

La física médica en la ciudad de La Habana

Rodolfo Alfonso Laguardia, Adlin López Díaz, Oscar Díaz Rizo

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de la Universidad de La Habana (InSTEC-UH)

Avenida Salvador Allende y Luaces, La Habana, Cuba.

odrizo@instec.cu

Resumen

Se resumen las principales contribuciones en las aplicaciones de las ciencias y tecnologías nucleares al diagnóstico y tratamiento de enfermedades neoplásicas desarrolladas por físicos médicos de diferentes instituciones habaneras. Adicionalmente, se presentan las principales actividades de formación y acreditación de físicos médicos para los servicios de radiodiagnóstico, medicina nuclear, radioterapia y protección radiológica en la red hospitalaria de La Habana.

Palabras clave: protección contra las radiaciones; Cuba; pacientes; técnicas de diagnóstico; radioterapia; diagnóstico.

Medical physics in Havana city

Abstract

The main contributions in the applications of nuclear sciences and technologies to the diagnosis and treatment of neoplastic diseases, obtained by medical physicists from various Havana institutions are summarized. Additionally, the main activities to guarantee the training and accreditation of medical physicists for radiodiagnosis, nuclear medicine, radiotherapy and radiation protection services in Havana hospital network is presented.

Key words: radiation protection; Cuba; patients; diagnostic techniques; radiotherapy; diagnosis.

Introducción

La Física Médica es la rama de la ciencia que comprende la aplicación de los conceptos, leyes, modelos, técnicas y métodos de las ciencias y tecnologías nucleares y las radiaciones ionizantes para la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades y, en la actualidad, desempeña una importante función en la asistencia médica, la investigación biológica y médica, y en la optimización de ciertas actividades sanitarias.

Su génesis en nuestro país, son los tratamientos de cáncer de tiroides con yodo y fósforo radioactivos que, en 1950, inició el Dr. Zoilo Marinello Vidaurreta, padre de la oncología cubana, en el entonces llamado Instituto del Cáncer de La Habana. Ya en 1961 se inaugura el Hospital Oncológico de la Habana, bajo la certera conducción del Prof. Marinello, el cuál más tarde, se convertiría en lo que hoy conocemos como Instituto Nacional de Oncología y Radiobiología (INOR), centro rector de las investigaciones sobre el cáncer, de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes al diagnóstico y tratamiento de neoplasias en el país, empleando para ello las más modernas tecnologías, así como de la formación de médicos y enfermeras en las diferentes especialidades médicas asociadas a las neoplasias.

En la actualidad, además del INOR, en la ciudad de La Habana existe toda una red de institutos y centros hospi-

talarios que, entre otras funciones, cuentan con personal, recursos y equipamiento necesarios para el diagnóstico y tratamiento de diferentes enfermedades, entre los que sobresalen el Centro de Investigaciones Médico-Quirúrgicas (CIMEQ), dónde se ha instalado el primer ciclotrón en el país para la producción de radiofármacos positrónicos, el Hospital Clínico Quirúrgico “Hermanos Ameijeiras” (HHA), los Institutos de Cardiología y Cirugía Cardiovascular (ICCC) y de Nefrología (INEF), entre otros.

Además, en la capital se encuentra el Centro de Isótopos (CENTIS), institución adscrita a la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA) y centro rector de la producción e investigación de radiofármacos en nuestro país, así como el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de la Universidad de La Habana (InSTEC-UH), única institución de educación superior del país encargada en la formación de especialistas nucleares (físicos nucleares, radioquímicos e ingenieros nucleares y energéticos), tanto de pregrado como de postgrado.

Principales aportes científicos de la física médica habanera

La contribución de los físicos médicos cubanos al desarrollo de especialidades médica como la Radioterapia y la Medicina Nuclear ha sido trascendental. A mediados de los años 90, Cuba ya contaba con más físicos

médicos en Radioterapia que el resto de Centroamérica y el Caribe hispano en su conjunto. En el campo de la Medicina Nuclear la diferencia en proporción es todavía mayor que en el resto de América Latina y el Caribe. Nuestros especialistas son, a su vez, portavoces de los avances científico-técnicos del país y fuente de trabajos científicos de impacto tanto en congresos regionales como de importantes asociaciones profesionales internacionales como la Asociación Latinoamericana de Físicos Médicos (ALFIM), la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA, por sus siglas en inglés), Asociación Latinoamericana de Sociedades de Biología y Medicina Nuclear (ALASBIMN) y Asociación Latinoamericana de Terapia Radiante Oncológica (ALATRO).

Aportes en Física de la Medicina Nuclear: Una de las áreas de la Física Médica donde mayor desarrollo tecnológico y científico se ha experimentado en la capital del país ha sido en la Medicina Nuclear. Varios centros habaneros han contado con fuertes grupos de físicos médicos, como el INOR, HHA, el Centro para el Control Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CECMED) y la Dirección de Investigaciones Clínicas del Centro de Isótopos (CIC-CENTIS). Esto ha influido en que las tecnologías más avanzadas en esta especialidad, como los sistemas híbridos, se concentren en la capital. Los 3 PET-CT y 4 SPECT-CT con que cuenta el país se encuentran ubicados en servicios de Medicina Nuclear habaneros. No obstante, gracias a la regionalización del Sistema Nacional de Salud, estos brindan servicios a pacientes remitidos de todas las provincias del país. Esta disponibilidad de equipamiento, combinada con la alta capacidad en recursos humanos, ha permitido el avance de importantes investigaciones aplicadas de la Física Médica que se han desarrollado en la Habana, tales como:

1. Aporte a la digitalización de las cámaras gamma analógicas existentes en el país, a través del proyecto IMAGAMMA [1, 2]. El aporte ha sido reconocido por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), por la contribución de físicos médicos cubanos a los proyectos de cooperación técnica de esta organización en países como Bolivia, Ecuador, Venezuela y Colombia (Tribuna de la Habana, 27 de marzo del 2015).
2. Desarrollo de un nuevo método para la cuantificación relativa de la perfusión cerebral mediante SPECT. Introducción de la corrección de la radiación dispersa en la SPECT cerebral con ^{99m}Tc . Métodos para el mejoramiento de la cuantificación relativa del flujo sanguíneo cerebral mediante SPECT. Desarrollo de biomarcadores del estadio preclínico de la enfermedad de Alzheimer (estado de deterioro cognitivo leve) a partir de la cuantificación del flujo sanguíneo cerebral en unidades absolutas y la SPECT cerebral de perfusión basada en el vóxel, en condición basal y luego de vasodilatación vascular inducida (reserva vascular cerebral) [3-5].
3. Se desarrolló una metodología de planificación tratamiento con radiofármacos emisores beta basada

en estimaciones dosimétricas paciente-específica a partir de imágenes SPECT y en la modelación radiobiológica de la respuesta en términos de probabilidad de control tumoral, que al aplicarse a un paciente, demostró la posibilidad de optimizar tratamientos que emplean múltiples administraciones de actividad [6-9]. Estos resultados se han venido aplicando con las nuevas tecnologías híbridas SPECT/CT adquiridas por el país recientemente.

4. Se ha desarrollado un amplio programa para el desarrollo de sistemas de gestión de la Calidad en Medicina Nuclear, con la producción de herramientas computacionales que favorecen su implementación a escala nacional e internacional y la publicación de protocolos nacionales que rigen los programas de control de calidad [10-13].
5. Farmacocinética, biodistribución y dosimetría interna de radiofármacos para diagnóstico y terapia con técnicas de Medicina Nuclear, con lo que se apoya el desarrollo de productos biotecnológicos cubanos y se aplican nuevos métodos computacionales para el tratamiento de imágenes de Medicina Nuclear [14-18].
6. Se desarrolló una metodología y las herramientas computacionales para la planificación dosimétrica paciente específica para el tratamiento del Hipertiroidismo con ^{131}I , empleando una combinación de tecnologías médico nucleares que puede implementarse a nivel nacional con un costo económico bajo [19-27]. Esta metodología emplea los captoreadores de Iodo que son de producción nacional para estudiar la farmacocinética del tiroides y las cámaras gamma para obtener solamente una imagen de la distribución espacial 2D y 3D (ver figura 1).
7. En colaboración con la Universidad Central de Las Villas se desarrollaron metodologías con vistas a la optimización de las dosis a administrar a pacientes en estudios de Ventriculografía, Renogramas, SPECT y otros ensayos de Medicina Nuclear [13, 28-32].

Desarrollos y aportes en Física de la Radioterapia: En el caso de la Radioterapia, la contribución de los físicos médicos de la Habana al desarrollo de la Física Médica del país ha sido igualmente muy relevante, especialmente con el desarrollo local de sistemas computarizados de planificación, que han permitido elevar la calidad y seguridad de los tratamientos radioterápicos basados en imágenes, así como la introducción de nuevas tecnologías, como son los aceleradores lineales, la radiocirugía estereotáctica (RCE) y la radioterapia con intensidad modulada (IMRT).

Algunos ejemplos de contribución a la física de Radioterapia se relacionan a continuación:

1. El INOR ha promovido el desarrollo e introducción, a nivel nacional, de un Programa Integral de Garantía de Calidad en Radioterapia, el cual fue desarrollado en el marco de un proyecto de asistencia técnica con el OIEA [33, 34]. Este programa ha sido generalizado y actualizado para las nuevas tecnologías

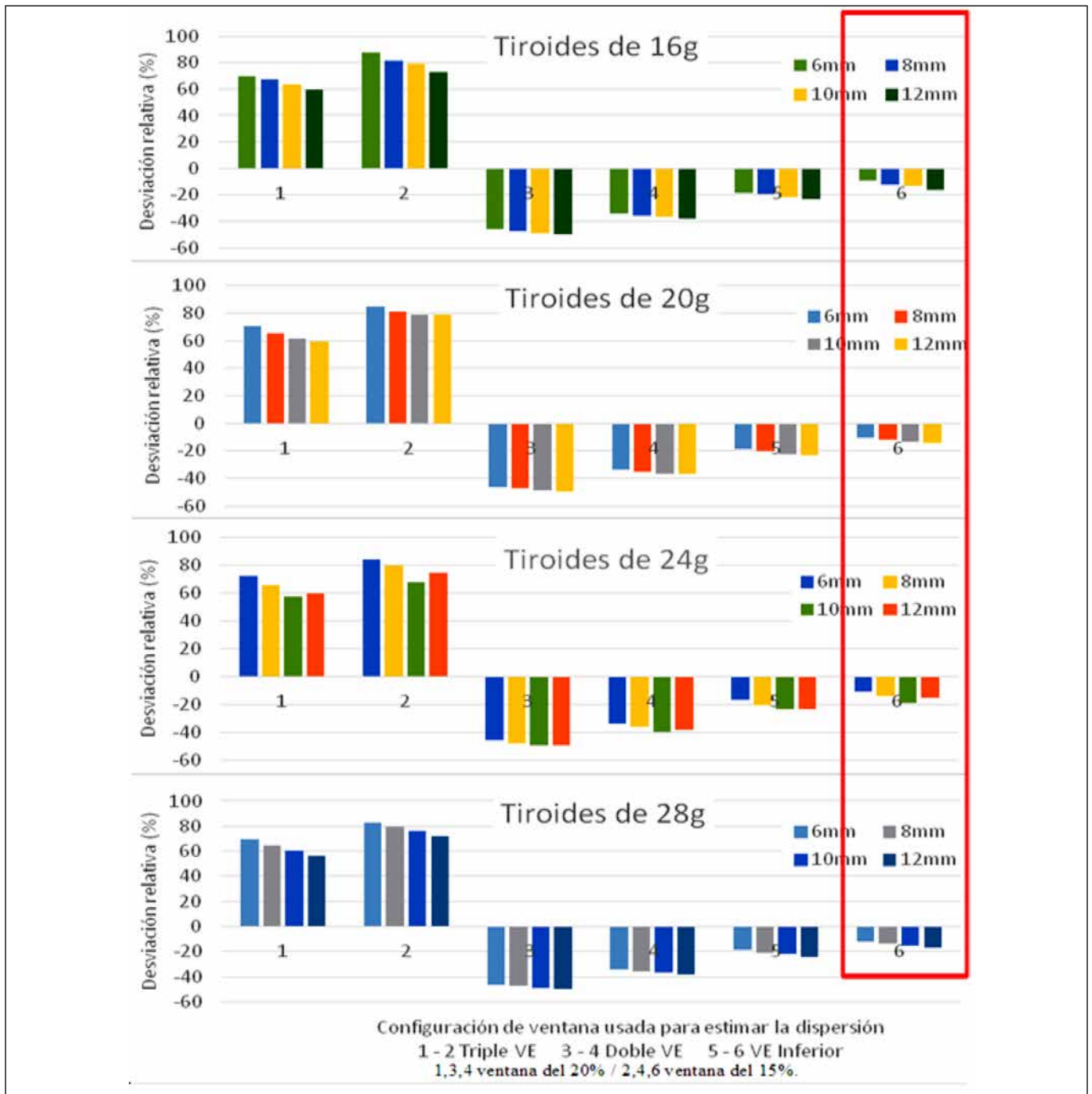


Figura 1. Resultados del estudio de evaluación por Monte Carlo de los métodos de corrección de dispersión con 131I empleando colimador pinhole en estudios de tiroides [24].

radioterápicas gracias a la importante contribución de físicos médicos de la Habana. Una contribución importante a la calidad de los tratamientos radiantes del cáncer ha sido la implementación de un programa nacional de auditorías dosimétricas [33], lo que ha elevado la exactitud en la entrega de la dosis a los pacientes de todo el país.

2. Desarrollo de un nuevo método para la cuantificación relativa de la perfusión cerebral mediante SPECT. Introducción de la corrección de la radiación dispersa en la SPECT cerebral con ^{99m}Tc. Métodos para el mejoramiento de la cuantificación relativa del flujo sanguíneo cerebral mediante SPECT. Desarrollo de biomarcadores del estadio preclínico de la enfermedad de Alzheimer (estado de

deterioro cognitivo leve) a partir de la cuantificación del flujo sanguíneo cerebral en unidades absolutas y la SPECT cerebral de perfusión basada en el vóxel, en condición basal y luego de vasodilatación vascular inducida (reserva vascular cerebral) [3-5].

3. La introducción de técnicas avanzadas de radioterapia, como la IMRT, ha sido posible gracias al trabajo de investigación-desarrollo llevado a cabo por físicos médicos del INOR, en colaboración con el HHA (ver figura 2). La implementación de una metodología integral para la verificación de los planes de tratamientos de forma redundante [36, 37].
4. Los tratamientos de lesiones intracraneales mediante las técnicas radiantes de mínimo acceso como la Radiocirugía estereotáctica fueron fomentadas y

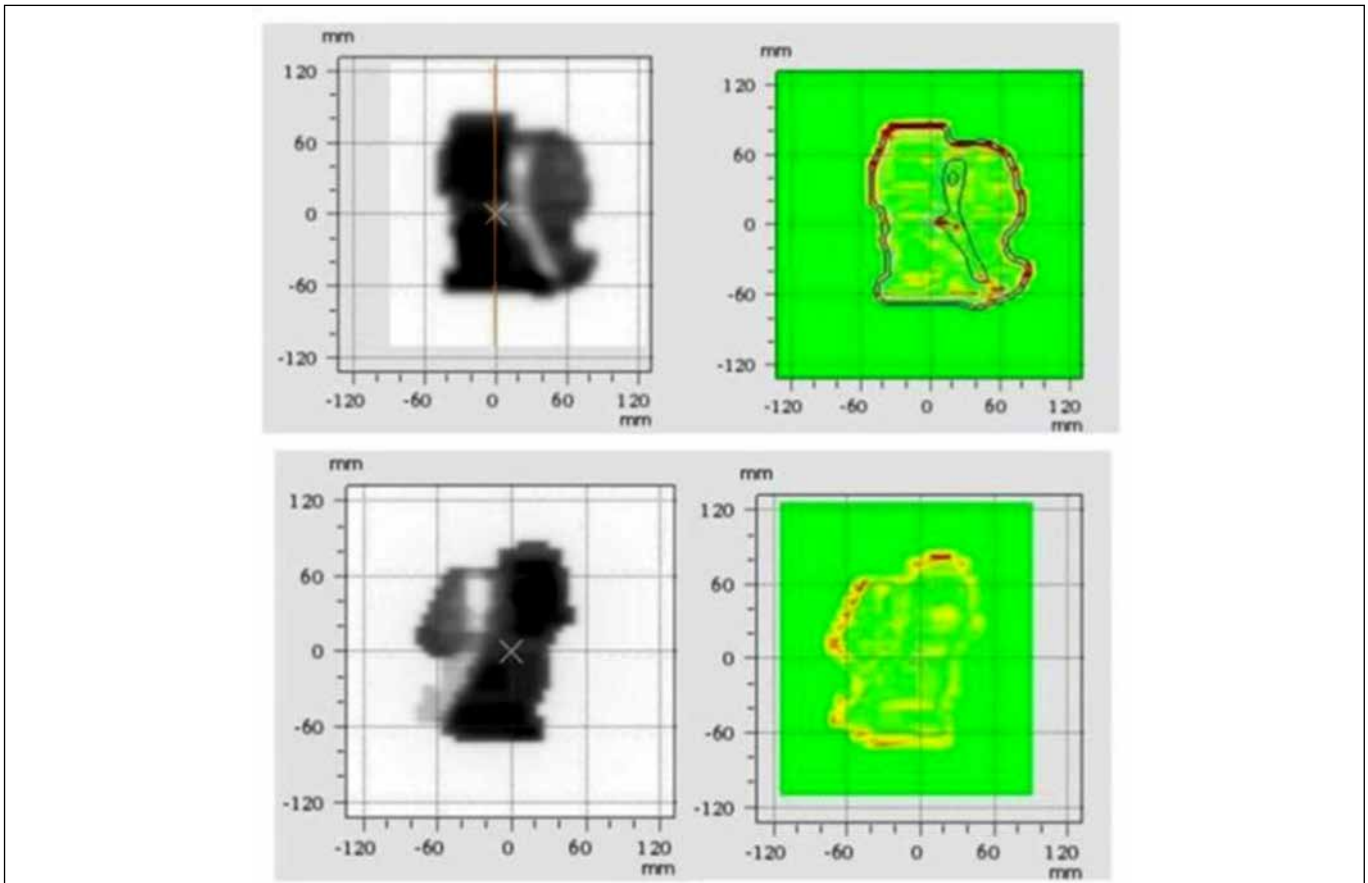


Figura 2. Ejemplo de los casos prueba realizados durante la validación del Procedimiento de CC paciente-específico de IMRT utilizando el EPID [37].

puestas en marcha por físicos médicos, inicialmente en el HHA [35] y luego en el INOR. Estas técnicas fueron acompañadas de investigaciones para el mejoramiento de la dosimetría de haces pequeños de fotones [38, 39].

En general, los físicos médicos de la Habana han contribuido de forma esencial en la definición de las tecnologías de avanzada que se han adquirido para la Medicina Radiológica; han llevado a cabo la aceptación y puesta en servicio clínico de dichas tecnologías, incluyendo aceleradores lineales de alta gama, sistemas de imágenes híbridos y sus herramientas informáticas avanzadas; han sido, además, el puntal fundamental para mantener estos equipos brindando asistencia médica con los altos estándares internacionales, lo que asegura su empleo eficiente y seguro. Sin la presencia de los físicos médicos en los servicios de Radioterapia y Medicina Nuclear, la puesta en marcha y utilización segura de estas tecnologías hubiera sido imposible.

Cabe destacar que, con el apoyo del CECMED, las autoridades del MINSAP y las Universidades Central "Marta Abreu" de las Villas y de Oriente, se han venido produciendo esfuerzos para la ampliación de las fortalezas de la física médica cubana a la radiología, la cual ya comienza a ver sus frutos a partir de investigaciones aplicadas a mamografía, tomografía computada e intervencionismo [40-42].

La Habana y la formación de físicos médicos del país

El papel del físico médico ha sido definido por diversas organizaciones internacionales, tales como el OIEA [43, 44], la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Mundial del Trabajo (OIT) [45], la Organización Mundial de Física Médica (IOMP) [46], entre otras. En correspondencia con la actividad que realizan, se puede hablar de dos tipos de profesionales en Física Médica:

- Físicos médicos clínicos, quienes trabajan en instituciones hospitalarias o médicas, donde desempeñan labores asistenciales, docentes y de investigación, para lo cual han recibido un entrenamiento clínico supervisado en Física Médica, y
- Físicos médicos no-clínicos, quienes desempeñan labores docentes y de investigación académica en universidades, institutos de investigación, etc.

Según la definición del OIEA [43],... "un físico médico cualificado clínicamente (FMCC) es un individuo competente para ejercer profesionalmente, y de manera independiente, en una o más de las especialidades de la Física Médica"...

Por lo general, los FMCC son profesionales con formación académica de postgrado y entrenamiento

clínico, que forman parte del grupo multidisciplinario profesional responsable del diagnóstico y tratamiento de pacientes, garantizando la calidad de los aspectos técnicos que intervienen en los procesos, la efectividad y la seguridad de los mismos, reduciendo así la probabilidad de accidentes. El reconocimiento del FMCC como profesional de la salud, ha sido corroborado por las nuevas Normas Básicas de Seguridad del OIEA [47],

La institución en Cuba que ha promovido y centrado la formación de posgrado de los físicos médicos, ha sido el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), el cual, en 1999, convocó a la primera edición de un Diplomado en Física Médica, el cual sirvió de base para la primera versión de la Maestría en Ciencias en Física Médica

El programa de Maestría inició su primera edición en el año 2004 y del mismo emergieron 24 egresados en las modalidades de Física de la Radioterapia, Física de la Medicina Nuclear, Física del Radiodiagnóstico y Protección Radiológica en la práctica médica.

Tras una actualización profunda de sus contenidos, con vistas a su homologación con la práctica internacional e incluyendo los requisitos establecidos internacionalmente para esta profesión, el 27 de diciembre de 2017 fue aprobada la reapertura del nuevo Programa de Maestría en Física Médica, cuya primera edición cuenta con 20 estudiantes, la mayoría de los cuales son físicos que se desempeñan en servicios de Radioterapia, Medicina Nuclear o Radioprotección del Sistema Nacional de Salud.

El InSTEC en años recientes ha comenzado a promover la Física Médica desde las carreras de pregrado de Física Nuclear, Ingeniería Nuclear y Radioquímica. A partir del curso 2013-2014 se ha comenzado a impartir una asignatura optativa en estos programas, dedicada a la Física Médica, lo que ha contribuido a motivar a los estudiantes hacia esta especialidad de alta demanda. Esta estrategia ha rendido sus frutos, pues en los últimos 5 años se han desarrollado más de 15 trabajos de diploma en temas afines a la Física Médica. Toda esta actividad de promoción vocacional ha contribuido a una inyección de nuevos profesionales a los servicios de Radioterapia y Medicina Nuclear de importantes centros de salud de la capital.

Adicionalmente, el MINSAP, a través de sus facultades de Tecnología de la Salud, ha formado a la mayoría de los operadores de las instalaciones de Radiodiagnóstico. También ha contribuido a la formación de posgrado de físicos médicos a través de dos programas de Diplomado, uno, en Física de Radioterapia (iniciado en 2003 en el INOR) y otro, en Física de Medicina Nuclear (iniciado en 2007 en el HHA), acreditados por la Facultad de Ciencias Médicas "Manuel Fajardo".

Con el objetivo de cerrar el ciclo de formación en esta especialidad de vital importancia para el país, la Física Médica junto al desarrollo de radiofármacos y la Protección Radiológica forman parte importante del Programa Doctoral en Ciencias y Tecnologías Nucleares, que se encuentra en fase de aprobación por la Comisión Nacional de Grados Científicos de Cuba. Es im-

portante resaltar que, en el marco de otros programas doctorales estrechamente vinculados a la temática, han defendido exitosamente el grado de Doctor en Ciencias una decena de profesionales de la física médica y, la mayoría de ellos, se ha incorporado activamente en la formación de sus colegas.

Conclusiones

La gran mayoría de los físicos médicos de todo el país, han recibido su superación profesional en instituciones habaneras, tanto docentes como médicas, al tener estas una mayor disponibilidad de tecnologías y de personal cualificado para la docencia y la asistencia médica. Estas instituciones son, a su vez, el portal para la introducción de las nuevas tecnologías, avanzados procedimientos médicos y productos de la investigación nacional e internacional y así, fomentar la cultura de validación e introducción tecnológica en escalada y de forma segura.

Referencias

- [1]. GONZÁLEZ J, OSORIO J, ALCAINA J. Renovación del registro médico del sistema ImaGamma. CCEEM: La Habana, 2005 .
- [2]. BORRÓN M, MORALES J, RODRÍGUEZ M, GONZÁLEZ J, ALCAINA J. Validation of the imagama interface for connecting gamma cameras to personal computers. *Revista Española de Medicina Nuclear*. 1998; 17(1): 2-7.
- [3]. SÁNCHEZ CA, RODRIGUEZ R, CISNERO M, DIAZ RIZO O. Brain perfusion ratios by (99) mTc HMPAO utilizing a mean value of the visual cortex to the cerebellum ratio derived from a normal database. *European Journal of Nuclear Medicine*. 2001; 28(8): 1021.
- [4]. SÁNCHEZ C, DÍAZ O, AGUILA A. Control de la calidad en la tomografía por emisión de fotones (SPECT). *Revista Cubana de Física*. 2002; 19(1): 36-48.
- [5]. SÁNCHEZ C, DÍAZ O, RODRÍGUEZ M, RODRÍGUEZ R, AGUILA A. Mejoramiento de la cuantificación relativa del flujo sanguíneo cerebral con la tecnología médico-nuclear disponible en el país. *Nucleus*. 2002; (31): 8-17.
- [6]. GONZÁLEZ J, CALDERÓN C, RODRÍGUEZ M Determination of radionuclide S value from any voxel size based on 3D Fourier Transform Convolution method. *World Journal of Nuclear Medicine*. 2007; 6(1): 40-44.
- [7]. CALDERÓN C, GONZÁLEZ J, ALFONSO R. Radiobiological concepts for treatment planning of schemes that combines external beam radiotherapy and systemic targeted radiotherapy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2017; 865: 152-6.
- [8]. CALDERÓN-MARÍN CF, GONZÁLEZ-GONZÁLEZ JJ, QUESADACEPERO W, ALFONSO-LAGUARDIA R, DÍAZ-RIZO O. Validating activity prescription schemes in radionuclide therapy based on TCP and NTCP indexes calculation. In: *Standard, applications and quality assurance in medical radiation dosimetry (IDOS)*. Vol. 2. p. 317-331. IAEA/STI/PUB/1514. Vienna: IAEA, 2011.
- [9]. GONZÁLEZ J, CALDERÓN C, ALFONSO R, DÍAZ RIZO O, OLIVA JP, BAUM RP. Inverse treatment planning for targeted radionuclide therapy. In: *Standard, applications and quality assurance in medical radiation dosimetry (IDOS)*. Vol. 2. p. 301-315. IAEA/STI/PUB/1514. Vienna: IAEA, 2011.
- [10]. LÓPEZ A, CALDERÓN C, VARELA C, TORRES L, DÍAZ M, OROPESA P, et. al. Protocolo Nacional "Control de Calidad de la Instrumentación en Medicina Nuclear". La Habana: Cubanenergía, 2011.
- [11]. VARELA C, LÓPEZ A, CALDERÓN C, LÓPEZ G, GONZÁLEZ J, DÍAZ M, et. al. Control de calidad de la instrumentación en Medicina Nuclear. Protocolo Nacional. Segunda ed. La Habana: Editorial Ciencias Médicas, 2017. 141 p.
- [12]. DÍAZ M, VARELA C, LÓPEZ G, LÓPEZ A, TORRES L, COCA M, et. al. Resultados preliminares de la implementación del QUA- NUM en Cuba. *Revista de Física Médica*. 2011; 12(1): 29-32.

- [13]. PÉREZ M, DÍAZ O, LÓPEZ A, ESTÉVEZ E, ROQUE R. Validación de un método para optimizar actividad radionúclida en SPECT. Radioprotección. 2007; 52(XIV): 39-46.
- [14]. TORRES LA, COCA MA, CORNEJO N. A software package for tridimensional patient-specific dosimetry in ^{188}Re labeled h-R3 loco-regional RIT. Proceedings of the International Conference on Quality Assurance and New Techniques in Radiation Medicine (QANTRM). Vienna: IAEA, 2006. Book of extended synopses. IAEA-CN-146. 2006.
- [15]. TORRES LA, COCA MA, BATISTA JF, et. al. Biodistribution and internal dosimetry of the ^{188}Re labeled humanized monoclonal antibody anti-Epidermal Growth Factor receptor Nimotuzumab in the locoregional treatment of malignant gliomas. Nuclear Medicine Communications. 2008; 29: 66-75.
- [16]. AROCHE LT. Biodistribución y dosimetría interna del ^{188}Re -h-R3 empleado en la radioinmunoterapia de gliomas [tesis de doctor en Ciencias Farmacéuticas]. Universidad de la Habana. La Habana, 2009.
- [17]. PACILIO M, AMATO E, LANCONELLI N, BASILE C, TORRES L, BOTTA F, et. al. Differences in 3D dose distributions due to calculation method of voxel S-values and the influence of image blurring in SPECT. Physics in Medicine and Biology. 2015; 60: 1945-64.
- [18]. PACILIO M, LANCONELLI N, MEO SL, BETTI M, MONTANI L, TORRES L, et. al. Differences among Monte Carlo codes in the calculations of voxel S values for radionuclide targeted therapy and analysis of their impact on absorbed dose evaluations. Medical Physics. 2009; 36: 1543-52.
- [19]. LÓPEZ A, REYNOSA R, PALAU A, MARTÍN J, CASTILLO J, TORRES L, et. al. Gamma cameras calibration for I-131 uptake quantification in Hyperthyroidism diseases. IUPESM 2015, 2015; Canada. Switzerland: Springer International.
- [20]. LÓPEZ A, REYNOSA R, PALAU P, MARTÍN J, CASTILLO J, LA-TORRES. Methodology for Gamma cameras calibration for I-131 uptake quantification in Hyperthyroidism diseases. XV Workshop on Nuclear Physics and IX International Symposium on Nuclear and Related Techniques WONP-NURT'2015. February 9-13, 2015. Havana, Cuba.
- [21]. RAMOS E. Implementación del método de los factores S para dosimetría 3D con ^{131}I en el tratamiento del Hipertiroidismo [tesis de grado]. Universidad de La Habana. La Habana, Cuba. 2016.
- [22]. LÓPEZ A, MARTÍN J, FERNÁNDEZ V, PÉREZ A. Estimation of volumetric dose distribution delivery deviations from dose planned in ^{131}I hyperthyroidism treatment: preliminary results. XV Workshop on Nuclear Physics and IX International Symposium on Nuclear and Related Techniques (WONP-NURT). October 23-27th, 2017. Havana, Cuba: <http://www.wonp-nurt.cu>.
- [23]. LÓPEZ A, REYNOSA R, PALAU A, MARTÍN J, TORRES L. Obtención combinada de parámetros para la planificación dosimétrica 2D y 3D de tratamientos con ^{131}I en Hipertiroidismo. Nucleus. 2017; (61): 16-20.
- [24]. LÓPEZ A, RODRÍGUEZ S, DÍAZ A, PALAU A, MARTÍN J. Evaluación por Monte Carlo de los métodos de corrección de dispersión con ^{131}I empleando colimador pinhole. Nucleus. 2017; (61): 11-15.
- [25]. RAMOS E, LÓPEZ A, PÉREZ A. Implementation of "S factor methods" for 3D dose planning in ^{131}I hyperthyroidism treatment XV Workshop on Nuclear Physics and IX International Symposium on Nuclear and Related Techniques (WONP-NURT). October 23-27th, 2017. Havana, Cuba. <http://www.wonp-nurt.cu>.
- [26]. LÓPEZ A. Dosificación del tratamiento con I-131 en Hipertiroidismo mediante técnicas paciente-específicas [tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas]. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba. 2018.
- [27]. LÓPEZ A, MARTÍN J, RAMOS E. Estimación de la distribución 3D de dosis durante los tratamientos con I-131 en Hipertiroidismo. XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. Congreso Regional IRPA. 16-20 Abril 2018. La Habana, Cuba. <http://www.irpacuba2018.com>.
- [28]. PÉREZ M, DÍAZ O Métodos de optimización de la actividad a administrar al paciente en estudios de Medicina Nuclear. Revista Española de Física Médica. 2006; 7(1): 32-36.
- [29]. PÉREZ M, DÍAZ O, DOPICO R, ESTÉVEZ E. Administered Activity Optimization in $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAG3 Renography for Adults. Journal of Nuclear Medicine & Technology. 2003; 31: 216-21.
- [30]. PÉREZ M, DÍAZ O, ESTÉVEZ E. Activity Optimization in HMPAO - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Brain SPECT. Health Physics. 2007; 93(1): S23.
- [31]. Pérez M, Díaz O, López A. Activity optimization method in SPECT: a comparison with ROC curves. JZU Science B. 2006; 7(12): 947-56.
- [32]. PÉREZ M, FARCÍA J, PONCE F, DÍAZ O. Administered activity optimisation in patients studied by equilibrium gated radionuclide ventriculography using Pyrophosphate and Tc- $^{99\text{m}}$. Nuclear Medicine Communication. 2002; 23: 347-53.
- [33]. ALONSO-SAMPER JL, et. al. Use of an anthropomorphic phantom to improve the external beam quality audits in radiotherapy. Proceedings of An International Symposium On Standards, Applications And Quality Assurance In Medical Radiation Dosimetry (IDOS). Vienna: IAEA, 2011. p. 433-442. ISBN 978-92-0-116210-6.
- [34]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Aspectos físicos de garantía de la garantía de calidad en radioterapia: protocolo de control de calidad. IAEA TECDOC-1151. Viena: OIEA, 2000.
- [35]. ALAMINOS I, ORTEGA H, MOLINA P, VALLADARES R. A Stereotactic Surgical Planning System for the IBM 386 / 486 PC Family. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Rio de Janeiro, Brazil 1994.
- [36]. LARRINAGA CORTINA E, RODRÍGUEZ LINARES D, ALFONSO LAGUARDIA R. Optimización de un procedimiento de control de calidad para la radioterapia de intensidad modulada. Nucleus. 2016; (59): 25-28.
- [37]. LARRINAGA CORTINA E, ALONSO FERNÁNDEZ D, ALFONSO LAGUARDIA R, ALONSO SAMPER J. Control de calidad paciente-específico de radioterapia de intensidad modulada utilizando dispositivo electrónico de imagen portal. Nucleus. 2016; (59): 19-24.
- [38]. PALMANS H, ALFONSO R, ANDREO P, et. al. An international code of practice for the dosimetry of the small static photon field. Radiotherapy and Oncology. 2012; 103(1): S13.
- [39]. ALFONSO R, et. al. A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. Med. Phys. 2008; 35(11): 5179-86.
- [40]. MILLER R, PÉREZ M, LORES M, ORTEGA O, NEPITE R, GRIÑÁN O, et. al. Optimización mediante control automático de exposición para estudios de fosa posterior en TC pediátrica. Imagen Diagnóstica. 2014; 5(1): 10-6.
- [41]. MILLER R, PÉREZ M, MATAMOROS L, EDYVEAN S. Nonlinear model of image noise: an application on computer tomography including beam hardening and image processing algorithm. Applied Mathematics. 2014; 5(8): 1320-1331.
- [42]. MARTÍNEZ D, RUIZ Y, PÉREZ M. Comparison of image quality in Phase Contrast Mammography vs. Digital mamagraphy. Revista Cubana de Ciencias Informáticas. 2017; 11(1): 91-105.
- [43]. Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA). El físico médico: criterios y recomendaciones para su formación académica, entrenamiento clínico y certificación en América Latina. IAEA Human Health Series No1. Viena: OIEA, 2010.
- [44]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Roles and responsibilities, and education and training requirements for clinically qualified medical physicists. IAEA Human Health Series No 25. Vienna: IAEA, 2013.
- [45]. International Standard Classification of Occupations. ILO, Geneva 2012.
- [46]. International Organization for Medical Physics (IOMP). Basic requirements for education and training of medical physicists. IOMP Policy Statement No. 2. IOMP Working Group on Policy Statement No. 2. IOMP, 2010.
- [47]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. Vienna: IAEA, 2014.

Recibido: 08 de julio de 2019

Aceptado: 31 de julio de 2019