basadas en una cifra conservativa (aproximadamente 120 pacientes por millón de habitantes por año) sugieren que solo en Sudamérica, más de 50.000 pacientes por año podrían beneficiarse de la protonterapia, lo que requeriría más de 80 centros (equipados con 2 salas, considerando una capacidad típica en dos turnos diarios de alrededor de 300 pacientes/año por sala).

En base a estimaciones basadas en la cifra conservativa antes mencionada, podemos calcular el número específico de pacientes que

se beneficiarían de la protonterapia para los países de América del Sur. Como ejemplos, en Argentina el número de pacientes potencialmente beneficiados por año ascendería a 5.200 (equivalente a 16 salas de protonterapia). Esa misma estimación resultaría en más de 25.000 pacientes candidatos para Brasil, el país de mayor población de la región.

Según estadísticas del Hospital Garrahan, la principal institución pública en Argentina dedicada a la atención pediátrica, los principales tipos de cáncer en niños de 0 a 19 años son las enfermedades hematológicas (leucemias, por ejemplo), cáncer del Sistema Nervioso Central (SNC) y una variedad de tumores sólidos. La mayoría de los pacientes con cáncer del SNC recibirán radioterapia como parte del tratamiento. Si consideramos solamente los pacientes pediátricos con patologías del SNC en nuestro país llegamos a

totalizar alrededor de 300 pacientes por año. Esto significa que una sola sala puede dedicarse por completo a estos pacientes. Alrededor de 1900 pacientes pediátricos por año con patologías del SNC son candidatos para protonterapia, de nuestro país y provenientes de los países vecinos, llegando a totalizar más de 2800 pacientes pediátricos con patologías del SNC por año considerando toda América del sur. Vemos así que existe una necesidad real de implementar esta modalidad en la región, sólo considerando la población pediátrica.

Es importante destacar el hecho de que existe una diferencia notable en cuanto a los resultados clínicos y la supervivencia general para los pacientes con cáncer pediátrico, en términos del acceso a terapias avanzadas en países de bajos o medianos ingresos. En los países de altos ingresos, la disponibilidad y la asequi-



Figura 2.a. Fachada del Centro Argentino de Protonterapia (CeArP).



Figura 2.b. Ubicación dentro de la Ciudad de Buenos Aires del Centro Argentino de Protonterapia (CeArP), actualmente en etapa de puesta en marcha.

lidad de los tratamientos hacen que los niños tengan una mejor supervivencia que en los países con bajos ingresos. El peor escenario es cuando los niños mueren sin tratamiento o sin cuidados paliativos o analgésicos, situación frecuente en países de medianos a bajos ingresos.

EL CENTRO ARGENTINO DE PROTONTERAPIA

Argentina lidera la introducción de esta tecnología en la región con el Centro Argentino de Protonterapia (CeArP), Figura 2a. Se encuentra en etapa de puesta en marcha y está destinado a ser el primer centro de su tipo en América Latina. Está ubicado (Figura 2b) en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, en un predio adyacente al Instituto de Oncología Ángel H. Roffo y vecino al Centro de Diagnóstico Nuclear de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

Es un proyecto de carácter público, fruto de la colaboración entre la CNEA -la institución promotora del proyecto-, realizado en el marco del Plan Nacional de Medicina Nuclear -creado por una resolución ministerial en el año 2014-, junto con la Universidad de Buenos Aires (UBA) y la empresa estatal de alta tecnología INVAP. La gestión operativa estará a cargo de la Fundación Centro Argentino de Protonterapia, creada conjuntamente por la CNEA y la UBA.

El corazón del área de protonterapia es un sistema Proteus®PLUS del fabricante belga IBA (*Ion Beam Applications*), que incluye un ciclotrón modelo C230 capaz de acelerar protones hasta 230 MeV. Contará con dos salas de tratamiento equipadas con ganimies rotatorios que utilizan la técnica de *Pencil Beam Scanning* (PBS) (Figura 3). Adicionalmente, el CeArP contará con un área exclusi-

vamente dedicada a investigación, el Laboratorio Argentino de Investigación y Desarrollo en Protonterapia - LAIDEP. El LAIDEP dispondrá de una sala con un haz de protones PBS fijo horizontal, idéntico al de las salas clínicas y destinado enteramente a investigación y desarrollo. Poseerá ocho laboratorios dedicados a diferentes áreas: radiobiología, física de haces de protones, electrónica, dosimetría y detectores de radiación, cálculo avanzado, entre otras. Contará además con oficinas, sala de reuniones y conferencias y espacio para la estadía de investigadoras/es nacionales e internacionales. El centro también albergará equipos de radioterapia convencional de última generación (Acelerador Lineal Versa HD® de la empresa Elekta, un sistema de radiocirugía CyberKnife® de la empresa Accuray) y equipos de diagnóstico por imagen avanzados (Resonancia Magnética, Tomógrafo Computarizado de Energía Dual

marca GE, primero de su tipo en nuestro país).

La instalación del ciclotrón, líneas de haz y salas comenzó a mediados de 2024 (Figura 4). Se estima que los ensayos de comisionamiento podrían iniciarse en la segunda mitad de 2026, con la expectativa de tratar a los primeros pacientes entre finales de 2026 y principios de 2027.

Se estima que cada sala de tratamiento podría atender hasta 300 pacientes por año. El centro en su conjunto, incluyendo las modalidades convencionales, podría tener una capacidad anual de unos 1.700 pacientes. La inversión inicial fue importante (reportada en 150 millones de USD), y financiada con fondos públicos.

Frente a esto, el único proyecto tangible a corto plazo es el CeArP en Argentina, con dos salas clínicas.

Esto indica que, incluso tras su inauguración, el acceso a la protonterapia seguirá siendo extremadamente limitado para la vasta mayoría de pacientes latinoamericanos con indicación médica.

El modelo de desarrollo del CeArP, basado en una fuerte colaboración científico-tecnológica (CNEA-UBA-INVAP) gestionado a través de una fundación sin fines de lucro, aunque con dependencia inicial de un proveedor tecnológico internacional (IBA), podría servir de referencia para futuros proyectos. Combina el aprovechamiento de capacidades locales existentes en áreas como la tecnología nuclear, la investigación científica y académica en hadronterapia y la ingeniería, con la adquisición de tecnología especializada de alta complejidad. Un modelo aplicable de mayor autonomía tecnológica, explotando capacidades nacionales preexistentes (como la aplicación de la Tera-

pia por Captura en Boro, BNCT, con aceleradores, proyecto desarrollado íntegramente por la CNEA) podría llevarse a cabo contando con estas capacidades locales en tecnologías nucleares, aunque enfrenta el desafío de asegurar el financiamiento a largo plazo. Estos enfoques representan vías alternativas para la adopción de la protonterapia en la región, cada una con sus ventajas y desventajas en términos de velocidad de implementación, costo, dependencia tecnológica y desarrollo de capacidades locales.

B. BREVE COMPARATIVA CON OTRAS REGIONES DEL MUNDO (NORTEAMÉRICA, EUROPA, ASIA)

El estado incipiente de la protonterapia en América Latina contrasta fuertemente con la situación en otras regiones del mundo, donde la tecnología está considerablemente más establecida y en expansión:

Características generales

HARDWARE
 Dos salas de tratamiento, con gantries de 360°+PBS+CBCT
 Técnicas de verificación / adaptación: estereoscópica oblicua y ortogonal.
 Una instalación de I+D+PBS+Laboratorios
 Ciclotrón de 230 MeV + sistema de transporte de haz + selector de E para las tres salas
 Acelerador lineal de alta energía (Versa HD)
 SBRT (Cyberknife)
 Resonador magnético 1.5 Tesla
 TAC de planificación, ESPECTRAL
 Accesorios de inmovilización, anestesia
 Sistemas y dispositivos de dosimetría

SOFTWARE
 Sistemas de planificación de tratamiento
 Sistemas de posicionamiento robótico
 Sistemas de seguridad
 Sistemas de Información Oncológica
 Software no clínico para I+D

G. A. Santa Cruz - CNEA

Figura 3. Equipamiento del CeArP, instalado en las salas de imágenes y tratamiento.



Figura 4. Ingreso del ciclotrón al búnker del CeArP (junio de 2024).

- **Distribución Global:** la gran mayoría de los centros de protonterapia operativos y en construcción se concentran en Norteamérica, Europa y Asia (Figura 5). La base de datos de PTCOG (*Particle Therapy Co-operative Group*, <https://ptcog.online/>) lista más de 140 centros operativos a nivel mundial (de protones y de iones de carbono) a principios de 2026, con decenas adicionales en construcción o planificación.
- **Norteamérica:** lidera el mercado global, con Estados Unidos concentrando el mayor número de centros operativos del mundo en un único país, operados en su gran mayoría por instituciones privadas.
- **Europa:** posee una red significativa y creciente de centros de protonterapia distribuidos en numerosos países, incluyendo Alemania, Francia, Italia, Suiza, Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Polonia, Suecia y el Reino Unido. Además, hay una notable expansión en curso, con múltiples centros en construcción o planificación, destacando el caso de España que está desarrollando una red nacional de protonterapia con varias unidades.
- **Asia:** es otra región con una adopción muy significativa y en rápido crecimiento. Japón tiene una larga trayectoria y un número considerable de centros operativos, tanto de protones como de iones de carbono. China está experimentando una expansión exponencial, con varios centros ya operativos y un gran número de proyectos en construcción o planificación, posicionándose como un mercado clave. Corea del Sur y Taiwán también cuentan con múltiples instalaciones operativas y en desarrollo. India ha comenzado igualmente a implementar esta tecnología.
- **Otras Regiones (África, Medio Oriente):** la presencia de la protonterapia es también muy limitada. Sudáfrica tuvo un centro histórico operativo durante muchos años. Se reportan proyectos en desarrollo en Egipto y Emiratos Árabes Unidos, y un centro operativo en Israel. Al presente, no existen centros operativos en el continente africano.
- **América Latina:** como se detalló anteriormente, se encuentra tomando sus primeros pasos, sin centros operativos y solo un proyecto (CeArP) próximo a iniciar actividades.

Este marcado desfase entre América Latina y las regiones de Europa, Asia y América del Norte no es meramente cuantitativo. Refleja, muy probablemente, diferencias estructurales profundas en los niveles de inversión pública en salud y desarrollo científico-tecnológico, la accesibilidad a equipamiento de primera

línea para la infraestructura tecnológica y de investigación, la agilidad y especificidad de los marcos regulatorios para tecnologías complejas y la disponibilidad de modelos de financiamiento capaces de sostener inversiones de tan alto costo. Mientras que en países de altos ingresos la protonterapia se está integrando progresivamente (aunque no sin debate sobre su costo-efectividad) en el arsenal terapéutico oncológico, en América Latina su adopción enfrenta barreras fundamentales que van más allá de la simple decisión de adquirir el equipamiento.

■ III. DESAFÍOS CRÍTICOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN EN AMÉRICA LATINA

La introducción y expansión de la protonterapia en América Latina enfrenta una serie de desafíos interconectados y significativos, que expli-

can en gran medida el atraso de la región en comparación con Norteamérica, Europa y Asia.

A. BARRERAS ECONÓMICAS: ALTOS COSTOS DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN

El factor económico es, indiscutiblemente, una de las barreras más importantes.

- **Inversión Inicial Sustancial:** establecer un centro de protonterapia requiere un desembolso de capital masivo. Las cifras varían según el tamaño y la complejidad, pero las estimaciones internacionales sitúan la inversión inicial entre 40 millones de USD para un sistema compacto de una sola sala hasta más de 200-235 millones de USD para un centro multi-sala construido en un sitio nuevo. Un sistema

de una sola sala puede tener un costo del equipo de alrededor de 25 millones de USD, a lo que se suman costos de construcción del búnker y la instalación, que pueden añadir desde 5 millones de USD (si se integra en una instalación existente) hasta cifras mucho mayores si se construye desde cero, sumando sistemas de imágenes y de planificación de tratamientos. La inversión reportada para el CeArP en Argentina fue de 150 millones de USD. Estos montos representan una carga financiera inmensa para los presupuestos de salud de la mayoría de los países latinoamericanos. Sin embargo, se ha demostrado que, si bien la inversión inicial es importante, la alternativa multi-sala (por ejemplo, 3 salas alimentadas por un único acelerador) junto con la mayor vida de la instalación



Figura 5. El CeArP, único centro de protonterapia en América Latina. Ubicación de los centros operativos en el mundo. Las regiones sombreadas corresponden a los países de bajos y medianos ingresos (Fuente de la imagen: The Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG)).

- (más de 30 años) es comparable al costo de 8-9 instalaciones con aceleradores lineales cuya vida útil es 3 veces menor que la de una instalación de protonterapia (la cual puede extenderse aún más sin perjuicio de la calidad de la misma).
- **Costos Operativos Elevados:** más allá de la inversión inicial, los gastos anuales de funcionamiento son sustanciales y continuos. Los principales componentes incluyen:
 - **Utilidades:** principalmente el consumo de electricidad de los aceleradores y sistemas asociados, aunque generalmente menor que los costos de personal y mantenimiento.
 - **Costos Indirectos y Amortización:** estos pueden ser el componente más grande del costo total, especialmente en centros independientes o durante la fase inicial de operación con bajo volumen de pacientes. Incluyen la amortización del equipo y la infraestructura (si no es considerado costo hundido, como en el caso del CeArP), eventualmente costos financieros (intereses de préstamos), gastos administrativos y generales.
 - **Operación, mantenimiento y Servicio Técnico:** los contratos de servicio para equipos tan complejos son costosos, representando una parte importante del presupuesto operativo anual (estimado en 1.2 millones USD/año para una sala única y 3-4 millones USD/año para un centro multi-sala) pudiendo estimarse globalmente en un 21% del costo operativo total.
 - **Personal Especializado:** se requiere un equipo multidisciplinario altamente calificado (físicos/as médicos/as, oncólogos/as radioterapeutas, técnicos/as, dosimetristas, enfermeros/as), cuyos salarios (que deben ser competitivos considerando los valores “de mercado” en el ámbito privado) representan un costo fijo significativo, especialmente en un centro de múltiples salas y modalidades. Aun así, estos profesionales pueden desempeñarse gestionando varias modalidades a la vez con el consiguiente aumento en los ingresos del centro, compensando la cantidad de personal asistencial.
 - **Costo por Tratamiento Elevado:** como resultado de los altos costos fijos y operativos, el costo por fracción o por curso completo de tratamiento para un paciente es considerablemente más alto que el de la radioterapia convencional avanzada. Las estimaciones sugieren que la protonterapia puede costar entre 2 y 3 veces más por curso completo de tratamiento que la radioterapia de fotones. Sin embargo, si al costo del tratamiento se le suma el costo del abordaje de los eventos adversos, que pueden existir por varios años, se ha demostrado que, para las patologías de indicación como el meduloblastoma pediátrico, el costo total del tratamiento y seguimiento del paciente luego de la protonterapia es significativamente menor que con radioterapia convencional.
 - **Dependencia de Economías de Escala:** la estructura de costos, dominada por la inversión fija y los gastos indirectos, implica que la viabilidad económica del centro es muy sensible al volumen de pacientes tratados. A medida que aumenta el número de pacientes y se acerca a la capacidad máxima, los costos fijos se distribuyen entre más tratamientos, reduciendo significativamente el costo unitario. Sin embargo, alcanzar y mantener un alto volumen de pacientes puede ser un desafío, especialmente al principio y en mercados con sistemas de referencia y reembolso aún no establecidos para esta tecnología. Esto subraya la importancia crítica de una planificación cuidadosa de la demanda, la gestión eficiente de las derivaciones y la existencia de mecanismos de financiación sostenibles.

B. CAPITAL HUMANO: NECESIDAD DE PERSONAL ALTAMENTE ESPECIALIZADO Y PROGRAMAS DE FORMACIÓN

Tan crucial como el financiamiento es la disponibilidad de personal adecuadamente capacitado, lo cual representa otro cuello de botella importante para la adopción de la protonterapia en la región.

- **Equipos Multidisciplinarios Especializados:** la operación segura y eficaz de un centro de protonterapia depende de un equipo coordinado de profesionales con formación específica, que incluye oncólogos/as radioterapeutas, físicos/as médicos/as, dosimetristas, técnicos/as en radioterapia (operadores del equipo), personal de enfermería oncológica, ingenieros/as de operación y mantenimiento y personal de soporte.
- **Rol Crítico del profesional de física médica:** estos profesionales desempeñan un papel central

e indispensable. Son responsables de la aceptación y puesta en servicio del equipamiento, el desarrollo y mantenimiento de los programas de garantía de calidad, la dosimetría clínica (cálculo y verificación de dosis), la planificación de tratamientos complejos, la implementación de nuevas técnicas, la supervisión técnica del mantenimiento y, fundamentalmente, la garantía de la protección radiológica para pacientes, personal y público. Su formación requiere un nivel académico avanzado (típicamente maestría o doctorado en física médica o campos afines) complementado con un entrenamiento clínico supervisado extenso y específico en el área de la radioterapia.

- **Formación de Oncólogos/as Radioterapeutas:** Los especialistas en oncología radioterápica necesitan adquirir conocimientos específicos sobre las indicaciones clínicas apropiadas para la protonterapia, las ventajas y limitaciones de la técnica, los métodos de planificación de tratamiento (incluyendo delineación de volúmenes y evaluación de planes), el manejo de posibles toxicidades y el seguimiento de los pacientes tratados con protones.
- **Escasez Regional de Personal:** América Latina enfrenta, en general, un déficit de profesionales adecuadamente formados en radioterapia avanzada y física médica. En Argentina, a través de la red de centros de medicina nuclear y radioterapia y mediante carreras de grado y posgrado dictadas en los tres institutos de CNEA, la formación y especialización en estas áreas de vacancia hace que localmente se puedan formar, aunque deficitariamente, profesionales alta-

mente capacitados en las aplicaciones nucleares a la salud, del país y de la región.

- **Necesidad de Programas de Formación Dedicados:** dada la complejidad inherente a la física de partículas, la dosimetría de protones y la operación de los equipos, se requieren programas de formación y capacitación específicos y de alta calidad. Iniciativas como las guías de formación académica y clínica para físicos médicos desarrolladas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en colaboración con la Asociación Latinoamericana de Física Médica (ALFIM) buscan establecer y armonizar estándares en la región. El OIEA también apoya programas de maestría regionales, como el iniciado en Chile. Proyectos como el CeArP en Argentina reconocen esta necesidad e incluyen explícitamente un componente de investigación y desarrollo (LAI-DEP) que también servirá como plataforma para la formación de capital humano, con potencial impacto regional.

La inversión en equipamiento de protonterapia debe ir necesariamente acompañada de una estrategia robusta y sostenida para desarrollar el capital humano requerido. Sin físicos/as médicos/as, oncólogos/as, técnicos/as y dosimetristas adecuadamente formados y en número suficiente, los centros no podrán operar de manera eficiente y a plena capacidad. La creación de programas de formación nacionales y regionales, idealmente coordinados y con reconocimiento mutuo, junto con políticas para mejorar el atractivo y la retención de estos profesionales, es un prerrequisito fundamental para la viabilidad a largo plazo de la protonterapia en América Latina.

C. MARCO REGULATORIO: COMPLEJIDAD EN EL PROCESO DE LICENCIAMIENTO Y APROBACIONES

La implementación de cualquier instalación de radioterapia está sujeta a una estricta supervisión regulatoria, y esto es particularmente cierto para tecnologías complejas y novedosas como la protonterapia.

- **Múltiples Autoridades y Normativas:** en América Latina, la regulación de estas instalaciones suele involucrar a diversas entidades gubernamentales. Por un lado, las autoridades de seguridad nuclear y radiológica (como la Autoridad Regulatoria Nuclear - ARN en Argentina, la *Comissão Nacional de Energia Nuclear* - CNEN en Brasil, o la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias - CNSNS en México) son responsables de licenciar la instalación, el equipamiento y el personal desde la perspectiva de la protección radiológica contra las radiaciones ionizantes. Por otro lado, las autoridades sanitarias (como ANMAT en Argentina, ANVISA en Brasil, COFEPRIS en México, ISP en Chile) regulan los aspectos relacionados con la habilitación sanitaria del establecimiento, la aprobación de los dispositivos médicos, las buenas prácticas clínicas y, en algunos casos, también aspectos de seguridad radiológica en el ámbito médico. Cada país tiene su propio conjunto de leyes, decretos, resoluciones y normas técnicas específicas.
- **Complejidad y Potenciales Retrasos:** navegar este entramado regulatorio multi-agencia puede ser un proceso complejo, prolongado y burocrático. La necesidad de obtener múltiples licencias y permisos (para cons-

trucción, puesta en marcha, operación, importación de equipos, personal, etc.) de diferentes entidades, cada una con sus propios requisitos y tiempos de evaluación, puede generar demoras significativas en la puesta en marcha de los proyectos.

- Falta de Experiencia Específica: dado que la protonterapia es una tecnología nueva para la región, es probable que muchas agencias regulatorias nacionales carezcan de la experiencia y los criterios técnicos específicos para evaluar y licenciar estas instalaciones de manera eficiente y estandarizada. Esto puede generar incertidumbre tanto para los promotores de los proyectos como para los propios reguladores.

- Necesidad de Armonización y Guías Específicas: conscientes de este desafío, existen esfuerzos para desarrollar guías y armonizar criterios. El Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO), con el apoyo técnico del OIEA y la colaboración de entidades con experiencia como el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) de España, está trabajando en la elaboración de guías específicas para el licenciamiento de instalaciones de protonterapia en la región. A nivel regional, también hay iniciativas para una mayor convergencia regulatoria en el ámbito de medicamentos y dispositivos médicos, como la propuesta Agencia de Medicamentos de Latinoamérica y el Caribe (AMLAC). La adopción de estas guías internacionales y la colaboración entre las agencias reguladoras de los diferentes países serán fundamentales para facilitar la introducción segura y

eficiente de la protonterapia.

La adaptación de los marcos regulatorios existentes, la capacitación del personal de las agencias reguladoras y la adopción de estándares internacionales armonizados son pasos necesarios para superar la barrera regulatoria y asegurar que la implementación de la protonterapia se realice bajo condiciones óptimas de seguridad y calidad.

D. SUSTENTABILIDAD FINANCIERA: MODELOS DE FINANCIAMIENTO Y REEMBOLSO EN SISTEMAS DE SALUD REGIONALES

Asegurar la viabilidad económica a largo plazo de los centros de protonterapia dentro del contexto de los sistemas de salud latinoamericanos es un desafío mayor.

- Contexto Fiscal y Sanitario Regional: los sistemas de salud en América Latina y el Caribe operan en un contexto de restricciones fiscales, a menudo con un gasto público en salud insuficiente para cubrir las necesidades crecientes de la población y avanzar hacia la cobertura universal de salud (CSU). La Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) recomienda un gasto público en salud de al menos el 6% del Producto Interno Bruto (PIB) como referencia para reducir inequidades, meta que muchos países de la región no alcanzan. Además, los sistemas suelen estar fragmentados, con altos niveles de gasto de bolsillo por parte de los pacientes, lo que genera barreras financieras al acceso.
- Impacto Presupuestario de la Protonterapia: el gran costo de inversión y operación de la protonterapia plantea un desa-

fío mayúsculo para su incorporación en los presupuestos de salud, tanto públicos como privados. La decisión de financiar esta tecnología compite directamente con otras prioridades sanitarias, incluyendo intervenciones de salud pública de probada costo-efectividad o el fortalecimiento de la atención primaria.

- Cobertura y Reembolso: la falta de mecanismos claros y adecuados de cobertura y reembolso por parte de los financiadores (sean estos sistemas públicos, seguros sociales o aseguradoras privadas) es una barrera crítica. Incluso en países desarrollados, obtener la autorización y el reembolso para tratamientos de protonterapia puede ser un proceso complejo y no siempre garantizado. En América Latina, donde la tecnología es nueva y la evidencia de costo-efectividad local es inexistente, definir políticas de cobertura y tarifas de reembolso justas y sostenibles será un paso crucial pero difícil.
- Necesidad de Modelos de Financiamiento Sostenibles: la viabilidad a largo plazo requiere el desarrollo de modelos de financiamiento que vayan más allá de la inversión inicial y aseguren la cobertura de los elevados costos operativos recurrentes. Esto podría implicar una combinación de fuentes: asignaciones presupuestarias públicas directas (especialmente si se prioriza como política nacional), contratos con seguros sociales y privados, fondos específicos para tecnologías de alto costo, cooperación internacional, o incluso ingresos por investigación o atención a pacientes internacionales (turismo médico). La sustentabilidad

financiera es esencial no solo para la supervivencia del centro, sino para garantizar un acceso equitativo y predecible para los pacientes que lo necesiten.

- Rol de la Evaluación de Tecnologías Sanitarias (ETS): las decisiones sobre la adopción, cobertura y reembolso de tecnologías costosas como la protonterapia deberían fundamentarse en procesos sistemáticos y transparentes de Evaluación de Tecnologías Sanitarias (ETS). Estos análisis evalúan la evidencia disponible sobre eficacia clínica, seguridad, impacto organizacional, consideraciones éticas y sociales, y, crucialmente, el análisis económico (costo-efectividad, impacto presupuestario) en el contexto específico del sistema de salud local. Si bien algunos países de la región han avanzado en la institucionalización de la ETS, su aplicación y vinculación con la toma de decisiones aún es heterogénea.
- Dilemas de Priorización y Equidad: dado el alto costo y la capacidad limitada inicial, la introducción de la protonterapia inevitablemente plantea complejos dilemas éticos y de equidad. ¿Cómo priorizar el acceso entre los pacientes candidatos? ¿Cómo asegurar que la inversión en esta tecnología de punta no desvíe recursos indispensables de áreas con mayor impacto poblacional o que benefician a poblaciones más vulnerables? Es fundamental que las políticas de implementación busquen activamente mitigar las inequidades y se alineen con los principios de solidaridad y justicia social que deben guiar a los sistemas de salud universales.

La justificación de una inversión tan cuantiosa como la protonterapia en América Latina requiere, por tanto, una argumentación que trascienda la mera demostración de ventajas técnicas o dosimétricas. Exige un análisis económico riguroso adaptado a la realidad local, que demuestre que el beneficio clínico adicional (principalmente en términos de reducción de toxicidad y mejora de calidad de vida para indicaciones seleccionadas) justifica el costo incremental frente a las alternativas disponibles. Asimismo, requiere una estrategia financiera clara y sostenible, integrada en las políticas de salud nacionales, que asegure un acceso lo más equitativo posible y no comprometa la sustentabilidad global del sistema de salud.

E. ACCESO Y LOGÍSTICA: BARRERAS GEOGRÁFICAS PARA LOS PACIENTES

Incluso si se superan los desafíos financieros, de personal y regulatorios, la naturaleza inherentemente centralizada de la protonterapia crea importantes barreras geográficas y logísticas para el acceso de los pacientes en la vasta y diversa geografía latinoamericana.

- Concentración Geográfica Inevitable: debido a la enorme inversión requerida y la complejidad técnica, los centros de protonterapia se instalan necesariamente en un número muy limitado de ubicaciones, generalmente en grandes capitales o ciudades, e idealmente cercanos a hospitales universitarios de alta complejidad. Esta centralización es una consecuencia directa de los factores económicos y técnicos. Un ejemplo claro de esta asociación se aprecia en el CeArP, instalado vecino al Instituto de

Oncología Ángel Roffo y al Centro Diagnóstico Nuclear.

- Exacerbación de la Brecha Urbano-Rural: el acceso a servicios de salud especializados y tecnología médica avanzada ya presenta una marcada desigualdad entre las áreas urbanas y las zonas rurales o remotas en la mayoría de los países latinoamericanos. La protonterapia, al ser una tecnología de avanzada y de un costo mayor, inevitablemente agudizará esta disparidad, pudiendo quedar fuera del alcance práctico de la mayoría de la población que no reside en las proximidades de los pocos centros existentes si no existe una política de salud a nivel nacional que reduzca esta desigualdad.
- Necesidad de Desplazamiento y Estadía Prolongada: los pacientes que residan lejos del centro de protonterapia deberán afrontar la necesidad de viajar, a menudo largas distancias, y permanecer cerca de la institución durante todo el curso del tratamiento. Dado que la protonterapia, al igual que la radioterapia convencional, se administra típicamente en fracciones diarias durante varias semanas (variable, dependiendo del caso), esto implica una estadía prolongada fuera del hogar.
- Costos Indirectos y Carga para el Paciente: este desplazamiento genera una carga económica adicional significativa para los pacientes y sus familias, que va más allá del costo directo del tratamiento médico. Incluye gastos de transporte (a menudo para el paciente y un acompañante), alojamiento, alimentación y otros costos de vida

durante semanas, además de la posible pérdida de ingresos laborales tanto para el paciente como para quien lo acompaña. Estos costos indirectos pueden ser prohibitivos para muchas familias, convirtiéndose en una barrera de acceso insuperable, incluso si el tratamiento en sí estuviera cubierto por el sistema de salud.

- **Complejidad Logística y Soporte Social:** la gestión de estos pacientes requiere una infraestructura logística y de apoyo bien organizada. Esto incluye sistemas eficientes de derivación desde hospitales de origen, coordinación de citas, asistencia para encontrar alojamiento asequible, apoyo psicosocial para pacientes y familias lejos de su red de contención habitual y coordinación con los equipos médicos locales para el seguimiento post-tratamiento. El CeArP se concibe como un centro de derivación a nivel nacional e incluso regional, lo que implica la necesidad de desarrollar estos mecanismos de soporte.

La planificación e implementación de un centro de protonterapia en América Latina no puede limitarse a la construcción del edificio y la instalación del equipo. Debe incluir, desde el inicio, una estrategia integral para abordar las barreras geográficas y logísticas, con medidas concretas para apoyar a los pacientes que necesiten viajar (como subsidios, convenios con alojamientos, redes de transporte, programas de asistencia social). Sin estas medidas, el acceso a esta tecnología avanzada quedará restringido a una minoría de la población, principalmente aquellos que residen cerca del centro o que tienen los recursos económicos para afrontar los costos indirectos del desplazamiento, contradiciendo los principios de equidad que deben

regir los sistemas de salud públicos.

■ IV. OPORTUNIDADES ESTRATÉGICAS DE LA PROTONTERAPIA PARA LA REGIÓN

A pesar de los considerables desafíos, la adopción de la protonterapia también presenta oportunidades estratégicas significativas para mejorar la atención oncológica, impulsar la innovación y fortalecer el capital humano en América Latina.

A. AVANCES CLÍNICOS: MEJORA DE RESULTADOS EN CÁNCERES PEDIÁTRICOS Y COMPLEJOS

La oportunidad primordial reside en el potencial de mejorar los resultados clínicos y la calidad de vida de grupos específicos de pacientes oncológicos en la región.

- **Beneficio Directo para Pacientes:** ofrecer protonterapia localmente brindaría acceso a un tratamiento potencialmente superior, en términos de reducción de toxicidades agudas y tardías, para niños con cáncer y adultos con tumores en localizaciones anatómicamente complejas o cercanas a órganos críticos. Esto podría traducirse no solo en una mejor tolerancia al tratamiento y una mejor calidad de vida post-tratamiento, sino también potencialmente en una mayor supervivencia a largo plazo, al disminuir las comorbilidades graves y el riesgo de segundos cánceres inducidos por la radiación.
- **Reducción de Derivaciones al Extranjero:** actualmente, un número limitado pero significativo de pacientes latinoamericanos con indicaciones claras para protonterapia (principalmente niños o casos muy complejos) son derivados a centros en Estados Unidos o Europa. Estos

tratamientos en el extranjero implican costos extremadamente elevados para los sistemas de salud públicos, los seguros o las propias familias, además de ser una experiencia compleja al ser la relación institución-paciente muy diferente a la que le es familiar a gente de nuestra región. Disponer de centros de protonterapia en Latinoamérica permitiría aliviar la traumática experiencia de trasladarse al exterior y convivir con un lenguaje y costumbres diferentes, además de reducir drásticamente estos costos de derivación y las dificultades logísticas asociadas.

- **Acceso a Tratamiento de Vanguardia:** la implementación de la protonterapia posiciona a las instituciones y a los países que la adoptan en la frontera del conocimiento, la ciencia y la tecnología en oncología radioterápica. Esto no solo beneficia directamente a los pacientes tratados, sino que también puede elevar el estándar general de la atención oncológica en el país, actuar como un imán para atraer y retener a profesionales médicos y científicos de alto nivel, y mejorar la reputación internacional del sistema de salud.

B. INNOVACIÓN: POTENCIAL PARA POLOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

La complejidad inherente a la protonterapia la convierte en un catalizador natural para la investigación y la innovación.

- **Fomento de la Investigación Clínica y Traslacional:** la presencia de un centro de protonterapia abre un vasto campo para la investigación clínica adaptada a la población local. Esto incluye la realización de ensayos clínicos comparativos (protones

vs. radioterapia convencional avanzada), estudios para optimizar las indicaciones y la selección de pacientes, evaluación de resultados a largo plazo (control tumoral, supervivencia, toxicidades tardías, calidad de vida), e investigación en técnicas de imagen y planificación avanzadas. Además, impulsa la investigación traslacional en áreas como la radiobiología de protones (estudio de la dosis isoelectiva a otra radiación de referencia, combinación con fármacos), el desarrollo de biomarcadores predictivos de respuesta o toxicidad, la dosimetría computacional y la física médica aplicada (desarrollo de algoritmos de cálculo, técnicas de control de calidad), el desarrollo de instrumentación nuclear específica para protones y neutrones de altas energías, la oferta de servicios especializados con haces de protones de altas energías como la calificación de electrónica satelital, reacciones nucleares con protones, formación de capital humano, etc.

- **Desarrollo Tecnológico Asociado:** si bien la tecnología central del acelerador y el gantry suele ser importada de proveedores internacionales especializados, la operación y optimización de un centro de protonterapia genera oportunidades para el desarrollo de tecnologías y capacidades locales en áreas complementarias. Esto puede incluir software de planificación de tratamiento y análisis de imágenes, sistemas de posicionamiento e inmovilización de pacientes, dispositivos para control de calidad y dosimetría, detectores de radiación, e incluso, a más largo plazo y con una inversión estratégica sostenida, el desarrollo de componentes propios

del sistema, como lo sugiere la participación de una institución de investigación y desarrollo en tecnología nuclear como la CNEA o una empresa tecnológica nacional como INVAP, en el proyecto CeArP.

- **Integración en Redes Internacionales:** Operar un centro de protonterapia facilita la integración de los investigadores y clínicos locales en las redes internacionales de colaboración científica y clínica en terapia de partículas. Esta participación permite el intercambio de conocimientos, la adopción de mejores prácticas, la participación en estudios multicéntricos globales y la visibilidad internacional de la producción científica local. La celebración de la conferencia PTCOG 63 en Buenos Aires, realizada en junio de 2025 por primera vez en toda América Latina es un claro ejemplo de esta oportunidad de integración.

La inversión en un centro de protonterapia, por lo tanto, puede trascender el ámbito puramente asistencial y actuar como un nodo de innovación. Puede generar un “efecto halo”, atrayendo talento, estimulando la investigación en disciplinas relacionadas (ingeniería biomédica, biofísica de las radiaciones, biología computacional, informática médica) y fortaleciendo el ecosistema científico-tecnológico del país o la región, generando beneficios que van más allá de la atención directa al paciente.

C. ATRACCIÓN REGIONAL

Dada la extrema escasez de centros de protonterapia en América Latina, las primeras instalaciones en operar tienen el potencial de convertirse en centros de referencia regionales, atrayendo pacientes de países vecinos.

- **Atracción de Pacientes Internacionales:** pacientes de países latinoamericanos sin acceso a protonterapia, que actualmente podrían ser derivados a Estados Unidos o a Europa (con costos muy elevados), podrían optar por tratarse en un centro regional si este ofrece calidad y costos competitivos. Esto podría generar una fuente adicional de ingresos para el centro, contribuyendo a su sustentabilidad financiera, y también beneficiar a la economía local a través de los gastos asociados al turismo médico (alojamiento, transporte, servicios para pacientes y acompañantes).
- **Mejora de la Viabilidad Económica:** mediante un análisis de costo-beneficio específico, la inclusión de los ingresos (médicos y no médicos) generados por el llamado “turismo médico” puede mejorar significativamente la rentabilidad y el retorno de la inversión del proyecto desde una perspectiva social amplia, haciendo la inversión más justificable. Sin embargo, la atracción de pacientes internacionales no es inmediata. Requiere que el centro ofrezca estándares de calidad clínica y seguridad comparables a los de centros internacionales establecidos, personal capaz de atender a pacientes en diferentes idiomas (principalmente español y portugués en el contexto latinoamericano), procesos administrativos y logísticos eficientes para pacientes extranjeros, y precios competitivos (considerando el costo total del tratamiento más viaje y estancia). Además, pueden ser necesarios acuerdos entre los sistemas de salud de los diferentes países para facilitar la derivación y el financiamiento de estos tratamientos transfronterizos.

El potencial del turismo médico es una oportunidad real, pero su materialización exige una estrategia deliberada y una inversión en calidad y servicios que posicionen al centro como una opción atractiva y confiable a nivel regional e internacional.

D. CAPACITACIÓN AVANZADA: ESTÍMULO A LA FORMACIÓN DE PROFESIONALES DE ALTA ESPECIALIZACIÓN

La introducción de una tecnología tan avanzada como la protonterapia actúa como un poderoso estímulo para el desarrollo del capital humano en el campo de la oncología radioterápica y la física médica.

- **Atracción y Desarrollo de Talento:** la oportunidad de trabajar con tecnología de punta y participar en investigación avanzada puede atraer a profesionales altamente calificados (tanto locales como extranjeros) y motivar a estudiantes a especializarse en estas áreas.
- **Creación de Programas de Formación Específicos:** la necesidad de personal capacitado impulsa la creación o el fortalecimiento de programas de posgrado (maestrías, doctorados), residencias médicas y de física médica, y cursos de entrenamiento clínico focalizados en protonterapia y técnicas asociadas (planificación 4D, IMPT, IGRT avanzada, control de calidad en terapias con partículas).
- **Retención de Profesionales:** ofrecer un entorno de trabajo estimulante, con acceso a tecnología de vanguardia y oportunidades de desarrollo profesional e investigación, puede contribuir a retener el talento local, reduciendo la “fuga de cerebros” ha-

cia países con mayor desarrollo tecnológico.

- **Impacto Regional en la Formación:** los centros pioneros en la región, como el CeArP, pueden convertirse en centros de referencia no solo para tratamiento, sino también para la formación de profesionales de otros países latinoamericanos. Esto puede generar un efecto multiplicador, elevando gradualmente el nivel de conocimiento y práctica de la oncología radioterápica en toda la región.

La inversión en protonterapia, por lo tanto, puede catalizar una mejora cualitativa en la formación de recursos humanos en oncología. Las habilidades y conocimientos adquiridos en el manejo de esta tecnología (física de partículas, dosimetría avanzada, control y disminución de las incertezas dosimétricas, aseguramiento de la calidad riguroso) son, en gran medida, transferibles y beneficiosos para mejorar la calidad y seguridad de otras modalidades de radioterapia avanzada basadas en fotones, generando un impacto positivo en el conjunto de la especialidad.

■ V. INICIATIVAS Y POLÍTICAS DE APOYO EN AMÉRICA LATINA

La viabilidad de la protonterapia en América Latina dependerá en gran medida del marco de políticas públicas y la articulación con el sector privado, las iniciativas institucionales y el apoyo de organismos internacionales y sociedades profesionales.

A. ROL DE ORGANISMOS INTERNACIONALES Y SOCIEDADES MÉDICAS

Diversas organizaciones juegan un papel importante en facilitar o guiar

la adopción de tecnologías como la protonterapia:

- **OIEA (IAEA):** Es un actor clave en la promoción del uso seguro y eficaz de las tecnologías nucleares y radiológicas en salud. Proporciona asistencia técnica, fomenta la cooperación regional, organiza programas de formación y capacitación y desarrolla normas y guías técnicas fundamentales (ej. guías para formación de físicos médicos, iniciativa “Rayos de Esperanza”).
- **OPS/OMS (Organización Panamericana de la Salud – Organización Mundial de la Salud):** Se enfoca en el fortalecimiento general de los sistemas de salud, la promoción de la cobertura universal, la mejora del acceso a medicamentos y tecnologías esenciales, y el establecimiento de estándares éticos. Aunque no emite recomendaciones específicas sobre protonterapia en los documentos que ha generado, su marco conceptual sobre inversión en salud, sustentabilidad financiera, financiamiento equitativo y eliminación de barreras de acceso es directamente relevante para la toma de decisiones sobre esta tecnología.
- **CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe):** Aporta análisis económicos sobre la situación de los sistemas de salud en la región, incluyendo estudios sobre sustentabilidad financiera, que pueden informar las discusiones sobre la viabilidad de inversiones de alto costo.
- **ALATRO (Asociación Ibero Latinoamericana de Terapia Radiante):** Como principal sociedad científica de oncología radioterápica en la región, juega un rol

fundamental en la disseminación de conocimientos, la actualización profesional a través de congresos y cursos, y la promoción de estándares de práctica clínica. Su colaboración con sociedades científicas internacionales como ASTRO y ESTRO facilita el acceso a la información más reciente. Es un interlocutor clave para la comunidad médica regional.

- SAFIM (Sociedad Argentina de Física Médica): Es una asociación civil sin fines de lucro fundada en 1995 que nuclea a los profesionales e investigadores de la física médica en el país. Agrupa a físicos especialistas en radioterapia, medicina nuclear, diagnóstico por imágenes y radio-protección, Organiza periódicamente jornadas y congresos (como el Congreso Argentino de Física Médica) para compartir avances científicos e innovaciones tecnológicas, facilita el desarrollo de estudios básicos y aplicados para mejorar la seguridad del paciente y los tratamientos médicos. En el marco de sus reuniones científicas comienza a promoverse la temática de la hadronterapia en los últimos tiempos.
- ALFIM (Asociación Latinoamericana de Física Médica): Colabora estrechamente con el OIEA en la promoción y aplicación de estándares para la formación de físicos médicos en la región, un aspecto crítico para la protonterapia.
- PTCOG: Es la organización global de referencia para la terapia de partículas. Establece consensos, organiza la principal conferencia científica anual (la realización del PTCOG 63 en Buenos Aires en 2025, un hito

para la región), y mantiene la base de datos más completa sobre centros operativos y en desarrollo. La participación activa en PTCOG es esencial para cualquier centro que aspire a operar con estándares internacionales.

B. INTEGRACIÓN EN POLÍTICAS Y PLANES NACIONALES DE CÁNCER

Para que la protonterapia se desarrolle de manera estratégica y equitativa en América Latina, su adopción debería idealmente formar parte de una planificación nacional integral.

- Necesidad de Estrategia Nacional: la decisión de invertir en protonterapia no debería ser aislada, sino integrada en las políticas nacionales de salud y, específicamente, en los planes nacionales de control del cáncer (por ejemplo, a través del Instituto Nacional del Cáncer, INC). Esto implica una evaluación formal de su prioridad frente a otras necesidades oncológicas, la definición clara de su rol terapéutico, el establecimiento de criterios de indicación y acceso basados en evidencia y equidad, la planificación coordinada de la infraestructura y el capital humano, y la asignación de mecanismos de financiamiento y reembolso sostenibles a largo plazo.
- Situación Actual: como se mencionó la protonterapia aún no figura explícitamente en la mayoría de los planes nacionales de cáncer de la región. Su avance parece depender más de iniciativas puntuales de instituciones académicas, centros de investigación en tecnología nuclear o decisiones políticas específicas (como en Argentina), que de una estrategia nacional planificada en la mayoría de los países.

- Coordinación Intersectorial Requerida: la complejidad de la implementación exige una fuerte articulación entre múltiples actores: Ministerios de Salud, agencias de ciencia y tecnología, autoridades regulatorias (nucleares y sanitarias), universidades, hospitales, sociedades científicas y, potencialmente, el sector privado.

La falta de integración formal en las políticas nacionales de cáncer podría limitar la expansión de la protonterapia más allá de proyectos pioneros aislados. Una planificación gubernamental explícita, que defina el lugar de esta tecnología dentro del sistema de salud y asegure los recursos y la coordinación necesarios, parece indispensable para una adopción más amplia, sostenible y equitativa en el futuro.

■ VI. SÍNTESIS Y PERSPECTIVAS FUTURAS: OBSTÁCULOS Y POTENCIAL DE LA PROTONTERAPIA EN AMÉRICA LATINA

A. RECAPITULACIÓN DE LOS PRINCIPALES OBSTÁCULOS Y FACILITADORES

El análisis de la situación actual y las características de la protonterapia revela un panorama complejo para su adopción en América Latina, marcado por obstáculos significativos, pero también por facilitadores y oportunidades potenciales.

Obstáculos Principales:

- Costo elevado de la inversión inicial: la barrera más inmediata y universalmente reconocida es el gran costo tanto de la inversión inicial (equipamiento e infraestructura) como de la operación continua (mantenimiento, personal, utilidades). Estos costos son difíciles de justificar

y absorber dentro de los presupuestos de salud limitados de la región.

- **Déficit de Capital Humano:** la falta de un número suficiente de profesionales (físicos médicos, oncólogos radioterápicos, técnicos) con la formación y experiencia altamente especializada requerida es un cuello de botella crítico.
- **Complejidad regulatoria:** la necesidad de navegar marcos regulatorios multi-agencia, a menudo no adaptados específicamente para esta tecnología, puede generar retrasos e incertidumbre.
- **Incertidumbre sobre sustentabilidad financiera:** la ausencia de modelos claros y sostenibles de financiamiento y reembolso a largo plazo pone en riesgo la viabilidad económica de los centros, especialmente en sistemas de salud fragmentados y con alto gasto de bolsillo.
- **Acceso geográfico desigual:** la inevitable centralización de los centros crea barreras significativas de acceso para la mayoría de la población que reside lejos, exacerbando las inequidades existentes.
- **Evidencia Clínica Limitada:** si bien el beneficio es claro en pediatría y tumores raros/complejos, casos de reirradiaciones locales o tumores localizados en cercanías a estructuras críticas, la necesidad de desarrollo de evidencia robusta de su superioridad clínica en comparación con alternativas más económicas, para indicaciones más comunes en adultos, dificulta justificar la inversión a gran escala.

Facilitadores y Oportunidades Potenciales:

- **Beneficio Clínico Percibido:** el fuerte argumento clínico basado en la reducción de toxicidad para indicaciones pediátricas y tumores complejos es un motor importante del interés.
- **Iniciativas Pioneras:** proyectos como el CeArP en Argentina demuestran que la implementación es posible con voluntad política, inversión pública y colaboración interinstitucional.
- **Apoyo Internacional:** la asistencia técnica, las guías y los programas de formación de organismos como el OIEA y la experiencia de proveedores internacionales pueden facilitar la transferencia de tecnología y conocimiento.
- **Potencial de Innovación:** la oportunidad de establecer polos de investigación y desarrollo, formar capital humano avanzado y participar en redes científicas internacionales.
- **Turismo Médico Regional:** la posibilidad de atraer pacientes de países vecinos que no cuentan con esta tecnología.
- **Necesidad Clínica Insatisfecha:** la alta carga de cáncer en la región y las limitaciones de los tratamientos actuales para ciertos tumores crean una demanda potencial para terapias más avanzadas.

B. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DESARROLLO Y ADOPCIÓN FUTURA

Considerando el balance entre obstáculos y oportunidades, el escenario más probable para la protonterapia en América Latina en el mediano

plazo es el de una adopción lenta, gradual y altamente selectiva.

- Se espera que la expansión se limite a unos pocos centros de referencia, ubicados estratégicamente en los países con mayor capacidad económica, científica y política para sostener la inversión (inicialmente Argentina, potencialmente seguidos por Brasil, Chile o México si las iniciativas actuales prosperan).
- El enfoque clínico inicial se concentrará, lógicamente, en las indicaciones donde el beneficio es más evidente y el consenso internacional es mayor: oncología pediátrica, tumores de la base del cráneo, tumores irresecables y/o cercanos a órganos críticos, casos de reirradiación, etc. La expansión a indicaciones más prevalentes en adultos (como próstata o mama) dependerá de la generación de evidencia local de coste-efectividad y de la evolución de las políticas de reembolso.
- La dependencia de la voluntad política y la inversión pública será crucial. Sin un compromiso gubernamental explícito, reflejado en planes nacionales y asignaciones presupuestarias, es poco probable que la protonterapia se desarrolle más allá de proyectos aislados.
- La colaboración regional emerge como una estrategia potencialmente valiosa para optimizar los escasos recursos. Esto podría incluir la creación de redes de derivación de pacientes entre países, programas conjuntos de formación de personal, intercambio de protocolos y experiencias, e incluso, a más largo plazo, la exploración de mecanismos de compra conjunta.

de equipamiento o servicios de mantenimiento.

- La evolución tecnológica global hacia sistemas de protonterapia más compactos, eficientes, instalables en espacios reducidos y potencialmente más asequibles podría, eventualmente, reducir algunas de las barreras de costo e infraestructura, aunque seguirán representando inversiones significativas para los países de la región.

C. RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS PARA LA TOMA DE DECISIONES

Para los tomadores de decisiones en salud (gobiernos, instituciones, financiadores) que consideren la adopción de la protonterapia en América Latina, es importante considerar las siguientes recomendaciones estratégicas:

- **Planificación Nacional Integrada:** antes de invertir, realizar una evaluación estratégica a nivel nacional para determinar si la protonterapia es una prioridad dentro del plan global de control del cáncer, considerando las necesidades epidemiológicas, los recursos disponibles y las alternativas existentes. Si se decide proceder, integrarla formalmente en las políticas nacionales, definiendo su rol, objetivos, criterios de acceso y métricas de evaluación.
- **Evaluación Rigurosa Basada en Evidencia:** realizar estudios rigurosos de evaluación de tecnologías sanitarias, incluyendo análisis de costo-efectividad y de impacto presupuestario adaptados al contexto socioeconómico y sanitario local. Utilizar estos resultados para informar las decisiones sobre inversión, cober-

tura y definición de tarifas de reembolso.

- **Inversión Estratégica en Capital Humano:** desarrollar un plan a largo plazo para la formación, contratación y retención del personal altamente especializado necesario. Fomentar la creación de programas de posgrado y residencias en física médica y oncología radioterápica, alineados con estándares internacionales y promover la colaboración regional en formación.
- **Fortalecimiento y Armonización Regulatoria:** trabajar con las agencias regulatorias nacionales para adaptar los marcos normativos, agilizar los procesos de licenciamiento y aprobación para tecnologías avanzadas, y adoptar guías internacionales (como las del FORO/OIEA) para asegurar la implementación segura y eficiente. Fomentar la convergencia regulatoria regional.
- **Diseño de Modelos de Financiamiento Sostenibles:** explorar y definir modelos de financiamiento viables a largo plazo, que combinen fuentes públicas y eventualmente privadas, que aseguren la cobertura de los costos operativos y establezcan mecanismos de reembolso transparentes y armonizados para las indicaciones clínicas aprobadas por el nomenclador nacional.
- **Estrategias de Acceso Equitativo:** diseñar e implementar activamente medidas para mitigar las barreras geográficas y económicas para los pacientes, tales como subsidios o apoyos para transporte y alojamiento, redes de derivación eficientes entre regiones y niveles de atención, y uso de telemedicina para consultas de seguimiento.

- **Fomento de la Investigación y Colaboración:** promover la posibilidad de que los centros de protonterapia incorporen un componente de investigación científica, tecnológica y traslacional, y fortalecer activamente la colaboración con otras instituciones nacionales e internacionales (participación en PTCOG, redes de ensayos clínicos) para generar evidencia local, optimizar la práctica clínica y contribuir al avance del conocimiento.

- **Enfoque Gradual y Priorizado:** considerar un enfoque de implementación gradual, comenzando con uno o pocos centros de referencia nacionales o regionales, enfocados inicialmente en las indicaciones de mayor beneficio clínico comprobado (pediatría, tumores complejos). Evaluar cuidadosamente los resultados clínicos, económicos y organizacionales antes de considerar una expansión mayor.

En conclusión, la protonterapia representa una frontera científica y tecnológica atractiva en la lucha contra el cáncer, con un potencial real para beneficiar a pacientes específicos en América Latina. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos formidables relacionados con el costo, la necesidad de personal especializado, la complejidad regulatoria, la sustentabilidad financiera y el acceso equitativo. Una adopción exitosa y responsable requerirá una planificación estratégica cuidadosa, una inversión sostenida tanto en tecnología como en capital humano, una fuerte voluntad política y una evaluación continua basada en la evidencia y adaptada al contexto particular de cada país y de la región en su conjunto.

■ BIBLIOGRAFÍA.

- Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Centro Argentino de Protonterapia <https://www.argentina.gob.ar/cnea/centro-argentino-de-protonterapia>.
- Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, <https://www.foroiberam.org/> (junio 2026)
- Insurance coverage recommendations for proton therapy, American Society for Radiation Oncology (ASTRO). Proton Beam Therapy Model Policy. Arlington, VA: ASTRO; 2018. <https://www.astro.org> (junio 2026)
- Jones DA, Smith J, Mei XW, et al. A systematic review of health economic evaluations of proton beam therapy for adult cancer. *Clin Transl Radiat Oncol*. 2019;20:19–26. doi:10.1016/j.ctro.2019.10.007.
- Kalospyros SA, Gkikoudi A, Koutsotathis A, Adamopoulou A, Vasiliopoulos SN, Rangos V, et al. Radiobiological and clinical advantages of proton therapy in modern cancer treatment. *Cancers* (Basel). 2026;18(5):885. doi:10.3390/cancers18050885.
- Li CC, Lin YC, Liang JA, et al. Health economic evaluation of proton therapy for lung cancer: a systematic review. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(6):4727. doi:10.3390/ijerph20064727.
- Lundkvist, Cost-effectiveness of proton radiation in the treatment of childhood medulloblastoma, *Cancer* 103:793-801, 2005.
- Mariana Mazzucato, “El Estado Emprendedor” Título original inglés: *The Entrepreneurial State*. Anthem Press, Barcelona, ISBN: 978-84-9056-296-3 2014.
- National Association for Proton Therapy (NAPT). Pediatric proton therapy – standard of care for children and young adults. Arlington, VA: NAPT; 2025. Disponible en: <https://www.protontherapy.org>. (junio 2026)
- Santos MA, Bourel VJ, Mazal A, Figueroa VC, Sarria GJ, Salata C, Serrano J, Santa Cruz G. Proton therapy in Latin America: urgent need for investment and strategic implementation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2025;123(1 Suppl):e507. doi:10.1016/j.ijrobp.2025.09.3127.
- The Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG), <https://ptcog.online/> (junio 2026)
- Vanderstraeten B, Verstraete J, De Croock R, De Neve W, Lievens Y. In search of the economic sustainability of Hadron therapy: the real cost of setting up and operating a Hadron facility. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2014 May 1;89(1):152-60. doi: 10.1016/j.ijrobp.2014.01.039. PMID: 24725698.
- World Child Cancer USA, <https://worldchildcancer.us/learn-more/> (junio 2026)

■ NOTA

1 Eventos adversos: incluyen pérdida auditiva, reducción del coeficiente intelectual (IQ), hipotiroidismo, deficiencia de la hormona del crecimiento (GHD), osteoporosis, enfermedad cardíaca y neoplasias secundarias.