

Las técnicas nucleares y la formación de profesionales en el InSTEC

Oscar Díaz Rizo, Katia D'Alessandro Rodríguez, Alina Gelen Rudnikas, Neivy López Pino, Jorge Borroto Portela, Judith Domínguez Catasús, Aida M. Abreu Díaz

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC)
Ave. Salvador Allende y Luaces. La Habana, Cuba
odrizo@instec.cu

Resumen

Se resumen los principales resultados obtenidos en los últimos 25 años por el Grupo de Aplicaciones Nucleares del InSTEC, en el desarrollo de técnicas nucleares y su aplicación en diferentes sectores de la sociedad. Se presenta el impacto que han tenido las investigaciones aplicadas en la formación de pregrado y posgrado en carreras nucleares y en el reconocimiento social de la comunidad universitaria.

Palabras clave: impacto social; usos; instalaciones educativas; herramientas educativas; energía nuclear; Cuba

Nuclear techniques and professional education at InSTEC

Abstract

The paper includes the most relevant results obtained by InSTEC's Group of Nuclear Applications in the last 25 years, in the development of nuclear techniques and its application in different social areas. The impact of applied research on graduated and post graduated education in nuclear careers as well as the social recognition of the university community are presented.

Key words: social impact; uses; educational facilities; educational tools; nuclear energy; Cuba

Introducción

El programa nuclear cubano (PNC) en sus inicios contenía cinco objetivos fundamentales: la nucleenergética, la creación del sistema de protección radiológica y seguridad nuclear, la amplia introducción de técnicas nucleares en diversos sectores; el impulso a las investigaciones básicas y aplicadas y la formación de los recursos humanos requeridos [1]. En 1992 se detiene la construcción de la Central Electronuclear de Juraguá, pero las actividades del PNC continuaron orientadas principalmente a las aplicaciones no energéticas de la energía nuclear [2].

El Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC) es la universidad cubana responsable de la formación de recursos humanos en especialidades nucleares. Hoy, cuando se convoca a actualizar los programas de formación e investigación de las universidades en función de las necesidades del desarrollo económico y social del país [3] se afirma que desde su fundación, en 1981, los objetivos de trabajo del InSTEC (entonces Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías

Nucleares) estuvieron fuertemente asociados a los principales objetivos del PNC, por lo que las líneas de investigación del claustro y el trabajo científico de los estudiantes de las especialidades nucleares (Física Nuclear, Radioquímica e Ingeniería en Instalaciones Nucleares y Energéticas) se han concentrado fundamentalmente en las investigaciones nucleares básicas y aplicadas, la dosimetría y protección radiológica, la ingeniería nuclear y en la aplicación de las técnicas nucleares y conexas en los más diversos sectores de la sociedad.

En 1990 comienzan a ejecutarse los primeros proyectos del Grupo de Aplicaciones Nucleares (GAN) del InSTEC, con profesores y técnicos de los Departamentos de Física Nuclear y Radioquímica de la universidad, y se obtienen los primeros resultados aplicados, de relevancia para varios sectores importantes de la economía. En el presente trabajo se resumen los principales resultados alcanzados por el GAN en estos últimos 25 años, así como el impacto que ha tenido la formación de pregrado y posgrado en la producción científica y visibilidad de la universidad.

Principales experiencias en la aplicación de técnicas nucleares en el InSTEC

Desde su creación, el Grupo de Aplicaciones Nucleares del InSTEC ha ejecutado unos 40 proyectos asociados a la física médica, dosimetría y protección radiológica; a la caracterización de instalaciones nucleares y radiactivas, la modelación y simulación de procesos nucleares y radiactivos; al desarrollo de métodos nucleares de análisis (análisis por activación neutrónica (AAN), análisis por activación gamma (AAG), espectrometría gamma de bajo fondo (EGBF), fluorescencia de rayos X (FRX), reflexión de neutrones (RN) y el uso de radiotrazadores) y su aplicación a la geofísica de yacimientos, agroindustria azucarera y al medioambiente; a la obtención de datos nucleares para las técnicas nucleares, entre otros. Estas investigaciones se han realizado, tanto en las instalaciones del Instituto como en laboratorios de universidades y centros de investigación de Cuba y de diferentes países que tienen colaboración con él. A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en los diferentes campos de aplicación:

Geofísica y geoquímica de yacimientos: mediante las técnicas de AAN en reactores y la FRX se realizó la caracterización multielemental de rocas reservorios de petróleo y gas de los yacimientos del norte de Habana-Matanzas, Martín Mesa y Pina [4-7], en tanto mediante la EGBF se estudió la radiactividad natural de las muestras, obteniéndose las concentraciones de radisótopos naturales de U, Th y K. Los resultados obtenidos mediante estas técnicas nucleares, permitieron calibrar los registros de los sondeos neutrónicos y gamma que se aplican en la geofísica de pozos. El estudio de rocas bituminosas por RN permitió calibrar las sondas neutrón-gamma con el fin de optimizar la determinación de la frontera petróleo-agua en los pozos petroleros de los yacimientos estudiados.

Se estudió la composición elemental de muestras de los más importantes yacimientos de zeolitas cubanas utilizando las técnicas de AAN y FRX [8], determinándose las concentraciones de 29 elementos, lo que permitió evaluar la factibilidad desde el punto de vista toxicológico de este importante mineral, como complemento en la alimentación animal, componente de medicamentos y desarrollo de zeopónicos.

Agroindustria azucarera: el estudio de la relación suelo-planta en más de 100 plantaciones cañeras del país mediante AAN permitió determinar que la distribución de elementos minoritarios y trazas en la hoja de la caña de azúcar es uniforme e independiente de la variedad de caña de azúcar y del tipo de suelo, así como la conformación de cuatro grupos principales de elementos a partir de su absorción por la planta [9]. Este resultado permitió la evaluación adecuada de los fertilizantes utilizados en la agricultura cañera.

Mediante el AAN se comprobó la inocuidad para el consumo y exportación desde el punto de vista de su composición, de los tres tipos de azúcares que se producen en el país: refinado, crudo y blanco-directo [10]. Por otra parte, el estudio de las mieles finales provenientes

de 74 centrales, permitió comprobar que la composición inorgánica de estas no limita su utilización, tanto en los procesos fermentativos como en la alimentación del ganado [11-12].

Física médica y dosimetría: se diseñó un método general físico-matemático de optimización de la actividad radionuclídica a administrar en Medicina Nuclear a partir de técnicas de conglomerado y análisis discriminante, comprobándose su aplicabilidad para estudios planares y tomográficos (SPECT). Este método fue validado según los procedimientos establecidos internacionalmente y aplicados en 210 estudios reales de pacientes adultos en medicina nuclear (gammagrafía ósea general con MDP-^{99m}Tc, gammagrafía renal morfológica con DMSA-^{99m}Tc, Renografía nuclear con MAG 3-^{99m}Tc, ventriculografía nuclear en reposo, utilizando pirofosfato y ^{99m}Tc y SPECT de flujo sanguíneo cerebral con HMPAO-Tc^{99m} [13-17]. Se optimizaron las dosis en estos estudios utilizando radiofármacos de producción nacional. Se estimó la reducción del riesgo radiológico de los pacientes adultos en los estudios optimizados mediante el cálculo de las dosis absorbidas en órganos y tejidos, así como dosis total efectiva en todo el organismo con el software MIRDOSE 3.0 y se mejora la protección radiológica del paciente en la medicina nuclear cubana. Se propusieron los valores de actividad radionuclídica optimizados para elaborar una Norma Cubana de Medicina Nuclear.

Se desarrolló y validó un método no estándar de adquisición de imágenes que logra una mejoría de la resolución espacial tomográfica de un 18 % en estudios de cuantificación relativa del flujo sanguíneo cerebral mediante la tomografía por emisión de fotones [18,19], la cual es significativa para aquellos sistemas de tomografía por emisión de fotones que no pueden ser modernizados con los más recientes avances tecnológicos. Se desarrolló y validó un método de cuantificación basado en un hecho fisiológico encontrado por el grupo no reportado anteriormente, que permitió introducir un nuevo valor de referencia, el seudocerebelo [20], que permite generalizar al cerebelo como región de referencia en estudios de perfusión cerebral, aplicable incluso a pacientes con hipoperfusión cerebelosa, excepto cuando también existe hipoperfusión en la corteza visual, lo cual es mucho menos frecuente en la práctica neurológica.

Se desarrollaron modelos y soluciones para evaluar las dosis por fuentes ambientales a la población cubana. Se evaluaron las dosis recibidas por los miembros del público por irradiación externa a la radiación cósmica y a la radiación terrestre, así como por irradiación interna debida al ⁴⁰K del cuerpo y por incorporación de los radionúclidos presentes en el medio ambiente [21-22]. Como resultados se introdujo un nuevo modelo para las dosis debidas al ⁴⁰K basado en una red neuronal, más realista en tanto considera las especificidades morfológicas de cada persona, y se obtienen valores de las dosis que recibe la población cubana, identificándose las fuentes que contribuyen significativamente a estas dosis y estimándose el valor de 1.1 ± 0.3 mSv/año, el cual está en el intervalo reconocido por UNSCEAR [23] como representativo para la población mundial.

Medioambiente: las técnicas nucleares, dadas sus características, son de gran ayuda en estudios de impacto ambiental. Por ejemplo, mediante el AAN se pudo caracterizar los residuales de la Antillana de Acero [24], el impacto que induce la industria niquelífera a la bahía de Nipe [25], así como el daño provocado por los pedraplenes en la cayería norte del centro del país [26].

Durante varios años se llevó a cabo el estudio multielemental más amplio realizado a los sedimentos de la Bahía de La Habana, empleando para ello la integración de las técnicas nucleares de EGBF, AAN, AAG y FRX. La EG permitió determinar los radionúclidos presentes en los sedimentos, así como las tasas de sedimentación y edad de los sedimentos en la bahía [27]. Mediante la combinación del AAN, AAG y FRX se determinaron las concentraciones de un número importante de elementos (naturales, antropogénicos, tierras raras, etc.), permitiendo comparar la naturaleza geológica de los sedimentos de la bahía con otras zonas del país, la distribución de elementos asociados a su contaminación y las posibles fuentes de contaminación [28-30]. La integración del AAN y la EG en el estudio de perfiles de sedimentos permitió conocer la historia de la contaminación por metales pesados de la rada habanera en los últimos 100 años. La normalización de los resultados demuestra cómo la descarga de efluentes industriales y urbanos a la bahía ha provocado un aumento de la contaminación por la incidencia de metales pesados y elementos trazas. Por otra parte, se comprobó la presencia de una contaminación moderada por cromo y plomo en los sedimentos de la Bahía de Nuevitás [31]. En la actualidad se estudia la Bahía de Guantánamo.

Se estudió el estado de la contaminación por metales pesados en los sedimentos costeros del Golfo de Guacanayabo y la bioacumulación de varios de ellos en especies de interés pesquero: ostiones (*Crassostrea rhizophorae*) y cobos (*Strombus gigas*) [32-33]. Se comprobó que el Golfo de Guacanayabo es el entorno marino de menor contaminación radiactiva de los estudiados en el país [34]. Se evaluaron por primera vez las características radiológicas y de concentración de metales pesados de los sedimentos de uso terapéutico del estuario del Río San Diego, Pinar del Río; se evaluó la calidad de estos para su empleo con fines terapéuticos [35-36]; y se determinó la influencia que tuvo el impacto de eventos climáticos severos en la calidad de ellos [37]. Similar estudio se realizó para los balnearios de Elguea, Santa Lucía y Cajío. Recientemente se ha estudiado la línea de base del contenido de metales pesados en las arenas de duna y playa de los balnearios ubicados en el litoral de La Habana y Matanzas, así como del balneario de Varadero [38-39], principal polo turístico del país, comprobándose la elevada calidad de las arenas de las playas de La Habana y Varadero, así como la contaminación por cromo que presenta el balneario El Judío de la ciudad de Matanzas.

El estudio por FRX de muestras de suelos urbanos permitió reportar por primera vez las concentraciones de metales pesados en suelos urbanos de La Habana, Moa, Las Tunas y Cienfuegos [40-43], y el estudio de su

comportamiento en suelos de diferente uso (industriales, parques, escuelas, áreas no urbanizadas, huertas populares, etc.), así como los niveles de contaminación por metales pesados en suelos de diferentes locaciones específicas [44-45], evaluando la calidad de estos para su empleo en la agricultura urbana y su posible impacto en la salud de la población. En la actualidad se estudian los suelos y polvos del municipio de San Miguel del Padrón (La Habana) y de la ciudad de Camagüey. Se reportaron los contenidos de zinc y su bioacumulación en 19 cultivos procedentes de 18 áreas de agricultura urbana y suburbana de las provincias de La Habana, Matanzas y Cienfuegos [46], determinándose que el arroz es la principal fuente de este esencial elemento en la dieta de la población.

Mediante el empleo de trazadores radiactivos y convencionales se han desarrollado metodologías que permitieron perfeccionar instalaciones industriales [47-48], digestores de plantas de tratamiento de residuales [49], así como evaluar la carga contaminante presente en los ríos Almendares y Luyanó [50-53], lo que ha permitido el desarrollo de métodos y tecnologías para la remediación de esos ecosistemas. Estos métodos se han aplicado también en la cuenca del río Guaire (Caracas, Venezuela) y en el transporte de sedimentos en el río Pampulha (Brasil).

Desarrollo de las técnicas nucleares: se le realizaron importantes modificaciones y complementaciones al método k_0 de AAN [54-55], comprobándose la dependencia que tiene esta técnica analítica nuclear de características importantes del flujo neutrónico del reactor [56-57]. Se desarrollaron monitores neutrónicos [58] y se realizó la caracterización de reactores nucleares de México y Brasil para el empleo de esta técnica [59-60]. Por otra parte, se han desarrollado instalaciones que han permitido determinar secciones eficaces de fotoefecto y de la energía del borde de absorción K de diferentes átomos, utilizando radiación de frenado, con vistas al desarrollo de la FRX con blanco secundario [61]. Además, se han caracterizado los espectrómetros de EGBF y de FRX del InSTEC para el estudio de muestras ambientales, utilizando procedimientos experimentales y simulación por Monte Carlo [62-64].

Se desarrolló un novedoso proyecto de un generador de $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ para su empleo como radiotrazador ambiental y se han desarrollado varias metodologías de evaluaciones ambientales empleando el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ como radisótopo.

Impacto de las investigaciones aplicadas en la formación de pregrado y posgrado, y en el reconocimiento de la comunidad universitaria

Debido a que el GAN está integrado por profesores y técnicos de los Departamentos de Física Nuclear y de Radioquímica del InSTEC, los programas de formación de estas especialidades son los que reciben los mejores beneficios de las investigaciones aplicadas. En la tabla 1 se presentan las asignaturas de los programas en Física

Tabla 1. Asignaturas vinculadas a las aplicaciones nucleares en el InSTEC

Programa	Asignatura	Currículo
Física Nuclear*	Técnicas nucleares	Obligatorio
	Dosimetría y protección radiológica	Obligatorio
	Física de los neutrones	Propio
	Complementos de Física Nuclear Experimental	Propio
	Fundamentos de Física Médica	Propio
Radioquímica**	Química nuclear	Obligatoria
	Radioquímica	Obligatoria
	Radiotrazadores y métodos nucleónicos	Propio
	Técnicas radioanalíticas	Optativa-Electiva
	Radiofarmacia	Obligatoria
Maestría en Física Nuclear*	Espectrometría alfa, beta, gamma	Obligatoria
	Métodos analíticos nucleares	Opcional
	Análisis por activación avanzado	Opcional
	Aplicación de las técnicas analíticas nucleares a la Geoquímica y el control del medio ambiente	Opcional
	Espectrometría gamma de alta resolución	Opcional
	Métodos de análisis estructural	Opcional
	Aplicación de las radiaciones ionizantes a la medicina	Opcional
	Tópicos selectos de las técnicas analíticas	Opcional
Maestría en Radioquímica*	Métodos nucleares de análisis	Opcional
	Análisis nuclear: Radiotrazadores	Opcional
	Espectrometría alfa	Opcional

* Programas acreditados de Excelencia por la Junta de Acreditación Nacional del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba.

**Programa acreditado de Certificado por la Junta de Acreditación Nacional del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba.

Nuclear y Radioquímica que tienen vinculación con las aplicaciones nucleares. Al ser los profesores principales de estas asignaturas miembros del GAN, toda su experiencia profesional se vuelca en el desarrollo, actualización y perfeccionamiento de las materias a impartir. Por otra parte, en las clases de laboratorio, por ejemplo, de técnicas nucleares, en las que realizan prácticas de AAN, FRX, EGBF y RN, las muestras de estudio que se utilizan se individualizan por estudiante y puede ser un suelo, un sedimento, un residual industrial, una roca, etc.

Es conocido que la vinculación de los estudiantes a los proyectos de investigación que desarrolla el claustro [65], fortalece considerablemente la disciplina de trabajo científico estudiantil contemplada en los planes de estudios de ambas especialidades. Además de consolidar los conocimientos obtenidos en clases, adquieren otros vinculados al objeto de estudio de su investigación, que pueden ser incluso ajenos al currículo de su especialidad (por ejemplo, un estudio de impacto ambiental), lo que complementa su formación. Toman conciencia de la importancia y relevancia de su especialidad al constatar la aceptación e introducción de los resultados de su trabajo de investigación por parte de los usuarios de los proyectos, y al reconocimiento que reciben de sus profesores y compañeros. En los programas de posgrado ocurre de manera similar, aunque con mucho más protagonismo por parte del estudiante, pues partici-

pa prácticamente a la par de los integrantes del GAN o como miembro pleno de este. En la tabla 2 se presenta la cantidad de profesionales cubanos formados en todas las modalidades por los integrantes del GAN del InSTEC. Por otra parte, se han formado estudiantes de maestrías provenientes de Guatemala, Argentina, Austria y España; se han entrenado a especialistas de México, Brasil, Perú y Francia y se han impartido cursos de posgrado en España, Perú, Venezuela, Brasil, Chile y Paraguay.

Tabla 2. Profesionales en Física Nuclear y Radioquímica formados por los integrantes del GAN

Programas	Egresados
Licenciatura	65
Maestría*	17
Doctorado*	19

*Estos Programas comenzaron en el curso 1995-1996.

Importante ha sido la contribución del GAN a la visibilidad y reconocimiento nacional e internacional de la universidad. En estos 25 años, los profesores del GAN han participado en más de 120 eventos científicos nacionales e internacionales y han publicado más de 170 artículos científicos en reconocidas revistas del país, así como en revistas indexadas en el Site Citation Index (SCI), contribuyendo a que la universidad tenga un índi-

ce de publicaciones por profesor entre los más elevados del país, y a que varios de los miembros del GAN sean árbitros de más de una docena de importantes revistas del SCI, así como miembros de los consejos editoriales y árbitros de varias revistas científicas nacionales.

Los proyectos ejecutados, relativos al desarrollo y aplicación de las técnicas nucleares y conexas en diferentes sectores de la economía, han contribuido a mantener el elevado nivel de aceptación que tiene el uso de las técnicas nucleares en la sociedad, y se han reconocido a nivel colectivo como resultados científicos destacados a diferentes instancias (tabla 3) y a nivel individual con importantes condecoraciones (Orden Carlos J. Finlay, Medalla José Tey, Distinción por la Educación Cubana, Distinción del Ministro del Educación Superior, entre otras).

Tabla 3. Reconocimientos científicos obtenidos por el GAN

Resultados a nivel de:	Cantidad
Academia de Ciencias de Cuba	5
Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada	22
Universidad	33

No se pueden realizar investigaciones aplicadas sin una amplia colaboración nacional. La gran mayoría de los resultados, arriba resumidos, se han obtenido con la participación activa de especialistas e investigadores de los organismos del Estado vinculados a los diferentes campos de acción mencionados (ver figura). Más de 30 instituciones nacionales, entre centros de investigación, universidades, empresas, hospitales, etc., han colaborado en diferentes momentos de las investigaciones y han jugado un rol importante en la introducción de los resultados en la práctica social. Varias de esas instituciones son centros receptores de los egresados de las especialidades de Física Nuclear y Radioquímica y Unidades Docentes del InSTEC. Las relaciones de trabajo establecidas han contribuido también a que varios de los integrantes del GAN sean en la actualidad miembros externos de varios consejos científicos, integren grupos de expertos de varios ministerios, y fueran seleccionados como expertos de la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada. Uno de los profesores del

GAN fue elegido Miembro Titular de la Academia de Ciencias de Cuba en el 2012.

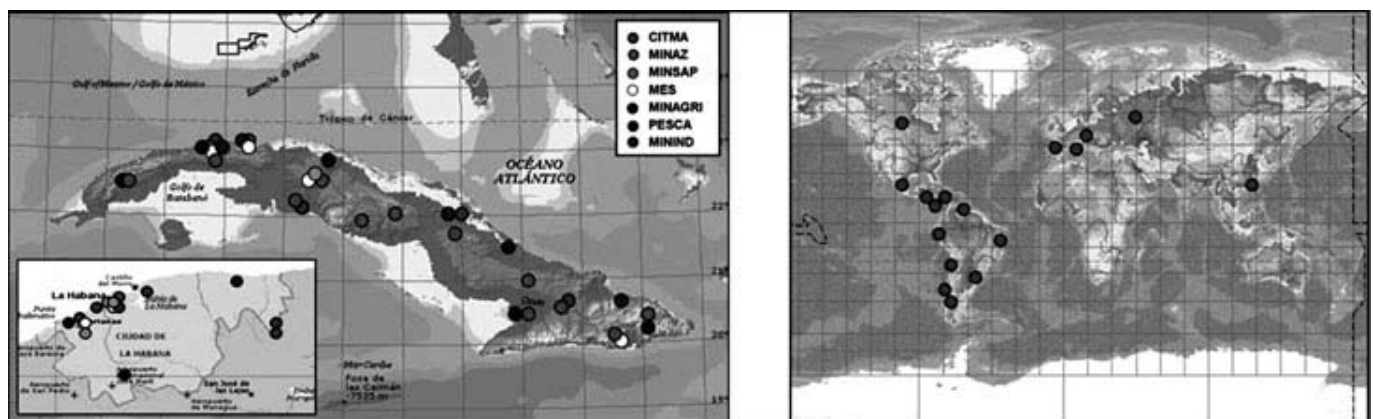
La colaboración internacional del GAN ha tenido una importancia trascendental en el desarrollo y resultados del grupo. Ello ha permitido el acceso a instalaciones nucleares y a otras facilidades experimentales no disponibles en el país. Muy importante ha sido la contribución del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en el mejoramiento de las facilidades experimentales de los laboratorios docentes y de investigación, en la preparación de los integrantes del GAN y en la contratación de proyectos de investigación que han permitido realizar aportes a diferentes técnicas nucleares. En la actualidad, varios de los integrantes del GAN son expertos del OIEA, colaboradores de importantes centros científicos y profesores invitados de varias universidades extranjeras.

Conclusiones

La experiencia acumulada por el Grupo de Aplicaciones Nucleares del InSTEC en la ejecución de proyectos aplicados a diferentes sectores de la sociedad cubana ha demostrado cuán pertinente, desde el punto de vista docente, de producción científica y de visibilidad de la comunidad universitaria, resulta vincular los procesos de formación e investigación de la universidad en función de las necesidades del desarrollo económico y social del país. Por otra parte, esta experiencia, unida a la alcanzada por los colectivos de profesores y estudiantes que se dedican a las investigaciones básicas en Física Nuclear y Radioquímica, contribuyeron a alcanzar y contribuyen a mantener la condición de Excelencia en la acreditación de los programas de formación de profesionales.

Referencias

- [1] CASTRO DÍAZ-BALART F. La física nuclear en Cuba: apuntes para una historia. Nucleus. 2014; (56): 5-16.
- [2] BETANCOURT HERNÁNDEZ LA. A 20 años de la Agencia de Energía Nuclear. Nucleus. 2014; (56): 1-4.
- [3] Cuba. Partido Comunista de Cuba. Información sobre el resultado del Debate de los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución. VI Congreso del PCC. Mayo, 2011.
- [4] HERRERA E, NAZAROV VM, DÍAZ RIZO O, et. al. Study of the behaviour of rare earth elements in rocks from a petroleum ore by NAA. JINR Rapid Comm. E14-91-399. Dubna, 1991.



Colaboración nacional e internacional del GAN del InSTEC.

- [5] HERRERA E, NAZAROV VM, DÍAZ RIZO O, et. al. NAA applied to the study of the composition of Cuban geological samples from petroleum ores. *JINR Rapid Comm.* P14-91-397. Dubna, 1991.
- [6] MONTERO CABRERA ME, HERRERA PERAZA E & RODRÍGUEZ MARTÍNEZ N, et. al. Multi-elemental characterization of vulcano and vulcano-sedimentary rocks from Pina petroleum ore, Central Cuba. *Nuclear Geophysics.* 1994; 8(4): 361.
- [7] MONTERO ME, HERRERA E, CABRERA O, et. al. Elementos trazas de las rocas reservorios de petróleo en los yacimientos de Habana Matanzas. *Nucleus.* 1997; (23): 8-13.
- [8] DÍAZ RIZO O & HERRERA PERAZA EF. Multi-elemental characterization of Cuban natural zeolites. *J Radioanal Nucl Chem.* 1997; 221(2): 255-258.
- [9] DÍAZ RIZO O, GRIFFITH J. Soil-plant relation in sugar cane by INAA. *J Radioanal Nucl Chem.* 1996; 213(5): 377-384.
- [10] DÍAZ RIZO O, GRIFFITH J, GÓMEZ SAUNDERDS M & ZHUK LI. NAA of different types of Cuban sugars. *Nucleus.* 1992; (13): 15-17.
- [11] DÍAZ RIZO O, LÓPEZ REYES MC, MOREJÓN D, et. al. AAN de mieles finales de la industria azucarera. *Nucleus.* 1996; (20): 3-5.
- [12] GRIFFITH J, ROSENBERG RJ, DÍAZ RIZO O, et. al. Neutron activation analysis of final molasses from cuban sugar industry. *J Radioanal Nucl Chem.* 1996; 213(1): 71-78.
- [13] PÉREZ DÍAZ M, DÍAZ RIZO O, DOPICO R, et. al. Administered activity optimization in patients studied by equilibrium gated radionuclide ventriculography using pyrophosphate and Tc-99m. *Nucl Med Común.* 2002; 23(4): 347-353.
- [14] PÉREZ DÍAZ M, APARICIO E, DÍAZ RIZO O, et. al. Administered activity optimization in 99mTc-MAG3 renography for adults. *J Nucl. Med Technol.* 2003; 31(4): 216-221.
- [15] PÉREZ DÍAZ M & DÍAZ RIZO O. Métodos de optimización de la actividad a administrar al paciente en estudios de medicina nuclear. *Rev Esp Fís Médica.* 2006; 6(1): 32-36.
- [16] PÉREZ DÍAZ M, DÍAZ RIZO O, et. al. Activity optimization method in SPECT: a comparison with ROC curves. *JZU Science B.* 2006; 7(12): 947-956.
- [17] PÉREZ DÍAZ M, DÍAZ RIZO O, APARICIO E, et. al. Activity Optimization in HMPAO - 99mTc Brain SPECT. *Health Phys.* 2007; 93(1): S23.
- [18] SÁNCHEZ C, DÍAZ O, RODRÍGUEZ M, et. al. Mejoramiento de la cuantificación relativa del flujo sanguíneo cerebral con la tecnología médico-nuclear disponible en el país. *Nucleus.* 2002, (31): 8-17.
- [19] SÁNCHEZ C, PUCHAL R, DÍAZ RIZO O, et al. Problemas que afectan la cuantificación en SPECT. *Rev Esp Fís Médica.* 2003; 4(1): 31-41.
- [20] SÁNCHEZ CATASÚS C, DÍAZ RIZO O, et. al. Brain perfusion ratios by 99mTc-HMPAO spect utilizing a mean value of the visual cortex to the cerebellum ratio derived from normal subjects. *Alasbinm Journal.* 2002; 5(17 special issue).
- [21] ZERQUERA JT, PRENDES M, FERNÁNDEZ IM, et. al. Studies on internal exposure doses received by the cuban population due to the Intake of Radionuclides from the Environmental Sources. *Radiat Prot Dosim.* 2006; 121(2): 168-174.
- [22] ZERQUERA JT, PRENDES M & DÍAZ RIZO O. Distribution of doses received by Cuban population due to environmental sources of radioactivity. *Radiat Prot Dosim.* 2007; 123(1): 118-121.
- [23] United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations, 2000.
- [24] DÍAZ RIZO O, HERRERA PERAZA E & BORROTO PORTELA J. Análisis expreso por activación neutrónica de residuales siderúrgicos. *Rev. Cub. Fis.* 2001; 18(1): 67-70.
- [25] GÓMEZ SAUNDERS M, MONTERO CABRERA ME, HERRERA PERAZA EF, et. al. Metal concentrations in scleractinian corals determined by instrumental neutron activation analysis and atomic absorption spectrometry. *J Radioanal Nucl Chem.* 1997; 219(1): 135-137.
- [26] HERRERA PERAZA E, HERRERA PERAZA R, DÍAZ RIZO O, et. al. Análisis de la composición elemental de diferentes zonas costeras de Cayo Coco atendiendo a su vegetación. *Rev. Cub. Fis.* 1998; 15(2): 137-139.
- [27] GELEN RUDNIKAS A, DÍAZ RIZO O, SIMÓN MJ, et. al. 210Pb of sediments from Havana Bay. *J Radioanal Nucl Chem.* 2003; 256(3): 561-564.
- [28] GELEN RUDNIKAS A, LÓPEZ PINO N, DÍAZ RIZO O, et. al. Gamma activation analysis of sediments at Havana bay (Cuba). *J Radioanal Nucl Chem.* 2005; 266(3): 485-490.
- [29] DÍAZ RIZO O, GELEN RUDNIKAS A, GRACIANO FIGUEREIDO AM, et. al. Análisis ambiental por activación neutrónica de sedimentos de la Bahía de La Habana. *Nucleus.* 2008, (44): 15-23.
- [30] DÍAZ RIZO O, GELEN RUDNIKAS A, FIGUEREIDO AMG, et. al. REE enrichment in Havana bay surface sediments using INAA. *J Radioanal Nucl Chem.* 2012; 292: 81-84.
- [31] DÍAZ RIZO O, GELEN RUDNIKAS A, LAVIN PÉREZ RD, et. al. XRF analysis of sediments from Nuevitas Bay (Cuba): Assessment of heavy metal contamination and ecological risks. *Nucleus.* 2014; (55): 11-14.
- [32] DÍAZ RIZO O, OLIVARES REUMONT S, VIGURI FUENTE J, et. al. Copper, zinc and lead enrichments in sediments from Guacanayabo Gulf, Cuba, and its bioaccumulation in oysters, *Crassostrea rhizophorae.* *Bull Environ Contam Toxicol.* 2010; 84(1): 136-140.
- [33] DÍAZ RIZO O, OLIVARES REUMONT S, VIGURI FUENTE J, et. al. Copper, zinc and lead bioaccumulation in marine snail, *strombus gigas,* from Guacanayabo Gulf, Cuba. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2010; 85(3): 330-333.
- [34] REYES H, LÓPEZ PINO N, DÍAZ RIZO O, et. al. Environmental radioactivity study in surface sediments of Guacanayabo Gulf (Cuba). *AIP Conf. Proc.* 2009; 1139(1): 156-157.
- [35] DÍAZ RIZO O, GELEN RUDNIKAS A, ARADO LÓPEZ JO, et. al. Radioactivity levels and radiation hazard of healing mud from San Diego river, Cuba. *J Radioanal Nucl Chem.* 2013; 295(2): 1293-1297.
- [36] DÍAZ RIZO O, GELEN RUDNIKAS A, D'ALESSANDRO RODRÍGUEZ K, et. al. Assessment of historical heavy metal content in healing muds from San Diego river (Cuba) using nuclear analytical techniques. *Nucleus.* 2013; (53): 19-23.
- [37] DÍAZ RIZO O, GELEN RUDNIKAS A, GONZÁLEZ HERNÁNDEZ P, et. al. Evaluation of the hurricanes Gustav and Ike impact on mud from San Diego river using nuclear and geochemical techniques. *Nucleus.* 2011; (50): 7-11.
- [38] DÍAZ RIZO O, BUZÓN GONZÁLEZ F & ARADO LÓPEZ JO. Assessment of Ni, Cu, Zn and Pb levels in beach and dune sands from Havana resorts, Cuba. *Mar Poll Bull.* 2015; 100(1): 571-576.
- [39] DÍAZ RIZO O, BUZÓN GONZÁLEZ F, ARADO LÓPEZ JO, et. al. Assessment of Ni, Cu, Zn and Pb levels in beach and dune sands from Havana resorts, Cuba. *Mar Poll Bull.* 2015; 100(1): 571-576.
- [40] DÍAZ RIZO O, ECHEVARRÍA CASTILLO F, ARADO LÓPEZ JO, et. al. Assessment of heavy metal pollution in urban soils of Havana city, Cuba. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2011; 87(4): 414-419.
- [41] DÍAZ RIZO O, COTO HERNÁNDEZ I, ARADO LÓPEZ JO, et. al. Chromium, cobalt and nickel content in urban soils from Moa, Northeastern Cuba. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2011; 86(2): 189-193.
- [42] DÍAZ RIZO O, FONTICIELLA MORELL D, ARADO LÓPEZ JO, et. al. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban top soils from Las Tunas city, Cuba. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2013; 91(1): 29-35.
- [43] DÍAZ RIZO O, QUINTANA MIRANDA E, ALONSO HERNÁNDEZ CM, et. al. Niveles de radionuclidos naturales y metales pesados en suelos urbanos de la ciudad de Cienfuegos, Cuba. *Nucleus.* 2013; (54): 17-22.
- [44] DÍAZ RIZO O, HERNÁNDEZ MERLO M, ECHEVARRÍA CASTILLO F, et. al. Assessment of metal pollution in soils from a former Havana (Cuba) solid waste open dump. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2012; 88(2): 182-186.
- [45] DÍAZ RIZO O, LIMA CAZORLA L, GARCÍA CÉSPEDES D, et. al. Assessment of heavy metal content in urban agricultural soils from the surrounding of steel-smelter plant using X-ray fluorescence. *Nucleus.* 2015; (54): 38-43.
- [46] DÍAZ RIZO O, OLIVARES REUMONT S, DENIS ALPÍZAR O, et. al. Bioaccumulation of zinc in crops and its contribution to Zn intake by Cuban population. *Nucleus.* 2013; (54): 8-11.
- [47] DOMÍNGUEZ J, ABREU AM, BORROTO J, et. al. Validación del modelo de tanques en serie con recirculación para la caracterización del mezclado en reactores discontinuos con agitador tipo ancla. *Nucleus.* 1998; (25): 24-29.

- [48] DOMÍNGUEZ J, ABREU A, BORROTO J, et. al. Mixing characterization in batch reactors using radiotracer techniques. *J Radioanal Nucl Chem.* 1999; 241(2): 337-340.
- [49] BORROTO J, et. al. Technetium-99m as tracer for the liquid RTD measurement in opaque anaerobic digester - application in a sugar wastewater treatment plant. *Chemical Engineering and Processing.* 2003; 42(11): 857-865.
- [50] DOMÍNGUEZ J, BORROTO J, HERNÁNDEZ A, et. al. Empleo de trazadores en la obtención de modelos de calidad de agua del río Almendares, *Nucleus.* 2003; (34): 19-26.
- [51] DOMÍNGUEZ J, BORROTO J, et. al. Use of 99mTcO₄⁻ and the rhodamine-wt as tracers and the mathematical convolution procedure to establish the alarm model in the Almendares river. *J Radioanal Nucl Chem.* 2004; 260(2): 417-420.
- [52] DOMÍNGUEZ J, BORROTO J, et. al. Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento en el río Almendares. *Revista CNIC-Ciencias Químicas.* 2005; 36(2):98-105.
- [53] VALCÁRCEL L, BORROTO J, ALBERRO N, et. al. Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. *Nucleus.* 2010; (47):16-23.
- [54] HERRERA PERAZA E, DÍAZ RIZO O, MANSO GUEVARA MV, et. al. Development and implementation of the k₀-standardization method. Part I. *J Radioanal Nucl Chem.* 1999; 240(2): 437-443.
- [55] DÍAZ RIZO O, HERRERA PERAZA E, MANSO GUEVARA MV, et. al. Development and implementation of the k₀-standardization method. Part II. *J Radioanal Nucl Chem.* 1999; 240(2): 445-450.
- [56] DÍAZ RIZO O, MANSO GUEVARA MV, HERRERA PERAZA EF, et. al. A reactor power dependence for the k₀ neutron flux parameters. *J Radioanal Nucl Chem.* 1997; 221(2): 241-244.
- [57] DÍAZ RIZO O, MANSO GUEVARA MV, HERRERA PERAZA E, et. al. The slowing-down thickness dependence of some neutron flux parameter for k₀ standardization. *J Radioanal Nucl Chem.* 1999; 240(1): 391-393.
- [58] DÍAZ RIZO O, ÁLVAREZ PELLÓN I, HERRERA PERAZA EF, et. al. HAV-1: a multipurpose monitor for reactor epithermal neutron flux characterization. *J Radioanal Nucl Chem.* 1997; 220(1): 99-102.
- [59] DÍAZ RIZO O, HERRERA PERAZA EF, LÓPEZ REYES MC, et. al. Neutron flux characterization of the TRIGA MARK III reactor, Salazar, Mexico, for use in INAA. *J Radioanal Nucl Chem.* 1997; 220(1): 95-97.
- [60] DÍAZ RIZO O, GRACIANO AM, NOGUEIRA CA, et. al. Epithermal neutron flux characterization of the IEA-R1 research reactor, Sao Paulo, Brazil, for use in INAA. *J J Radioanal Nucl Chem.* 2005; 266(1): 153-157.
- [61] GARCÍA ALVAREZ JA, LÓPEZ PINO N, DÍAZ RIZO O, et. al. Measurement of photoeffect cross section and the K- absorption edge energy of Dy, Ta, Pt and Au atoms using Bremsstrahlung. *Nucleus.* 2013; (54): 12-16.
- [62] DÍAZ RIZO O, LÓPEZ PINO N, D'ALESSANDRO RODRÍGUEZ K, et. al. Characterization of the low-background gamma spectrometer at INSTEC for environmental radioactivity studies. *Nucleus.* 2009; (46): 21-26.
- [63] LÓPEZ PINO N, PADILLA CABAL F, MARTINEZ PALENZUELA Y, et. al. Monte Carlo based geometrical model for efficiency calculation of a n-type HPGe detector. *Appl Radiat Isotopes.* 2010; 68(12): 2403-2408.
- [64] DÍAZ ARADO O, DÍAZ RIZO O, LÓPEZ PINO N, et. al. Evaluation of the InSTEC's EDXRF assembly for marine sediment pollution studies. *AIP Conf. Proc.* 2009; 1139(1): 158-159.
- [65] DÍAZ RIZO O, D'ALESSANDRO RODRÍGUEZ K & LÓPEZ PINO N. Vinculación del trabajo científico estudiantil a la investigación del claustro: experiencias de la disciplina de física nuclear experimental en el período 2006-2010. *Revista Congreso Universidad.* 2012; 1(3): 1-12.

Recibido: 23 de octubre de 2015

Aceptado: 27 de noviembre de 2015