

nucleus

ISSN 2075-5635
on line

No. 73, 2023

Publicación semestral

Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada de Cuba
Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

En este número:

**35 Aniversario
del CEADEN**



www.cubaenergia.cu/nucleus/nucleus.htm

Panorama Nuclear

Principales impactos de la instrumentación del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) en el Sistema Nacional de Salud.	1
Omar Morales Valdés, Lorenzo Hernández Tabares, Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Pedro Larrea Cox, Sandra Fernández Yanes	
Aportes de los servicios científico-técnicos del CEADEN a la economía nacional.	7
Victoria Herrera Palma, Débora Hernández Torres, Félix Sendoya Puente	

Ciencias Nucleares

Avances en la aplicación de la radiomutagenesis <i>in vitro</i> para el mejoramiento genético de portainjertos cítricos.	12
Alba Álvarez González, Livia Santiago Hernández, Sandra Carro Palacios, Victoria Zamora Rodríguez, Jorge R. Cueto Rodríguez, Alina Puentes Sánchez, Armando Chávez Ardanza, María C. González Cepero	
Potencialidad del CEADEN para desarrollar sistemas Inalámbricos de monitoreo ambiental y su empleo para la conservación del patrimonio cultural.	18
Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen	
Progresos en la síntesis de nanoestructuras de carbono por descarga de arco sumergida.	25
Luis Felipe Desdín García, Frank Justo Chao Mujica, Lorenzo Hernández Tabares, Liudy García Hernández, Juan Gualberto Darías González, Luis Miguel Ledo Pereda, Ángel Luis Corcho Valdés, Manuel Antuch Cubillas	
Radiomodificación de materiales poliméricos en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN).	29
Manuel Rapado Paneque	
Laboratorio de fechado del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN).	37
Luis Baly Gil, Raúl Arteché Díaz, Piet Van Espen, Héctor Lubian de Iraola, Inés Quesada Wiemann, Teresita Cepero Chao, Dania Rodríguez Nápoles, Guido Martín Hernández, et.al.	
La tecnología de irradiación en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Resultados y perspectivas.	42
Enrique Fco. Prieto Miranda , Armando Chávez Ardanza	
El estudio del daño radiacional en los materiales en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)	46
Carlos M. Cruz Inclán, Antonio Leyva Fabelo	
Revistas certificadas como Publicaciones Seriadas Científico-Tecnológicas	52
Instrucciones a los autores	55

summary

Nuclear Outlook

- Main impacts of the implementation of the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) in the National Health System. 1
Omar Morales Valdés, Lorenzo Hernández Tabares, Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Pedro Larrea Cox, Sandra Fernández Yanés
- Contribution to the national economy of scientific and technical services, provided by CEADEN. 7
Victoria Herrera Palma, Débora Hernández Torres, Félix Sendoya Puente

Nuclear Sciences

- Advances in the application of *in vitro* radiomutagenesis for the genetic improvement of *Citrus* rootstocks. 12
Alba Álvarez González, Livia Santiago Hernández, Sandra Carro Palacios, Victoria Zamora Rodríguez, Jorge R. Cueto Rodríguez, Alina Puentes Sánchez, Armando Chávez Ardanza, María C. González Cepero
- Potential of CEADEN to develop wireless environmental monitoring systems and their use for cultural heritage conservation. 18
Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen
- Progress in the synthesis of carbon nanostructures by submerged arc discharge. 25
Luis Felipe Desdín García, Frank Justo Chao Mujica, Lorenzo Hernández Tabares, Liudy García Hernández, Juan Gualberto Darias González, Luis Miguel Ledo Pereda, Ángel Luis Corcho Valdés, Manuel Antuch Cubillas
- Radiomodification of polymeric materials at the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN). 29
Manuel Rapado Paneque
- Dating laboratory of the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN). 37
Luis Baly Gil, Raúl Arteché Díaz, Piet Van Espen, Héctor Lubian de Iraola, Inés Quesada Wiemann, Teresita Cepero Chao, Dania Rodríguez Nápoles, Guido Martín Hernández, et.al.
- The radiation technology in the Center of Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN). Results and perspectives. 42
Enrique Fco. Prieto Miranda, Armando Chávez Ardanza
- The study of radiation damage to materials at the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN). 46
Carlos M. Cruz Inclán, Antonio Leyva Fabelo
- Magazines certified as serial scientific and technological publications 52
- Information for authors 55

Consejo editorial

Dra. en Ciencias Físicas Angelina Díaz García, Dr. en Ciencias Químicas José Morín Zorrilla, Dr. en Ciencias Médicas Juan Cárdenas Herrera, Dr. en Ciencias Médicas Juan Perfecto Oliva, Dr. en Ciencias Químicas Juan Jaen Osorio, Dr. en Ciencias Físicas Juan Luis François Lacouture, Dr. en Ciencias Físicas Luis Felipe Desdín García, MSc. en Ingeniería Nuclear Manuel Fernández Rondón, Dr. en Ciencias Físicas Oscar Díaz Rizo, Dr. en Ciencias Biológicas Omar García Lima, Dr. en Ciencias Ramón B. Pomés Hernández, MSc. en Ingeniería Nuclear Ramón R. Cardona, Dr. en Ciencias Físicas Raúl Oscar Barrachina Tejada

Equipo editorial

Director: Roberto Sosa Caceres / **Edición:** Lourdes González Aguiar **Diseño:** D.I. Liodibel P. Claro Drake / **Indización INIS:** Irayda Oviedo Rivero / **Referencias:** Miriam Amado Picasso

Revista arbitrada, certificada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Referenciada en las **Bases de Datos INIS, CUBACIENCIAS** Periódica, en el Sistema de Información **LATINDEX, ULRICH'S, EBSCO, SciELO** e **INFORMNAUKA**.



35 aniversario del CEADEN

Dr. Iván Padrón Díaz

Director

Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)

ipadron@ceaden.edu.cu

El Centro de Estudios Aplicados al Desarrollo Nuclear (CEADEN), se fundó el 28 de octubre de 1987 y contó con la presencia del Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, el Vicepresidente José Ramón Fernández, la Ministra de Ciencias Rosa Elena Simeón Negrín presidiendo a un grupo de dirigentes cubanos y como representante internacional al Director General del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) Hans Blix.

El CEADEN tuvo como antecedente inmediato en nuestro país, la existencia desde el año 1976 del Instituto Nacional para las Investigaciones Nucleares (ININ).

La institución científica está adscrita al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) y a la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada de Cuba (AENTA) y durante 14 años formó parte del Polo Científico del Oeste de La Habana. A partir de año 2001, como resultado de la política de perfeccionamiento del CITMA, el CEADEN y el Centro de Desarrollo de Instrumentos Científicos (CEDEIC), se funden creándose por Resolución No. 90/2001 del CITMA una nueva institución, el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear —con idéntico acrónimo—, que abarca una actividad más integral, en la cual se incluyen las investigaciones básicas y aplicadas, la prestación de servicios científico técnicos especializados y la producción de equipos e instrumentos para la Salud Pública y la Industria, como líneas con igual fuerza e importancia.

La entidad es una organización de investigación, desarrollo e innovación destinada a generar y difundir conocimiento y, desarrollar y comercializar productos y servicios competitivos a partir de las ciencias nucleares, el láser, la óptica, la ciencia de los materiales, la electrónica, la química analítica y más recientemente, las nanociencias. Esta diversidad de líneas de investigación le permite crear fácilmente grupos multidisciplinarios para aplicar con éxito a Programas Nacionales y Sectoriales de proyectos I+D+i y solucionar complejos problemas tecnológicos con el desarrollo de servicios científico-técnicos y asesorías.

Recientemente se ratificó como Centro de Investigaciones, —según la actual clasificación de las Entidades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ECTI) del CITMA—, y posee un núcleo de investigadores y técnicos fundadores que avalan la constancia y prestigio. Cuenta además, con reconocidos especialistas en sus respectivas temáticas que prestan servicios científico-técnicos únicos en el país.

El evento científico divulgativo en saludo al 35 Aniversario del CEADEN contó con la presencia de prestigiosas personalidades del quehacer científico. Las conferencias magistrales de Armando Rodríguez, Viceministro CITMA, de Agustín Lage, Asesor del Presidente y de Rolando Pérez, Asesor científico del Presidente de Biocubafarma, destacaron el nivel de la ciencia que ha desarrollado nuestro colectivo en estos años de creado.

Una selección de los trabajos presentados por nuestros especialistas en dicha cita, se publican en este número de la *Revista Nucleus*.

Principales impactos de la instrumentación del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) en el Sistema Nacional de Salud

 Omar Morales Valdés¹,  Lorenzo Hernández Tabares¹,  Guillermo Mesa Pérez¹,
 Eduardo Arista Romeu²,  Pedro Larrea Cox¹,  Sandra Fernández Yanes¹

¹Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana.

²Laboratorio de Biofotónica, ESIME Zac, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México 07738, México.

omar@ceaden.edu.cu

Resumen

Se realiza un resumen de las líneas fundamentales de equipos médicos destinados a la salud pública cubana desarrollados por el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Estas líneas se agrupan en dos direcciones fundamentales: la instrumentación óptica y la instrumentación nuclear para el diagnóstico en la medicina, el control de la calidad y la dosimetría.

Se exponen los principales desarrollos e impactos alcanzados en estas dos direcciones en el Sistema Nacional de Salud, así como sus perspectivas de desarrollos presentes y futuras.

Palabras clave: equipo; salud pública; protección contra las radiaciones; dosimetría; diagnóstico; terapia, láseres.

Main impacts of the implementation of the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) in the National Health System

Abstract

A summary of the fundamental lines of medical equipment for Cuban public health developed by the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) is made. These lines are grouped in two fundamental directions: optical instrumentation and nuclear instrumentation for medical diagnosis, quality control and dosimetry.

The main developments and impacts achieved in these two directions in the National Health System are exposed, as well as their perspectives for present and future developments.

Key words: nuclear medicine; single photon emission computed tomography; radiation protection; image processing; images; standardization; positron computed tomography.

Introducción

Desde la creación del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) su trabajo se vincula al avance de la instrumentación científica basada en las técnicas nucleares, la óptica y el láser. Han sido varios los equipos desarrollados en todos estos años dirigidos a las aplicaciones médicas en las especialidades de estomatología, ortopedia y traumatología, rehabilitación, medicina natural y tradicional, oncología, endocrinología, medicina deportiva, entre otras [1-10].

El CEADEN acumula una valiosa experiencia en el desarrollo, producción y aplicaciones de instrumentos ópticos y de perfil nuclear que se han introducido con éxito en el país, exportándose algunos de ellos a países latinoamericanos, además la institución organiza perió-

dicamente los eventos internacionales TECNOLASER y NURT cuyas ediciones cuentan con secciones de aplicaciones en la medicina donde se refleja el quehacer del centro en el campo médico en sus dos líneas principales: la instrumentación óptica y la instrumentación nuclear para el diagnóstico, el control de la calidad y la dosimetría.

En este trabajo se ilustran los principales impactos del CEADEN en el sistema de salud pública cubano en ambas líneas de desarrollo y sus principales retos en el próximo periodo.

Desarrollo

Cuba no ha estado ajena a la introducción de la radiación láser en la medicina, y durante años ha existido

un esfuerzo sostenido en las investigaciones y el desarrollo de tecnologías en esta esfera.

Desde finales de la década de 1970 se introduce en nuestro país el uso de la terapia con láser gaseoso de HeNe, y a partir de los años 80 con diodos láseres de baja potencia, como vía alternativa para el tratamiento de diversas afecciones [2]. Los resultados presentados en eventos científicos y las publicaciones realizadas avalan la aplicación de dicha técnica, lo que determinó se decidiera por la construcción de los equipos láseres médicos, contándose actualmente con más de 300 equipos distribuidos en todo el Sistema Nacional de Salud (SNS) cubano, además de exportarse un número considerable a varios países de América Latina.

En 1985 se decide la introducción y extensión de la tecnología láser en los hospitales. Como el precio de los sistemas disponibles era prohibitivo para el país, se organizó un programa para el diseño, el desarrollo y la producción de equipos láseres médicos. A principios de 1987, el Centro de Desarrollo de Equipos e Instrumentos Científicos (CEDEIC) entregó el primer equipo láser médico cubano, de HeNe, con 2 mW de potencia de salida (LASERMED 1), el cual comenzó a utilizarse en aplicaciones de láserpuntura y fisioterapia, en pequeñas lesiones dermatológicas y estomatológicas.

En 1990, luego de evaluados sus resultados, se tomó la decisión de financiar una producción de los modelos LASERMED 101M, LASERMED 401M y FISSER III.

La aparición de nuevos láseres semiconductores, con precios muy ventajosos respecto al HeNe, trajo una revolución en el desarrollo de estos productos, dando lugar a los nuevos LASERMED 670 y LASERMED 830 en 1996, producidos por la Empresa mixta TECE, SA y, más recientemente, el FISSER 21 y el FISSER 25, desarrollados en el CEADEN [3].

Los resultados de esa etapa tienen una expresión científica, recogida en varias publicaciones internacionales, el establecimiento de una Maestría en Óptica y Láser, la organización del Programa Ramal de la Óptica y el Láser (PROL), y la realización del evento internacional TECNOLÁSER.

El desarrollo de esta línea tiene su expresión en diferentes momentos como se refleja en la figura 1.

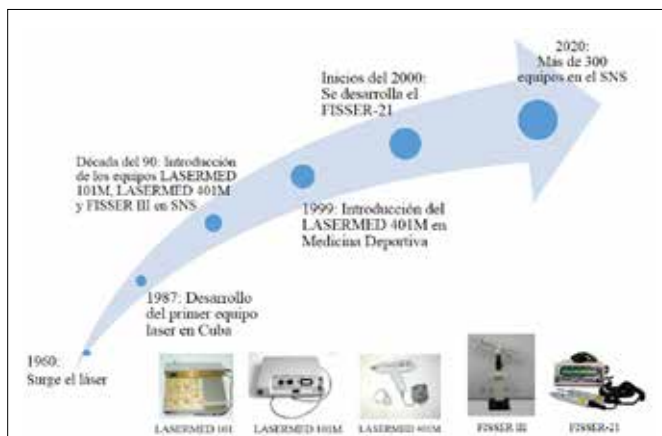


Figura 1. Principales momentos de introducción de la instrumentación láser en el sistema de salud.

La marca FISSER incluye varios equipos de fisioterapia láser, entre los que se encuentra el FISSER-21 (figura 2). Este modelo ostenta el registro médico otorgado por el Centro para el Control Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CECMED), y debido a su gran versatilidad puede ser empleado prácticamente en todas las afecciones donde se utiliza la terapia láser, destacándose las siguientes especialidades: odontoestomatología, medicina natural y tradicional (MNT), medicina física y rehabilitación, dermatología, cirugía plástica y reconstructiva, angiología, otorrinolaringología, ortopedia y traumatología.



Figura 2. Equipo Láser FISSER 21

Desde hace varios años, el CEADEN ha contribuido con la inserción de los equipos láser en el Sistema Nacional de Salud, con los siguientes resultados:

- 158 equipos FISSER-21 en servicios de estomatología.
- 102 equipos FISSER-21 en servicios de MNT.
- 69 equipos FISSER-21 en otras especialidades.
- Graduados 782 especialistas en cursos sobre las aplicaciones del láser en medicina y estomatología.
- Más de 450 libros distribuidos en los servicios de salud.
- Exportación: + 90 equipos (México, Colombia, Argentina, Panamá, Honduras, Ecuador, Perú, Congo, Venezuela y República Dominicana)

Respecto a la línea de instrumentación nuclear para el diagnóstico en la medicina, el control de la calidad y la dosimetría se ha acumulado una valiosa experiencia en el desarrollo, producción e introducción con éxito en los módulos de medicina nuclear del sistema nacional de salud dentro los que podemos citar los contadores de pozo para la determinación de hormonas y marcadores tumorales en suero sanguíneo por la técnica RIA-IRMA y el sistema DETECT-PC para el estudio de la glándulas tiroideas.

Los instrumentos desarrollados han alcanzado un nivel competitivo y muchos de ellos se han validado y aplicado en las instituciones médicas del país.

La técnica RIA/IRMA es de amplia aplicación en el diagnóstico de diversas enfermedades y llegó a ser trabajo de rutina de un gran número de técnicos y profesionales en los servicios de medicina nuclear

del sistema nacional de salud, pero las roturas y obsolescencia del equipamiento importado instalado para la medición a principios de la década pasada dio al traste con la labor a que se enfrentaban diariamente dichos profesionales ocasionando problemas de validación de resultados, rechazo de datos, no estandarización de procesos, interpretación y comportamientos anómalos de los procesos, etc., quedando solo la técnica disponible en algunos servicios a nivel nacional y el servicio centralizado de determinación en el CENTIS lo que provocaba traslados de muestras y de pacientes entre diferentes provincias y demora en la entrega de los resultados en más de 20 días.

En el CEADEN para finales de esa misma década se desarrolló un sistema para la adquisición y procesamiento de los datos provenientes de los KITS RIA/IRMA tratando de suplir las necesidades en la técnica e incorporando las facilidades tecnológicas actuales dando lugar al sistema SRN1C-02 (figura 3), equipo que cumple los estándares internacionales para la fabricación de equipos médicos, lo que le permitió alcanzar su registro sanitario para la aplicación RIA-IRMA con el número I 0060105381100. Es a partir de este momento que se traza una estrategia de conjunto con el Centro de Isó-

pos (CENTIS) y el Grupo de Control del Cáncer del MIN-SAP para restablecer dichos servicios a nivel nacional.

Introducción del contador de pozo en 18 servicios de medicina nuclear y laboratorios clínicos, en 11 provincias, para el estudio de hormonas, marcadores tumorales y control de calidad de radiofármacos.

Principales estudios realizados con la técnica RIA-IRMA:

- Tiroideas: Kit RIA T3, Kit RIA T4, Kit IRMA TSH, tiroglobulina, calcitonina, Kit RIA Free T3, Kit RIA Free T4
- Reproducción: Kit IRMA Prl, Kit IRMA FSH, progesterona, cortisol, Kit IRMA LH
- Crecimiento: Kit IRMA GH
- Diabetes: Kit RIA Ins
- Marcadores tumorales: PSA, FPSA, CEA, CA 19-9, CA 15-3, CA 125
- Trasplantes: ciclosporina

En la actualidad hay 26 sistemas instalados en 15 servicios de 11 provincias según se muestra en la figura 4 que realizan estas determinaciones con este sistema instalado a nivel nacional garantizando una cobertura nacional.

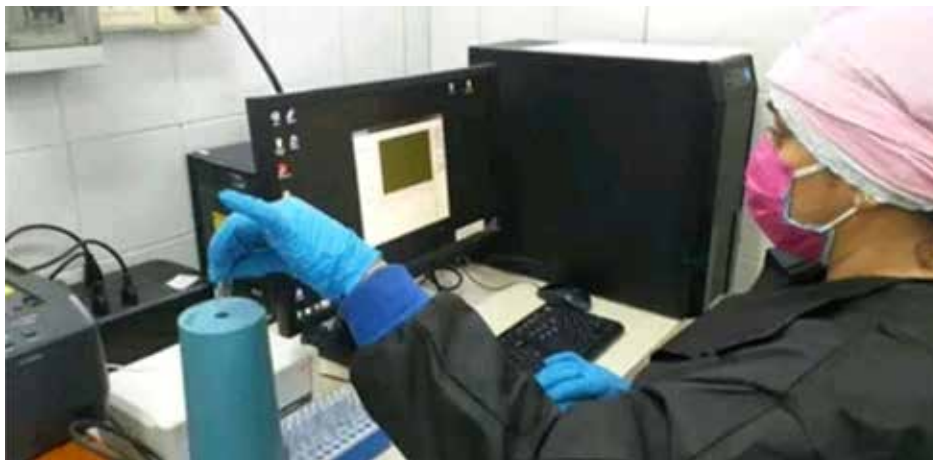


Figura 3. Sistema SRN1C-02 para medición de kits RIA e IRMA acoplado a PC.



Figura 4. Distribución de los Sistema SRN1C-02 para la medición de kits RIA e IRMA acoplado a PC.

Otro instrumento que ha alcanzado impacto en esta línea es el Sistema DETECT-PC para evaluar el funcionamiento de la glándula tiroidea.

Las enfermedades producidas por trastornos en la glándula tiroidea tienen una gran incidencia en la población. Cualquier hospital general atiende decenas de casos mensuales y hay lugares en los que este padecimiento es endémico. La captación de Yodo en tiroides se utiliza como método de diagnóstico desde la década del 50. Los estudios de captación de yodo se orientan en aquellos casos que se desee evaluar el estado funcional de la glándula tiroidea como son: hipertiroidismo, bocio tóxico difuso, bocio nodular, cáncer de tiroides y otros, lo que permite la evaluación de resultados terapéuticos y la planificación del tratamiento ¹³¹I [11].

El sistema DETEC-PC es básicamente un dispositivo para la realización de radiometría por un canal de detección. Se compone de tres partes fundamentales: el detector con su colimador, el módulo ciego de medición SRN1C-02 y el software de la aplicación como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Sistema DETEC-PC para la captación de yodo.

Estos sistemas han sido introducidos en 11 servicios de medicina nuclear, para la captación de yodo en tiroides y estudios de dosimetría interna lo que ha permitido una cobertura a nivel nacional (tabla 1).

Tabla 1. Distribución de los Sistemas DETEC-PC en el sistema nacional de salud.

Ubicación	Provincia
Hospital Hermanos Ameijeiras	La Habana
Instituto Oncología y Radiobiología	La Habana
Instituto de Hematología	La Habana
Hospital Salvador Allende	La Habana
Hospital Camilo Cienfuegos	Sancti Spiritus
Hospital Oncológico Marie Curie	Camagüey
Hospital Ernesto Guevara	Las Tunas
Hospital Celia Sánchez Manduley	Manzanillo
Hospital Univ. Vladimir Ilich Lenin	Holguín
Hospital Oncológico Conrado Benítez	Santiago de Cuba
Hospital Agostinho Neto	Guantánamo

Los resultados de esta línea tienen una expresión científica, recogida en varias publicaciones internacionales, y la realización del evento internacional NURT.

El colectivo multidisciplinario que se desempeña en estas líneas trabaja en el desarrollo de nuevos instrumentos, que tengan un importante impacto en la salud, para alcanzar los siguientes resultados:

- Equipos basados en el láser, la óptica y tecnologías conexas, portátiles y de nuevas prestaciones.
- Desarrollo de sistemas láser para cirugía, en estomatología y otras especialidades.
- Dosímetros de zona y monitores de contaminación superficial con nuevas prestaciones para módulos de medicina nuclear y otros sectores de la economía.
- Nuevos sistemas radiométricos y espectrométricos para el diagnóstico clínico y para las investigaciones en la física nuclear experimental.
- Modernización de instrumentación nuclear instalada en instituciones médicas del país.

Dentro de los desarrollos de mayor impacto está el Láser quirúrgico para aplicaciones estomatológicas.

En comparación con la técnica tradicional del uso del bisturí, en las intervenciones quirúrgicas con láseres de alta potencia los pacientes experimentan menos dolor postoperatorio por lo que suelen ser también menores las dosis prescritas de analgésicos para controlarlo. Debido a la actividad antimicrobiana del láser el procedimiento se realiza en un campo operatorio con cantidad disminuida de microorganismos. También se propicia la reducción del tiempo de cicatrización, del tiempo de cirugía y de la presencia de tejido cicatrizado [12-15].

El tipo de diodo láser pertinente para una aplicación así sería uno que emita en una longitud de onda entre los 810 y 980 nm. Estas longitudes de onda son altamente absorbidas por los tejidos blandos no así por el tejido dentario u óseo. Estos tipos de láseres son unidades pequeñas, manejables y transportables, económicamente más accesibles y con gran rendimiento costo-beneficio [16].

Existen en el mercado diversos equipos de láser semiconductor de alta potencia con aplicaciones en estomatología: Denlase Dental Diode Laser, Biolase Inc. Epic X Deka Laser Diode, Smart, OrotigMed LASER Pocket, Sirona SIROLaserAdvance [8]. Sin embargo, este tipo de equipamiento no se produce en el país y es uno de los recientes desarrollos que se ha propuesto el centro con el objetivo de ampliar la introducción de dispositivos y equipos basados en la óptica y el láser en nuestros centros de salud.

El equipo en desarrollo está compuesto por dos tarjetas electrónicas, diseñadas especialmente para la aplicación y que controlan su funcionamiento, más varios módulos comerciales: módulo láser (G980-10WD-14HHL-PTFS), driver láser (LDP-CW 18-05), driver TEC o enfriador termoeléctrico (PL-TEC 2-1024), una com-

putadora monoplaca del tipo Raspberry Pi y una pantalla táctil de 7" [9].

Todos estos elementos están integrados dentro de un mueble al que se le conecta una fuente de alimentación externa, un interruptor a pedal y una fibra óptica terminada en un aplicador (figura 6).



Figura 6. Equipo láser de potencia para cirugía estomatológica FISSEHighBeam10w.

La principal función del equipo es generar la emisión de radiación láser a través del aplicador, que se apunta a la zona de cirugía del paciente. Para esto, el sistema debe ser capaz de habilitar y accionar la emisión de un diodo láser y controlar y variar su potencia de emisión. Se controla también la emisión del láser guía y la temperatura del enfriador del módulo láser. El sistema se comunica con la pantalla, desde la cual recibe las órdenes de operación introducidas por el usuario y se visualiza el estado del equipo.

A través de la pantalla táctil se realiza básicamente toda la interfaz con el usuario. Esta utilidad hace flexible y actual el diseño del equipo, brindando varias opciones tanto para la operación y configuración del equipo por parte del usuario como la calibración y ajuste de él por el fabricante.

Un equipo así podría utilizarse en cirugía de los tejidos blandos (curetaje, corte de la encía y de la mucosa bucal), incisión y drenaje de abscesos, biopsias, para obtener hemostasia en los procedimientos quirúrgicos con excesivo sangrado, en el tratamiento de la periimplantitis. Por su efecto bactericida, tiene indicaciones específicas en periodoncia (incisiones y escisiones gingivales) y en endodoncia (como sistema de desinfección: descontaminación y remoción de bacterias) [10].

En la actualidad el equipo se encuentra en pruebas técnicas para iniciar ensayos clínicos.

Conclusiones

El desarrollo e introducción de estos instrumentos y sus resultados ha permitido disponer de tecnologías biomédicas nacionales, con alta utilidad en aplicaciones de diagnósticos y terapéuticas, posibilitando el uso de sus prestaciones al alcance de toda nuestra población además de garantizar la estabilidad de dichos servicios lo que repercute de forma muy positiva en la seguridad y bienestar a los pacientes.

Es importante destacar que el uso de la tecnología láser constituye un medio absolutamente indoloro, ino-cuo, no invasivo y aséptico que con su empleo reduce los gastos en la adquisición de medicamentos, así como la disminuye el tiempo de estadía de los pacientes hospitalizados, y la rápida recuperación de los pacientes ambulatorios, junto a su pronta incorporación a la vida social.

El desarrollo e introducción de la tecnología nacional ha permitido elevar el número de unidades asistenciales con estas técnicas, al disminuirse los costos de producción que, unidos a la asistencia técnica y la implementación del sistema de entrenamiento ha permitido alcanzar mejores resultados en la introducción de las tecnologías y garantizar un servicio estable en la red nacional de salud.

Se ha logrado el desarrollo de un prototipo de láser quirúrgico estomatológico con diodo láser de 976 nm, una potencia de hasta 7 W y de emisión continua (CW) a la par que se asimila un *know-how* propio relacionado con la tecnología de los láseres para cirugía estomatológica, como parte del desarrollo del primer equipo de láser semiconductor para aplicaciones quirúrgicas en el país. Esto podrá beneficiar a miles de pacientes con una amplia variedad de afecciones dentales y bucales que asisten a las clínicas estomatológicas existentes en el país, otro de sus beneficios sería la introducción de esta técnica en las facultades de estomatología, para su empleo en la docencia y en la investigación científica garantizando la formación de las nuevas generaciones.

Referencias bibliográficas

- [1]. ARISTA E, TOLEDO R and DOTRES A. A new curimeter with advanced software capabilities. Third International Symposium on Nuclear and Related Techniques. October 22-26, 2001. Havana, Cuba.
- [2]. BOLAÑOS L, ALONSO D, ARISTA E, ARTECHE R, AND LEMUS O. Software for thyroid uptake equipment based on PC. In: Validation Procedures of Software Applied in Nuclear Instruments. IAEA-TECDOC-1565. 2007. pp. 113-119.
- [3]. LARREA P, HERNANDEZ TABARES L, SUÁREZ C, et al. Evaluación de densitómetro automático con diodo láser. Rev. Cuba. Física. 2010; 27(1): 102-106.
- [4]. ALONSO ABAD D and ARISTA ROMEU E. Thyroid uptake software. Nucleus. 2004; (35): 20-24.
- [5]. ARISTA ROMEU E, ALONSO ABAD D, ARTECHE DÍAZ R. Captador de Yodo Acoplado a PC destinado al Sistema Nacional de Salud. Nuclues. 2003; (34): 44-48.
- [6]. COMBARRO ROMERO AM, ORELLANA MOLINA AA, A. HERNÁNDEZ DÍAZ PJ, et al. Láser de baja potencia, física y aplicaciones médicas. La Habana: Cubaenergía, 2011.
- [7]. FUNDORA SARRAFF T, HERNÁNDEZ REYES LH, MESA PÉREZ G, et al. Apoyo tecnológico cubano a la medicina nuclear en hematología. Rev. Cubana. Hematol. Inmunol y Hemoter. 2017; 33(1): 1-4.
- [8]. LARREA COX P, HERNÁNDEZ TABARES L, VALDÉS SANTURIO E, et al. Improvement of the first cuban laser densitometer. Rev. Cubana. Física. 2015; 32(2): 106-108.
- [9]. GONZÁLEZ PÉREZ M, VAZQUEZ HERNÁNDEZ I, HERNÁNDEZ TABARES L, et al. Sistema de control para laser semiconductor de alta potencia. Rev. Cubana. Física. 2018; 35(1E): E31-E33.
- [10]. HERNÁNDEZ DÍAZ A. El láser terapéutico en la práctica médica actual. 2da ed. La Habana: Editorial Científico-Técnica, 2007.
- [11]. ARISTA ROMEU E. Detect-PC Software Version 3.0. Proceedings of the XIII Workshop on Nuclear Physics and VII International

- Symposium on Nuclear and Related Techniques.. WONP-NURT 2011. February 7-11, 2011. Havana, Cuba.
- [12]. PULIDO ROZO MA, TIRADO AMADOR LR and MADRID TROCONIS CC. Gingivoplastia y frenilectomía labial con láser de alta intensidad: presentación de caso. *Rev. Clínica Periodoncia, Implantol. y Rehabil. Oral.* 2015; 8(2): 157-162.
- [13]. AZMA E and SAFAVI N. Diode laser application in soft tissue oral surgery. *J. Lasers Med. Sci.* 2013; 4(4): 206-211.
- [14]. PATEL R, VARMA S, SURAGIMATH G, *et. al.* Comparison of labial frenectomy procedure with conventional surgical technique and diode laser. *J. Dent. Lasers.* 2015; 9(2): 94-99. doi: 10.4103/0976-2868.170565.
- [15]. AGRAMONTE I, RODRÍGUEZ G, HERNÁNDEZ Y and DORREGO MD. Cirugía de blefaroplastia por técnica convencional versus láser de CO₂. *Rev. Cubana. Oftalmol.* 2013; 26(3). [en línea]. Disponible en: <https://revoftalmologia.sld.cu/index.php/oftalmologia/article/view/206/html>.
- [16]. PÉREZ RODRÍGUEZ MJ. Tener un láser en la consulta de ortodoncia: ¿Por qué?. *RCOE: Revista del Ilustre Consejo General de Colegios de Odontólogos y Estomatólogos de España.* 2014; 19(4): 295-301.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

CRedit / Conceptualización: Omar Morales Valdés, Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Lorenzo Hernández Tabares, Pedro Larrea Cox, Sandra Fernández Yanes. **Fuentes:** Lorenzo Hernández Tabares, Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Pedro Larrea Cox. **Curación de datos:** Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Pedro Larrea Cox. **Software:** Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu. **Análisis formal:** Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Pedro Larrea Cox. **Supervisión:** Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Pedro Larrea Cox. **Adquisición de fondos:** Omar Morales Valdés. **Validación:** Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Pedro Larrea Cox. **Investigación:** Omar Morales Valdés, Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Lorenzo Hernández Tabares, Pedro Larrea Cox, Sandra Fernández Yanes. **Visualización:** Omar Morales Valdés, Sandra Fernández Yanes. **Metodología:** Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu, Lorenzo Hernández Tabares, Pedro Larrea Cox. **Administración de proyecto:** Omar Morales Valdés, Guillermo Mesa Pérez, Eduardo Arista Romeu. **Redacción – borrador original:** Omar Morales Valdés, Lorenzo Hernández Tabares. **Redacción – revisión y edición:** Omar Morales Valdés, Lorenzo Hernández Tabares, Sandra Fernández Yanes.

Aportes de los servicios científico-técnicos del CEADEN a la economía nacional

 Victoria Herrera Palma¹,  Débora Hernández Torres²,  Félix Sendoya Puente¹

¹Laboratorio de Materiales, Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN).

²Subdirección de Servicios Científico-Técnicos, Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN).

Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana

victoria@ceaden.edu.cu

Resumen

Tanto la Investigación aplicada como la Innovación generan productos tangibles o servicios (productos intangibles), de múltiple impacto en la sociedad.

En particular, los servicios científico-técnicos también contribuyen a la mayor soberanía del país al permitir que sean resueltos disímiles problemas a partir de los recursos humanos y materiales existentes en la nación; juegan un crucial papel en la gestión de la calidad de cualquier proceso, y tributan fuertemente a la seguridad industrial y alimentaria.

En el presente trabajo se esbozan varias de las causas que, en opinión de los autores, limitan el impacto de los servicios científico-técnicos para cumplir el papel que debe tener la Ciencia y la Innovación. A continuación son presentadas las diferentes líneas de servicios científico-técnicos que ha ofrecido u ofrece el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) en sus 35 años de labor.

Palabras clave: bienes y servicios; producción; desarrollo tecnológico; personal científico; ensayos; diagnóstico; irradiación; ingeniería; análisis químico.

Contribution to the national economy of scientific and technical services, provided by CEADEN

Abstract

Applied research as well as Innovation breed tangible products or services (intangible ones), with multiple impact on society.

Particularly, scientific-technical services contribute to a greater national sovereignty with the solution of dissimilar problems with the participation of national human resources and materials. These services play a crucial role in quality management of any process, and furthermore, they also contribute to industrial and food safety.

This paper outlines several of the causes that, in the authors' opinion, limit the impact of scientific-technical services in fulfilling the role that Science and Innovation should have.

The different lines of scientific-technical services offered by the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) in its 35 years of work are presented below.

Key words: goods and services; production; technology development; scientific personnel; testing; diagnosis; irradiation; engineering; chemical analysis.

I. Introducción

En las directrices del VIII Congreso del Partido Comunista de Cuba (PCC) en el campo de la Economía se indica [1] “Impulsar la ciencia y el desarrollo de la tecnología y la innovación, de modo que desempeñen un papel principal en el incremento de la productividad, la eficiencia y la eficacia” y “Consolidar el papel de las universidades y

fortalecer sus relaciones con las entidades de la ciencia, tecnología e innovación y el sector empresarial”.

Junto a ello se destaca que la Ciencia y la Innovación, la Informatización de los procesos y la Comunicación social son los tres pilares para el perfeccionamiento de la gestión de gobierno [2-3]. El problema identificado en este análisis radica en que “el potencial humano y las capacidades científicas y tecnológicas que la Revolución ha creado

no han tenido de manera generalizada el impacto práctico deseado en la sociedad y en particular en la economía". En ello destaca la "insuficiente efectividad en las conexiones entre las universidades y las entidades de ciencia, tecnología e innovación (ECTI) con los sectores productivos de bienes y servicios y los territorios". La solución necesaria se considera la Búsqueda de un sistema de gestión del Gobierno basado en ciencia e innovación (SGGCI).

El Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) fue creado el 28 de Octubre de 1987 a partir del anterior Instituto de Investigaciones Nucleares ININ para apoyar el desarrollo del programa nuclear cubano.

En el presente trabajo se esbozan las diferentes líneas de servicios científico-técnicos que ha ofrecido u ofrece el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) en sus 35 años de labor.

2. Papel de los servicios científico-técnicos

Tanto la Investigación aplicada como la Innovación generan productos tangibles o servicios (productos intangibles), de múltiple impacto en la sociedad.

En particular, los servicios científico-técnicos también contribuyen a la mayor soberanía del país al permitir que sean resueltos disímiles problemas a partir de los recursos humanos y materiales de la nación; juegan un crucial papel en la gestión de la calidad de cualquier proceso, y tributan significativamente a la seguridad industrial y alimentaria. De hecho, la comercialización de servicios científico-técnicos constituye en el mundo el objeto social de muchas empresas pequeñas, medianas y grandes, a menudo, generadas a partir de una entidad de ciencia y técnica que actuó como incubadora. Otros casos muestran la oferta de estos servicios directamente por la propia institución científica que realizó la investigación o la innovación originales, la cual actúa como entidad de Ciencia y técnica a ciclo completo.

Entre las causas de la insuficiente conexión entre los sectores productivos de bienes y servicios y las entidades de ciencia y técnica (universidades y centros de investigación), a partir de la experiencia de este colectivo de autores en la prestación de servicios científico-técnicos a disímiles sectores por más de 30 años, se puede mencionar:

- ausencia de motivación de las empresas en solicitar servicios a las entidades de ciencia, tecnología e innovación (ECTI), limitándose frecuentemente a hacerlo ante etapas de crisis, como averías o reclamaciones comerciales.
- no se solicitan proyectos empresariales con un alcance mayor y visión de mejora de sus procesos.
- interés mayormente centrado en el cumplimiento en valores del plan económico. Calidad no imprescindible.
- el acercamiento a las ECTI está dado frecuentemente por regulaciones de obligatorio cumplimiento: Ej: ensayo de cables, o elementos críticos de equipos de parques de diversión.

- discontinuidad de los intereses logrados en la contratación de servicios y proyectos a las ECTI, cuando ocurre renovación de algunos de los directivos principales. Esto apunta, a nuestro juicio, a una débil sistematicidad en el sector productivo del control y utilización de los resultados de los servicios y proyectos que han sido solicitados anteriormente.
- Insuficiente estructura económica de la mayoría de las ECTI, lo que obstaculiza una comercialización exitosa.

3. Servicios científico-técnicos del CEADEN

3.1 Servicios de ensayos y diagnóstico de materiales para la industria y otros sectores

Los servicios en la especialidad de Ciencia de Materiales contribuyen a la calidad de los procesos y a la prevención de fallos del equipamiento o instalación.

En el campo de los materiales metálicos, utilizando tanto técnicas destructivas como ensayos no destructivos, se ha dado respuesta a problemas de comprobación de la calidad y de su correspondencia con el uso previsto de materiales, piezas y componentes de instalaciones diversas tanto importados como de producción nacional, como por ejemplo, componentes y procesos durante la construcción de la central nuclear de Juraguá, partes de motores Diesel de grupos electrógenos, alambres para usos diversos, tubos de caldera de las centrales térmicas eléctricas, tuberías de instalaciones para la industria farmacéutica, pinzas estomatológicas, etc.

Un servicio de especial importancia es la supervisión y control de la seguridad de los equipos de parques de diversión. (figura 1). Entre las obras de interés social, estos también presentan un riesgo intrínseco durante la explotación de sus equipos, no percibido adecuadamente en muchas ocasiones. Por tal motivo es necesario realizar controles con el objetivo de conocer mediante la utilización de diferentes métodos el estado técnico de aquellos elementos denominados críticos, es decir, los que están relacionados directamente con la seguridad de los pasajeros. Este servicio es realizado de acuerdo a la metodología descrita en [4].



Figura 1. Inspección de elementos críticos de equipos de parques de diversión.

3.2 Soluciones tecnológicas en instalaciones de alto riesgo y en tecnologías limpias

Desde finales de la década de los 80 el CEADEN, junto a su apoyo a la construcción de la CEN Juraguá, comenzó a incursionar en la atención a los problemas de metales en las centrales eléctricas del país mediante su laboratorio de Materiales. Posteriormente, luego de la interrupción de la construcción de dicha facilidad nuclear, desde 1995 ha estado presente en la industria biotecnológica y farmacéutica cubana, destacándose por su aporte social y económico mediante el trabajo de los grupos SITA y SELAR. Se destacan los trabajos de Ingeniería realizados por el CEADEN a la industria biotecnológica y farmacéutica, los cuales han recibido dos premios de Innovación Tecnológica de la Academia de Ciencias.

En este campo los servicios prestados han sido:

- Servicios de Ingeniería (Grupo SITA), que abarcan Diseño, fabricación, construcción, montaje, ajuste y puesta a punto en servicios de equipos de generación de agua de diferente calidad (purificada, para inyección, vapor puro) y de paneles eléctricos y de control para los sistemas críticos de las industrias médico – farmacéutica y biotecnológica. Servicios de mantenimiento correctivo y vigilancia a dichos sistemas. Servicios de adiestramiento de operadores y asesoría técnica (figura 2).



Figura 2. Servicios de Ingeniería.

- Servicios de validación de los equipos de esta industria (Grupo SITA), cuyo fin es calificar la instalación, la operación y el desempeño, dejando como resultado los respectivos protocolos que rigen las distintas etapas que componen la validación.
- Diagnóstico y Análisis de Fallas (Laboratorio de Materiales).en componentes Industriales (calderas de centrales térmicas eléctricas, componentes de motores Diesel de grupos electrógenos, entre otros). Se determinan las causas de fallas, avería o rotura de piezas e instalaciones metálicas específicas de la industria, ofreciendo recomendaciones al cliente sobre los métodos que son convenientes para la prevención o la erradicación del daño originado por el medio o las condiciones de fabricación u operación.
- Servicios de Recubrimientos especiales (Grupo SELAR). de superficies en instalaciones con altos estándares de buenas prácticas de producción

de la industria biotecnológica y farmacéutica. Este servicio consiste en la colocación de recubrimientos de PVC en pisos y paredes, accesorios complementarios, así como el montaje de falsos techos y panelería ligera. De significativa importancia fue el servicio de colocación de 8000 metros de pisos de PVC en el Complejo Biotecnológico CIGB Mariel para la producción de la vacuna Abdala. Otros usuarios de estos servicios son hospitales hoteles, centros recreativos y oficinas (figura 3).



Figura 3. Servicios de aplicación de Recubrimientos especiales.

3.3 Análisis y ensayos en matrices de interés

Los Laboratorios de Análisis Químico y de Materiales son los relacionados con este tipo de servicios, que están dirigidos a sectores de la industria, la salud y la conservación del medio ambiente, industrias farmacéutica, alimentaria y de la pesca, entre otros. Ambos realizan a la vez actividad de proyectos de I+D de Programas nacionales o sectoriales y laboran sobre un Sistema de Gestión de Calidad de acuerdo a la norma NC/ISO/IEC 17025. Además, mantienen colaboración con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) mediante la participación de proyectos de ese organismo internacional.

3.3.1 Análisis y selección de materiales

El Laboratorio caracteriza materiales diversos (aceros y otros materiales metálicos, minerales, cerámicas) y los resultados del estudio permiten a los especialistas comprobar el cumplimiento de los certificados de calidad del ítem suministrado por el proveedor, dar recomendaciones al cliente sobre la capacidad del ítem para el uso propuesto e investigar el efecto del medio sobre el producto o el material. Estos servicios están destinados a diversos sectores de la industria metalúrgica, mecánica, farmacéutica, alimenticia y energética.

3.3.2 Ensayo de cables metálicos

Este servicio, reconocido por la Sociedad Clasificadora Registro Cubano de Buques, consiste en un Ensayo de tracción de un cable de acero hasta provocar su rotura, obteniéndose como resultado final la carga de rotura mínima que éste soporta. Se realiza previamente una Inspección visual y la clasificación de la arquitectura del cable de acuerdo a normas internacionales.

3.4 Servicio de análisis químico

El Laboratorio de Análisis Químico posee diversas técnicas de análisis que permiten la determinación simultánea de varios elementos: Fluorescencia de Rayos X dispersiva de energías en sus tres variantes (Con fuentes radioisotópicas de excitación, con tubo de rayos X y blanco secundario., Por Reflexión Total). Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA). Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES) y Polarografía.

Los servicios implementados son:

3.4.1 Análisis multielemental en matrices diversas

En virtud de la calidad que requieren los productos para consumo local y para la exportación, la vigilancia de la inocuidad es una tarea que debe seguirse de manera sistemática a través de un programa de Monitoreo y Control de Residuos Químicos y Contaminantes en Alimentos, que permita poder tomar las medidas oportunas. El servicio determina:

- Elementos esenciales y tóxicos en suelos, fertilizantes, enmendantes y vegetales.
- Elementos mayoritarios, minoritarios y a nivel de traza en sedimentos (marinos, fluviales y lacustres) y especies biológicas.
- Elementos mayoritarios minoritarios y a nivel de traza en suplementos nutricionales.
- Metales pesados y otros en organismos bioindicadores de la contaminación ambiental.
- Elementos tóxicos en productos pesqueros.
- Metales pesados en bebidas alcohólicas.
- Análisis de metales, aleaciones y otros productos industriales.

3.4.2 Análisis físico-químico del agua

Superficial, subterránea, potable de piscina, para la industria farmacéutica y para salas de hemodiálisis

3.5 Irradiación y microbiología

Estos servicios son ofrecidos por las áreas que realizan investigación –desarrollo que relaciona las radiaciones ionizantes con la biología de plantas y tejidos, las cuales mantienen una fuerte relación con el OIEA, participando en proyectos y otras actividades del OIEA.

Las líneas de servicios de esta área son:

- Irradiación: Radioesterilización y/o descontaminación de productos varios (esterilización de materia prima, suplementos nutricionales, productos farmacéuticos y dispositivos médicos).
- Microbiología.
- Estudios de genotoxicidad y evaluación de radioprotectores.

3.5.1 Servicio de Irradiación

El servicio se fundamenta en el empleo de las radiaciones gamma con el fin de alcanzar un objetivo tecnológico determinado, dependiendo del valor de la dosis absorbida recibida por el producto tratado. Son tres los efectos fundamentales que se alcanzan con este tipo de tecnología: efectos físicos, químicos y biológicos, siendo estos últimos los más empleados. Ejemplos de estas aplicaciones son Radioesterilización de material médico-farmacéutico, Higienización de productos naturales, Irradiación de alimentos, Modificación de polímeros y Radiomutagénesis.

3.5.2 Servicio de Microbiología

El Laboratorio de Microbiología del CEADEN, utilizando un grupo de normas cubanas, analiza la calidad microbiológica en:

Aguas: (potable, piscinas, residual, mar, etc.); muestras de lodo, suelos, aire, así como productos de la industria: materias primas de la industria médico farmacéutica, equipos médicos, cosméticos, alimentos, entre otras.

3.6 Servicios técnicos especializados en equipamiento de alta tecnología

Este servicio del Grupo de Reparación de Instrumentación Electrónica proporciona la reparación, mantenimiento, instalación y calibración de la instrumentación láser y de perfil nuclear para protección radiológica, de uso médico e industrial y electrónica de laboratorios de investigación y para Ensayos no destructivos (END). Ejemplos del equipamiento atendido son Equipos de protección radiológica: (dosímetros, monitores, alarmas, intensímetros), Equipos dosimétricos para radioterapia y medicina nuclear: (electrómetros, cámaras de ionización, calibradores de dosis, captadores de yodo, Renógrafos, equipos de rayos X diagnóstico); Equipos nucleares de uso industrial (medidores de nivel, humedad, densidad); Equipos para ensayos no destructivos por ultrasonido y de Radiografía industrial Equipos láser para aplicaciones médicas; entre otros.

3.7 Servicio de Protección Radiológica

Este servicio incluye la medición de tasa de dosis equivalente ambiental, y contaminación. En el marco

del mismo se ofrece asesoría para la elaboración de documentación para la obtención y renovación de licencias para el trabajo con radiaciones ionizantes que incluye la confección de expedientes de seguridad para las prácticas de licencia de construcción, operación, servicios técnicos e inscripción en registros, así como el Plan de emergencia radiológica, cálculos de blindaje entre otros. Se brindan talleres de capacitación y cursos sobre protección radiológica para operadores de radiografía industrial. Este servicio tiene el reconocimiento de la Oficina de Regulación Ambiental y Seguridad Nuclear (ORASEN) del CITMA y las licencias correspondientes.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los especialistas de los grupos de Irradiación, Microbiología, SITA, SELAR, Reparación e Instrumentación electrónica, Seguridad Radiológica y Análisis químico del CEADEN por la información suministrada.

Referencias bibliográficas

- [1]. Cuba. Directrices del VIII Congreso PCC. 2021
- [2]. DÍAZ- CANEL BERMÚDEZ, MM. ¿Por qué necesitamos un sistema de gestión del Gobierno basado en ciencia e innovación? [consulta: 8 de febrero 2023]. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/opinion/2021/03/17/por-que-necesitamos-un-sistema-de-gestion-del-gobierno-basado-en-ciencia-e-innovacion/>.
- [3]. DÍAZ- CANEL BERMÚDEZ, MM. ¿Por qué necesitamos un sistema de gestión del Gobierno basado en ciencia e innovación?. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba. 2021; 11(1) [consulta: 8 febrero 2023]. Disponible en: <http://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/1000/1078>.
- [4]. HERRERA V, SENDOYA F, DOMÍNGUEZ H, et. al. Contribución a la restauración y el mantenimiento de obras de importancia histórica, cultural y social de la ciudad de La Habana. Nucleus. 2019; (66): 22-26.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

CRedit / Conceptualización: Victoria Herrera Palma. **Fuentes:** Victoria Herrera Palma, Débora Hernández Torres. **Análisis formal:** Victoria Herrera Palma, Félix Sendoya Puente. **Supervisión:** Débora Hernández Torres. **Redacción – borrador original:** Victoria Herrera Palma. **Redacción – revisión y edición:** Victoria Herrera Palma, Débora Hernández Torres, Félix Sendoya Puente.

Avances en la aplicación de la radiomutagenesis *in vitro* para el mejoramiento genético de portainjertos cítricos

Alba Álvarez González¹, Livia Santiago Hernández¹, Sandra Carro Palacios¹,
Victoria Zamora Rodríguez², Jorge R. Cueto Rodríguez², Alina Puente Sánchez²,
Armando Chávez Ardanza¹, María C. González Cepero³

¹ Grupo de Radiomutagénesis y Biotecnología. Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN).
Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana. Cuba.

² Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical (IIFT).
Calle 7ma e/ 30 y 32. Miramar, Playa, La Habana

³ Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). Carretera San José-Tapaste, km 3½. Gaveta Postal 1.
San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

aalvarez@ceaden.edu.cu

Resumen

Desde los años 80 del pasado siglo, el Departamento de Radiobiología del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) ha colaborado con importantes grupos de mejoradores del país en la obtención de mutantes de arroz, tomate, caña de azúcar, soya, entre otros; no sólo con la irradiación de materiales, sino también en la caracterización bioquímica y molecular de los mutantes generados, principalmente de arroz. A partir del 2000 se inician proyectos de radiomutagénesis en frutales (cítricos y aguacatero), en colaboración con el Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical (IIFT) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). En este trabajo se presentan los avances en el establecimiento de una metodología de radiomutagénesis *in vitro* en portainjertos de interés para la citricultura cubana (citrumelo Swingle, *Citrus macrophylla*, *Citrus aurantium*, mandarina Cleopatra y citrange Carrizo). Se desarrolló un protocolo de selección *in vitro* de líneas con posible tolerancia a la sequía, se determinaron las dosis selectivas frente a PEG-6000 y se identificaron posibles descriptores de la respuesta al estrés hídrico *in vitro*. Se evaluó en citrumelo Swingle un protocolo de selección de tolerancia a la alcalinidad, basado en un medio deficiente de hierro. Se desarrollaron tres lotes de líneas mutantes seleccionadas frente a estrés hídrico, los que se encuentran en evaluación y se han identificado hasta el momento, dos líneas con mayor relación diámetro/altura, cuatro líneas de interés por el acortamiento de los entrenudos, una de ellas de bajo porte y cinco con mejor vigor y comportamiento fitopatológico.

Palabras clave: *Citrus*; mutantes inducidos por radiación; mutagénesis; sequía; alcalinidad.

Advances in the application of *in vitro* radiomutagenesis for the genetic improvement of *Citrus* rootstocks

Abstract

Since the 80's of the last century, the Radiobiology Department at CEADEN has collaborated with important genetic breeding groups in the country in obtaining mutants of rice, tomato, sugar cane, soybean, among others; not only with the irradiation of materials, but also in the biochemical and molecular characterization of the mutants generated, mainly in rice. Starting in 2000, radiomutagenesis projects began in fruit crops (*Citrus* and avocado) in collaboration with the Tropical Fruit Growing Research Institute (IIFT) and the International Atomic Energy Agency (IAEA). This work presents the advances in establishing an *in vitro* radiomutagenesis methodology for rootstocks of interest for the Cuban citriculture (Swingle citrumelo, *Citrus macrophylla*, *Citrus aurantium*, Cleopatra mandarin and Carrizo citrange). An *in vitro* selection protocol for lines with possible tolerance to drought was developed, the selective doses against PEG-6000 were determined and putative descriptors of the response to *in vitro* water stress were identified. An alkalinity tolerance selection protocol, based on an iron deficient selective medium, was evaluated on Swingle citrumelo. Three lots of mutant lines selected against water stress were developed which are currently under evaluation. At the moment, two mutant lines with higher diameter/height ratio, four lines with shorter internodes (one of them with reduced height) and five lines with higher vigor and better phytopathological behavior have been identified.

Key words: *Citrus*; radiation induced mutants; mutagenesis; drought; alkalinity.

Introducción

Como método de mejoramiento genético, la radiomutagénesis ha permitido inducir genes que controlan caracteres como el enanismo, la precocidad, los componentes del rendimiento y la tolerancia a estreses bióticos y abióticos [1]. A partir de los años 80 del pasado siglo, diferentes grupos de mejoradores en Cuba obtuvieron y registraron variedades mutantes de arroz, tomate, ajo, caña de azúcar, soya y flor de jamaica [2]. El Departamento de Radiobiología del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN), colaboró desde los inicios con el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), el actual Instituto de Investigaciones de Granos (IIG) y otros, desarrollando no sólo la irradiación de los materiales, sino también la caracterización bioquímica y molecular de la base genética, comercial y de los principales mutantes de arroz generados en estos programas [3, 4].

En los años 2000 el CEADEN comienza a participar en proyectos de radiomutagénesis *in vitro* para el mejoramiento de frutales como cítricos y aguacatero, en colaboración con el Instituto de Investigaciones de Fruticultura Tropical (IIFT) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Se caracterizó la diversidad genética del germoplasma de aguacatero en Cuba, se seleccionaron los genotipos de interés y se establecieron metodologías de propagación y selección *in vitro* de tolerancia a sequía y salinidad a partir de embriones cigóticos [5-7].

En cuanto a los cítricos, el cultivo requiere de nuevas estrategias de manejo, que incluyen el uso de portainjertos enanizantes en plantaciones de alta densidad, frente a las grandes afectaciones por el enverdecimiento de los cítricos o huanglongbing (HLB) [8]. También es de interés mejorar la tolerancia frente a los retos del cambio climático como la sequía y los suelos alcalinos, que limitan el uso de algunos de estos cultivares en importantes regiones cítricas del país [9]. Por ello, a partir del 2015, se ha trabajado en el establecimiento de metodologías de radiomutagénesis y micropropagación *in vitro* de los portainjertos de interés para la citricultura cubana. Esto permitió el desarrollo de líneas mutantes seleccionadas *in vitro*, las cuales son actualmente evaluadas en condiciones controladas y de campo, como parte de un proyecto con el Grupo Empresarial Agrícola (GAG).

En este trabajo se presentan los avances en el establecimiento de una metodología de radiomutagénesis y propagación *in vitro* de portainjertos de interés para la citricultura cubana; en el desarrollo de protocolos para la selección *in vitro* de líneas con posible tolerancia a la sequía y a la alcalinidad de los suelos; así como el estado actual en la evaluación de algunas líneas mutantes.

Materiales y métodos

1. Protocolo de radiomutagénesis y propagación *in vitro* de portainjertos cítricos basado en organogénesis adventicia:

En un estudio previo, se estableció un protocolo de radiomutagénesis y micropropagación *in vitro* basado en organogénesis adventicia en el portainjertos citrumelo Swingle [10]. A partir de este protocolo, se comparó su eficiencia entre cuatro portainjertos (citrumelo Swingle, *Citrus macrophylla*, *Citrus aurantium* y mandarina Cleopatra). Se establecieron las dosis mutagénicas de Cobalto 60 (⁶⁰Co) y se comparó la brotación, el enraizamiento y la adaptación a sustrato.

2. Esquema de selección *in vitro* de tolerancia a sequía:

Se obtuvieron vitroplantas de los portainjertos citrange Carrizo, *Citrus macrophylla* y mandarina Cleopatra, obtenidas según [10] y se subcultivaron *in vitro* por seis meses hasta tener como mínimo dos entrenudos y cinco hojas desarrolladas. Estas se sometieron a tres tratamientos: medio Murashige-Skoog (MS) con un 0 (control), 10, 20 y 30 % de polietilenglicol (PEG-6000) durante 14 días. Las curvas dosis-efecto se desarrollaron considerando el porcentaje de supervivencia a los 30 días de retirado el estrés, en 15 vitroplantas por tratamiento. Se evaluaron ocho caracteres morfofisiológicos (altura de la planta, largo de la raíz, número de hojas, necrosis foliar, necrosis del ápice del brote, oscurecimiento radicular, necrosis del ápice radicular y estrechamiento de las raíces) y se comparó el índice de tolerancia relativo (ITR) de los mismos [11] a los 14 días, respecto al control.

3. Esquema de selección *in vitro* de posible tolerancia a alcalinidad:

Los ensayos se desarrollaron en vitroplantas de citrumelo Swingle obtenidas como se indica en el acápite anterior, las que se sometieron por 30 días a tres tratamientos selectivos: control (C), intermedio (½ Fe) y deficiente de hierro (0 Fe); consistentes en MS, MS conteniendo la mitad de la concentración de las sales de hierro y MS basal sin sales de hierro, respectivamente [12]. Se utilizaron 15 vitroplantas por tratamiento, considerando la supervivencia a los 30 días de retirado el estrés. A los 7, 14, 21 y 28 días de estrés, se evaluaron seis caracteres morfofisiológicos (altura de la planta, número de hojas, número y largo promedio de las raíces y porcentaje de enraizamiento secundario). El grado de clorosis en las hojas se determinó como el número de hojas con síntomas de clorosis, del total.

4. Líneas mutantes:

Se desarrollaron tres lotes de líneas mutantes de *Citrus macrophylla*, *Citrus aurantium*, citrange Carrizo y citrumelo Swingle seleccionadas *in vitro* frente a estrés hídrico. El lote 1 (L1) fue aclimatado y adaptado a sustrato según el protocolo establecido [10] y los lotes L2 y L3 fueron injertados para acelerar su propagación clonal

y su entrada en fase productiva. En diciembre de 2020 se sembraron 39 líneas mutantes en parcela experimental J-10, de la UCTB “Félix Duque”, Jagüey Grande, Matanzas. Cada seis meses se evaluaron variables del crecimiento como la altura de la planta, la relación diámetro altura (D/A), el largo promedio de los entrenudos (LE) y se realizaron evaluaciones fitosanitarias.

5. Análisis de los datos:

Las curvas dosis-efecto se obtuvieron por ajuste de los valores medios en Origin-PC, a partir de un diseño experimental completamente aleatorizado. Se calculó la media, desviación estándar y error estándar de cada carácter evaluado y se determinó el ajuste a la normalidad y la homogeneidad de varianza por las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Levene, respectivamente. Se aplicaron las pruebas de comparación de medias correspondientes (SPSS V19) y los porcentajes se compararon con una prueba de Chi cuadrado (χ^2) de comparación de proporciones (Statgraphics Plus V5.1).

Resultados y discusión

1. Protocolo de radiomutagénesis *in vitro* basado en organogénesis adventicia en tres portainjertos cítricos:

A partir de las curvas de radiosensibilidad se determinaron las dosis mutagénicas para segmentos de epicótilo de cada portainjertos (tabla 1). Excepto para citrumelo Swingle, que resultó más radiorresistente ($DL_{50}=45$ Gy); la radiosensibilidad fue similar para los restantes portainjertos, con DL_{50} entre 26 y 29 Gy. Estos valores están en el rango informado para especies cítricas como la mandarinas Fremont, el tangor Murcott y la lima Rangpur (de 22 a 34,5 Gy) [13]. Aunque se considera que DL_{50} ($\pm 10\%$) garantiza la mayor frecuencia de mutaciones; en nuestros trabajos se recomendó una dosis intermedia que permite inducir mutaciones sin un alto grado de daños deletéreos. En este caso, se utilizó la dosis que reduce en un 30% la supervivencia (DL_{30}).

Tabla 1. Dosis mutagénicas frente a rayos gamma de ^{60}Co

Cultivar	DL_{50}	DL_{30}
<i>Citrus macrophylla</i>	27 Gy	15 Gy
mandarina Cleopatra	26 Gy	15 Gy
<i>Citrus aurantium</i>	29 Gy	18 Gy
citrumelo Swingle	45 Gy	37 Gy

Al utilizar 2,0 mg L⁻¹ de 6-bencilaminopurina (6-BAP) según el protocolo establecido [10], se observaron los mayores valores de brotación adventicia (97 y 90 %) para citrumelo Swingle y *Citrus macrophylla*, respectivamente; un 87 % para mandarina Cleopatra y el valor más bajo, para *Citrus aurantium* (68 %). Al evaluar los tratamientos de enraizamiento [10], se obtuvieron los mayores porcentajes y número de raíces por explante en MS suplementado con ácido 1-naftilacético (ANA) para todos los portainjertos, excepto para mandarina Cleopatra que no mostró diferencias entre tratamientos (figura 1). En el caso de citrumelo Swingle, se observó un mayor número de raíces primarias y de mayor longitud en el medio de suplementado con ácido 4-3 indolbutírico (AIB), sin embargo, a partir de los 30 días se observó un enraizamiento secundario, que alcanzó un valor significativo (92 %) a los 60 días en el medio suplementado con ANA [10]. En general, el mejor comportamiento del enraizamiento en medio suplementado con ANA estuvo en correspondencia con otros estudios en *Citrus* spp. [14]. La adaptación a sustrato estuvo en correspondencia con el grado de enraizamiento previamente obtenido para cada portainjertos. Así, se obtuvo un 92, 62, 60 y 55 % de adaptación a sustrato para citrumelo Swingle, mandarina Cleopatra, *Citrus aurantium* y *Citrus macrophylla*, respectivamente. Tanto para la brotación como para el enraizamiento, la variación en la respuesta estuvo determinada por el genotipo, indicando que, aunque el protocolo de organogénesis adventicia establecido puede ser aplicado en los portainjertos estudiados con un determinado grado de eficiencia, son necesarios estudios adicionales con diferentes concentraciones o combinaciones de reguladores del crecimiento para alcanzar la respuesta óptima de cada genotipo en las diferentes etapas del mismo.

2. Selección *in vitro* de posible tolerancia a la sequía:

Con el análisis de las curvas dosis-efecto, se pudo observar una menor supervivencia de citrange Carrizo, mientras la mayor tolerancia se observó en las vitroplantas de mandarina Cleopatra, en correspondencia con su comportamiento diferencial frente a la sequía (figura 2). A partir de las curvas dosis efecto, se obtuvieron DL_{50} de 15, 17 y 30 % de PEG-6000 para citrange Carrizo, *Citrus macrophylla* y mandarina Cleopatra, respectivamente. Considerando los valores obtenidos en este estudio, para los futuros esquemas de mejora-

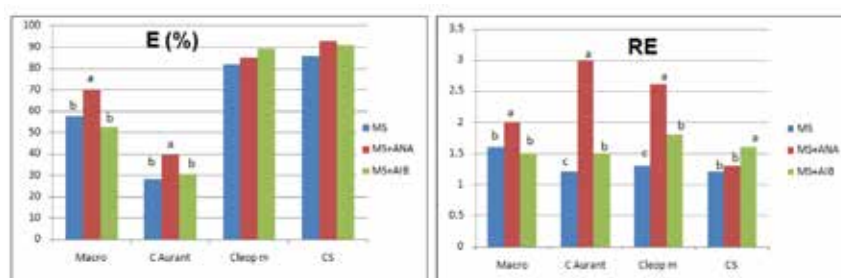


Figura 1. Porcentaje de enraizamiento (E) y número de raíces por explante (RE) para brotes adventicios de *Citrus macrophylla*, *Citrus aurantium*, mandarina Cleopatra y citrumelo Swingle en medio de enraizamiento MS, MS+ANA y MS+AIB. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

miento, se determinó aplicar dosis selectivas iguales o superiores a la DL_{50} del genotipo más susceptible. Por ello, en los lotes de líneas mutantes desarrollados posteriormente, se aplicaron dosis selectivas de 15 y de 20 % de PEG-6000 por 14 días.

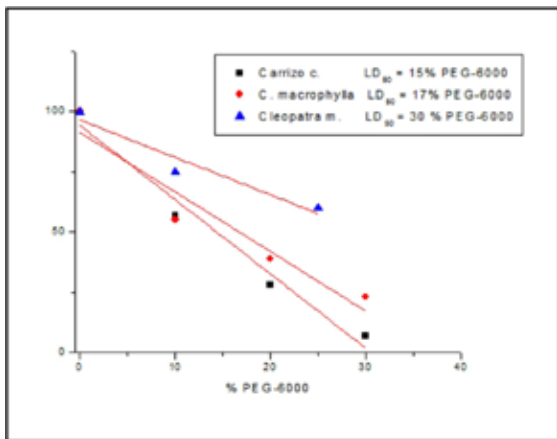


Figura 2. Curvas dosis-efecto y valores de DL_{50} para citrange Carrizo, mandarina Cleopatra y *Citrus macrophylla*, basados en la supervivencia de las vitroplantas frente a PEG-6000 por 14 días.

Se comparó el ITR de ocho caracteres morfofisiológicos, para analizar su posible utilidad como descriptores de la respuesta *in vitro* frente a estrés hídrico en portainjertos cítricos. Se obtuvo que cuatro de ellos (la altura de la planta, la necrosis foliar, la necrosis del ápice radicular y el estrechamiento de las raíces), fueron diferentes del control (figura 3), sugiriendo su utilidad para la selección de genotipos con tolerancia al estrés hídrico *in vitro*.

Con el fin de corroborar estos resultados, se prevén estudios adicionales para evaluar la correlación de estos caracteres con la supervivencia *ex vitro* de las plantas, así como su comportamiento en ensayos de estrés hídrico en condiciones controladas y en campo.

3. Selección *in vitro* de posible tolerancia a alcalinidad:

El cambio climático, no solo provoca la sequía. El incremento de las temperaturas, combinadas con el mal manejo de la fertilización y la calidad del agua de rie-

go, han conllevado a la alcalinización de algunos de estos, como es el caso de la región de Jagüey Grande, importante zona cítrica del país. Los suelos alcalinos inducen una fuerte clorosis férrica, que afecta principalmente a los portainjertos trifoliados. Por ello, se inició un estudio para establecer un esquema de selección *in vitro* de mutantes con posible tolerancia a la alcalinidad.

La solubilidad del hierro está muy influenciada por el pH del suelo. En condiciones ácidas predomina la forma ferrosa (Fe^{2+}) que es soluble; mientras que en medio alcalino, el Fe^{2+} es oxidado a la forma férrica (Fe^{3+}), que precipita como óxidos e hidróxidos disminuyendo su biodisponibilidad. Bajo este principio, en muchos estudios de evaluación de portainjertos cítricos y de otros frutales [12] se ha utilizado como método selectivo, un medio deficiente de hierro. En este trabajo se diseñó un esquema de selección *in vitro* con tres tratamientos: control, intermedio y deficiente de hierro en el portainjerto citrumelo Swingle.

Con respecto a los caracteres evaluados, se observó que la altura de la planta y el número de raíces mostraron una afectación en función del déficit de hierro a partir de los 21 y 28 días de estrés, respectivamente (figura 4 A y B). En este ensayo *in vitro*, la clorosis en hojas se manifestó como un aclaramiento del color verde en los espacios entre las nervaduras. El grado de clorosis tuvo un incremento marcado a partir de los 14 días y también en función del déficit de sales de hierro en el medio (figura 4 C y D). Por otra parte, la supervivencia de las vitroplantas a los 30 días de retirado el estrés fue de 87, 73 y 53 % para el control, el medio $\frac{1}{2}$ Fe y el medio 0 Fe, respectivamente, indicando que el medio MS sin sales de hierro (0 Fe) puede ser utilizado como medio selectivo para el desarrollo de lotes de líneas mutantes.

4. Líneas mutantes en evaluación:

Las líneas mutantes desarrolladas serán evaluadas frente a estrés hídrico, en condiciones semicontroladas y de campo. Para ello, además de los lotes obtenidos por enraizamiento de los brotes adventicios [10],

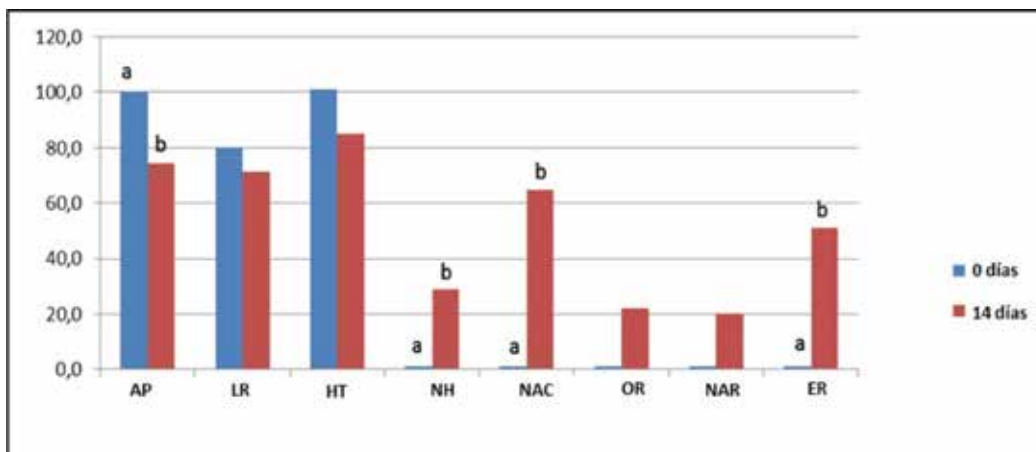


Figura 3. Índice de tolerancia relativo (ITR) de ocho caracteres morfofisiológicos: altura de la planta (AP), largo de la raíz (LR), número total de hojas (HT), necrosis de la hoja (NH), necrosis del ápice caulinar (NAC), oscurecimiento de la raíz (OR), necrosis del ápice radicular (NAR) y estrechamiento de las raíces (ER), evaluados en *Citrus macrophylla*. Letras diferentes corresponden a diferencias significativas (Test χ^2 de comparación de proporciones, $p < 0.05$).

se generaron nuevos lotes injertando las líneas obtenidas. Esto permite acelerar su desarrollo y entrada en madurez reproductiva, para obtener líneas mutantes regeneradas a partir de semilla y evaluar el comportamiento de su sistema radicular pivotante. Por otra parte, es importante identificar si existen variantes con arquitectura reducida (menor altura, mayor relación D/A, menor largo promedio de entrenudos) pues estas son de interés para las plantaciones de alta densidad,

como una de las estrategias de la nueva citricultura frente al HLB.

En diciembre de 2020 se sembraron las primeras 39 líneas mutantes en parcela experimental J-10, de la UCTB “Félix Duque”, Jagüey Grande, Matanzas. A finales de 2022 dos líneas mantuvieron una mayor relación D/A, mientras que otras cuatro resultaron de interés por el acortamiento de los entrenudos. De ellas, una línea de citrange Carrizo resultó de interés por ambas carac-

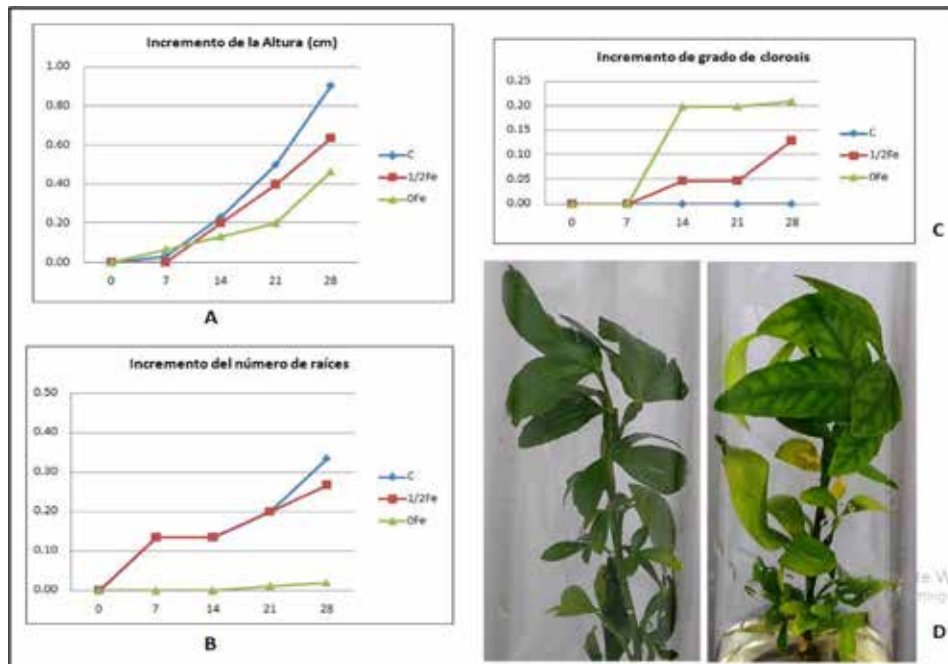


Figura 4. Incremento de la altura de la planta (A), el número de raíces (B) y el grado de clorosis (C) en vitroplantas de citrumelo Swingle sometidas a estrés por déficit de hierro. (D) Clorosis en hojas de vitroplanta sometida a medio sin sales de hierro (0 Fe) (a la derecha) y planta control (a la izquierda).

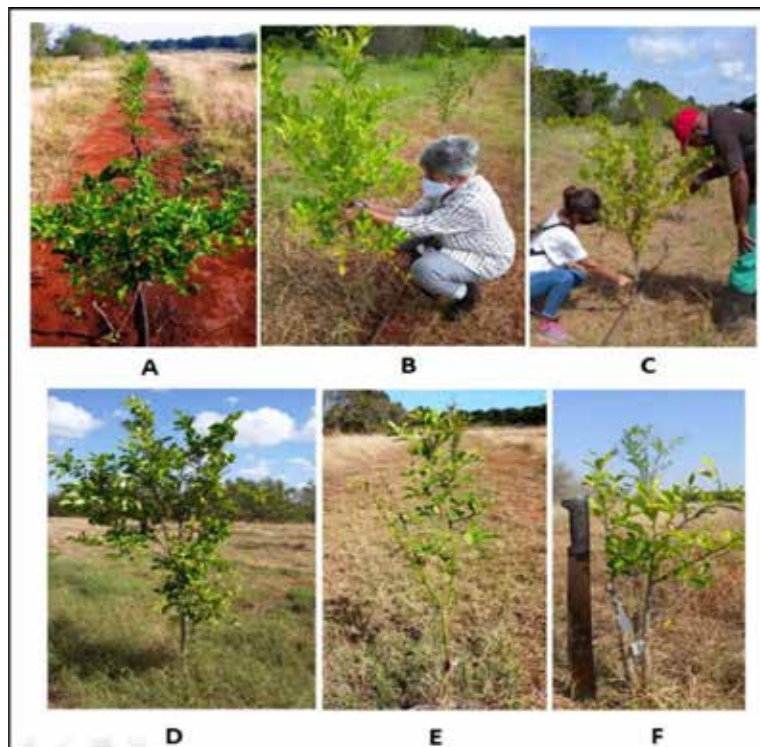


Figura 5. Lotes 1, 2 y 3 de líneas mutantes sembradas en diciembre de 2020 en estación J-10, Jagüey Grande (A). Evaluaciones fitosanitarias (B) y morfológicas (C) en noviembre de 2021. Líneas mutantes de interés identificadas: *Citrus aurantium* de buen vigor y comportamiento fitosanitario (D), citrange Carrizo de buen vigor y comportamiento fitosanitario (E), citrange Carrizo de bajo porte y menor longitud de entrenudos (F).

terísticas (bajo porte y entrenudos más cortos) (figura 5). Estos caracteres deben seguirse monitoreando a lo largo del desarrollo vegetativo de las plantas. Desde el punto de vista fitopatológico, se sigue el comportamiento de cinco líneas que mantienen menor incidencia de plagas y menos síntomas de enfermedades.

Conclusiones

El protocolo de radiomutagenesis *in vitro* basado en organogénesis adventicia permitió desarrollar líneas mutantes de cuatro protainjertos cítricos (citrumelo Swingle, *Citrus macrophylla*, *Citrus aurantium* y citrange Carrizo); aunque la eficiencia del mismo estuvo determinada por las diferencias entre genotipos. El esquema de selección *in vitro* frente a estrés hídrico permitió determinar las dosis selectivas de PEG-6000 para futuros esquemas de radiomutagénesis, así como identificar cuatro posibles descriptores (altura de la planta, necrosis foliar, necrosis del ápice radicular y estrechamiento radicular). En este trabajo se evaluó por primera vez un protocolo de selección *in vitro* de tolerancia a la alcalinidad, basado en un medio selectivo deficiente de hierro. La clorosis férrica parece ser buen descriptor de la respuesta *in vitro*. Finalmente, se identificaron dos líneas con mayor relación D/A, cuatro resultaron de interés por el acortamiento de los entrenudos, una de ellas de bajo porte y cinco con mejor vigor y comportamiento fitopatológico.

Referencias bibliográficas

- [1]. KHARKWAL MC. History of plant mutation breeding and global impact of mutant varieties. In: Mutation Breeding for Sustainable Food Production and Climate Resilience. Singapore: Springer, 2023. p. 25-55. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9720-3_2
- [2]. GONZÁLEZ CEPERO MC, GUILLAMA ALONSO R, HORTA FERNÁNDEZ D, ÁLVAREZ GONZÁLEZ A, et. al. Main results of plant mutation induction for abiotic stress in Cuba. International Symposium on Plant Mutation Breeding and Biotechnology. FAO/IAEA. August 27-31, 2018. Vienna, Austria.
- [3]. ÁLVAREZ A, FUENTES JL, DEUS JE, et. al. Genetic Diversity analysis in rice mutants using isozyme and morphological markers. Cultivos Tropicales. 2000; 21(4): 39-44.
- [4]. FUENTES JL., CORNIDE MT, ÁLVAREZ A., et. al. Genetic diversity analysis of rice varieties (*Oryza sativa* L.) based on morphological, pedigree and DNA polymorphisms data. Plant Genetic Resources. 2005; 3(3): 353-359.
- [5]. FUENTES JL., SANTIAGO L, RODRÍGUEZ NN, et. al. Combining zygotic embryo culture and mutation induction to improve salinity tolerance in avocado. In: Induced mutations in Tropical Fruit Trees. IAEA TECDOC-1615. Vienna: IAEA, 2009. p. 71-82.
- [6]. ÁLVAREZ A, ALONSO A, ÁLVAREZ M, et. al. Metodología de radiomutagénesis y selección *in vitro* para la tolerancia a la sequía utilizando embriones cigóticos de aguacatero. CitriFrut. 2013; 30(2): 22-29.
- [7]. COTO O, RODRÍGUEZ NN, FUENTES JL; ÁLVAREZ A, et. al. Mutation-based breeding of avocado in Cuba: state of the art. In: Mutagenesis: exploring genetic diversity of crops. (Chapter 13). Wageningen Academic Publishers, 2014. p. 265-282.
- [8]. BEOZZO R, LOPES SA, PEDREIRA M, WULFF NA, et. al. Overview of citrus huanglongbing spread and management strategies in Brazil. Tropical plant pathology. 2020; 45: 251-264
- [9]. FEBLES GONZÁLEZ JM, SOMOZA CABRERA J, VEGA MB, et. al. Effects of climate change on soils of cattle regions from the southern karst plain Habana - Matanzas, Cuba. Cuban J. Agric. Sci. 2017, 51(1): 139-151.
- [10]. ÁLVAREZ A., MARTÍNEZ A, ZAMORA V, et. al. Comparación de dos protocolos de radiomutagénesis *in vitro* para el portainjerto cítrico citrumelo Swingle. Cultivos Tropicales. 2022; 43(1): 07.
- [11]. GONZÁLEZ CEPERO MC & MARTÍNEZ ROMERO A. Selección de mutantes de arroz de buen comportamiento agronómico en condiciones de bajo suministro de agua. Cultivos Tropicales. 2016; 37(1): 102-109.
- [12]. MARTÍNEZ CUENCA M.R., QUIÑONES A., FORNER GINER MA. Screening of 'King' mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) × Poncirus trifoliata ((L.) Raf.) hybrids as citrus rootstocks tolerant to iron chlorosis. 2016. Scientia Horticulturae. 2016; 198: 61-69. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.038.
- [13]. GONZAGA DL, LATADO RR, TULMAN NA, PIO RM. Radiosensibilidad de dois tipos de propagulos de citros. Bragantia, Campinas. 2011; 70(1): 13-18.
- [14]. KUMAR K, GILL MIS, GOSAL SS. Somatic Embryogenesis, *in vitro* selection and plantlet regeneration for citrus improvement. In: Biotechnologies of crop improvement. Vol 1. 2018. p. 373-406.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit / Conceptualización: Alba Álvarez González. **Análisis formal:** Alba Álvarez González. **Investigación:** Alba Álvarez González, Livia Santiago Hernández, Sandra Carro Palacios, Victoria Zamora Rodríguez, Jorge R. Cueto Rodríguez, María Caridad González Cepero, Armando Chávez Ardanza, Alina Puente Sánchez. **Metodología:** Alba Álvarez González. **Supervisión:** Livia Santiago Hernández, Victoria Zamora Rodríguez. **Adquisición de fondos Administración de proyecto:** Alba Álvarez González. **Redacción – borrador original:** Alba Álvarez González. **Redacción – revisión y edición:** Alba Álvarez González, Victoria Zamora Rodríguez, Jorge R. Cueto Rodríguez, María Caridad González Cepero.

Declaración de financiamientos: Los trabajos fueron financiados a través del contrato de los proyectos ARCAL RLA/5/063 "Apoyar el Mejoramiento Genético de Subutilizados y otros cultivos importantes para el desarrollo agrícola sostenible en comunidades rurales", RLA/5/068 "Aumento del Rendimiento y del Potencial Comercial de los Cultivos de Importancia Económica" y del proyecto Ramal "Aplicación de tecnologías nucleares para la obtención de genotipos con mayor adaptación a los efectos del cambio climático en diferentes cultivos de importancia económica" de la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada. Desde 2020 está siendo financiado también por el Proyecto Empresarial del Grupo Agrícola de Cuba (GAG-2077) "Desarrollo y evaluación en condiciones de campo de líneas mutantes de portainjertos cítricos con tolerancia a estreses abióticos".

Potencialidad del CEADEN para desarrollar sistemas inalámbricos de monitoreo ambiental y su empleo para la conservación del patrimonio cultural

 Ana Ester Cabal Rodríguez¹,  Lorenzo Hernández Tabares¹,  Isabel Otero Abreu¹,
 Dania Rodríguez Nápoles¹,  Piet Van Espen²

¹ Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana.

² Departamento de Física, Universidad de Amberes, Bélgica

acabal@ceaden.edu.cu

Resumen

El Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) demostró la capacidad de asimilar las nuevas tecnologías de internet de las cosas desarrollando un sistema inalámbrico de monitoreo ambiental. El sistema está basado en una red inalámbrica de sensores, empleando plataformas electrónicas de hardware y software libres como Arduino y conectadas entre sí mediante la interfaz inalámbrica de comunicación LoRa. El sistema posibilitó la medición continua de parámetros ambientales cubriendo grandes áreas dentro del Museo Nacional de Bellas Artes. La larga experiencia del laboratorio de microbiología facilitó la creación de un procedimiento para el muestreo microbiano, realizado en paralelo con las mediciones ambientales. La combinación del monitoreo ambiental con el muestreo microbiológico mostraron que pueden ser herramientas que ayuden a los conservadores de arte a la preservación del patrimonio cultural.

Palabras clave: muestreo; sensores; objetos culturales; conservación; microanálisis, internet; microorganismos; calidad ambiental.

Potential of CEADEN to develop wireless environmental monitoring systems and their use for cultural heritage conservation

Abstract

Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) demonstrated the ability to assimilate new Internet of Things technologies by developing a wireless environmental monitoring system. The system is based on a wireless network of sensors, using free hardware and software electronic platforms such as Arduino and LoRa wireless communication interface. It enabled the continuous measurement of environmental parameters covering large areas within the National Museum of Fine Arts. The long experience of the microbiology laboratory facilitated the creation of a procedure for microbial sampling, carried out in parallel with environmental measurements. The combination of environmental monitoring with microbiological sampling showed that they can be tools that help art conservators to preserve cultural heritage.

Key words: sampling; sensors; cultural objects; preservation; microanalysis; internet; microorganisms; environmental quality.

Introducción

Preservar el patrimonio cultural heredado de nuestros ancestros y pasarlo a las nuevas generaciones con el menor daño posible es una tarea primordial de los guardianes de ese patrimonio. Especialistas del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear, (CEADEN), desde comienzos del siglo XXI han interactuado con colegas de instituciones encargadas de preservar el patrimonio cul-

tural en nuestro país. Existen ejemplos de esa colaboración que ha sido desde el uso de métodos nucleares para el estudio de cerámica arqueológica [1, 2] y de pinturas [3] del Gabinete de Arqueología de la Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana y del Consejo Nacional de Patrimonio Cultural, hasta la determinación de la carga microbiana de documentos de la Cinemateca de Cuba. En el marco de la colaboración con la Universidad de Amberes, Bélgica, colegas del CEADEN han participa-

do en el desarrollo de sistemas, empleando diversas técnicas de rayos X, para la investigación de pinturas [4-9].

De la experiencia adquirida trabajando en esta temática se constató que la conservación de las obras de arte está fuertemente influenciada por la calidad de las condiciones de su preservación. Los altos valores de humedad relativa y temperatura, propios de los países tropicales, unido a la contaminación ambiental en zonas urbanas y al inapropiado acondicionamiento de los locales destinados a exponer o guardar las colecciones ponen en peligro su durabilidad en el tiempo. Estos factores también son los que acentúan el nivel de contaminación microbiana de los ambientes cerrados, como los museos. Una herramienta necesaria para seleccionar y mantener las mejores condiciones de preservación es el monitoreo sistemático del ambiente en que se guardan las colecciones [10, 11], el análisis de sus parámetros físicos (temperatura, humedad relativa, presión, intensidad de la luz visible y ultravioleta), químicos (material particulado en el aire, concentración de gases contaminantes), así como microbiológicos. La medición continua y simultánea de un variado número de parámetros ambientales da una información de gran utilidad sobre los riesgos a los cuales se expone la colección, permitiendo detectar las tendencias o desviaciones de las condiciones ambientales establecidas y así identificar posibles daños incipientes y actuar antes de que estos sean irreversibles.

El uso de tecnologías en apoyo a la conservación del patrimonio cultural se ha incrementado, debido a que desde comienzos del siglo XXI se ha producido un progreso en la electrónica de hardware y software libres, las comunicaciones inalámbricas y la producción de sensores de pequeño y bajo costo. Para el monitoreo de las condiciones ambientales en museos y archivos ya existen en el mercado algunos sistemas, varios de los cuales solo miden humedad y temperatura [12-17]. En muchos casos la electrónica y la programación de esos sistemas no es de código abierto y por lo tanto no pueden ser modificadas o sólo serlo mediante pago, a lo que se agrega además la desventaja de que tienen un precio elevado. Esta electrónica de hardware y software libres puede ser una alternativa importante en el desarrollo de sistemas especializados para el cliente con un costo asequible. Existen algunos ejemplos de desarrollo de sistemas específicos de adquisición de datos para el uso en la conservación del patrimonio cultural [18-21]. Además se constató en la bibliografía que en nuestro país existen serios trabajos de estudios ambientales microbianos. [22-24].

Aprovechando la experiencia del CEADEN en el trabajo con sensores ambientales, en el desarrollo de sistemas automáticos y del grupo de microbiología se asumió el reto de desarrollar un sistema inalámbrico de monitoreo ambiental simultáneo y continuo de mediano costo, específico para las condiciones de nuestro país. Empleando plataformas electrónicas de hardware y software libres como Arduino, conectadas en red con la interfaz inalámbrica de comunicación LoRa, se desarrolló un sistema automatizado que sigue la tendencia actual

del Internet de las Cosas (IoT). Paralelamente, se realizó además un muestreo microbiológico, de manera que se acumulara suficiente información que pudiera relacionar los resultados de las mediciones del monitoreo de los parámetros físicos con los del microbiano.

Debido al interés mostrado por las autoridades del Museo Nacional de Bellas Artes la comprobación del prototipo a desarrollar se realizó en esa institución. Luego de revisar el estado del arte de sistemas de monitoreo ambiental en sitios de patrimonio cultural, así como de interactuar con especialistas del Museo Nacional de Bellas Artes, estudiando las características tanto técnicas como ambientales de los locales donde se encuentran las obras de arte, y definiendo los parámetros más importantes a medir para determinar la calidad del aire en el museo, se diseñó el esquema del sistema de monitoreo ambiental a desarrollar.

Diseño de sistema inalámbrico de monitoreo ambiental para su uso en museos y otros sitios patrimoniales

1. Sistema de monitoreo ambiental

El sistema seleccionado se conformó en base a la llamada red de sensores inalámbricos “WSN” por su nombre en inglés (*wireless sensor network*) (figura 1), red que en la actualidad se usa ampliamente en aplicaciones IoT [25-29], donde se pueden monitorear diferentes parámetros mediante los sensores y en dependencia del valor de los mismos tomar acciones.

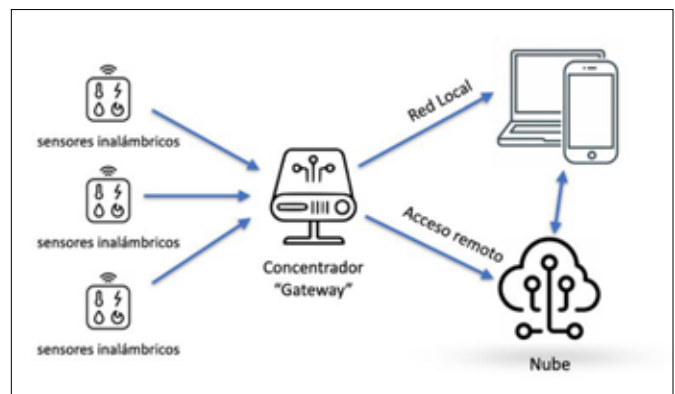


Figura 1. Esquema de una red de sensores inalámbricos usada en aplicaciones IoT.

La red está conformada por nodos de sensores inalámbricos, los cuales se comunican con un concentrador o “gateway”, que permite la transmisión de la información dentro de una red local o a través de acceso remoto, garantizando la accesibilidad de los datos de las mediciones en todo momento y de cualquier lugar.

Para el diseño del sistema de monitoreo ambiental se estudiaron los componentes más importantes de esta red, que son: los sensores, el hardware de conexión y el tipo de comunicación inalámbrica, los cuales serán explicados a continuación:

1.1. Comunicación inalámbrica

Se realizó un estudio sobre los diferentes tipos de comunicación inalámbrica tales como los que confor-

man las redes personales “PAN” (WiFi, Bluetooth), las redes de amplio alcance “WAN” (donde se incluyen las 4G, 5G) o las de bajo consumo y largo alcance “LPWAN” (Sigfox, LoRaWAN), comparando sus características tales como: alcance y transferencia de datos, consumo de energía y uso de espectro de radiofrecuencia de banda libre o con licencia mediante pago.

Del estudio se decidió escoger la comunicación LoRa (Long Range, que quiere decir de largo alcance), que es un tipo de modulación en radiofrecuencia patentado por Semtech y es la parte física del protocolo de red LoRaWAN, sus características son [29-30]:

- Bajo consumo (hasta 10 años con una batería según el fabricante Semtech).
- Largo alcance, de 10 a 20 km (rural), de 2 a 5 km (urbano).
- Baja transferencia de datos (hasta 255 bytes).
- Alta tolerancia a las interferencias.
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168dB).
- Basado en la modulación de espectro expandido tipo “chirp”.
- Frecuencias de trabajo en el espectro sin licencia de la banda de radio ISM (Industrial, Científica y Médica): 915 MHz en Estados Unidos, 868 MHz en Europa, 433 MHz en Asia.
- Se pueden conectar hasta 1000 nodos o sensores con un concentrador LoRa.

Esta tecnología permite que los dispositivos conectados intercambien pequeñas cantidades de datos a baja velocidad con un largo alcance y bajo consumo de energía. Estos son requisitos importantes para la medición de parámetros en museos donde se deben cubrir grandes áreas y se necesitan dispositivos que estén alimentados con baterías.

1.2. Sensores

Debido a la amplia gama de sensores que existen en la actualidad, se escogieron los sensores que permiten medir los parámetros determinantes de la calidad del ambiente en el museo, los cuales fueron: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, intensidad de rayos ultravioletas UVA y UVB e intensidad de la luz. También pueden adicionarse otros sensores, para estudios específicos o en determinados lugares, tales como de movimiento, de gases, conteo de partículas finas. Todos los sensores seleccionados se acoplan con el sistema por medio de interfaces de comunicación en serie I2C ó SPI.

1.3. Hardware de conexión

Se basó en placas de desarrollo de bajo costo con software libre, principalmente usando la plataforma de creación de electrónica de código abierto basada en hardware y software libres Arduino [31]. Existe una gran variedad de estas tarjetas con microcontroladores fabricadas por Arduino, lo cual permitió la creación de un sistema de estaciones satélites de medición, que se comunican de manera inalámbrica con una estación máster, la cual tiene como misión el control de las estaciones satélites en tareas como la transferencia y el almacenamiento de datos.

El sistema de monitoreo ambiental conformado (figura 2) es el siguiente:

- Estaciones satélites de medición compuestas por dos módulos de Arduino: MKR WAN 1310 y MKR ENV, alimentándose con baterías de Li (o Pb usando un regulador de voltaje de 3.3 V para su uso en las salas de exposición del museo), las características de cada módulo se muestran en la tabla 1.

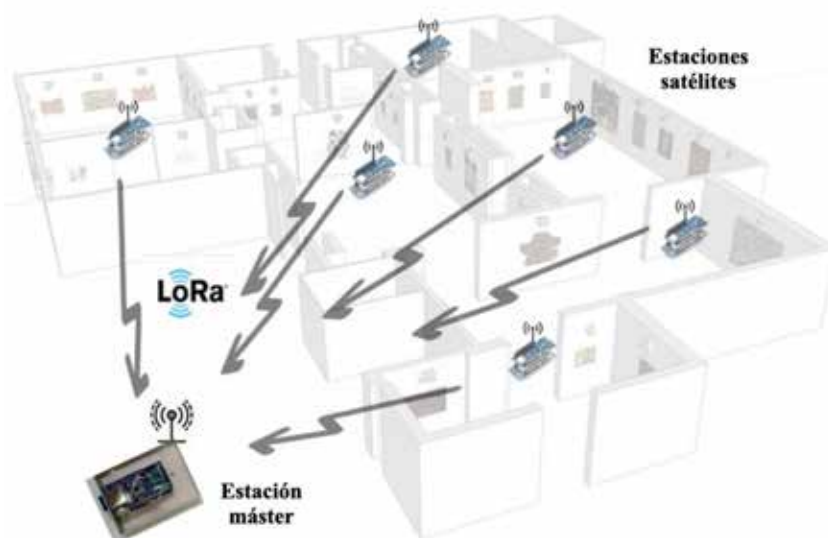


Figura 2. Sistema de monitoreo ambiental compuesto por 6 estaciones satélites de medición y una estación máster.

- Estación máster con la combinación de la tarjeta con microcontrolador ATmega2560 de Arduino MEGA y la tarjeta Adafruit RFM95W de radio LoRa, conectada a la red eléctrica, las características de cada módulo se muestran en la tabla 1.
- La comunicación inalámbrica entre las estaciones satélites y la estación máster seleccionada del tipo radio LoRa a frecuencia de 868 MHz.
- Las mediciones se guardan en tarjetas SD.
- El software de funcionamiento del sistema se desarrolló en el lenguaje C++ conjuntamente con ARDUINO IDE y permite la medición de los parámetros ambientales, el almacenamiento de los datos y la comunicación entre los dispositivos.

2. Sistema de monitoreo microbiano

El muestreo microbiológico se realizó en el mismo local y al mismo tiempo en que se realizaron las mediciones de monitoreo ambiental, de manera tal que al acumularse suficiente información pudieran relacionarse los parámetros de ambas mediciones. Por esta razón se consideró conveniente aplicar el método de placa expuesta, tal como se describe en la NC-26-211 [32], se colocaron las placas con medios de cultivo en lugares próximos y al mismo nivel que los sensores. Teniendo en cuenta que el método de muestreo es pasivo, se determinó colocar 4 placas por cada sensor, con al menos 2 medios de cultivo como mínimo. Las placas estuvieron abiertas durante 15-20 minutos, luego se cerraron, sellaron y se trasladaron al laboratorio, donde se pusieron a incubar durante 5 días. Posteriormente se contaron las colonias, se describió la morfología y se conservaron los microorganismos aislados para posterior descripción microscópica e identificación taxonómica, al menos hasta el nivel de género. Los conteos reportados corresponden a una hora de exposición al aire, extrapolando los resultados obtenidos a ese tiempo de referencia.

Las mediciones se realizaron principalmente cerca del mediodía, ya que autores consultados [22] muestran que la mayoría de los hongos detectados en el aire de La Habana muestran un patrón diurno, con el mayor pico previo al mediodía.

Comprobación del primer prototipo de sistema de monitoreo ambiental y microbiano en el Edificio de Arte Universal del Museo Nacional de Bellas Artes

Durante los años 2020 y 2021 se realizaron diversas mediciones en el Museo Nacional de Bellas Artes para comprobar el funcionamiento del sistema de monitoreo ambiental. La mayoría de ellas se hicieron sin la afluencia de público en el museo, debido a las regulaciones por la pandemia COVID 19. Primeramente se realizó la prueba del alcance de la comunicación por LoRa entre la estación máster y las estaciones satélites (conocido como la medición del “link budget”). La estación máster se colocó en un lugar específico de la planta baja y los satélites en todas las áreas de exposición y almacenamiento del Edificio de Arte Universal. Se comprobó buen alcance de la señal de comunicación en la mayoría de las áreas.

Posteriormente se realizaron muestreos ambientales continuos por un período de 15 días, midiendo en cada minuto los parámetros de temperatura, humedad, intensidad de la luz o iluminancia y cantidad de partículas finas. Las áreas del Edificio de Arte Universal analizadas fueron:

- Sala España; 3er piso, 2021
- Sala Francia; 4to piso, 2021
- Sala Antigüedad; 4to piso, 2020
- Sala Gran Bretaña e Italia; 5to piso, 2021
- Sala Flamenca; 5to piso, 2020
- Salas Latinoamérica y Estados Unidos; planta baja, 2020, 2021
- Sala exposición transitoria en planta baja; 2020, 2021

Tabla 1. Características técnicas de los componentes del sistema de monitoreo.

<p>Arduino MKR WAN 1310</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador de 32 bits • módulo de radio LoRa 868 MHz • 8 pines I/O digitales • 7 pines I analógicas (CAD 8/10/12 bit) • 1 pin O analógica (CDA 10 bit) • CPU memoria Flash 256 kB (interna) • QSPI memoria Flash 2 Mbyte (externa) • Voltaje trabajo 3.3 V • ~ 40 € 	<p>Arduino MKR ENV</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiene incluido los sensores <ol style="list-style-type: none"> 1. LPS22HB: Presión atmosférica 2. HTS221: Temperatura y humedad 3. VEML6075: Intensidad de luz ultravioleta UVA y UVB, índice UV 4. TEMT600: Intensidad de luz • Voltaje trabajo 3.3 V • Tarjeta SD • Comunicación: I2C/ Analógica • ~ 35 €
<p>Arduino MEGA ATmega2560</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador de 8 bits, reloj 15 MHz • 54 pines I/O digitales, • 16 pines I analógicas • Memoria Flash 256 kB, EEPROM 4 kB • Voltaje trabajo 5 V • ~ 45 € 	<p>Adafruit RFM95W</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transmisor-receptor de radio LoRa • 868 o 915 MHz • Potencia de salida 20 dBm • Rango de 2 km • Voltaje trabajo 3.3 V • ~ 25 €

- Almacén de Pinturas VI; sótano, 2020, 2021
- Almacenes de Pinturas VII e Instalaciones; sótano, 2021

Un ejemplo de estas mediciones son los gráficos mostrados en la figura 3, que corresponden al monitoreo en el mes de febrero del 2020 en un área de exposición y otra de almacenamiento. Una estación satélite se colocó sobre una vitrina que contiene cerámicas etruscas, la cual está situada cerca de una ventana, en el ala sureste del cuarto piso del museo. El gráfico con las mediciones de iluminancia muestra los máximos valores cerca de las 9 de la mañana. La temperatura promedio fue de $24,2 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$. Se observan fluctuaciones tanto de la temperatura como de la humedad relativa, cuyo valor promedio fue de $65,5 \pm 3,2 \%$. La segunda estación satélite se colocó en la sala VI de almacenamiento de pinturas, ubicada en el sótano del edificio, en la zona central. La temperatura promedio fue de $22,7 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, mientras que la humedad relativa fue de $62,2 \pm 2,3 \%$. En las áreas de almacenamiento los parámetros ambientales se mantuvieron más estables, aunque en ocasiones por encima de los valores recomendados. En varias mediciones se detectó que no se cumplen los parámetros de temperatura y humedad relativa que debería entregar el sistema de clima.

La información aportada por el monitoreo muestra que existen condiciones de riesgo para la preservación de los objetos expuestos. Es necesario realizar un estudio durante un tiempo prolongado (algunos meses)

para entender mejor estos riesgos. De todos modos los resultados de las mediciones preliminares mostraron que se pueden mejorar las condiciones de los locales de exposición y almacenamiento, eliminando la influencia de la luz solar, así como lograr el valor requerido y una mayor estabilización de parámetros ambientales como humedad relativa y temperatura con un adecuado funcionamiento del sistema de refrigeración del museo. En el futuro se deben correlacionar los parámetros ambientales medidos en el interior del museo con las condiciones meteorológicas presentes durante el período de medición.

Paralelamente al estudio ambiental se realizaron los muestreos microbiológicos para detectar la presencia de hongos y bacterias. El medio de cultivo Agar Dextrosa Sabouraud es el que mostró más eficiencia para el recobrado de los hongos ambientales en el microambiente estudiado (figura 4). Por otro lado el género *Aspergillus* fue el más frecuentemente aislado, lo cual corresponde por lo reportado por otros autores [22]. También se constató incremento de la carga fúngica ambiental en el período de afluencia de público. Se determinó que se necesitan más datos, o sea realizar más muestreo microbiano durante el monitoreo ambiental, para poder identificar una correlación entre los resultados de las mediciones de los parámetros físicos con los microbianos.

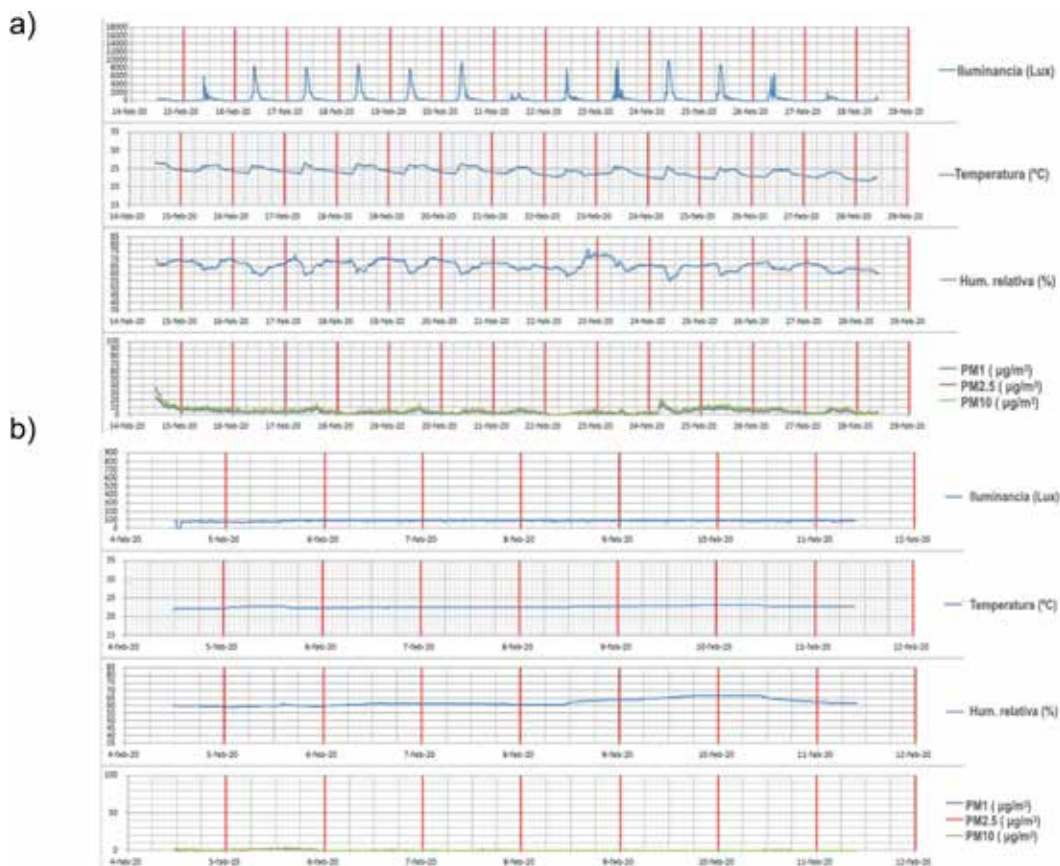


Figura 3. Monitoreo de parámetros ambientales realizado en el mes de febrero del 2020 en a) un área de exposición y b) otra de almacenamiento.



Figura 4. Los hongos filamentosos ha sido el grupo microbiano más frecuente en el microambiente estudiado.

Conclusiones

Se diseñó un sistema inalámbrico de monitoreo ambiental, asimilando la tecnología de internet de las cosas. Este sistema se comprobó en el Museo Nacional de Bellas Artes con resultados alentadores. Se constató que todavía se necesitan perfeccionar algunos aspectos importantes para tener un sistema de monitoreo ambiental profesional que ayude a preservar las obras del patrimonio cultural. Entre estos aspectos se encuentra aumentar el tiempo de duración de autosuficiencia de las estaciones satélites, correlacionar los parámetros ambientales dentro del museo con las condiciones meteorológicas en el exterior, realizar una mayor cantidad de mediciones en todas las áreas del museo para tener mayor información y lograr establecer una correlación entre los parámetros físicos y los microbiológicos, así como evolucionar a la comunicación de una red LoRaWAN clásica.

El laboratorio de microbiología del CEADEN con su larga experiencia en la determinación de la carga microbiana de diferentes productos y ambientes, específicamente en el caso del muestreo microbiano en el Museo Nacional de Bellas Artes, contribuyó a demostrar que la microbiología puede ser una herramienta que aporte las evidencias necesarias para lograr la aplicación de tecnologías encaminadas a la reducción de los niveles de contaminación y de esta forma a la preservación del patrimonio cultural.

Referencias bibliográficas

- [1]. PADILLA R, SCHALM O, *et al.* Microanalytical characterization of surface decoration in Majolica pottery. *Analytica Chimica Acta*. 2005; 535(1-2): 201-211.
- [2]. PADILLA R, P.J.M. VAN ESPEN, *et al.* Compositional classification of archaeological pottery based on INA and SEM-EDX. *J. Trace Microprobe Tech.* 2003; 21(4): 677-695.
- [3]. HERRERA V, ORTUETA M, *et al.* Caracterización de materiales (pigmentos y cerámicas) para la conservación del patrimonio cultural y social en ciudad de La Habana. *Nucleus*. 2019; (66): 18-21.
- [4]. BOLAÑOS L, CABAL A, *et al.* Sistema de detección de rayos x para obtener imágenes digitales en el estudio de obras de arte. *Nucleus*. 2008; (43): 9-13.
- [5]. SCHALM O, CABAL A, VAN ESPEN P, *et al.* Improved radiographic methods for the investigation of paintings using laboratory and synchrotron X-ray sources. *J Anal At Spectrom.* 2011; 26: 1068-1077.
- [6]. LEYVA D, CABAL A, VAN ESPEN P, *et al.* Simulation and evaluation of the absorption edge subtraction technique in energy-resolved X-ray radiography applied to the cultural heritage studies. *Nucleus*. 2011; (50): 24-30.
- [7]. CABAL A, LEYVA D, SCHALM O, VAN ESPEN P. Possibilities of energy-resolved x-ray radiography for the investigation of paintings. *Anal. Bioanal. Chem.* 2012; 402(4): 1471-1480.
- [8]. CABAL A, SCHALM O, *et al.* Comparison of x-ray absorption and emission techniques for the investigation of paintings. *X-Ray Spectrom.* 2015; 44: 141-148.
- [9]. SCHALM O, LEYVA D, CABAL A, VAN ESPEN P, *et al.* Exploring the possibility of radiography in emission mode at higher energies: Improving the visualization of the internal structure of paintings. *Nucleus*. 2018; (64): 42-48.
- [10]. VAN DUIN P. Climate effects on museum objects. The need for monitoring and analysis. *Conservation Perspectives. The GCI Newsletter Fall.* 2014; 29(2): 13-15.
- [11]. ASHLEY-SMITH J. Challenges of managing collection environments, *Conservation Perspectives, The GCI Newsletter Fall.* 2018; 33(2): 4-9.
- [12]. LASCAR electronics: Temperature & Humidity Monitoring For Museums & Heritage. <https://www.lascarelectronics.com/applications/museums-exhibitions> [consulta: 13 febrero 2023].
- [13]. Vaisala: Humidity control in museums, archives and libraries. Available in: <https://www.vaisala.com/en/industries-applications/hvac-measurement/museums-archives-and-libraries> [consulta: 13 febrero 2023].
- [14]. Comprehensive monitoring of ambient conditions in museums and archives with the monitoring system testo. Available in: <https://static-int.testo.com/media/6b/d1/d12cb7b4668d/testo-160-Example-Application-EN.pdf/> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [15]. SensMax automated temperature and humidity monitoring system. Available in: <https://sensmax.eu/solutions/temperature-and-humidity-monitoring-for-museums-and-art-galleries/> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [16]. Hanwell. Heritage environmental monitoring solutions. Available in: <https://hanwell.com/app/uploads/Hanwell-brochure-heritage.pdf> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [17]. ONSET. Bluetooth Data Loggers Streamline Museum Environmental Monitoring. Available in: <https://www.onsetcomp.com/content/bluetooth-data-loggers-streamline-museum-environmental-monitoring> [consulta: 13 de febrero de 2023].
- [18]. MESAS CARRASCOSA F, VERDÚ SANTANO D, *et al.* Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: a case study of the mosque-cathedral of Córdoba. *Sensors*. 2016; 16(10): 1620-1634. doi:10.3390/s16101620.
- [19]. LECCESE F, CAGNETTI M, *et al.* A new acquisition and imaging system for environmental measurements: an experience on the Italian cultural heritage. *Sensors*. 2014; 14(5): 9290-9312. doi:10.3390/s140509290.
- [20]. GAUDENZI M, SERRA M, *et al.* The smARTS_Museum_V1: an open hardware device for remote monitoring of cultural heritage indoor environments. *HardwareX*. 2018; 4: e00028. doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00028
- [21]. LABORDA J, GARCIA AM, *et al.* From concept to validation of a wireless environmental sensor for the integral application of preventive conservation methodologies in low-budget museums. *Heritage Science*. 2022; 10: 197-214. doi.org/10.1186/s40494-022-00837-9.
- [22]. BORREGO S, MOLINA A. Fungal assessment on storerooms indoor environment in the National Museum of Fine Arts, Cuba. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2019; 12: 1373-1385. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00765-x>.
- [23]. ALMAGUER M, *et al.* Study of airborne fungus spores by viable and nonviable methods in Havana, Cuba. *Grana*. 2013; 52(4): 289-298. dx.doi.org/10.1080/00173134.2013.829869.

- [24]. VAILLANT M. Biodeterioro del patrimonio histórico documental. Alternativas para su erradicación y control. Rio de Janeiro, 2013.
- [25]. RODRÍGUEZ LM, BRITO L, GOUVEIA BA. The WISE-MUSE project: Environmental monitoring and controlling of museums based on wireless sensor networks. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2009; 9(01): 46-57.
- [26]. MECOCCI A, ABRARDO A. Monitoring architectural heritage by wireless sensors networks: San Gimignano – A case study. *Sensors*. 2014; 14(1): 770-778. doi:10.3390/s140100770.
- [27]. KLEIN LJ, BERMUDEZ S, et. al. Wireless sensor platform for cultural heritage monitoring and modeling system. *Sensors*. 2017; 17(9): 1998- 2019. doi:10.3390/s17091998.
- [28]. VALENTINI F, CALCATERRA A, et. al. Smart portable devices suitable for cultural heritage: a review. *Sensors*. 2018; 18(8): 2434-2456. doi:10.3390/s18082434
- [29]. Semtech, Available in: <https://www.semtech.com/lora>. [consulta: 3 marzo 2023].
- [30]. The things network, Available in: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>. [consulta: 3 de marzo de 2023].
- [31]. ARDUINO Corp. <https://www.arduino.cc/>. [consultado 3 marzo 2023].
- [32]. NC 26-211-1: 1992 Buenas prácticas de producción farmacéutica. Comité Estatal de Normalización Ministerio de Salud Pública. Vig. desde marzo 1992.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit / Conceptualización: Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Curación de datos:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Análisis formal:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Adquisición de fondos:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Piet Van Espen. **Investigación:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Metodología:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Software:** Lorenzo Hernández Tabares, Piet Van Espen. **Validación:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Visualización:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen. **Escritura – borrador original:** Ana Ester Cabal Rodríguez. **Redacción – revisión y edición:** Ana Ester Cabal Rodríguez, Lorenzo Hernández Tabares, Isabel Otero Abreu, Dania Rodríguez Nápoles, Piet Van Espen.

Progresos en la síntesis de nanoestructuras de carbono por descarga de arco sumergida

 Luis Felipe Desdín García,  Frank Justo Chao Mujica,  Lorenzo Hernández Tabares,
 Liudy García Hernández,  Juan Gualberto Darias González,  Luis Miguel Ledo Pereda,
 Ángel Luis Corcho Valdés,  Manuel Antuch Cubillas

Grupo de Nanociencias. Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana.

desdin@ceaden.edu.cu, luisfelipedesdingarcia@gmail.com

Resumen

Los nanomateriales de carbono constituyen el área de mayor y más rápido crecimiento de la Nanotecnología. Sus propiedades excepcionales encuentran aplicación en numerosos sectores de la economía. Sin embargo, su producción a gran escala con la calidad adecuada sigue siendo un problema abierto. En el presente trabajo se presentan los avances obtenidos en el desarrollo de la tecnología de descarga de arco sumergido para la producción de nanoestructuras de carbono en el Grupo de Nanociencias del CEADEN. Así mismo se reporta la implementación de métodos para la evaluación de la seguridad en el uso *in vitro* de nanoestructuras de carbono sintetizadas usando dicho método.

Palabras clave: nanomateriales; carbono; arcos eléctricos; descarga; seguridad; *in vitro*.

Progress in the synthesis of carbon nanostructures by submerged arc discharge

Abstract

Carbon nanomaterials are the major and fastest growing area of nanotechnology. Their exceptional properties find application in numerous sectors of the economy. However, their large-scale production with adequate quality is still an open problem. In the present work, the advances obtained in the development of the submerged arc discharge technology for the production of carbon nanostructures in the Nanosciences Group of CEADEN are presented. We also report the implementation of methods for the safety evaluation of the *in vitro* use of carbon nanostructures synthesized using this method.

Key words: nanomaterials; carbon; electric arcs; flashover; safety; *in vitro*.

Introducción

A finales del siglo XX y principios de XXI se han sintetizados nuevos alótropos del carbono con propiedades excepcionales. Constituyen un conjunto de nanoestructuras que son paradigma de como la reducción de tamaño hasta el nivel nano determina el confinamiento cuántico generando propiedades radicalmente nuevas. Dichas propiedades han encontrado múltiples aplicaciones en los más diversos sectores, incluyendo la Ciencia y la Tecnología Nuclear.

Sin embargo, la elaboración de nanoestructuras de carbono en grandes volúmenes, con calidad adecuada y costos razonables aún no está solventada. Por ello se han explorado diferentes métodos de manufactura. Uno de los más promisorios resulta la descarga de arco entre electrodos de grafito en gases, que produce nanoestructuras de alta cristalinidad, pero con contami-

nantes y subproductos indeseables. Recientemente se instrumentó en fase líquida para soslayar el empleo de sistemas de vacío y gases que encarecen la tecnología y dificultan su escalado. El grupo de Nanociencia del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear ha desarrollado en la última década una línea de investigación orientada a descubrir los mecanismos de formación de las nanoestructuras en la descarga de arco sumergida (DAS) para aminorar la generación de contaminantes y optimizar las propiedades de las nanoestructuras sintetizadas.

La relación calidad / escala de producción hace de las nanoestructuras de carbono sintetizadas por DAS candidatos promisorios para las aplicaciones biomédicas.

En el presente trabajo se brinda una panorámica de los progresos obtenidos en el desarrollo la tecnología DAS y la implementación de métodos para la evaluación

de la seguridad en el uso in vitro de nanoestructuras sintetizadas por este método.

Materiales y métodos

Se estudiaron los factores que incidían en la formación de contaminantes, prestándosele especial atención a la estabilidad de la descarga. Dichos estudios permitieron esclarecer las ventajas e inconvenientes de los métodos de estabilización reportados en la literatura [1]. Sobre la base de este conocimiento se diseñó y construyó una instalación de Descarga de Arco Sumergida (DAS) que combina un sistema de micro posicionamiento de los electrodos controlado por retroalimentación de la corriente de la descarga, con un sistema de estabilización eléctrica y un sistema multiparamétrico que permite registrar de manera correlacionada 5 parámetros [2-4]. Este último sistema permitió implementar métodos de diagnóstico del proceso de síntesis basados en la espectroscopia óptica [5] y la acústica [6].

Se desarrollaron métodos de purificación de nanoestructuras basados en la oxidación y la extracción líquido-líquido [7]. Las nanoestructuras obtenidas fueron caracterizadas empleando las siguientes técnicas: TEM, SEM, AFM, EDX, microscopia fluorescente, isothermas de adsorción de N₂ (BET), DRX, XPS, DLS, TGA, espectroscopias Raman y UV-Visible, magnetometría, mediciones de conductividad y fluorimetría.

La demostración de la seguridad del uso in vitro de Nanocebollas de Carbono con vistas a sus posibles aplicaciones biomédicas fue realizada empleando el ensayo con azul de tripano, TEM y la Cromatografía Líquida/Espectrometría de Masas en tándem [8].

Fueron diseñados e implementados procedimientos de Nanoseguridad para la síntesis y purificación de las nanoestructuras producidas [9,10].

Resultados y discusión

Se investigaron experimentalmente los métodos de control de la estabilidad de la DAS revelando sus limitaciones [1]. Estas explican las discrepancias en los valores reportados de consumo de precursores y pureza de los productos. Sin embargo, las características de los electrodos y el esquema electromecánico implementado también aportan en determinada medida a estas divergencias. No obstante, el factor determinante es el método de estabilización adoptado.

La instalación construida permitió sintetizar nanotubos de pared múltiple (MWCNTs) y nanocebollas de carbono (CNOs) [11-14]. Como los MWCNTs son el producto que se obtiene con el mayor rendimiento en la DAS se estudiaron detalladamente sus posibles aplicaciones, enfatizándose en la catálisis de compuestos orgánicos [15]. Se reporta por primera vez la síntesis de GO y CQDs por DAS y se demostró que estos últimos constituyen un promisorio fluoróforo para investigaciones biomédicas [6, 16].

Se demostró que la DAS transcurre en una sucesión de periodos de estabilidad e inestabilidad como con-

secuencia del efecto z – pinch [17]. En los periodos de estabilidad se forman los MWCNTs y los CNOs, mientras que en los periodos de inestabilidad se manifiesta un proceso de estrés térmico que conduce a la exfoliación de plaquetas de grafeno que en presencia de altas temperaturas y radicales muy reactivos da lugar a la formación de GO y CQDs. Como resultado de los estudios realizados se elaboró un modelo que explica los mecanismos de formación de las nanoestructuras y los contaminantes. El modelo considera la existencia de tres zonas que se diferencian por sus temperaturas, homogeneidad del campo eléctrico y entorno químico en las cuales se desarrolla el proceso de formación de las nanoestructuras. La primera zona de la descarga, la más interna, en ella la temperatura es tan alta que no se produce ningún proceso de nucleación. Mientras que en la segunda se forman los MWCNTs en la zona de mayor homogeneidad del campo eléctrico y en su parte periférica se originan estructuras cuasi-esféricas (CNOs). La formación de GO y CQDs se produce en la zona más externa, en la frontera con la superficie del agua, en esa región está presente una capa de vapor de agua a altas temperaturas en la cual se produce la funcionalización de los grafenos exfoliados en los periodos de inestabilidad.

A la comprensión de estos mecanismos contribuyó significativamente el desarrollo de métodos optoelectrónicos y acústicos de diagnóstico, así como la simulación del funcionamiento de la instalación [5, 17], lo que permitió identificar y comprender la influencia del diseño electro-mecánico de la instalación en la generación de contaminantes y otros procesos como la emisión de chorros de vapores de carbono emitidos en los procesos de constricción del canal de la descarga. En las mediciones de espectroscopia óptica se observaron las bandas de Swann comprobándose que la mayor emisión corresponde a los clústeres tipo C2. La frecuencia de emisión de los chorros fueron descritos empleando un modelo de resonador sin cuello tipo Helmholtz y se identificaron los procesos de vibraciones y su papel en la erosión del ánodo [17].

Como las nanoestructuras sintetizadas son promisorias para las aplicaciones biomédicas en paralelo a las investigaciones físico-químicas se efectuó el análisis de las visiones y normativas sobre los aspectos regulatorios en la nanomedicina, la nanotoxicología y las herramientas empleadas para evaluar la seguridad de su uso in vitro como primer paso [18]. Entre los elementos claves en esas visiones y pautas se destacan la importancia que le conceden al esclarecimiento de la biocompatibilidad, la evaluación de la nanotoxicidad y a la determinación de la capacidad de estas nanoestructuras para penetrar en las células.

Dado que las CNOs obtenidos a partir del método DAS han sido propuestos para una nueva terapia antitumoral se estudió su seguridad in vitro. El análisis de proteómica reveló que las CNOs no causan respuesta inflamatoria (proteínas pro-inflamatorias) a las concentraciones estudiadas (de interés biomédico) [8,19] y que reprimen la expresión de determinados genes asocia-

dos a enfermedades malignas. El ensayo de Rojo Neutro es un método estándar para el estudio de la toxicología de sustancias en estado micro y macroscópico. Sin embargo, los resultados obtenidos indicaron que el ensayo de rojo neutro brinda información errónea al evaluar la toxicidad de las CNOs. Ello motivo un estudio complementario que demostró que las CNOs resultan muy prometedoras en aquellas aplicaciones en que se requieran nanoestructuras que interactúen fuertemente con compuestos que contengan grupos aromáticos [20]. Una de tales aplicaciones, por ejemplo, pudiera ser la purificación de aguas residuales de la industria farmacéutica.

Conclusiones

Los métodos de estabilización de la DAS fueron analizados y se determinó la estrategia más efectiva para este propósito. Sobre la base de este enfoque se construyó una instalación avanzada para la síntesis de nanoestructuras de carbono que permite la obtención de MWCNTs, CNOs, GO y CQDs a una escala y con la calidad necesaria para abordar investigaciones biomédicas. La composición química, la estructura y la morfología de las estructuras sintetizadas fueron determinadas de forma exhaustiva. Se implementaron métodos de diagnóstico óptico - electrónico y acústicos que permitieron explorar los mecanismos de formación de las nanoestructuras y los contaminantes. Estos permiten un mejor diseño de las instalaciones de síntesis y constituyen herramientas para controlar el funcionamiento de estas. Se asimilaron e implementaron métodos para la evaluación de la seguridad en el uso *in vitro* de nanoestructuras de carbono. Todos los trabajos con las nanoestructuras se efectuaron acorde a procedimientos de nanoseguridad desarrollados en el grupo para nanomateriales de carbono.

Referencias bibliográficas

- [1]. HERNANDEZ TABARES L, DARIAS GONZÁLEZ JG, CHAO MUJICA FJ, DESDÍN GARCÍA LF, et. al. Stabilization methods in the submerged arc discharge synthesis of carbon nanostructures. *Journal of Nanomaterials*. 2021; (9-10): 1-12.
- [2]. HERNÁNDEZ TABARES L, CARRILLO BARROSO E, DARIAS GONZÁLEZ JG, DESDÍN GARCÍA LF, et. al. Arc current control for a carbon nanoparticle. *Revista Cubana de Física*. 2011; 28 (1): 1E76-1E79. E/RCF-28-1E.
- [3]. DARIAS GONZALEZ JG, CARRILLO BARROSO E, HERNÁNDEZ TABARES L., DESDÍN GARCÍA LF, et. al. Sistema de descarga de arco sumergida para la síntesis de nanoonions de carbono multicapas. *Revista Cubana de Física*. 2011; 28(1): 1E80-1E84.
- [4]. HERNÁNDEZ TABARES L, DARIAS GONZÁLEZ JG, DESDÍN GARCÍA L.F, et. al. Automated system for the synthesis of nanostructures via arc-discharge in liquids. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. 2018; 9(3): 035002.
- [5]. DARIAS GONZÁLEZ JG, HERNÁNDEZ TABARES L, LEDO PEREDA LM, DESDÍN GARCÍA LF, et. al. Note: Limitations of the optoelectronic control for carbon nanoparticles synthesis via arc-discharge in solution. *Review of Scientific Instruments*. 2014; 85(3): 036107-036107-3.
- [6]. CHAO MUJICA FJ, GARCIA HERNÁNDEZ L, DARIAS GONZÁLEZ JG, DESDÍN GARCÍA LF, et. al. Carbon quantum dots by submerged arc discharge in water: synthesis, characterization, and mechanism of formation. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(16): 163301.
- [7]. CHAO MUJICA FJ, DARIAS GONZÁLEZ JG, GARCÍA HERNÁNDEZ L, DESDÍN GARCÍA LF, et. al. Arc discharge carbon nanoonions purification by liquid-liquid extraction. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*. 2019; 9(2): 1-10.
- [8]. GARCÍA HERNÁNDEZ L, CHAO MUJICA FJ, MUSACCHIO JA, DESDIN GARCÍA LF, et. al. Proteomic analysis in cells treated with pristine carbon nano-onions and its subcellular localization. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 2019; 10 (3): 035011.
- [9]. SOGUERO GONZÁLEZ D, CASTILLO ÁLVAREZ J, DESDÍN GARCÍA LF. Sistema de seguridad para elaborar nanopartículas de carbono a escala de laboratorio. *Revista de Salud Ambiental*. 2012; 12 (1): 46-51.
- [10]. DESDÍN GARCÍA LF, GARCÍA HERNÁNDEZ L, DÍAZ CURBELO A, DARIAS GONZALEZ JG, et. al. Nanoseguridad. La Habana: Editorial Científico-Técnica, 2014. ISBN 978-959-05-0711-3.
- [11]. DARIAS GONZÁLEZ JG, HERNÁNDEZ TABARES L, CODORNIU PUJALS D, DESDÍN GARCÍA L, et. al. Carbon nanostructures obtained by underwater arc discharge of graphite electrodes: synthesis and characterization. *Proceedings of the XV Workshop on Nuclear Physics and IX International Symposium on Nuclear and Related Techniques WONP-NURT'2015*. CEADEN. February 9-13, 2015. Havana, Cuba. ISBN 978-959-300-069-7. ArXiv preprint, arXiv: 1502.04062 Cornell University.
- [12]. CODORNIU PUJALS D, RODRÍGUEZ GARCÉS D, ARIAS DE FUENTES O, DESDÍN GARCÍA LF. XPS of carbon nanostructures obtained by underwater arc discharge of graphite electrodes. *Nucleus*. 2018; (64): 15-18.
- [13]. CODORNIU PUJALS D, ARIAS DE FUENTES O, DESDIN GARCÍA LF, CAZZANELLI E, CAPUTI LS. Raman spectroscopy of polyhedral carbon nano-onions. *Applied Physics A*. 2015; 120: 1339-1345.
- [14]. BARRIOS COSSIO JJ, ACEVEDO PEÑA P, HERNÁNDEZ GORDILLO A, et. al. In Situ Aniline-Polymerized Interfaces on GO-PVA Nanoplatfoms as Bifunctional Supercapacitors and pH-Universal ORR Electrodes. *ACS Appl. Energy Mater*. 2020; 3(5): 4727-4737.
- [15]. CORCHO VALDÉS AL, CALZADILLA MAYA J, DESDÍN GARCÍA LF, ANTUCH CUBILLAS M. Carbon nanotubes in organic catalysis. In: *Carbon composite catalysts. Preparation, structural and morphological property and applications*. Springer Singapore, 2022. p. 223-266.
- [16]. DESDÍN GARCÍA LF, CHAO MUJICA FJ, DARIAS GONZÁLEZ JG, HERNÁNDEZ TABARES L, et. al. Método de producción de puntos cuánticos de carbono y óxido de grafeno por descarga de arco sumergida. Certificado No. 24548. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial. Boletín Oficial. 2021; (396): 5. Resolución 1831/2021.

- [17]. HERNÁNDEZ TABARES L, CHAO MUJICA FJ, DARIAS GONZÁLEZ J. G., DESDÍN GARCÍA LF, et. al. Multiparametric diagnostic in the synthesis of carbon nanostructures via submerged arc discharge: Stability, nucleation and yield. *Journal of Applied Physics*. 2019; 126(18): 183301.
- [18]. PÉREZ GUEVARA OL, DESDÍN GARCÍA LF, GARCÍA HERNÁNDEZ L. Una aproximación a los aspectos regulatorios en las nanotecnologías. *Anuario Científico CECMED*. 2021; 19: 101-114.
- [19]. GARCÍA HERNÁNDEZ L, SALMEN ESPINDOLA F, DESDÍN GARCÍA LF. "Omics" studies on carbon nanoparticles effects. *Biosci. J.* 2015; 31(4): 1260-1269.
- [20]. LÓPEZ YC, CHAO MUJICA FJ, DESDÍN GARCÍA LF, GARCÍA HERNÁNDEZ L, et. al. Neutral red dye adsorption on carbon nanotubes: viability assay interference and adduct characterisation *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 2022; 13(4): 045001.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit / Conceptualización: Luis Felipe Desdín García, Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Liudy García Hernández, Manuel Antuch Cubillas. **Curación de datos:** Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Liudy García Hernández. **Software:** Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Luis Miguel Ledo Pereda. **Análisis formal:** Luis Felipe Desdín García, Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González. **Adquisición de fondos:** Luis Felipe Desdín García, Juan Gualberto Darías González. **Recursos:** Juan Gualberto Darías González. **Investigación:** Luis Felipe Desdín García, Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Liudy García Hernández, Luis Miguel Ledo Pereda, Manuel Antuch Cubillas, Ángel Luis Corcho Valdés. **Visualización:** Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Luis Miguel Ledo Pereda, Liudy García Hernández, Ángel Luis Corcho Valdés. **Metodología:** Luis Felipe Desdín García, Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Luis Miguel Ledo Pereda, Liudy García Hernández, Manuel Antuch Cubillas. **Administración de proyecto:** Luis Felipe Desdín García, Juan Gualberto Darías González. **Supervisión:** Luis Felipe Desdín García, Juan Gualberto Darías González. **Validación:** Luis Felipe Desdín García, Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Liudy García Hernández, Luis Miguel Ledo Pereda, Ángel Luis Corcho Valdés. **Redacción – borrador original:** Luis Felipe Desdín García, Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González. **Redacción – revisión y edición:** Luis Felipe Desdín García, Lorenzo Hernández Tabares, Frank Justo Chao Mujica, Juan Gualberto Darías González, Manuel Antuch Cubillas.

Declaración de financiamientos: El financiamiento de este trabajo fue efectuado a través de los proyectos "Investigación del proceso de síntesis de nano-onions de carbono por descarga de arco sumergida (N@NO, 2011-2014)" e "Investigación de métodos para la destrucción y/o reducción de la proliferación de células cancerígenas basados en las Nanociencias (N@NONCO, 2015-2018)" de la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada. Además fue financiado a través del proyecto "Estudio teórico – experimental de nanoestructuras de carbono (N@NO – C, 2015-2018) del Programa Nacional de Ciencias Básicas.

Radiomodificación de materiales poliméricos en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)

 Manuel Rapado Paneque

Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana.
rapado@ceaden.edu.cu

Resumen

En el presente trabajo se muestran algunos estudios realizados a lo largo de estas dos décadas en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) en el campo de la radiomodificación y síntesis de materiales poliméricos mediante el empleo de las radiaciones ionizantes en la obtención de polímeros por injerto, radioesterilización y purificación de un polímero natural: el alginato de sodio, obtención de un copolímero de metacrilato de 2 hidroxietilo (HEMA) y acrilamida, la preparación de apósitos de hidrogel a partir de polivinilpirrolidona (PVP) para uso tópico, con los cuales se realizaron dos ensayos clínicos en hospitales de La Habana y el CEADEN recibió el registro médico por parte del Centro para el Control Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CEDMED) como órgano regulador, al final se describe la obtención de nanogeles de PVP y PVP-plata para la liberación controlada.

Palabras clave: radiaciones ionizantes; polímeros; monómeros; hidrogeles; nanopartículas; materias biológicas.

Radiomodification of polymeric materials at the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN)

Abstract

This paper shows some studies carried out throughout these two decades at the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) in the field of radiomodification and synthesis of polymeric materials through the use of ionizing radiation to obtain polymers by grafting, radiosterilization and purification of a natural polymer: sodium alginate, obtaining a copolymer of 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) and acrylamide, preparing hydrogel dressings from polyvinylpyrrolidone (PVP) for topical use, with two clinical trials were carried out in hospitals in Havana and CEADEN received the medical record from the Center for State Control of Medications, Equipment and Medical Devices (CEDMED) as a regulatory body, in the end it was describes the production of PVP and PVP-silver nanogels for controlled release.

Key words: ionizing radiations; polymers; monomers; hydrogels; nanoparticles; biological materials

Introducción

El procesamiento con radiaciones de alta energía se ha posicionado en el campo de los materiales poliméricos. Esto ha sido posible debido a bondades que ofrecen los procesos radioinducidos para la preparación de estos nuevos materiales, como son: los polímeros pueden ser modificados químicamente en un proceso relativamente simple, libre de aditivos a temperatura ambiente y muchas veces con la esterilización simultánea.

La irradiación de monómeros y polímeros conduce a la formación de especies intermediarias muy reactivas, tales como: radicales libres, iones y especies excitadas lo cual conlleva a producir cambios dramáticos en

sus propiedades físico-químicas y mecánicas de estos materiales. Estos efectos según las condiciones experimentales y estructura de la cadena polimérica provocan en los polímeros desprendimiento de gases, degradación, injerto, autoinjerto y reticulación. De acuerdo con las condiciones experimentales algunos de estos efectos pueden ser atenuados o utilizar unos de estos ellos con fines tecnológicos.

El objetivo del siguiente artículo es mostrar algunas de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo de los materiales poliméricos en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) durante los últimos 20 años.

Materiales y métodos

Obtención de un copolímero por injerto radioinducido de poliacetato de vinilo en polihidroxibutirato

En esta investigación se empleó el polihidroxibutirato, que es un poliéster, termoplástico semicristalino, biodegradable, obtenido microbiológicamente, valorado como un material importante para usar en el campo biomédico, como matriz para la liberación de fármacos, en ingeniería de tejidos y en otros dispositivos médicos. Este polímero por presentar propiedades semejantes al polipropileno se plantea que en el futuro pudiera ser su sustituto [1]. El polihidroxibutirato es moderadamente hidrofóbico, por lo que fue necesario estudiar su radiomodificación con el objetivo de obtener un material con propiedades hidrofílicas, para dicho propósito se le agregaron grupos funcionales los cuales eran sustentables de realizarle su modificación posterior.

Para el experimento de irradiación se utilizó PHB en polvo sumergido en acetato de vinilo (VAc). Se desgasificó el sistema reaccionante en una línea de vacío (10^{-3} - 10^{-6} Torr), las síntesis se realizaron en una instalación de irradiación autoblandada del tipo $MP\gamma^{30}$ de ^{60}Co .

La reacción fundamental del proceso de copolimización del PHB con el VAc por injerto radioinducido se representa en la figura 1, para ello se empleó la técnica de irradiación simultánea de ambos compuestos.

Para la caracterización se empleó la técnica de microscopía óptica de alta resolución a los homopolímeros por separado, PHB, PVAc y al copolímero por injerto, PHB-co-PVc.

En la figura 2, se puede observar que estamos en presencia de materiales de diferente naturaleza.

La micrografía del PHB muestra una superficie lisa, característica de la fragilidad de este material.

Por otro lado, la imagen del PHB-co-PVc no presenta cambios morfológicos apreciables a esta resolución con respecto a la del PHB. Lo que puede inferirse que el injerto del PVAc en el PHB ocurre sin afectaciones apreciables en la morfología del sustrato. Comparativamente podemos afirmar que los materiales analizados tienen propiedades ópticas diferentes.

Los espectros Raman muestran que existe una clara diferencia en las bandas del copolímero por injerto en comparación con los espectros Raman del PHB de control (figura 3). La banda a 629 cm^{-1} corresponde al modo acoplado de la deformación C-COO del nuevo copolímero por injerto. En el trabajo publicado en [2] se muestran todas las asignaciones de las diferentes señales de los espectros Raman del PHB-co-PVc, que confirmaron la presencia del nuevo material.

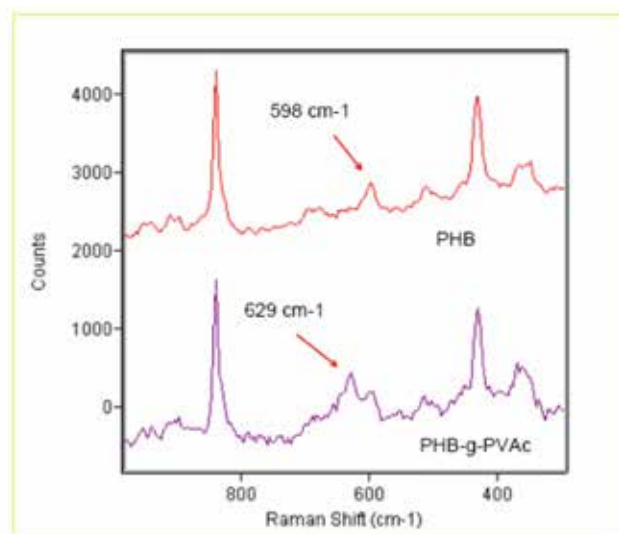


Figura 3. Espectros Raman del PBP y el copolímero por injerto PBP-graf-PAC en la región de los 300-1000 cm^{-1} .

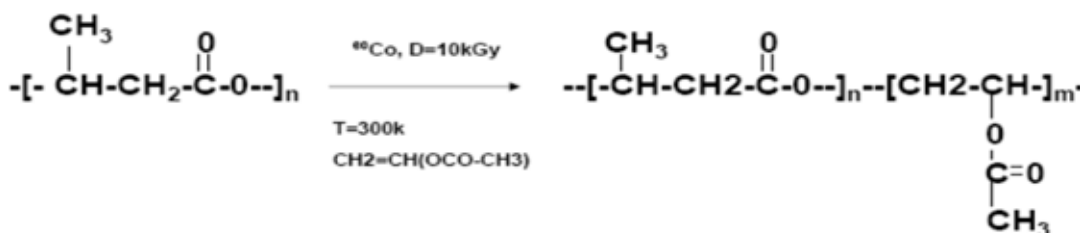


Figura 1. Reacción radioinducida que representa la formación del copolímero por injerto PHB-co-VAc.



Figura 2. Imagen del PHB, PVAc y PHB-co-PVc por microscopía óptica de alta resolución.

Radiesterilización y purificación de polisacáridos aniónicos para obtener concentrados poliméricos como sistemas inmunoprotectores

El acápite relacionado con esta investigación estuvo enfocado a la radioesterilización y purificación de polímeros naturales aniónicos, candidatos como inmunoprotectores en las terapias basadas en trasplantes de órganos híbridos, las que requieren biomateriales apropiados y de la selección de procesos adecuados para su preparación. Las operaciones de purificación y de preparación de polisacáridos tales como alginato de sodio y sulfato de celulosa se caracterizan por su capacidad para ser esterilizados, manteniendo un nivel bajo de endotoxinas capaz de conservar su biocompatibilidad.

La radiosterilización del Alginato de sodio se realizó empleando las normas ISO 11137 Sterilization of Health Care Products. Los protocolos de la radioesterilización y purificación del alginato de sodio se muestran representados mediante los siguientes diagramas de flujo. Los estudios básicos que fundamentaron estos protocolos aparecen reportados en [3, 4].

El diseño de la secuencia de purificación debía considerar operaciones simples, efectivas y productivas

pero que a su vez garantizaran que el producto final no presentara modificaciones apreciables de la estructura polimérica ni de sus características macromoleculares. El diseño de la secuencia de separación para la purificación está basado en el conocimiento de las características físico químicas de sus constituyentes del producto y su interacción (figura 4). El método de purificación reportado, consiste en la precipitación de polianiones en solución acuosa usando diferentes solventes (etanol-acetona) el cual resultó ser un solvente menos tóxico y menos costoso comparado con los que se usan para la extracción. Las especificaciones de pureza del alginato de sodio comercial se realizaron utilizando las especificaciones de calidad de la National Formulary (NF) [5] establecidas para el alginato de sodio. Los resultados de los análisis realizados se muestran en la tabla 1.

Como se aprecia en la tabla 1, los parámetros de control de la calidad de los productos de partida cumplen con lo establecido por las normas internacionales para estos tipos de materiales [5].

Ensayos realizados en el CEADEN permitieron obtener cápsulas estables a partir de alginato de sodio de grado clínico, con resultados satisfactorios (figura 5).

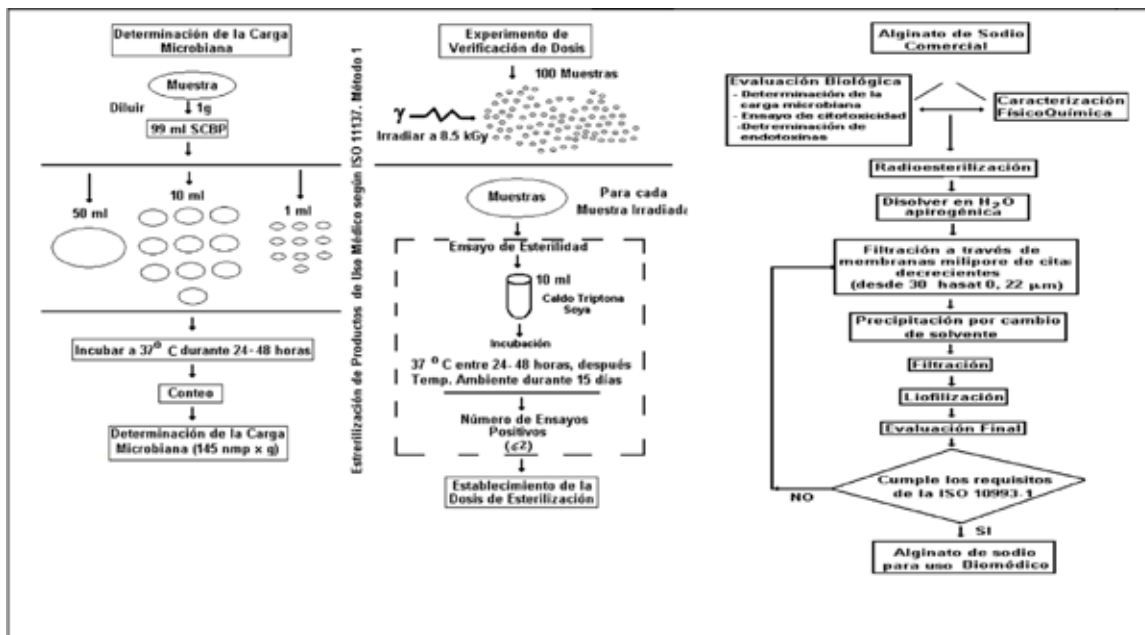


Figura 4. Representación esquemática de las etapas de radioesterilización y purificación del alginato de sodio.

Tabla 1. Especificaciones de pureza para las muestras de Alginato de sodio utilizados en la investigación.

Especificaciones de Pureza	National Formulary		
	Alginato de sodio GC	Alginato de sodio Keltone HV/ Nutra Sweet	Alginato de sodio Algimar FAC Na-0069
Materia Seca (%)	90.8–106	96.3 ±0.4	95.8 ±0.2
Humedad (%)	máx 15	4.04	3.24
Cenizas (%)	<4	2.3 ±0.02	2.4 ±0.03
As (ppm)	<3	<3	<3
Pb (ppm)	<10	<10	<10
Metales pesados	0.004	<0.002	<0.002



Figura 5. Cápsulas obtenidas a partir de alginato de sodio de grado farmacéutico.

Formación de Hidrogeles a partir de monómeros para uso biomédico.

Este método es uno de los más empleados y mediante esta técnica ocurre la polimerización en una primera etapa, seguida del entrecruzamiento de las cadenas formadas (figura 6). Esta vía es la conveniente cuando el monómero seleccionado está disponible y no el polímero, sin embargo, a veces ocurre muchos monómeros son nocivos y

tóxicos por lo que en la práctica se adiciona un monómero bifuncional para incrementar la eficiencia del entrecruzamiento [6]. En este sentido en nuestra investigación se estudió la reacción de copolimerización del metacrilato de 2 hidroxietilo (HEMA) y la AAm la cual se puede representar, en forma simplificada, según el siguiente esquema: (figura 6)

Los hidrogeles obtenidos mostraron buena consistencia mecánica, eran estables y fáciles de manipular, y todos resultaron ser transparentes. Las matrices M4 y M5 fueron más blandas y de mayor elasticidad. En la figura 7 se evidencia la transparencia de los hidrogeles hinchados y su apariencia vítrea en su forma de xerogel (primero a la izquierda).

En la figura 8 puedes notarse como el copolímero obtenido a 3 kGy (menos entrecruzado), posee mayor cantidad de poros que el obtenido a 10 kGy, además se observa que el copolímero obtenido a 40 kGy no posee una superficie porosa; sino, más bien en forma de escamas.

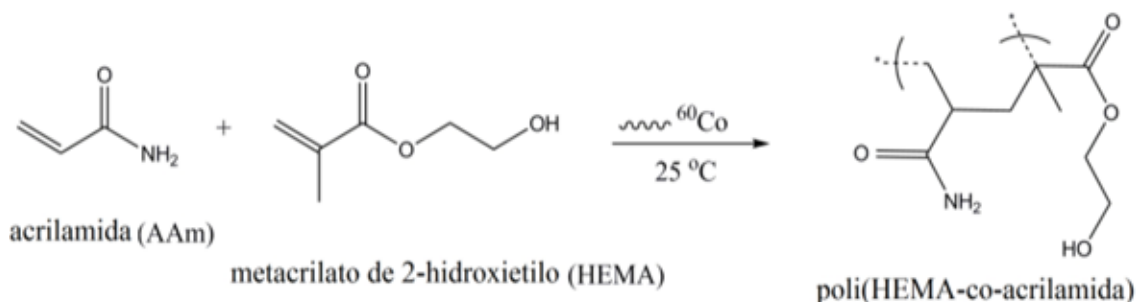


Figura 6. Representación esquemática simplificada de la obtención del poli (HEMA-co-AAm).

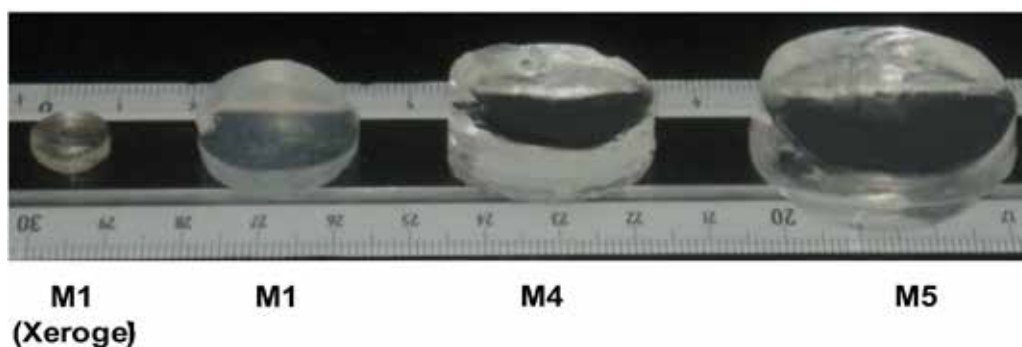


Figura 7. Imágenes de los hidrogeles de poli(HEMA-co-AAm), saturados con N₂O, obtenidos a 10 kGy. Aparecen de izquierda a derecha el xerogel de M1 y los hidrogeles de las matrices M1, M4 y M5, hinchados en agua a 25°C hasta el equilibrio.

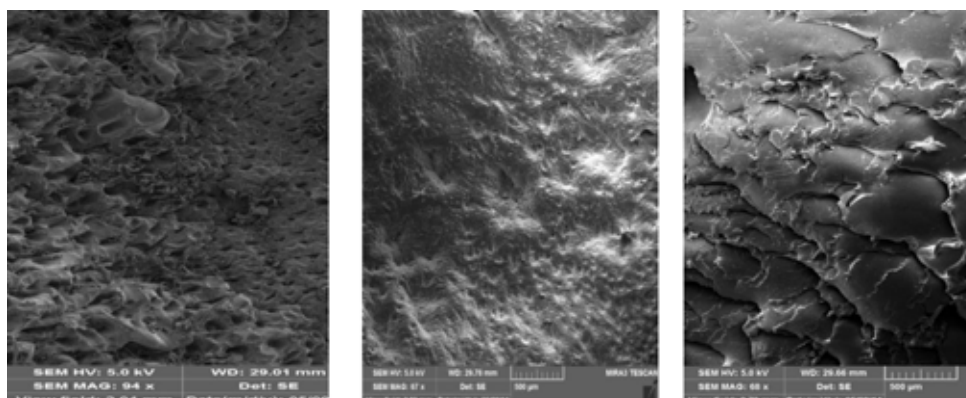


Figura 8. Morfología mediante imagen SEM de los xerogeles liofilizados para el copolímero M5: (A) 3 kGy, (B) 10 kGy, (C) 40 kGy.

Estos hidrogeles fueron ensayados para la liberación controlada in vitro de un citostático, la doxorubicina (DOX). Los perfiles de liberación de la DOX a partir de los hidrogeles obtenidos, a distintas dosis de radiación se presentan en la figura 9.

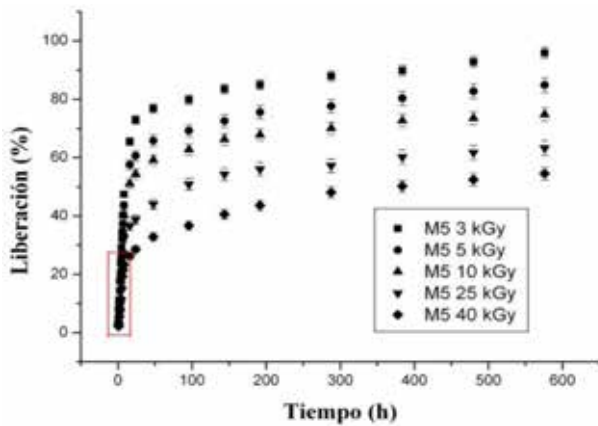


Figura 9. Perfiles de liberación de DOX, obtenidos a 37 °C, para la matriz M5(A): a diferentes dosis absorbidas.

Se puede observar que la cantidad de fármaco liberada es función de la dosis absorbida. Estos hidrogeles fueron propuestos para uso potencial como sistemas de liberación controlada de citostáticos y otros principios activos para contacto directo con el sistema sanguíneo en humanos.

Formación de Hidrogeles a partir de un polímero para uso tópico.

Presentamos un ejemplo de un sistema que ha resultado exitoso y hemos asimilado y adaptado la tecnología en el CEADEN desde el 2007 [7], este apósito de hidrogel se prepara directamente a partir de un polímero la polivinilpirrolidona con la bondad de evitar el uso de monómeros ni agentes entrecruzante donde se evita el homoinjerto que puede conducir a estructuras ramificadas y residuos de monómeros sin reaccionar. Este tipo de apósito es considerado un equipo médico de categoría 2B por el Centro para el Control Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CEMED) y se utiliza en contacto directo con los tejidos vivos y previene la contaminación por microorganismos, inhibe la pérdida de fluidos, permite la entrada de oxígeno a la herida y generalmente acelera la cicatrización en aproximadamente la mitad del tiempo de otros tratamientos convencionales para estos fines (figura 10).



Figura 10. Tratamiento de zona postraumática en un paciente diabético.

Las primeras experiencias fueron llevadas a cabo en el tratamiento de úlceras varicosas y flebotáticas mediante un ensayo clínico fase I, en el Instituto de Angiología durante el 2012, en ese mismo año el CEADEN obtuvo el registro médico otorgado por el CECMED, lo que dio lugar a la posibilidad de comenzar la introducción en el sistema nacional de salud y la generalización del uso del apósito mediante la producción de pequeños lotes a escala de laboratorio en diferentes hospitales de la Capital. De esta forma las membranas obtenidas se han utilizado en el tratamiento de pacientes en el Instituto de Angiología (INAV) con úlceras varicosas y flebotáticas, Hospital Pediátrico Juan Manuel Márquez, en niños quemados y con queloides, Hospital Hermanos Ameijeiras, en zonas donantes, Hospital Manuel Fajardo y Hospital Joaquín Albarán, en zonas cruentas (figura 11). Debido a la ausencia de coberturas temporales se aplicó en 500 personas y este apósito fue utilizado para el tratamiento de 60 pacientes críticos con diferentes afecciones que implicaban la posible pérdida de su vida.

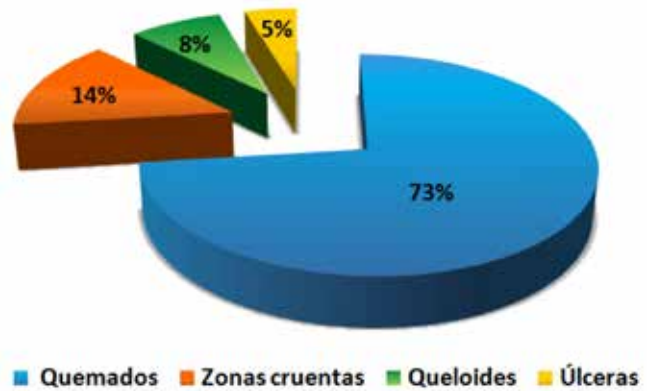


Figura 11. Empleo de los apósitos de hidrogel por dolencia.

El apósito de hidrogel fue preparado según un sistema de calidad según las siguientes normas: NC-ISO 13485: 2018: Equipos médicos - sistemas de gestión de la calidad- requisitos del sistema para propósitos reguladores, NC-ISO 14971: 2012: Aplicación de la gestión de riesgos a los equipos y/o dispositivos médicos, Buenas Prácticas de Producción. Productos Estériles: NC 211-1: 1993, normativas reguladoras del CECMED.



Resultados y discusión

Resultados obtenidos al aplicar el apósito de hidrogel

- Acorta el tiempo de cicatrización en las quemaduras de segundo y tercer grado.
- Cierre definitivo de muchas quemaduras de tercer grado evitando con ellas el autoinjerto de piel.
- Favorece temprana epitelización de zonas donantes de piel.
- Disminución inmediata del dolor al ser colocado en zonas cruentas.
- Controla la infección y el sangramiento.
- Facilita la formación de un tejido de granulación útil en zonas cruentas.
- Hidrata, alivia el prurito, el dolor y mejora la calidad de cicatrización de las mismas.

Nanogeles de PVP obtenidos mediante polimerización inducida por radiación gamma.

En esta parte de la investigación con nanogeles poliméricos no se empleó la polimerización, sino la reticulación intramolecular de las cadenas poliméricas. El objetivo de la investigación fue obtener nanogeles de polivinilpirrolidona (PVP) mediante irradiación gamma para su posterior evaluación como sistema potencial de liberación de fármacos [8]. Los experimentos se realizaron en ausencia de oxígeno empleando soluciones acuosas de PVP. La síntesis se llevó a cabo en una cámara de irradiación

gamma. Las técnicas de caracterización empleadas fueron: viscosimetría, microscopía electrónica (TEM y SEM), se realizaron estudios de citotoxicidad en línea celular de primate Vero. Los resultados muestran que a concentraciones diluidas y altos valores de dosis se favorece la formación nanogeles. Los nanogeles muestran una estructura química y sensibilidad a la degradación térmica similar al polímero inicial, con un rango de tamaño entre 45 y 370 nm aproximadamente, una morfología esférica y alta biocompatibilidad (figura 12).

Los nanogeles obtenidos no presentan toxicidad para las células, evidenciándose un efecto protector o estimulador de la viabilidad celular a medida que aumenta las concentraciones de los mismos. Este resultado muestra que los nanogeles logran entrar a la célula de monocitos humanos y su tráfico celular es mediante endocitosis [9]. Los nanogeles no son reconocidos como cuerpos extraños para el organismo y logran internarse en la célula mediante endocitosis, (figura 12) la microscopía óptica de la derecha.

Obtención y caracterización de nanocompuestos de polivinilpirrolidona-plata.

En el presente trabajo se obtuvo un sistema de nanocompuestos de polivinilpirrolidona-plata (PVP-Ag) y se realizó su caracterización por microscopía electrónica de barrido (SEM). Se evaluó la citotoxicidad en la línea de fibroblastos murinos mediante el ensayo de captación de rojo neutro y se observó la internalización a la célula mediante la microscopía de fluorescencia. En la figura 13 se muestra la instalación experimental,

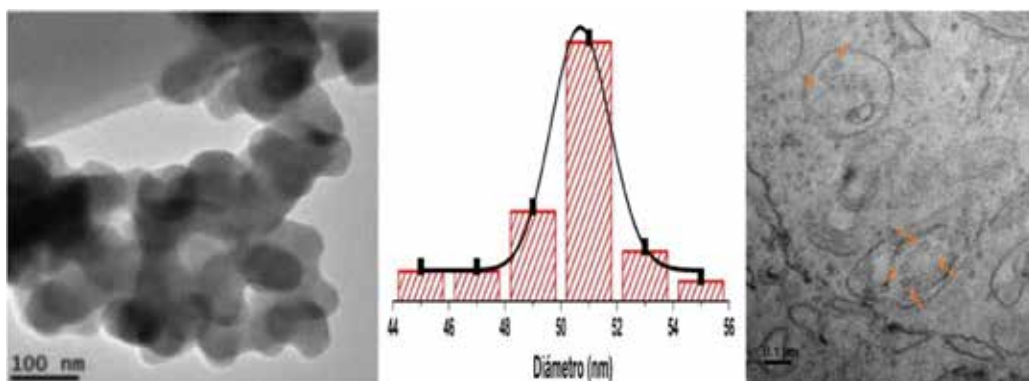


Figura 12. Microscopía electrónica de transmisión SEM de nanogeles de PVP (0.25% a 15 kGy), (a la izquierda). Histograma de la distribución del tamaño de partícula (en el centro). Imagen TEM de una célula de monocitos humanos con nanogeles atrapados dentro de una endosoma, indicados con flechas carmelitas (a la derecha).



Figura 13. Esquema de instalación experimental para la síntesis de nanocompuestos PVP-Ag.

donde se obtuvieron dos tipos de nanocompuestos con tamaños aproximados de 125 nm y 140 nm, con concentraciones de PVP 0.05% y 0.15% respectivamente; en ambos las concentraciones de nanopartículas de plata fueron de 2×10^{-4} (mol/L) y la dosis de irradiación 20 kGy.

La microscopía electrónica de barrido permitió confirmar la obtención de los nanocompuestos de forma redondeada, los cuales se encuentran en forma de cúmulos (figura 14), ahí se pueden observar los nanocompuestos, señalados con flechas amarillas. Esto permite suponer que las nanopartículas de plata se encuentran totalmente ocluidas en los microgeles.

Para ambos casos se pudo constatar que la morfología y apariencia fue similar a resultados obtenidos por

diversos autores en nanogeles con ácido poliacrílico [10] y nanocompuestos de PVP-Fe [11]. Teniendo en cuenta estos resultados podemos confirmar la formación de los nanocompuestos de PVP-Ag. El estudio permitió establecer el rol que juega el polímero entrecruzado como medio estabilizante para el control en la formación de las nanopartículas de plata y el almacenamiento de estas. A la misma vez se expresa la contribución del metal como agente entrecruzante del polímero para lograr un material nanoestructurado con efecto sinérgico (biomaterial estéril con propiedades antimicrobianas).

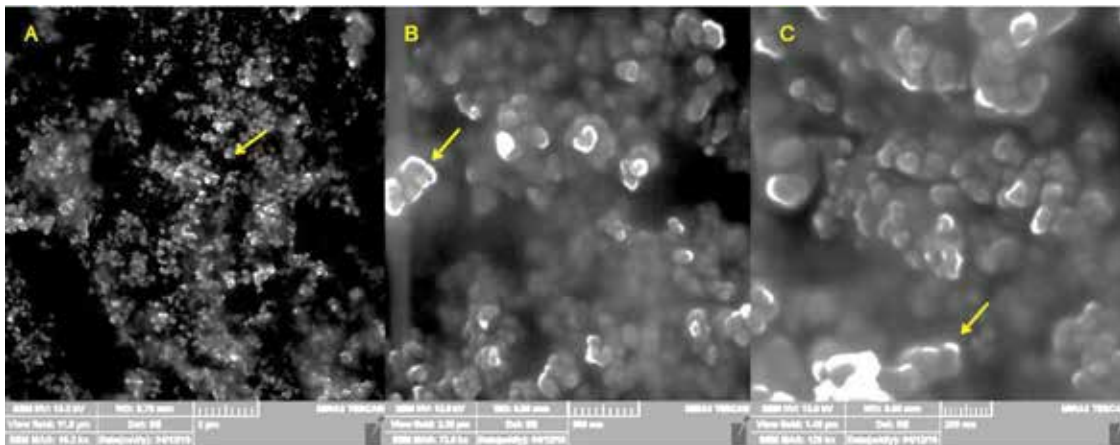


Figura 14. Microscopías electrónicas de barrido para diferentes ampliaciones A: 2 μ m, B: 500 nm, C: 200 nm, las flechas amarillas indican nanocompuestos de PVP-Ag.

Conclusiones

Los procesos inducidos por técnicas de irradiación se han posicionado para obtener diferentes materiales poliméricos amigables con el hombre, como alternativa a otras tecnologías existentes.

Las membranas de hidrogel se han aplicado satisfactoriamente en Cuba en diversas afecciones de la piel, tales como: quemaduras de diferentes grados, úlceras varicosas y flebostáticas, úlceras del pie diabético, zonas cruentas y donantes, mordeduras de animales y otras.

La obtención de nanogeles y compuestos nanoestructurados con nanopartículas de plata y polímeros de PVP, son candidatos para su uso potencial como vehículos de fármacos anticancerígenos y a su vez son de interés en aplicaciones para el diagnóstico y como agentes terapéuticos para la transfección y vacunación.

Agradecimientos

Quiero agradecer la contribución en estas investigaciones de los siguientes colegas: Maikel González, Norma Galego, Dianelys Sainz, Cristine Wandrey, Carlos

Peniche, Liudys García, Yuri Aguilera, Armando Chávez, Enrique Prieto, Roxana Páez, Rosa Pérez, Juan González, Adriana Díaz, Marioly Vernhés Isabel Otero y Gisela Barrera.

Referencias

- [1]. SASTRE R, DE AZA S, SAN ROMÁN J. Biomateriales. Faenza Editrice Ibérica, S.L., Marzo 2004. 522 p.
- [2]. GONZÁLEZ M, GALEGO N, ORTIZ P, RAPADO M. Raman spectroscopy of poly(3-hydroxybutyrate) modified with poly(vinylacetate) by radiation induced copolymerization, *Nucleus*. 2007; (42): 40-44.
- [3]. RAPADO M, SAINZ D, FERRER A, WANDREY C. Physical-chemical changes in irradiated sodium alginate alginate. *Nucleus*. 2004; (35): 55-59.
- [4]. WANDREY C, SAINZ D. Purification of polymeric biomaterials. *AnnNY Acad Sci*. 2001; 944: 187-198.
- [5]. United States. FDA guidelines USP. Bacterial endotoxin test. 1991.
- [6]. RAPADO M, PENICHE C. Synthesis and characterization of pH and temperature responsible poly(2-hydroxyethyl methacrylate-co-acrylamide) hydrogels. *Polímeros: Ciencia e Tecnologia*, 2015; 25(6): 547-555.
- [7]. RAPADO M, RODRÍGUEZ A, PENICHE C. Hydrogel wound dressing preparation at laboratory scale by using electron beam and gamma radiation. *Nucleus*. 2013; (53): 24-31.
- [8]. GES A, VILTRES H, RAPADO M, AGUILERA Y. Radiation-induced synthesis of polyvinylpyrrolidone. (PVP) nanogels. *Journal of Physical Science and Application*. 2016; 6(5): 21-26.

- [9]. GARCÍA RODRÍGUEZ LAURA M, DÍAZ JIMÉNEZ DANIELA,, PÉREZ GUEVARA OL, et. al. Evaluación de la citotoxicidad de nanogeles de polivinilpirrolidona (PVP) en fibroblastos murinos. Revista Biomédica. 2019; 30(3). Disponible en: <https://www.revistabiomedica.mx/index.php/revbiomed/article/view/708>
- [10]. KOUL V, KUCKLING D, CHOUDHARY V. Interpenetrating polymer network (IPN) nanogels based on gelatin and poly(acrylic acid) by inverse miniemulsion technique: synthesis and characterization. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2011; 83(2): 204-213.
- [11]. MBHELE Z, SITTERT V, NEDELJKOVIC JM, et. al. Fabrication and characterization of silver polyvinyl alcohol nanocomposites. Chem Mater. 2003; 15(26): 5019-5024.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

CRedit / Conceptualización: Manuel Rapado Paneque. **Fuentes:** Manuel Rapado Paneque. **Curación de datos:** Manuel Rapado Paneque. **Software:** Manuel Rapado Paneque. **Análisis formal:** Manuel Rapado Paneque. **Supervisión:** Manuel Rapado Paneque. **Adquisición de fondos:** Agencia de Energía Nuclear y Tecnología de Avanzada (AENTA), Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). **Validación:** Manuel Rapado Paneque. **Investigación:** Manuel Rapado Paneque. **Visualización:** Manuel Rapado Paneque. **Metodología:** Manuel Rapado Paneque. **Administración de Proyecto:** Manuel Rapado Paneque. **Redacción – borrador original:** Manuel Rapado Paneque. **Redacción – revisión y edición:** Manuel Rapado Paneque.

Laboratorio de fechado del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)

 Luis Baly Gil¹,  Raúl Arteche Díaz¹,  Piet Van Espen²,  Héctor Lubian de Iraola¹,
 Inés Quesada Wiemann¹,  Teresita Cepero Chao¹,  Dania Rodríguez Nápoles¹,
 Guido Martín Hernández¹,  Leandro Luis Peñalver Hernández³,  Roberto Alfonso Denis Valle³,
 Enrique Castellano Abella⁵,  Ana E. Cabal Rodríguez¹,  María García Fernández¹,
 Iván Pupo González¹,  Juan Carlos Gutiérrez Viera¹,  Armando Chávez Ardanza¹,
 Angelina Díaz García¹,  Fátima Padilla Cabal⁵,  Jossué Arteche Díaz¹,  Carlos M. Cruz Inclán¹,
 Antonio Leyva Fabelo¹,  Javier Riberón Peña¹,  Alexis Rosales Suárez¹,  Pilar Oropesa Verdecia⁶

¹ Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN), La Habana, Cuba

² Universidad de Amberes, Amberes, Bélgica

³ Instituto de Geología y Paleontología. (IGP), La Habana, Cuba

⁴ Ministerio de Energía y Minas, (MINEM), La Habana, Cuba

⁵ Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InsTEC), La Habana, Cuba

⁶ Centro de Isótopos (CENTIS), Mayabeque, Cuba

baly@ceaden.edu.cu

Resumen

El presente trabajo resume las principales tareas desarrolladas durante los últimos 20 años encaminadas al desarrollo de capacidades humanas y técnicas para la creación de un laboratorio de fechado para la determinación de la edad de formación de los depósitos sedimentarios mediante la técnica de luminiscencia ópticamente estimulada del cuarzo. Para ello se hace un análisis de los antecedentes que sirvieron de base a la decisión de empezar este proyecto, sus objetivos y resultados alcanzados. Al final se plantean las perspectivas de desarrollo.

Palabras clave: fechado; luminiscencia; cuarzo; dosimetría retrospectiva.

Dating laboratory of the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN)

Abstract

This paper summarizes the main activities carried out during the last 20 years aimed at developing human and material capacities supporting the creation of a dating laboratory for determining the age of sedimentary deposits using the quartz optically stimulated luminescence technique. Following an analysis of the background conditions that served as the basis for the decision to start this project, the specific goals are exposed and the achieved results are presented. Finally, the perspective developments are commented.

Key words: luminescence dating; quartz; retrospective dosimetry.

Introducción

La determinación de la edad de objetos de interés geológico permite no solo conocer la historia de la evolución de la Tierra, también permite elaborar modelos de evolución en base a los cuales hacer planes de adaptación o mitigación. El método de fechado por luminiscencia del cuarzo es uno de los tantos métodos de fechado, pero el único que permite la determinación directa de la edad de formación de un depósito sedimentario con un alcance entre los mil y 250 mil años cuando se usa el cuarzo o entre 1000 y 500 mil años cuando se utiliza el feldespato.

Este método es relativamente joven. La idea del método es publicada por primera vez en la revista Nature [1]. Este método se basa en las propiedades de algunos minerales, lo cuales al estar expuestos a la radioactividad natural se vuelven luminiscentes. La intensidad de la luminiscencia es proporcional al tiempo que han estado expuestos y esta se va acumulando mientras el mineral no es expuesto a la luz. Por tanto el método determina la última vez que el mineral estuvo expuesto a la radiación solar antes de que sobre este se depositara una nueva capa de sedimentos. Fue en el año 2003 cuando se publica el desarrollo del protocolo SAR (del inglés Single Aliquot Regenerative) [2] que garantiza la

obtención de edades confiables. A ello contribuyó el diseño y construcción de equipos altamente especializados y complejos para el análisis de la luminiscencia del cuarzo o del feldespato [3, 4]. Para el cálculo de la edad de formación se utiliza la ecuación fundamental del método de fechado por luminiscencia [5].

$$\frac{\text{Edad (años)} = \text{Dosis Total Recibida (Gy)}}{\text{Tasa de Dosis Anual (Gy/año)} \quad (1)$$

La magnitud *Dosis Total Recibida* se refiere a la dosis recibida por el mineral durante el tiempo de enterramiento y es medida con un lector de luminiscencia previamente calibrado y con la aplicación del protocolo SAR. La magnitud *Tasa de Dosis Anual* se refiere a la dosis anual recibida por el mineral y esta se determina a partir de la concentración de elementos radiactivos naturales presentes en el sedimento. La concentración de estos elementos es normalmente tan baja que para su determinación se utiliza un sistema espectrométrico de bajo fondo.

Como se explicó anteriormente, para preservar la señal luminiscente, el mineral no puede ser expuesto a la luz en ningún momento del proceso, empezando por la toma de muestras en el campo, su tratamiento en el laboratorio y el proceso de medición.

Antecedentes

El proyecto del laboratorio de fechado surge en el grupo láser del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). El objetivo de este grupo organizado en el año 1988 era de diseñar y construir equipos basados en la óptica y el láser para dar respuesta a las necesidades del programa nuclear cubano. Tras la reestructuración del programa nuclear cubano, los objetivos de este grupo se reorientan hacia las necesidades de otros sectores de la economía. Dentro de los resultados más relevantes de aquella etapa se puede mencionar los equipos para el control metroológico de la radiación láser LM-09, el fluorímetro láser para la determinación de trazas de uranio en solución acuosa LF2 y los láseres de nitrógeno LN-03 (figura 1), de este último se exportaron dos equipos a Brasil y uno a Alemania.

Para finales de los años 90, las pocas perspectivas de ventas de los láseres de nitrógeno sumado al hecho que desde el punto de vista científico estos no tenían novedad determinaron el cierre de esta línea de trabajo, y con ello la búsqueda de una nueva línea de trabajo.

Para definir esta nueva línea se elaboraron tres directrices: La primera, en lugar de orientarnos hacia la producción de instrumentos se buscaría una línea en la cual se pudiera ofrecer un servicio científico de complejidad y utilizar nuestra capacidad de construir instrumentos para crear nuestras propias condiciones; segundo la línea de trabajo debía pertenecer a un área donde la óptica y lo nuclear se combinaran, en especial si se incluía la fluorimetría. La otra directriz era de que esta línea tuviera respaldo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

La línea de trabajo escogida entonces fue la dosimetría retrospectiva. En aquel entonces se estaba utilizando la luminiscencia del cuarzo extraído de materiales constructivos en la zona de Chernóbil para hacer un análisis retrospectivo de la radiación que recibió la población tras el accidente [6]. En el año 2001, viaja a Cuba para participar en un evento NURT la Profesora Dra. Ann Wintle, una de las autores del protocolo SAR [2], y en el intercambio ella recomienda dirigir el proyecto hacia el fechado de sedimentos que utilizan la misma metodología pero la aplicación es más amplia. Así se decide empezar el proyecto del laboratorio de fechado.

Objetivos del proyecto del laboratorio de fechado

Se definieron dos objetivos del proyecto del laboratorio de fechado, el primero crear las capacidades técnicas y humanas que permitieran ofrecer un servicio de fechado, el segundo participar en los temas de discusión internacional sobre el método de fechado por luminiscencia.

Para evaluar el alcance de los objetivos propuestos basta con observar el mapa mundial de distribución de estos laboratorios (figura 2) con fecha del 2014 conformado a partir de los participantes en el evento LED2014 celebrado en Montreal, Canadá. Este tipo de laboratorio solo existían en países altamente desarrollados; en el continente americano sin contar Cuba, solo en tres países: E.U.A, Canadá y Brasil. Mucho más reducido es el grupo de países donde se fabrican los lectores automatizados de luminiscencia, el elemento distintivo de estos laboratorios. Los elevados costos de adquisición y mantenimiento de estos equipos son una de las razones por las que existen pocos laboratorios de este tipo.

Desarrollos técnicos del laboratorio de fechado

El desarrollo del lector automatizado de luminiscencia constituyó el objetivo de mayor complejidad.



Figura 1. A la izquierda el fluorímetro con resolución temporal LF2, en el centro el medidor de energía y potencia láser LM-09 y a la derecha el láser de nitrógeno LN-03



Figura 2. Mapa mundial de distribución por países de laboratorios de fechado (2014). Los círculos azules muestran los países donde se han desarrollado lectores automatizados de luminiscencia.

Para ello se estudiaron los diseños de los equipos comerciales, y se evaluaron los tiempos de ejecución de una secuencia típica que por lo general se toma más de 16 horas. Se analizó por esta razón, para poder responder a los tiempos demandados por los clientes, los laboratorios poseen por lo general un mínimo de 3 equipos. De este análisis y de la comprensión de que para nosotros solo sería posible construir una sola unidad, se decidió no reproducir estos diseños y proponer un diseño donde se aplicaran un conjunto de ideas destinadas a la reducción de los tiempos de ejecución de las secuencias.

En el año 2009 se pone en funcionamiento el lector automatizado de luminiscencia LF02 (figura 3). Este equipo seguía la estructura básica de los equipos comerciales; un sistema de estimulación luminosa y detección de la luminiscencia, una fuente radiactiva de radiación beta, un sistema de posicionamiento automático de muestras, que traslada las muestras hacia la fuente radiactiva hacia el sistema de estimulación detección (vea: https://www.youtube.com/watch?v=_znlq6wXB94)

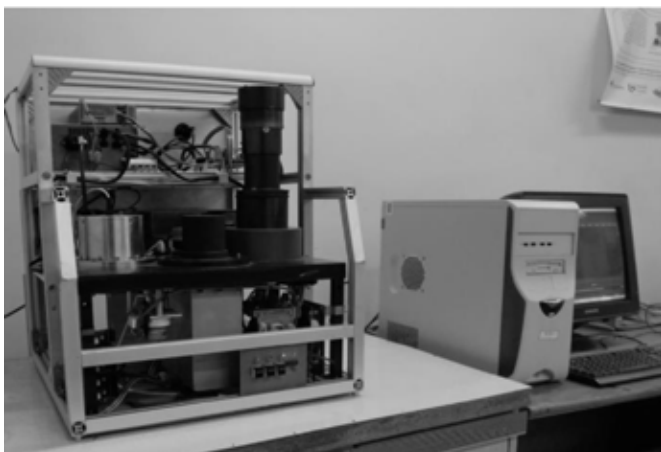


Figura 3. Lector automatizado de luminiscencia LF02

y un sistema electrónico que da soporte a estos sistemas y que sostiene la comunicación con una computadora. El LF02 tiene incorporado en su diseño un conjunto de ideas para acelerar el proceso de ejecución, que lo diferencian substancialmente de los equipos comerciales. Sin la posibilidad de explicar cada método, se destacan la introducción de la irradiación externa, la organización de la doble cola, el enfriamiento forzado de las muestras y la fusión de procesos de medición. El desarrollo del LF02 fue solo posible por la solidaridad de investigadores y técnicos de la Universidad de Amberes (UA) en Bélgica. Un equipo de tal complejidad necesitaba componentes mecánicos y electrónicos cuya adquisición no era posible. Los colegas de la UA asumieron la adquisición de estos componentes y se encargaron de la construcción de los elementos mecánicos de alta precisión.

El término automatizado no se refiere solo al posicionamiento de las muestras. Las secuencias de medición son procesos complejos de muchas variables experimentales, que varían de muestra a muestra y de proceso a proceso. La secuencia de medición es un fichero definido por el operador del equipo y requiere de una edición. Con el objetivo de generar los ficheros de secuencia fue desarrollado en conjunto con la Universidad de Ciencias Informáticas un conjunto de aplicaciones denominada SequenceToolkit [7]. Este conjunto incluye la aplicación GenSec con la cual se generan o editan las secuencias de medición. También contiene una aplicación GenRep, encargada de compilar y extraer de forma automatizada los resultados de medición generados por algunos cientos de curvas de medición. Está en proceso de desarrollo otra aplicación (GenVis) que realizará de forma automática el proceso de análisis que hoy se hace de forma manual.

Otro desarrollo importante fue el sistema espectrométrico gamma de bajo fondo (figura 4). Construido a partir de un detector de germanio de alta pureza (HPGe) recuperado y la modificación de un sistema de bajo fon-



Figura 4. Sistema espectrométrico gamma de bajo fondo.

do. La electrónica del sistema de conformación de la señal y el sistema ADC se organizaron utilizando módulos CREATE disponibles en el centro. El sistema multicanal y el software asociado fueron desarrollados por el proyecto. Esto último permitió la implementación de formas de medición para contrarrestar la inestabilidad en el suministro eléctrico, haciendo mediciones continuas con secciones de relativa corta duración. A pesar de los esfuerzos realizados, no fue posible obtener un detector HPGe nuevo que diera estabilidad a este sistema. En determinado momento fue necesario pasar a utilizar un sistema de detección basado en un sistema de centelleo con un cristal de NaI. Esto requirió de un largo proceso de puesta en marcha hasta encontrar una configuración que cumpliera con las expectativas del sistema. También fue necesaria la sustitución de las muestras de referencia, ya que la región de análisis del nuevo detector se movió hacia la zona de las altas energías.

Tanto la fuente radiactiva del lector LF02 como el sistema espectrométrico necesitan de muestras de referencias para ser calibrados. Con este propósito fueron diseñadas dos muestras de referencias. La primera construida en colaboración con el Centro de Higiene de las Radiaciones (CPHR) consistió en una muestra de cuarzo, seleccionada por su respuesta natural y posteriormente sensibilizada. Estas muestras fueron empaquetadas para que no recibieran luz y fueron irradiadas en el patrón secundario del CPHR a valores de dosis conocidos. Hasta la fecha han sido elaborados 4 lotes de muestras de referencia, el primero con muestras de 2 Gy, el segundo y tercero con muestras de 5 Gy y el cuarto con muestras de 5 y 30 Gy, este último para calibrar el sistema de calibración externa. La comparación entre la respuesta de las muestras de referencias nuestras de 5 Gy con las muestras de referencias de los laboratorios Riso, con una dosis de 4.8 Gy [8] da resultados satisfactorios.

La otra muestra de referencia utilizada para calibrar energéticamente el sistema espectrométrico y determinar la eficiencia del detector fue elaborada junto con el Centro de Isótopos (CENTIS). Una muestra de cuarzo na-

tural fue tratada químicamente hasta que su contenido radiactivo era inferior al límite de detección del sistema de bajo fondo. En base a esta muestra y a partir de una propuesta de actividad específica, se adicionaron cantidades específicas de fuentes radiactivas en solución de ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs y ^{60}Co . La actividad de la muestra fue finalmente determinada en el sistema espectrométrico del CENTIS el cual tiene trazabilidad internacional.

Uno de los elementos típicos de los laboratorios de fechado es el laboratorio de preparación de muestras, un laboratorio con las condiciones para realizar de ataques químicos con la peculiaridad de que la iluminación es la de los cuartos de fotografía. En el CEADEN no existía un laboratorio que tuviese estas condiciones, por lo que fue necesario construir uno y equiparlo.

En el año 2013 estaban listas las condiciones básicas del laboratorio. En ese momento se decide buscar instituciones dentro de las áreas de la geología o la oceanología que pudieran tener interés en la técnica y comenzar el proceso de divulgación y capacitación. Dentro de todas las instituciones a las que se acudió, el Instituto de Geología y Paleontología (IGP) tuvo un especial interés de participar y a hasta el día de hoy se mantiene una fructífera colaboración entre las dos instituciones. En el año 2014 se realiza la primera campaña conjunta CEADEN-IGP para de toma de muestras en provincia de Pinar del Río. En fue utilizado por primera vez un dispositivo de toma de muestras nombrado MAMBI, desarrollado y construido en el CEADEN. Este dispositivo permitía tomar las muestras sin que estas sean expuestas a la luz (figura 5) y al mismo tiempo soportar los estreses mecánicos. Hasta la fecha se han realizado 5 campañas a lo largo del país y se dispone de cerca de 100 muestras a analizar.



Figura 5. Primera campaña de recolección de muestras.

Desarrollo científico del laboratorio

Parte importante del desarrollo científico del laboratorio ha estado relacionado con los desarrollos técnicos del proyecto. La complejidad individual de muchos de los elementos y la novedad en muchos casos requirió de estudios, procesos de optimización mediante simu-

lación y comprobación experimental. Dentro de estos estudios se destaca los estudios para el desarrollo del sistema estimulación óptica [9,10]. Estos trabajos también han tenido una amplia presentación en evento científicos nacionales e internacionales.

También han sido tratados temas de corte fundamental, en específico se ha venido estudiando una propuesta de mecanismo denominado deposición de carga en el cuarzo durante el proceso de irradiación natural, y su influencia en la señal luminiscente [11, 12, 13].

El laboratorio ha estado vinculado a la formación de jóvenes especialistas. En estos años 8 estudiantes de diferentes universidades han realizado su tesis bajo la dirección de los especialistas del laboratorio.

Conclusiones

En el desarrollo del laboratorio de fechado han participado muchos especialistas de varias instituciones del país. La colaboración internacional también ha sido determinante para alcanzar este resultado, que distingue a Cuba entre los pocos países latinoamericanos con un laboratorio de este tipo, y con la singularidad de haber trabajado en el desarrollo de equipamiento especializado. En el futuro cercano se prevé terminar los análisis de muestras que ha colectado el laboratorio. También pretende continuar con los estudios básicos relacionados con el proceso de deposición de carga.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a todos aquellos que de alguna forma contribuyeron al desarrollo del laboratorio de fechado. En especial queremos reconocer el aporte financiero del sistema de programas gestionado por la Agencia Nuclear y Tecnologías de Avanzadas (AENTA) sobre la base de la cual se desarrollo este proyecto.

Referencias bibliográficas

- [1]. HUNTLEY DJ, GODFREY-SMITH DI, THEWALT MLW. Optical dating of sediments. *Nature*. 1985; 313: 105-107.
- [2]. MURRAY AS, WINTLE AG. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiat. Meas.* 2000; 32: 57-73.
- [3]. BORTOLOTT VJ. A new modular high capacity OSL reader system. *Radiat. Meas.* 2000; 32(5-6): 751-757.
- [4]. BÖTTER-JENSEN L; BULUR E, DULLER GAT, MURRAY AS. Advances in luminescence instrument systems. *Radiat. Meas.* 2000; 32(5-6): 523-528.
- [5]. AITKEN MJ. *Thermoluminescence Dating*. London: Academic Press, 1985.
- [6]. BAILIFF IK, STEPANENKO VF, GÖKSU HY, et. al. The application of retrospective luminescence dosimetry in areas affected by fallout from the Semipalatinsk Nuclear Test Site: an evaluation of potential. *Health Physics*. 2004; 87(6): 625-641.
- [7]. FERRÁS HERNÁNDEZ CM, Quesada Hernández YL. Paquete de aplicaciones para la generación y análisis de secuencias de medición del lector LF02 [tesis de grado]. La Habana, Universidad de Ciencias Informáticas. Disponible en: <https://repositorio.uci.cu/jspui/handle/123456789/7102>
- [8]. HANSEN V, MURRAY AS, BUYLAERT JP, et. al. A new irradiated quartz for beta source calibration. *Radiat. Meas.* 2015; .81: 123-127.
- [9]. QUESADA I, OTAZO MR, BALLY L, GONZÁLEZ, Y. Design of a blue LED stimulation unit with a highly uniform illumination pattern. *Ancient TL*. 2004; 22 (2): 29-34.
- [10]. BALLY L, QUESADA I, OTAZO MR, GONZÁLEZ Y. Influence of non-uniformity of the stimulation source on quartz OSL signals. *Radiat. Meas.* 2006; 41(7-8): 787-789.
- [11]. BALLY L, MARTÍN G, QUESADA I, PADILLA F, ARTECHE R. Monte Carlo determination of the infinite matrix dose rate correction factors for 250 µm quartz and TLD500 chip. *Radiat. Meas.* 2015; 72: 23-30.
- [12]. AUTZEN M, MURRAY AS, GUÉRIN G, BALLY L, et. al. Luminescence dosimetry: Does charge imbalance matter? *Radiat. Meas.* 2018; 120: 26-32.
- [13]. BALLY L, QUESADA I, MURRAY AS, et. al. Modeling the charge deposition in quartz grains during natural irradiation and its influence on the optically stimulated luminescence signal. *Radiat Meas.* 2021; 142: 106564.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

CRedit / Conceptualización: Luis Baly Gil, Raúl Arteché Díaz. **Curación de datos:** Teresita Cepero Chao, Héctor Lubián de Iraola, Inés Quesada Wiemann, Dania Rodríguez Nápoles. **Software:** Inés Quesada Wiemann, Raúl Arteché Díaz, Guido Martín, Fátima Padilla Cabal, Juan Carlos Gutiérrez Viera. **Supervisión:** Enrique Castellano Abella, Angelina Díaz García, Carlos M. Cruz Inclán, Antonio Leyva Fabelo. **Adquisición de fondos:** Piet Van Espen, María García Fernández, Ana Ester Cabal Rodríguez, Enrique Castellano Abella, Antonio Leyva Fabelo. **Validación:** Héctor Lubián de Iraola, Inés Quesada Wiemann, Teresita Cepero Chao, Dania Rodríguez Nápoles. **Investigación:** Héctor Lubián de Iraola, Inés Quesada Wiemann, Teresita Cepero Chao, Roberto Alfonso Denis Valle, Guido Martín Hernández, Raúl Arteché Díaz, Jossué Arteché Díaz, Fátima Padilla Cabal, Juan Carlos Gutiérrez Viera, Pilar Oropesa Verdecia, Javier Riberón Pena, Alexis Rosales Suárez, Armando Chávez Ardanza. **Visualización:** María García Fernández. **Metodología:** Héctor Lubián de Iraola, Iván Pupo González, Teresita Cepero Chao, Dania Rodríguez Nápoles. **Administración de Proyecto:** María García Fernández, Luis Baly Gil, Dania Rodríguez Nápoles. **Escritura – borrador original:** Luis Baly Gil. **Redacción – revisión y edición:** Luis Baly Gil.

La tecnología de irradiación en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Resultados y perspectivas

 Enrique Fco. Prieto Miranda,  Armando Chávez Ardanza
Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN).
Calle 30 esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana. Cuba.
efprieto@ceaden.edu.cu

Resumen

La tecnología de irradiación es aplicada en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) desde su inauguración en 1987, donde el Centro disponía de un irradiador de laboratorio, el cual fue desmantelado en el año 2010. En el presente trabajo se muestra el desarrollo alcanzado actualmente, las instalaciones de irradiación, los sistemas dosimétricos empleados, sistema de gestión de la calidad, los aspectos normativos, los resultados y las perspectivas de trabajo.

Palabras clave: tecnología de irradiación; instalaciones de irradiación; radioesterilización; sistemas dosimétricos.

The radiation technology in the Center of Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN). Results and perspectives

Abstract

The radiation technology is applied in the Center of Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) from its inauguration in 1987, where the Center disposed of a laboratory irradiator, which was dismantled in the year 2010. In the present paper is shown the development reached currently, the irradiation facilities, the dosimetric systems used, quality management system, the normative aspects, the results and the work perspectives.

Key words: radiation technology; irradiation facilities; radiosterilization; dosimetric systems.

Introducción

Dentro de las líneas de investigación-desarrollo que tiene el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN), la tecnología de irradiación es una de las fundamentales, por los resultados alcanzados. Desde la inauguración de la Institución esta tecnología se ha empleado con diferentes fines, en diversas especialidades, como son, en la agricultura, la biología, la medicina, la biotecnología, la modificación de materiales, y la dosimetría de altas dosis, entre otras.

Dada la pequeña capacidad de irradiación de sus instalaciones, ya que son irradiadores de laboratorios, fundamentalmente se realizan trabajos de investigaciones-desarrollo con aplicaciones a corto y mediano plazo en instalaciones de una mayor capacidad de irradiación, además se establecen tecnologías de irradiación para diferentes productos y objetivos, y se realizan servicios de irradiación de esterilización, por ejemplo de tejido óseo y material quirúrgico y de descontaminación de algunos productos.

En el presente trabajo se muestra el desarrollo alcanzado actualmente y las perspectivas de trabajo, así como, las instalaciones de irradiación, sistemas dosimétricos empleados, sistema de gestión de la calidad, y los aspectos normativos y regulatorios.

De estos siete problemas antes mencionados cinco están vinculados al deterioro de los suelos, por lo que se hace necesario su cuidado y vigilancia ya que es un recurso importante para la sostenibilidad alimentaria del país. Siendo la degradación de los suelos uno de los problemas más serios que se presenta en la agricultura.

Desarrollo de la Tecnología de irradiación en el CEADEN

En el año 1971 se instala un irradiador de laboratorio ruso, tipo PX- γ -25 M, con una capacidad de 1 litro y una actividad inicial de 6.03 kCi, en el cual se realizaron investigaciones en el campo de la química de las radiaciones y la radiobiología. Este irradiador primeramente se ubicó en el Grupo de Radiobiología del Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ) y posteriormente en

1986 se trasladó hacia el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN), el irradiador fue desmantelado en el año 2010 [1].

En el año 1994 mediante un Proyecto de Asistencia Técnica con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) [2] se instala un irradiador de laboratorio, ruso, tipo PX- γ -30, de una capacidad de 4 litros y una actividad inicial de 10,45 kCi, para el desarrollo de las tecnologías de irradiación y brindar servicios de alto valor agregado, esta instalación se encuentra funcionando actualmente, luego de ser recargado con fuentes de cobalto-60 y ejecutado un mantenimiento capital, con lo que se recuperaron sus capacidades técnicas, en el año 2017 (figuras 1 y 2) [3].



Figura 1. Irradiador PX- γ -30.



Figura 2. Trabajo durante la recarga.

En febrero del 2012, se instala en el CEADEN un nuevo irradiador de laboratorio, húngaro, tipo ISOGAMMA LLCo, de una capacidad de 5 litros y una actividad inicial de 24,0 kCi (figura 3), con el objetivo de desarrollar investigaciones, tecnologías y servicios [4].



Figura 3. Irradiador ISOGAMMA LLCo

Las dos instalaciones de irradiación se encuentran ubicadas en el Laboratorio de Dosimetría de altas dosis y Química de las radiaciones del Departamento de Radiobiología.

Cada instalación de irradiación dispone de sistemas de seguridad radiológica para la protección del personal de operación, y el local de irradiación de un sistema de seguridad física, con sensores de movimiento y cámara, además de equipos para el monitoreo de radiación en el área de irradiación.

Para una satisfactoria aplicación de la tecnología de irradiación en diferentes productos y objetivos, esta se lleva a cabo mediante la interrelación entre varias instituciones del país y los diferentes laboratorios del Departamento de Radiobiología del CEADEN, el cual tiene personal especializado en:

- Radioesterilización y/o descontaminación de diferentes productos biológicos, médico-farmacéuticos y de suplementos nutricionales.
- Radiomutagénesis.
- Desarrollo de membranas de hidrogeles poliméricos y amniótica.
- Irradiación de frutas para el beneficio sanitario y fitosanitarios.
- Dosimetría de altas dosis.
- Operación y mantenimiento de irradiadores gamma.
- Trabajos para el desmantelamiento y la recarga de irradiadores de laboratorio.
- Aplicación de la técnica del insecto estéril.
- Irradiación de patrimonio cultural y material archivo.

- Asesoría en la modificación tecnológica de instalación semi-industrial, y en aspectos de Seguridad radiológica.
- Además de la contribución a la formación de especialistas.

Control del proceso de irradiación

Los sistemas dosimétricos empleados, tanto en la calibración como en el control del proceso de irradiación, son realizados sobre normas nacionales e internacionales, como son las de la ISO/ASTM (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales). Los sistemas dosimétricos utilizados son Fricke, alanina (ESR), etanol-clorobenceno (ECB), TLD, Perspex Red, así como indicadores de dosis [5, 6].

Se participó en los ejercicios del Servicio Internacional de Verificación de Dosis (IDAS) del OIEA, con resultados satisfactorios durante los años 2000, 2001 y 2002, lo que constituye una base sólida de nuestra trazabilidad metrológica internacional.

Resultados satisfactorios fueron alcanzados en los ejercicios de intercomparación de altas dosis realizados en la región de Latinoamérica en los últimos años (2017 y 2019), lo que han demostrado la competencia de estos sistemas.

Aspectos normativos

El laboratorio tiene implementado un sistema de gestión de la calidad para la operación de las dos instalaciones de irradiación y los servicios ejecutados en ellas, acorde con los requisitos de la Norma NC-ISO 9001: 2015, así como con las normas cubanas NC-ISO 11137: 2014 Esterilización de productos para el uso médico. La radiación. Parte 1: Requerimientos para el desarrollo, validación y el control rutinario de un proceso de esterilización para equipos médicos. Parte 2: Establecimiento de la dosis de esterilización. Parte 3: Recomendaciones sobre aspectos dosimétricos y NC 680:2009 Irradiación de alimentos-Requisitos Sanitarios Generales. Además se emplea la Specific Safety Guide. No. SSG-8- Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities, del OIEA [1].

El Comité Técnico de Normalización de Irradiación, CTN 125, fue creado con Resolución 27/2016, el cual garantiza la adopción de las normas internacionales y la actualización de los aspectos normativos nacionales relacionados con estas tecnologías.

Resultados

Durante todos los años de aplicación de la tecnología de irradiación en el CEADEN se pueden enumerar los resultados significativos siguientes:

- Irradiación de tejido óseo y piel de cerdo para injerto.
- Aplicación de técnicas de irradiación para la obtención de nuevas variedades agrícolas.
- Desarrollo de membranas amniótica y de hidrogel para uso clínico en el tratamiento de pacientes quemados y con zonas cruentas en la piel.

- Recuperación de materias primas, suplementos nutricionales, productos farmacéuticos y dispositivos médicos mediante servicios a escala de laboratorio de descontaminación y/o esterilización.
- Resultados parciales satisfactorios con el empleo de la irradiación como método alternativo con fines sanitarios y fitosanitarios, en mango y guayaba.
- Empleo de la técnica del insecto estéril (TIE) en el control del mosquito *Aedes aegypti*.
- Sistemas dosimétricos para la calibración y el control del proceso de irradiación, verificados mediante ejercicios de intercomparación.
- El trabajo realizado para la recarga del irradiador PX- γ -30
- Soporte técnico para la remodelación y recarga de la Planta de irradiación de alimentos del IIIA
- Cuba, fundador de la Asociación Latinoamericana de Tecnologías de Irradiación (ALATI). 2014.
- Creado el Comité Técnico de Irradiación . No.125. 2016.

Perspectivas de trabajo

Teniendo en consideración la experiencia adquirida y las tecnologías emergentes por irradiación, se pueden establecer las perspectivas siguientes:

- Empleo de la tecnología de irradiación como método alternativo con fines sanitarios y fitosanitarios, en frutas de interés comercial.
- Integración de la nanotecnología y tecnologías de irradiación para el desarrollo de materiales funcionales de utilidad para la salud, agricultura y el medioambiente.
- Continuar con la aplicación de las técnicas de irradiación para la obtención de nuevas variedades agrícolas resistentes a los efectos negativos del cambio climático.
- Desarrollo y aplicación de las tecnologías de irradiación para el tratamiento de residuales líquidos y sólidos.
- Continuar fortaleciendo el empleo de los sistemas de control dosimétrico y de gestión de los procesos de irradiación en los países de la región.
- Empleo de la técnica del insecto estéril, para lucha contra plagas dañinas a la salud del hombre y la agricultura.
- Potenciar la aplicación de las tecnologías de irradiación para la conservación del Patrimonio cultural y material de archivo.
- Realizar estudios de factibilidad técnico-económico de nuevas capacidades industriales de irradiación.

Conclusiones

- El desarrollo alcanzado en el Proceso de Irradiación ha sido posible:
- por el Programa Nuclear Cubano

- la cooperación con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- El empleo de la tecnología de irradiación puede alcanzar resultados satisfactorios en diferentes sectores de la sociedad contemporánea.

Agradecimientos

A los especialistas del Departamento de Radiobiología, a la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzadas (AENTA) y al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Referencias bibliográficas

- [1]. PRIETO MIRANDA EF, CHÁVEZ ARDANZA A, MORENO ÁLVAREZ D, RODRÍGUEZ CARDONA R, PÉREZ RIVERO B. Aplicación de la tecnología de irradiación en Cuba. Actualidad y perspectivas. *Nucleus*. 2019; (66): 1-6.
- [2]. Informe Técnico cierre de proyecto CUB/8/010. Desarrollo de técnicas de irradiación (1989-1994).
- [3]. Informe Técnico cierre de proyecto CUB /1/011. Mejorar el impacto de la tecnología de irradiación (2012-2013).
- [4]. Informe Técnico cierre de proyecto CUB/8/023. Obtención de membranas de hidrogel para aplicaciones biomédicas obtenidas con radiaciones gamma (2007-2008).
- [5]. PRIETO MIRANDA EF, CHÁVEZ ARDANZA A., CUESTA FUENTE G. Development and current state of dosimetry in Cuba. In: Techniques for high dose dosimetry in industry, agriculture and medicine. IAEA-TECDOC-1070. Proceedings of a Symposium held in Vienna. 2-5 November 1998. p. 319-326.
- [6]. International Agency Energy Atomic (IAEA). Dosimetry for food irradiation. Technical Report Series No. 409. Vienna: IAEA, 2002.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

CRedit / Conceptualización: Enrique Fco. Prieto Miranda y Armando Chávez Ardanza. **Fuentes:** Enrique Fco. Prieto Miranda. **Análisis formal:** Enrique Fco. Prieto Miranda. **Investigación:** Enrique Fco. Prieto Miranda. **Visualización:** Enrique Fco. Prieto Miranda y Armando Chávez Ardanza. **Metodología:** Enrique Fco. Prieto Miranda. **Redacción – borrador original:** Enrique Prieto Miranda y Armando Chávez Ardanza. **Redacción – revisión y edición:** Enrique Prieto Miranda y Armando Chávez Ardanza.

El estudio del daño radiacional en los materiales en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)

 Carlos M. Cruz Inclán,  Antonio Leyva Fabelo

Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN). Calle 30 Esq. 5ta Ave. Miramar, Playa, La Habana.
aleyya@ceaden.edu.cu; antonioleyvafabelo@gmail.com

Resumen

El Laboratorio de Daño del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) acumula más 30 años de experiencia en las investigaciones en la temática del daño radiacional en los materiales. Por la mira del grupo han pasado multitud de blancos: superconductores de altas temperaturas, diferentes nanoestructuras, semiconductores clásicos y avanzados, perovskitas, dispositivos detectores de radiaciones, etc. Fuentes de rayos gamma, electrones de altas energías, iones pesados, etc., han sido empleadas en las investigaciones. Múltiples técnicas de caracterización y simulación, modernas metodologías de cálculo han estado en las manos de los especialistas para hacer su trabajo. Centenares de publicaciones y participaciones en eventos científicos, cuatro Premios Nacionales de la Academia de Ciencias de Cuba (ACC), dos medallas Carlos J. Finlay, entre otros, más una encomiable labor docente, son parte de los resultados del colectivo. Una muy resumida historia de esta trayectoria científica dentro de la línea de trabajo de este Laboratorio es presentada en este trabajo.

Palabras clave: daño radiacional, desplazamientos atómicos, superconductores, semiconductores, nanoestructuras, simulación matemática

The study of radiation damage to materials at the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN)

Abstract

The Damage Laboratory of the Center for Technological Applications and Nuclear Development (CEADEN) accumulates more than 30 years of experience in research on the subject of radiational damage to materials. A multitude of targets have passed through the group's sights: high-temperature superconductors, different nanostructures, classical and advanced semiconductors, perovskites, radiation detection devices, etc. Gamma ray sources, high energy electrons, heavy ions, etc., have been used in investigations. Multiple characterization and simulation techniques, modern calculation methodologies have been in the hands of specialists to do their job. Hundreds of publications and participation in scientific events, four National Awards from the Cuban Academy of Sciences (ACC), two Carlos J. Finlay medals, among others, plus commendable teaching work, are part of the results of the group. A very summarized history of this scientific trajectory within the line of work of this Laboratory is presented in this work.

Key words: radiation damage, atomic displacement, superconductors, semiconductors, nanostructures, mathematical simulation.

Introducción

El efecto de la radiación ionizante sobre los materiales, conocido como daño radiacional (DR), puede conducir a la degradación de sus propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, etc., llevando a su deterioro e incapacidad de correcto desempeño en la aplicación donde se encuentra. Sin embargo, también se ha demostrado

que, bajo determinadas condiciones, los efectos de las radiaciones pueden tener un resultado contrario, potenciando la optimización de la estructura del blanco, que conduce a una manifestación más eficiente de algunas de sus propiedades.

El conocimiento de la resistencia a la radiación de los materiales semiconductores, nanoestructurados, superconductores, etc., garantizará que éstos se

puedan emplear de forma segura en las aplicaciones médicas, científicas o industriales que las requieran, a la par de que faciliten el desarrollo de nuevos y más útiles materiales.

El Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) desde el año 1990 tiene en su Departamento de Física un colectivo de especialistas de las ramas nucleares y de la ciencia de los materiales que orientaron sus esfuerzos científicos al estudio del DR en materiales sólidos de interés nuclear. Hasta el día de hoy estos colegas desarrollan investigaciones teóricas y experimentales en este campo con blancos que van desde cerámicas superconductoras de alta temperatura crítica (SCAT), hasta avanzados materiales semiconductores como el GaAs:Cr empleado en la fabricación de detectores.

Este trabajo pretende hacer un muy resumido recorrido por las principales actividades que ha realizado este colectivo de especialistas, mostrando algunos de sus resultados.

Materiales y métodos

Los superconductores de altas temperaturas críticas (SCAT) fueron el primer material estudiado por los especialistas de DR del CEADEN. Sus potencialidades para el transporte económico y sin pérdidas de muy altas corrientes, imprescindible en las ciencias nucleares, despertaron el interés hacia ellos. El $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO), sintetizado en el propio CEADEN [1], fue el SCAT masivo más profusamente estudiado, aunque también se investigaron sus capas gruesas, cerámicas de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ y otros.

Una vez que el CEADEN logró dar sus primeros pasos en el campo de las nanociencias al sintetizar nanocarbón (NCC) [2], estas y otras formas alotrópicas del carbono pasaron a ser también blancos de los estudios del DR.

En colaboración con el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares (IUIN) de Rusia, se estudió la resistencia a la radiación de un grupo de detectores híbridos. Estos detectores estaban destinados a la realización de experimentos de Física de las Altas Energías y aplicaciones de imagenología médica y otras. Entre los materiales sensores de esos detectores se seleccionó el arseniuro de galio compensado con cromo (GaAs:Cr) [3], al ser el más prometedor, pero también se estudiaron el CdTe y los clásicos Si y Ge, etc.

Otros materiales que en distintos momentos fueron objeto de los estudios sobre el DR en el CEADEN se pueden mencionar al silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), las perovskitas ferralíticas, los cristales centelleadores, etc.

Los blancos de las investigaciones siempre se irradiaron a temperatura ambiente. Como fuentes de rayos gamma se emplearon las dos cámaras gammas ^{60}Co MPX- γ -25M e ISOGAMMA-LLCo del CEADEN, y algunas fuentes patrones, como las de ^{57}Co y ^{137}Cs .

Como fuente de electrones se utilizó el acelerador lineal LINAC-200 de IUIN con una energía de salida de

aproximadamente 20 MeV, mientras que el ciclotrón U-400M de esa misma Institución se empleó para irradiar los blancos con iones pesados de ^{22}Ne acelerados hasta energías de 77 y 158 MeV.

Para la caracterización galvanomagnética se utilizaron métodos clásicos como el de Kelvin y la susceptibilidad magnética dinámica. También se midieron las características voltampéricas, capacitancia vs. voltaje, eficiencia de colección de cargas, y otras propiedades de los detectores, siempre en función del tipo, energía y dosis de radiación.

Para los estudios microestructurales se emplearon la Difracción de Rayos X (DRX), la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y la Espectroscopía Raman.

Como herramienta complementaria se empleó la simulación matemática de los procesos físicos. Para eso se utilizaron sistemas de códigos profesionales, como el MCNPX [4] y el SRIM-2013 [5], de conjunto con programas propios.

Entre estos últimos se contó con el MCCM (Método Clásico asistido por Monte Carlo) para el cálculo de las distribuciones del número de desplazamientos por átomos (*dpa*) en materiales sólidos [6]. Este programa hace uso de las teorías de dispersión elástica de los electrones y de las salidas del sistema de códigos MCNPX, permitiendo incluir el aporte de los positrones en los cálculos y analizar la contribución de cada especie atómica.

También se desarrolló y utilizó en las investigaciones una nueva metodología denominada "Simulación de Desplazamientos Atómicos mediante el Método de Monte Carlo" (MCSAD) [7] en la que se hace énfasis en simular y realizar el muestreo estadístico del proceso de formación de los *dpa* durante el transporte de las radiaciones gamma y electrónica.

Otras metodologías teóricas se emplearon ampliamente, como la Dinámica Molecular (DM) y la Teoría del Funcional de Densidad (DFT).

Algunos resultados obtenidos

Las muestras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, cerámica SCAT por excelencia, al ser expuestas a las radiaciones gamma revelaron que, en general, a bajas dosis y para diferentes energías de la radiación, tienen una respuesta sistemática y característica [8]. Se esclareció que a nivel intragranular se inducen efectos positivos que fortalecen los mecanismos de la superconductividad. Este efecto resulta simultáneamente modulado por una acción radiacional que debilita las junturas de Josephson, lo que trae como consecuencia un detrimento sistemático de las propiedades extrínsecas de transporte.

La figura 1(a) presenta la dependencia de la temperatura crítica, T_c , con la dosis de exposición para dos muestras. La T_c del material crece con la dosis hasta un valor máximo, tras el cual, comienza a caer de forma continua. El pico de T_c ocurre para una dosis ubicada entre los 100 y 200 kGy. Esta acción peculiar de la radiación gamma sobre los SCAT se sustenta principalmente en dos efectos: el relacionado con la demostrada capacidad de los rayos gamma de estimular la reorganiza-

ción de la estructura cristalina del material; y el asociado a la intensificación de los movimientos difusivos de las vacancias de oxígeno inducida por la interacción de la radiación electrónica secundaria con el material.

La dependencia de los parámetros de la red con la dosis en una de las cerámicas se presenta en la figura 1(b), y corrobora la capacidad de las radiaciones del ^{60}Co , a bajas y medianas dosis, de facilitar el reordenamiento de los oxígenos estructurales, proceso que conduce a la uniformidad cristalina de las cadenas Cu-O. Alcanzada la estructura termodinámicamente más estable, cualquier incremento de la dosis conlleva a un sobredopaje de defectos que modifica la estructura negativamente.

El estudio de las nanoestructuras se inició con el empleo de la MEB, orientada a un grupo de muestras de NCC, detectándose que estas eran inhomogéneas [9], pues además de las NCC se observaban la presencia de NTC simples y de paredes múltiples, carbono amor-

fo, etc. Luego de la exposición a las radiaciones gamma aparecían evidencias de un fenómeno de ruptura en los nanotubos presentes, con la consiguiente reducción de su longitud.

La dependencia de R vs. dosis en las NCC mostró un incremento inicial que alcanzó un valor máximo ubicado entre 100 kGy - 140 kGy, seguido de una caída monótona en el resto del intervalo de dosis (figura 2 (a)). Este comportamiento es consecuencia de la competencia entre los procesos de generación de nuevos defectos puntuales, su aniquilación y la formación de defectos más complejos que conducen al fortalecimiento de las uniones entre las nanopartículas presentes en la muestra. Las mediciones V-I para varias dosis, figura 2 (b), confirman que las propiedades de conducción de las muestras mejoran cuando la dosis de irradiación sobrepasa cierto valor umbral, manifestándose una transición de la conductividad eléctrica del tipo semiconductor al tipo metálico.

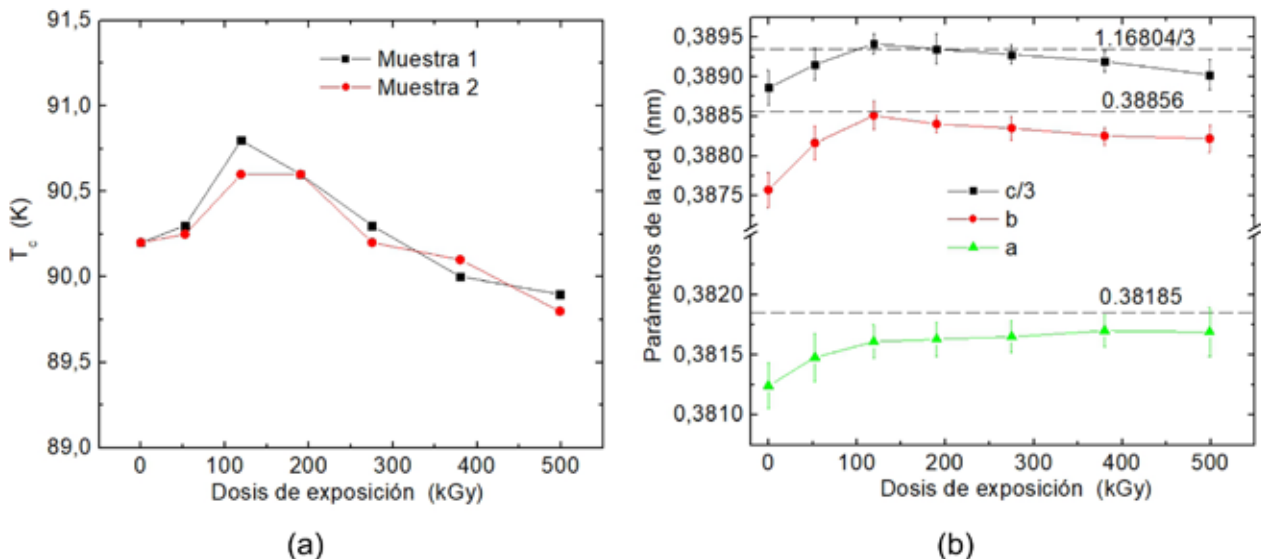


Figura 1. Dependencia de la T_c (a) y las dimensiones de la celda elemental (b) con la dosis de exposición en cerámicas de YBCO irradiadas con ^{60}Co .

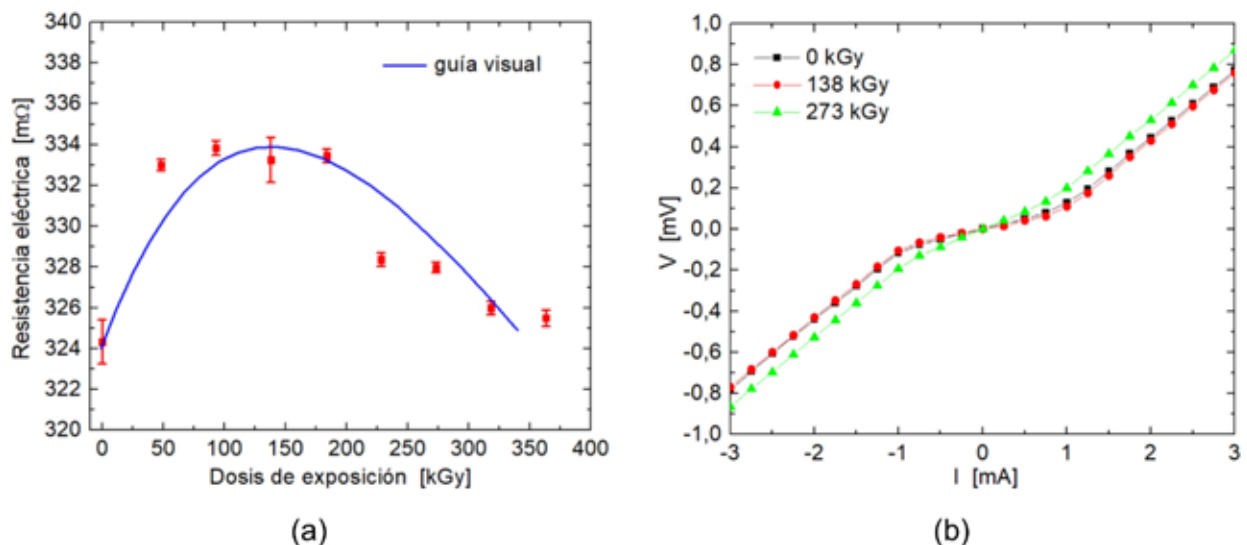


Figura 2. Dependencias de la resistencia eléctrica con la dosis (a), y de V-I para diferentes dosis de exposición (b) en muestras de nanocebollas de carbono.

La espectroscopía Raman ha resultado muy útil, por ejemplo, para estudiar el DR en los semiconductores, entre los que estuvo el GaAs:Cr. Las muestras de este material, base para la fabricación de detectores avanzados, fueron expuestas a los rayos gamma del ^{60}Co y a un haz de electrones de 20 MeV, y se analizaron mediante esta técnica. Un ejemplo de los espectros Raman tomados antes y después de la irradiación electrónica en una misma muestra se presenta en la figura 3(a).

Aunque a simple vista se aprecian sensibles diferencias, la deconvolución de los espectros (figura 3(b)), mostró que en el material estaban teniendo lugar significativos procesos estimulados por la radiación que conducen a la relajación del estado tensional de la estructura, al incremento de la cristalinidad, y a la disminución de la concentración de portadores libres, que en algunos casos llegó a ser del 2.31 % [10]. Los cambios observados deben estar relacionados con la generación de defectos de tipo Frenkel en la subred del arsénico, y a cambios radiacionalmente estimulados en la cantidad y características de defectos preexistente de mayor complejidad.

Se utilizaron también métodos galvanomagnéticos para caracterizar algunos detectores semiconductores, como el basado en GaAs:Cr, estudiándose la dependencia con la dosis recibida de importantes características como I-V y C-V. Los gráficos presentados en las figuras 4(a,b) muestran el comportamiento de estas dos características para diferentes valores de dosis de exposición al haz de electrones de 20 MeV [11].

Se aprecia la presencia de una ligera asimetría en I-V, más pronunciada a más altas dosis, que probablemente esté relacionado con la distribución asimétrica de potencial dentro del dispositivo, y que se modifica con el DR. Estas mediciones mostraron que la corriente de fuga aumentó de 3 a 7 veces con las dosis máximas alcanzadas, y puede ser debido a la introducción de daños por desplazamiento en el material, correspondientes a defectos primarios y complejos que conducen a la formación de nuevos niveles profundos en la banda prohibida.

En otro experimento, detectores Timepix con sensores GaAs:Cr y de Si fueron expuestos a haces de iones de neón de energías 77 y 158,4 MeV [12]. Se con-

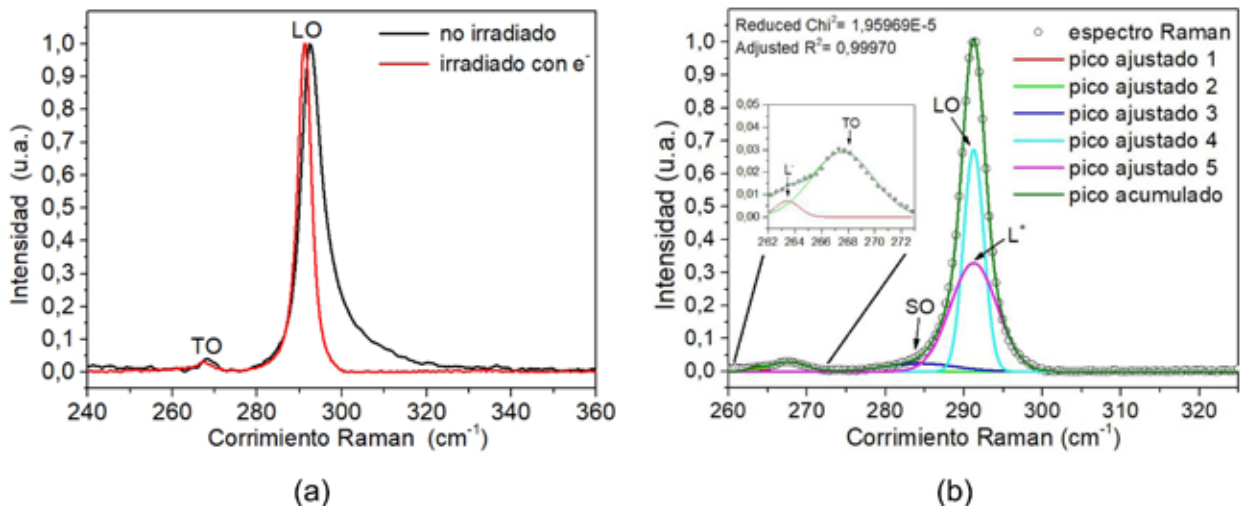


Figura 3. Superposición de los espectros Raman del GaAs:Cr antes y después de ser expuesto a electrones de 20 MeV (a), y espectro resuelto de la muestra irradiada (b).

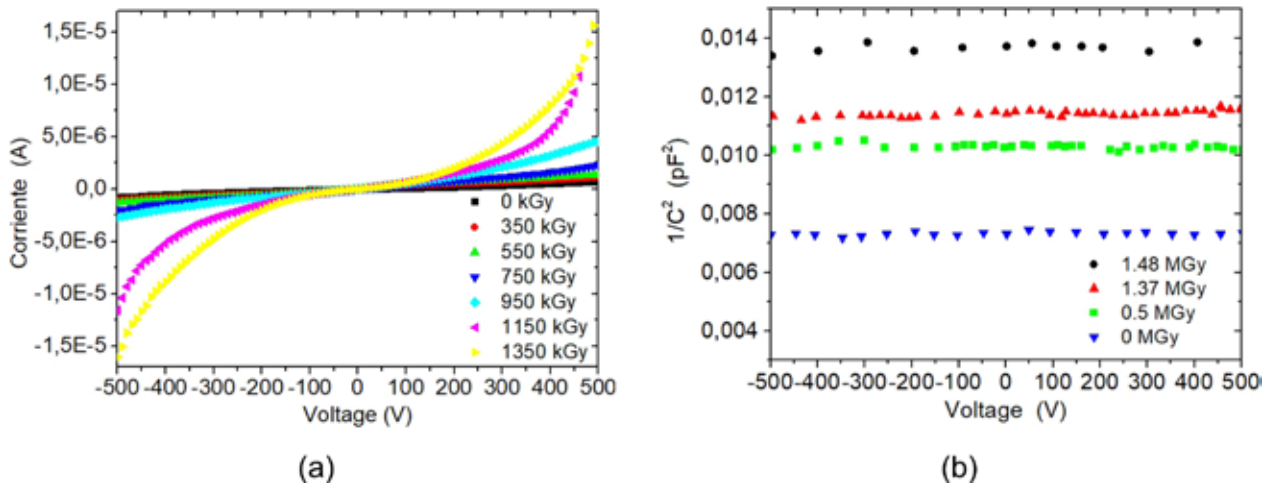


Figura 4. Característica volt-amperimétrica (a) y dependencia de la capacitancia con la tensión (b) para diferentes dosis de exposición en un detector de barrera de GaAs:Cr.

firmó la aparición del conocido como “efecto volcán” en el detector con sensor Si (tipo np), aunque estuvo absolutamente ausente en Timepix con sensor GaAs:Cr. Este fenómeno no se asocia a un posible DR, sino a efectos internos electrónicos vinculados con la protección para cargas de entrada muy altas en modo de recolección de huecos. Se empleó el sistema de códigos SRIM-2013 para calcular el alcance de los iones de ^{22}Ne para ambas energías en los dos blancos, y se estimó que en todos los casos más del 99.5 % de la energía depositada se pierde en procesos vinculados a la ionización, mientras que a la producción de daño en el material apenas va entre el 0.01 y el 0.008 %.

Múltiples trabajos teóricos y las dos metodologías desarrolladas en el Laboratorio (MCCM y MCSAD) han permitido evaluar en detalles el DR en un amplio espectro de materiales con resultados novedosos en este campo. Estos procedimientos posibilitaron calcular las energías umbrales de desplazamiento, T_d , para los átomos blanco, estudiar las secciones eficaces de producción de dpa , evaluar las distribuciones de los dpa con la profundidad y energía incidente, estimar los aportes de los sitios cristalinos y de cada especie atómica a los dpa , etc.

Las siguientes imágenes presentadas en la figura 5 son ejemplos de estas investigaciones. Por medio de los flujos de energía de partículas secundarias calculados con el MCNPX para detector GaAs:Cr de 900 μm , se pudo determinar con el código MCCM la distribución del número dpa , como se muestra en el ejemplo de la figura 5(a), para diferentes energías de fotones incidentes y para cada tipo de átomo [13]. Estas dependencias muestran que los perfiles de N_{dpa} aumentan con la energía del fotón, destacándose que con el aumento de la energía hasta los 6 MeV la cantidad de dpa correspondientes a los átomos de Ga y As se acercan entre sí; a partir de entonces la relación permanece inalterable.

La figura 5(b) presenta la distribución con la profundidad del número de vacancias calculado con el código SRIM, modelando la implantación de Mn^+ en un blanco de perovskita BaTiO_3 , a 250 keV [14]. La originalidad de esta simulación consistió en emplear para las diferentes especies atómicas las T_d calculadas aplicando los con-

ceptos de DM y DFT. Los resultados fueron comparados con ensayos similares reportados en la literatura.

Las siguientes referencias generales son el compendio de los trabajos más importantes del colectivo dedicado al DR en el CEADEN, y que por déficit de espacio no han podido ser presentados en estas páginas [6,8,15-19].

Finalmente se destaca que como resultado de las investigaciones en DR del CEADEN en el periodo 1990 al 2023 se publicaron 135 artículos científicos en diversas revistas, 1 capítulo de un libro [20], se presentaron 185 ponencias en eventos varios, y defendieron 42 Tesis de Licenciatura en Física Nuclear, tres Tesis de Maestría y tres Tesis de Doctorado [6, 8, 15], y se diseñó e imparte una asignatura docente vinculada a la temática del DR en el InSTEC. El Laboratorio fue distinguido con cuatro Premios de la ACC [15-19] y sus dos investigadores principales recibieron la Orden Carlos J. Finlay.

Los efectos de las radiaciones nucleares sobre las propiedades de los materiales sólidos continúan siendo de gran interés científico y tecnológico. Mantiene plena vigencia la necesidad del hombre de conocer en detalles el comportamiento de los materiales en los ambientes radiacionalmente agresivos donde se encontrarán. Bien puede ser en la imagenología médica, en la industria de la microelectrónica, la esterilización de productos, la nucleoenergética, las investigaciones básicas del micro-mundo, etc. Y no solo es imprescindible conocer cómo será el desempeño y la resistencia a las radiaciones de los diferentes materiales, sino que también estamos convocados a emplear eficientemente sobre ellos la llamada “ingeniería asistida por defectos”, posibilidad fascinante de modificar conscientemente las propiedades de un material bajo el efecto de las radiaciones.

En este contexto, la larga experiencia en el tema acumulada por los especialistas del CEADEN, y la pericia de éstos para dirigir sus esfuerzos a cualquier material que se entienda y constituya interés de la institución, la AENTA o el país, hacen que se cuente con una fortaleza única en Cuba apta para hacer frente a la tarea en la temática, por compleja o futurista que pueda parecer.

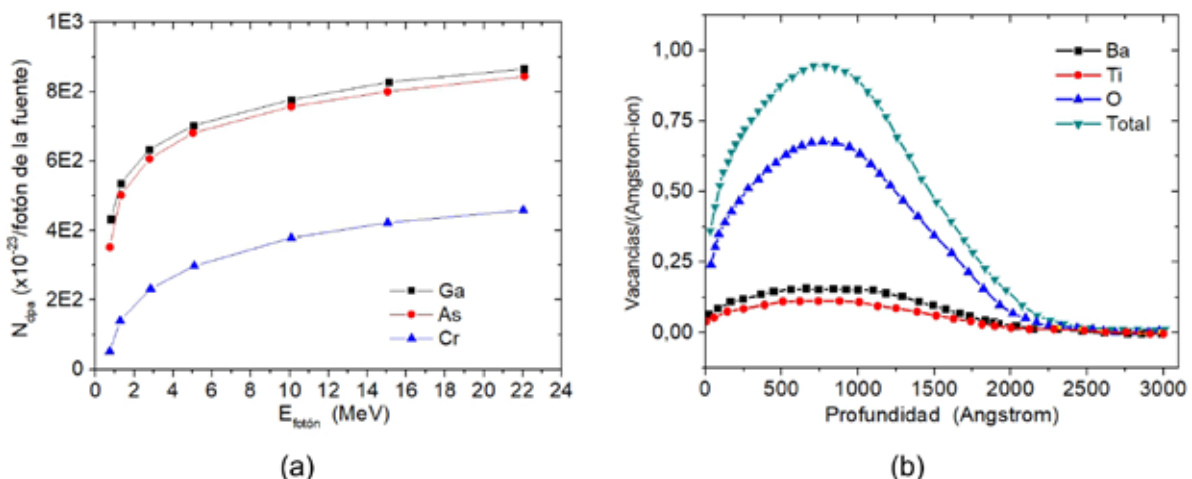


Figura 5. Dependencia del número de dpa con la energía de los fotones incidentes para cada especie de átomo en una muestra de GaAs:Cr (a), y distribución del número de vacancias con la profundidad para muestra de SrTiO_3 implantada con Mn^+ (b).

Conclusiones

El Laboratorio de DR del CEADEN durante más de treinta años de existencia ha tenido una trayectoria constante y fructífera en resultados, algunos de ellos expuestos muy brevemente en este trabajo. El núcleo del colectivo permanece activo y en su haber tienen más de 135 publicaciones, 185 ponencias en eventos, cuatro Premios de la ACC y otros altos estímulos, además de una muy amplia actividad docente. Indiscutiblemente, el CEADEN cuenta con una fortaleza humana única en Cuba apta para continuar acometiendo cualquier tarea en la temática.

Agradecimientos

Los autores queremos reconocer y agradecer la participación en las investigaciones aquí referidas a un grupo de colegas del CEADEN y estudiantes del InSTEC que en su momento contribuyeron decisivamente a la obtención de los resultados. Son ellos Ibrahim Piñera, Yamiel Abreu, Camilo Demyedenko, Eduardo González, Arturo Rodríguez, Adriana Torres, y otros. Igualmente agradecemos a los colegas del IUIIN que intervinieron en algunas de las investigaciones sobre el tema del DR que aquí se expusieron, destacando a Uladzimir Kruchonak, Said M. Abu Al Azm, Aleksei Zhemchugov y Piotr Smolyanskiy.

Referencias bibliográficas

- [1]. LEYVA A, CRUZ C, ARAGÓN B, SUÁREZ JC, MORA M. Obtención de cerámicas superconductoras con el empleo de reactivos cubanos. Optimización del método de síntesis. Reporte de la Comisión de Energía Atómica de Cuba. CEAC-R 1/91. p. 1-11.
- [2]. DARIAS J, CARRILLO E, CASTILLO R, ARTECHE J, et al. Sistema de descarga de arco sumergida para la síntesis de nanooxidos de carbono multicapas. Revista Cubana de Física. 2011; 28(1): 2-3. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00411-7>.
- [3]. AYZENSHTAT GI, BUDNITSKY DL, KORETSKAYA OB, NOVIKOV VA, et al. GaAs resistor structures for X-ray imaging detectors. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2002; 487: 96-101. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00951-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00951-8).
- [4]. WATERS LS, MCKINNEY GW, DURKEE JW, FENSIN ML, et al. The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code. AIP Conference Proceedings, 2007; 896(1): 81. <https://doi.org/10.1063/1.2720459>.
- [5]. ZIEGLER JF, ZIEGLER MD and BIRSACK JP. SRIM the stopping and range of ions in matter. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2010; 268(11-12): 1818-1823. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>.
- [6]. PIÑERA I. Simulation of atom displacements distribution profiles induced by photons and electrons in solid materials [tesis doctoral]. Departamento de Física, Universidad de Amberes, Bélgica. Abril, 2014. Identifier: c:irua:116687. <https://hdl.handle.net/10067/1166870151162165141>.
- [7]. CRUZ CM, PIÑERA I, CORREA C, ABREU Y, et. al. MCSAD: Monte Carlo simulation of atom displacements induced by fast electrons in solids. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Valencia, Spain, 2011; RTSD.S-282: 4622-4626. DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154746
- [8]. LEYVA A. Efectos de las radiaciones gamma sobre cerámicas superconductoras de interés en las tecnologías nucleares [tesis doctoral]. Facultad de Física, Universidad de La Habana. Cuba. Abril, 2014.
- [9]. LAGE J, LEYVA A, TOLEDO C, PIÑERA I, et. al. Electrical resistance behavior with gamma radiation dose in bulk carbon nanostructured samples. Proceedings of the XIV Workshop on Nuclear Physics and VIII International Symposium on Nuclear and Related Techniques. WONP-NURT'2013. Havana, Cuba. February 5-8, 2013. Identifier: PS-RP24: 141-144. ISBN 978-959-7136-98-9.
- [10]. LEYVA A, LEYVA D, RUBIERA JA, CRUZ CM, et. al. Study by Raman Spectroscopy of the induced radiation damage in GaAs:Cr exposed to 20 MeV electron beam. Revista Cubana de Física. 2021; 38(1): 4-9.
- [11]. KRUCHONAK U, ABOU EL-AZM S, AFANACIEV K, CHELKOVA, et. al. Radiation hardness of GaAs:Cr and Si sensors irradiated by electron beam. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020; 975: 164204-164214. doi: 10.1016/j.nima.2020.164204.
- [12]. ABU AL AZM SM, CHELKOVA G, KOZHEVNIKOV D, GUSKOV A, et. al. Response of Timepix detector with GaAs:Cr and Si sensor to heavy ions. Physics of Particles and Nuclei Letters. 2016; 13(3): 363-369.
- [13]. LEYVA A, RUBIERA JA, LEYVA D, PIÑERA I, et. al. Monte Carlo simulation of the radiation transport in chromium compensated gallium arsenide detectors. Nucleus, 2018; (64): 19-23.
- [14]. GONZÁLEZ E, ABREU Y, CRUZ CM, PIÑERA I, et. al. Molecular-dynamics simulation of threshold displacement energies in BaTiO₃. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2015; 358: 142-145. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.06.015>
- [15]. ABREU ALFONSO Y. Hyperfine parameters and radiation damage in semiconductors and superconducting materials. [tesis doctoral]. Departamento de Física, Universidad de Amberes, Bélgica. Abril, 2014. Identifier: c:irua:116686. <https://hdl.handle.net/10067/1166860151162165141>
- [16]. CRUZ CM, LEYVA A. Estudio de la respuesta al daño radiacional gamma de materiales cerámicos superconductores. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba, 2002. La Habana, Cuba.
- [17]. PIÑERA I, CRUZ CM, LEYVA A, ABREU Y. Método clásico asistido por Monte Carlo para la evaluación del daño radiacional en materiales sólidos. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba, 2012. La Habana, Cuba.
- [18]. ABREU Y, CRUZ CM, PIÑERA I, LEYVA A, et. al. Estudio teórico de los parámetros hiperfinos y del daño radiacional en materiales semiconductores y superconductores. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba 2016. La Habana, Cuba.
- [19]. CRUZ CM, PIÑERA I, LEYVA A, ABREU Y, et. al. Simulación numérica de procesos de desplazamientos atómicos inducidos por las radiaciones gamma y electrónica: herramientas y sistemática. Premio de la Academia de Ciencias de Cuba, 2016. La Habana, Cuba.
- [20]. CRUZ CM, PIÑERA I, LEYVA A, ABREU Y. Studies on the Gamma Radiation Responses of High Tc Superconductors. In: Superconductor. Chapter 7. p.135-160. 2010. doi: 10.5772/10122.

Recibido: 23 de enero de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2023

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit/Conceptualización: Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Curación de datos:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Análisis formal:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Adquisición de datos:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Investigación:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Metodología:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Administración del proyecto:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Recursos:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Software:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Supervisión:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Validación:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Visualización:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Redacción – borrador original:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo. **Redacción – revisión y edición:** Carlos M. Cruz Inclán y Antonio Leyva Fabelo.

Revistas certificadas

como Publicaciones Seriadadas Científico–Tecnológicas

2022

Cuba & Caña.....	AZCUBA
Anuario del Centro de Estudios Martianos	CE
Acta Botánica Cubana	CITMA
Anuario L/L. Estudios Lingüísticos	CITMA
Anuario L/L. Estudios Literarios	CITMA
Avances.....	CITMA
Avanzada Científica	CITMA
Biotecnología Aplicada	CITMA
Boletín Científico Técnico INIMET	CITMA
Boletín del Archivo Nacional	CITMA
Ciencia en su PC.....	CITMA
Ciencias de la Información.....	CITMA
Ciencias de la Tierra y el Espacio	CITMA
Ciencias Holguín.....	CITMA
Cubazoo	CITMA
Granma Ciencia	CITMA
Hombre, Ciencia y Tecnología	CITMA
Infociencia.....	CITMA
Innovación Tecnológica	CITMA
Isla, Ciencia y Tecnología	CITMA
Memorias de Geoinfo.....	CITMA
Normalización.....	CITMA
Nucleus	CITMA
Revista Cubana de Ciencias Sociales	CITMA
Revista Cubana de Filosofía	CITMA
Revista Cubana de Meteorología.....	CITMA
Serie Oceanológica.....	CITMA
Temas de Economía Mundial	CITMA
VacciMonitor.....	CITMA
Cuba: Investigación Económica.....	MEP
Arquitectura y Urbanismo.....	MES
Centro Agrícola	MES
Cuban Journal of Agricultural Science.....	MES
Cultivos Tropicales	MES
Ingeniería Energética	MES
Ingeniería Industrial	MES
Investigación Operacional	MES
Islas	MES

Revistas certificadas

Minería y Geología	MES	Revista Forestal Baracoa.....	MINAG
Novedades en Población	MES	Investigaciones Medicoquirúrgicas	MINAG
Pastos y Forrajes	MES	Ciencia y Tecnología de Alimentos.....	MINAL
Pedagogía Universitaria	MES	Cubaenvases	MINAL
Retos Turísticos	MES	Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras	MINAL
Revista CENIC Ciencias Biológicas	MES	ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar	MINAZ
Revista CENIC Ciencias Químicas	MES	INFOMIN	MINBAS
Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias	MES	Anuario de Investigaciones Culturales.....	MINCULT
Revista Cubana de Ciencia Agrícola	MES	Bibliotecas.....	MINCULT
Revista Cubana de Educación Superior	MES	Catauro.....	MINCULT
Revista Cubana de Química	MES	Clave	MINCULT
Ingeniería Mecánica	MES	Siga La Marcha.....	MINCULT
Revista de Protección Vegetal	MES	Temas.....	MINCULT
Revista de Salud Animal	MES	Órbita Científica	MINED
Revista del Jardín Botánico Nacional	MES	Varona	MINED
Santiago	MES	Pedagogía Profesional	MINED
Tecnología Química	MES	Revista IPLAC	MINED
Universidad de La Habana	MES	Luz	MINED
Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones ...	MES	Transformación.....	MINED
Universidad y Sociedad.....	MES	Maestro y Sociedad	MINED
Centro Azúcar	MES	Pedagogía y Sociedad.....	MINED
Ingeniería Hidráulica y Ambiental	MES	Revista Cubana de Medicina Militar	MINFAR
Biología Vegetal	MES	Investigaciones Medicoquirúrgicas	MININT
Economía y Desarrollo	MES	Anuario del Centro de Investigaciones Jurídicas	MINJUS
Cofin Habana	MES	ACIMED	MINSAP
Anuario de la Facultad de Ciencias Económicas		Acta Médica del Centro.....	MINSAP
y Empresariales	MES	Anuario Científico CECMED	MINSAP
Revista de Producción Animal.....	MES	Archivo Médico de Camagüey.....	MINSAP
Retos de la Dirección	MES	Correo Científico Médico.....	MINSAP
Revista Cubana de Ingeniería	MES	Educación Médica Superior.....	MINSAP
Congreso Universidad.....	MES	Folia Dermatológica Cubana	MINSAP
Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias	MES	Gaceta Médica.....	MINSAP
Estudios de Desarrollo social: Cuba y América Latina.....	MES	Humanidades Médicas.....	MINSAP
Revista de Arquitectura e Ingeniería.....	MICONS	Medi Ciego	MINSAP
Agrotecnia de Cuba	MINAG	Medicentro Electrónica	MINSAP
Café Cacao	MINAG	Medisan.....	MINSAP
Ciencia y Tecnología Ganadera.....	MINAG	MEDISUR	MINSAP
Citrifrut	MINAG	Panorama. Cuba y Salud	MINSAP
Fitosanidad.....	MINAG	Revista del Hospital Psiquiátrico de La Habana	MINSAP
Revista Computarizada de Producción Porcina.....	MINAG	Revista Cubana de Farmacia.....	MINSAP
Revista Cubana de Ciencia Avícola	MINAG	Revista Cubana de Anestesiología	
Revista Cubana del Arroz	MINAG	y Reanimación	MINSAP

Revista Cubana de Angiología y Cirugía Vascular	MINSAP	Revista Cubana de Medicina Física y Rehabilitación	MINSAP
Revista Cubana de Cirugía	MINSAP	Acuacuba	MIP
Revista Cubana de Endocrinología	MINSAP	Transporte, Desarrollo y Medio Ambiente	MITRANS
Revista Cubana de Enfermería	MINSAP	Estudio	UJC
Revista Cubana de Estomatología	MINSAP		
Revista Cubana de Genética Comunitaria	MINSAP		
Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Medicina Transfusional.....	MINSAP		
Revista Cubana de Higiene y Epidemiología	MINSAP		
Revista Cubana de Informática Médica	MINSAP		
Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas	MINSAP		
Revista Cubana de Medicina.....	MINSAP		
Revista Cubana de Medicina General Integral.....	MINSAP		
Revista Cubana de Medicina Tropical	MINSAP		
Revista Cubana de Obstetricia y Ginecología	MINSAP		
Revista Cubana de Oftalmología.....	MINSAP		
Revista Cubana de Ortopedia y Traumatología.....	MINSAP		
Revista Cubana de Pediatría	MINSAP		
Revista Cubana de Plantas Medicinales	MINSAP		
Revista Cubana de Reumatología.....	MINSAP		
Revista Cubana de Salud Pública	MINSAP		
Revista Cubana de Salud y Trabajo.....	MINSAP		
Revista de Ciencias Médicas de La Habana.....	MINSAP		
Revista de Ciencias Médicas de Pinar del Río.....	MINSAP		
Revista de Información Científica	MINSAP		
Revista Electrónica “Dr. Zoilo E. Marinello Vidaurreta”	MINSAP		
Revista Habanera de Ciencias Médicas	MINSAP		
Revista Médica Electrónica	MINSAP		
Revista Cubana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular	MINSAP		
Finlay.....	MINSAP		
Edumecentro	MINSAP		
CorSalud.....	MINSAP		
Revista Cubana de Ciencias Informáticas	MINSAP		
Multimed	MINSAP		
Revista Cubana de Alimentación y Nutrición.....	MINSAP		
Revista Cubana de Neurología y Neurocirugía	MINSAP		

Instrucciones a los AUTORES para publicar en nucleus

Para la redacción de los manuscritos a publicar en las secciones de **Ciencias Nucleares e Innovación Tecnológica**

- Los artículos originales deben tener una extensión máxima de 10 cuartillas (a una columna) incluidas tablas (un máximo de 5) e ilustraciones (un máximo de 5). Se enviarán por correo electrónico, en Word y en Arial 12 a 1,5 espacios, o entregar en la propia redacción de la revista en soporte electrónico. El total de líneas por páginas es 30 como máximo.
- Los artículos tendrán el siguiente orden: Resumen (español e inglés), Introducción, Materiales y métodos, Resultados, Discusión, Conclusiones, Recomendaciones (opcional), Agradecimientos (opcional), Referencias bibliográficas. Estas secciones deben estar bien definidas, aunque no necesariamente con subtítulos. No se escribirá punto al final de los subtítulos de las diferentes secciones.
- Cada trabajo deberá acompañarse de una carta firmada por el autor correspondiente, donde se declare que no existe **Conflicto de Intereses** entre los autores y además donde se confirme que dicho trabajo no se ha enviado a otra publicación con anterioridad.
- Los artículos están sujetos a arbitraje y a la aprobación del Consejo Editorial.
- Las contribuciones a la Revista se divulgan sin costo alguno para los autores. Una vez aceptados para su aprobación, los derechos de reproducción (copyright) son propiedad de la casa editorial.

Autor (es): Especificar nombres y dos apellidos así como la institución de procedencia.

Título: No debe exceder de 120 letras, o 20 palabras, ni contener abreviaturas, fórmulas químicas, ni nombres patentados (en lugar de genéricos). Como caso excepcional se aceptará la inclusión de siglas de uso común y generalizado en la literatura científico-técnica internacional. El título debe aparecer en español e inglés.

Resumen: No debe exceder de 250 palabras, ni contener siglas, abreviaturas ni referencias bibliográficas. Como caso excepcional se aceptará la inclusión de siglas de uso común y generalizado en la literatura científico-técnica internacional. Debe indicar los objetivos principales y alcance de la investigación, describir los métodos empleados, resumir los resultados y enunciar las conclusiones principales. Debe aparecer escrito en estilo impersonal, en pretérito, en español e inglés.

Se reflejará el contenido del documento a partir de 3 a 10 palabras claves al pie del resumen y en orden de importancia. Se escribirán en español, al pie del resumen en español y en inglés, al pie del resumen en idioma inglés. Por su parte el INIS insertará los descriptores correspondientes a la indización de cada trabajo.

ORCID: (código de identificación única para los investigadores): Representa una identificación inequívoca de un autor de una publicación. Este código es gratuito y para adquirirlo es necesario registrarse en el sitio <https://orcid.org/register>.

Introducción: Exponer con toda la claridad posible, la naturaleza y alcance de la investigación, revisar las publicaciones pertinentes, indicar el método de investigación si se estima necesario, mencionar los principales resultados de la investigación y expresar la conclusión o conclusiones principales sugeridas por los resultados.

Materiales y métodos: La mayor parte de esta sección se debe escribir en pasado y dar toda clase de detalles. La finalidad principal es describir y que los resultados sean reproducibles. En los materiales hay que incluir las especificaciones técnicas y las cantidades exactas, así como la procedencia o el método de preparación. Se deben emplear los nombres genéricos o químicos.

Resultados: Se debe hacer una descripción amplia, clara y sencilla de los experimentos, ofreciendo un panorama general pero sin repetir los detalles experimentales de los Materiales y Métodos. Se deben presentar los datos más representativos. La exposición se debe redactar en pretérito.

Discusión: Se deben presentar de forma expositiva los principios, relaciones y generalizaciones que los Resultados indican. Se deben señalar las excepciones o las faltas de correlación y delimitar los aspectos no resueltos. Mostrar cómo concuerdan (o no) los resultados e interpretaciones con los trabajos anteriormente publicados. Se deben exponer las consecuencias teóricas del trabajo y sus posibles aplicaciones prácticas. Resuma las pruebas que respaldan cada conclusión. Los tiempos verbales oscilarán entre el presente y el pasado.

Conclusiones: Se deben formular de forma clara y ordenada. No deberán incluir referencias bibliográficas.

Recomendaciones (opcional): Se deberá cuidar de reflejar solamente aquellas que consideren opciones para lograr un mayor desarrollo en la temática reflejada en el artículo y que resulten fáciles de ejecutar.

Agradecimientos (opcional): Se debe agradecer cualquier ayuda científico-técnica importante recibida de cualquier persona que haya colaborado en el desarrollo del trabajo. Entre otros aportes se pueden considerar la provisión de equipos, materiales especiales, así como la participación significativa en la revisión y presentación del artículo.

Referencias bibliográficas: Todos los documentos consultados se hacen constar al final del trabajo bajo el epígrafe Referencias bibliográficas. No se usan notas al pie de página. Se deben enumerar solo obras importantes y publicadas e incluir, de forma priorizada, trabajos de publicación reciente. Los trabajos originales no sobrepasarán las 20 citas; las revisiones, de 25 a 50. Se deben cotejar todas las partes de cada referencia contra la publicación original antes de presentar el artículo. Las referencias se deben enumerar en el texto con números arábigos, entre corchetes, en el lugar en

que se apliquen y siguiendo un orden de aparición consecutivo. Las referencias, con todos los datos requeridos (apellido, nombre del autor (es), título del trabajo, título de la publicación, año; volumen, número de la publicación, página inicial–página final), se incluirán después de las Conclusiones, o de los Agradecimientos, en caso de existir estos últimos. Si tiene 5 o más autores, se mencionarán los 4 primeros, seguidos de «et al.». Los títulos de las publicaciones periódicas se deben adecuar al sistema INIS (véase IAEA–INIS–11).

A continuación, a modo de ejemplo, se presentan dos referencias de trabajos en publicaciones periódicas:

[12] HILLEGONDS DJ, FRANKLIN S, SHELTON DK, VIJAYAKUMAR S, VIJAYAKUMAR V. The Management of Painful Bone Metastases with an Emphasis on Radionuclide Therapy. *J. Natl. Med. Assoc.* 2007; (99): 785–794.

[24] SRIVASTAVA SC. Treatment of joint and bone pain with electron emitting radiopharmaceuticals. *Indian J. Nucl. Med.* 2004; 19(3): 89–97.

Las referencias a trabajos publicados en Memorias de un evento deberán incluir la siguiente información: apellido, nombre del autor (es), título del trabajo; memorias de que evento (su denominación en el idioma original o transliteración en caso de idioma con alfabeto distinto al latino), lugar y fecha de la realización del mismo, así como entidad organizadora del evento y fecha de la publicación. A continuación se ofrecen referencias, a modo de ejemplo:

[13] WHITE JR, CHAPMAN DM, BISWAS D. Fuel Management Optimization Based on Generalized Perturbation Theory. *Proceedings of the Conference on Advances in fuel Management.* Toronto, Canada, June 9–12 1986. Canadian Nuclear Society. 1986.

[4] DI GEORGIO M. Respuesta multidisciplinaria desarrollada en Argentina ante un suceso radiológico. VIII Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. I Congreso Latinoamericano del IRPA. V Congreso Nacional de Protección Radiológica. 11 al 15 de octubre 2010. Medellín, Colombia. 2010.

Las referencias a trabajos de revistas en Internet deben incluir: Los autores (4 como máximo, et al). Título del artículo. Abreviatura de la revista. Año ; Volumen (número): páginas. Disponible en: URL del artículo. A modo de ejemplo:

[17] GUPTA M, CHOUDHURY PS. Systemic radionuclide therapy for bone pain palliation in cancer patients. *Cancer News.* 2014, (consultado 20 de Jun 2016). 18(2): 12–14. Disponible en: <http://www.rgcirc.org/UserFiles/cancer-news-june-2014.pdf>

Contribución de autoría (CREDIT): Los roles de autoría serán identificados en el orden siguiente, se incluye a cada autor en el rol que le corresponde y omitiendo los roles que no procedan en cada caso:

1. Conceptualización: xxxxxx
2. Curación de datos: xxxxxx
3. Análisis formal: xxxxxx
4. Adquisición de fondos: xxxxxx
5. Investigación: xxxxxx
6. Metodología: xxxxxx

7. Administración del proyecto: xxxxxx
8. Recursos: xxxxxx
9. Software: xxxxxx
10. Supervisión: xxxxxx
11. Validación: xxxxxx
12. Visualización: xxxxxx
13. Redacción – borrador original: xxxxxx
14. Redacción – revisión y edición: xxxxxx

Cada rol se define de la siguiente forma:

1. **Conceptualización:** ideas; formulación o evolución de los objetivos y metas generales de la investigación.
2. **Curación de datos:** actividades de gestión para anotar (producir metadatos), depurar datos y mantener los datos de la investigación (incluido el código de software, cuando sea necesario para interpretar los propios datos) para su uso inicial y su posterior reutilización.
3. **Análisis formal:** aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales u otras técnicas formales para analizar o sintetizar datos de estudio.
4. **Adquisición de fondos:** adquisición del apoyo financiero para el proyecto que conduce a esta publicación.
5. **Investigación:** realización de una investigación y proceso de investigación, realizando específicamente los experimentos, o la recolección de datos/evidencia.
6. **Metodología:** desarrollo o diseño de la metodología; creación de modelos.
7. **Administración del proyecto:** responsabilidad de gestión y coordinación de la planificación y ejecución de la actividad de investigación.
8. **Recursos:** suministro de materiales de estudio, reactivos, materiales, pacientes, muestras de laboratorio, animales, instrumentación, recursos informáticos u otras herramientas de análisis.
9. **Software:** programación, desarrollo de software; diseño de programas informáticos; implementación del código informático y de los algoritmos de apoyo; prueba de los componentes de código existentes.
10. **Supervisión:** responsabilidad de supervisión y liderazgo en la planificación y ejecución de actividades de investigación, incluyendo la tutoría externa al equipo central.
11. **Validación:** verificación, ya sea como parte de la actividad o por separado, de la replicabilidad/reproducción general de los resultados/experimentos y otros productos de la investigación.
12. **Visualización:** preparación, creación o presentación del trabajo publicado, específicamente la visualización/presentación de datos.
13. **Redacción–borrador original:** preparación, creación o presentación del trabajo publicado, específicamente la redacción del borrador inicial (incluyendo la traducción sustantiva).
14. **Redacción – revisión y edición:** preparación, creación o presentación del trabajo publicado por los miembros del grupo de investigación original, específicamente revisión crítica, comentario o revisión – incluyendo las etapas previas o posteriores a la publicación.

Abreviaturas, siglas y símbolos: Deben ser los aceptados internacionalmente. Las abreviaturas y siglas se deben explicar la primera vez que se mencionan. Los símbolos y caracteres griegos, al igual que los subíndices y supraíndices, se deben definir claramente. Los símbolos que no sean de uso corriente deberán ser descritos con claridad en el texto.

Tablas: Se deben ordenar con numeración arábica e incluirse al final del trabajo. No se pondrá punto al final del encabezamiento de la tabla.

Figuras: Los términos, las abreviaturas y los símbolos utilizados en las figuras deben ser los mismos que aparecen en el texto. No se utilizarán caracteres, ni símbolos poco frecuentes (son preferibles los círculos, cuadrados o triángulos en blanco o rellenos). Si son muy complejos se deben aclarar en una leyenda concisa. Los símbolos y caracteres deben ser claros y de tamaño suficiente, de manera que al reducirlos para la publicación sean legibles. Cuando se confirme que el número a publicar de la revista incluirá la variante impresa, para la diferenciación de varias curvas que concurren en una misma figura no se utilizarán colores, sino diferentes tipos de caracteres.

Ecuaciones y fórmulas: Las ecuaciones matemáticas se deben escribir en letras cursivas, con precisión, en especial los subíndices y supraíndices. Evite el uso de exponentes complicados y la repetición de expresiones elaboradas.

El significado de los símbolos se explica debajo de la ecuación. En la descripción de los símbolos se utilizan dos puntos (:).

Ejemplo:

$$e = v \cdot t$$

donde:

e: Espacio recorrido

v: Velocidad

t: Tiempo

El producto de dos o más unidades en forma de símbolos se indica con una cruz (x) como signo de multiplicación.

Ejemplo:

N x m (Newton metro)

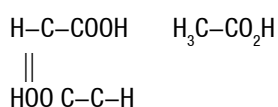
T x km (toneladas kilómetro)

En la división de unidades expresada en símbolos, se utiliza la línea horizontal (—), la línea oblicua (/) o las potencias negativas.

Ejemplo:

km/m, km x h⁻¹

En las fórmulas químicas los enlaces deben ir centrados y lo más unido posible a los átomos que se enlazan.



Unidades: Como norma general se deberá emplear el Sistema Internacional de Unidades y prescindir de símbolos y abreviaturas inadecuados.

Escritura de números

1. Los números enteros con más de tres dígitos se escriben en períodos de tres, de derecha a izquierda, dejando entre sí un espacio. Se exceptúan los números de télex, teléfonos, números de casas en las direcciones, páginas, años, leyes, decretos, resoluciones y patentes.
2. En la numeración decimal, la separación de la parte entera de la decimal, se hace mediante una coma (,). La parte entera, se escribe en grupos de tres dígitos, de derecha a izquierda, a partir de la coma, separada entre sí, por un espacio. La parte decimal se escribe también en grupos de tres dígitos, de izquierda a derecha, a partir de la coma.
3. Cuando se escriben números seguidos unos de otro, se separan con puntos y coma (;) si son decimales, y mediante comas (,) si todos los relacionados son enteros.
4. Después de un valor numérico cualquiera, los símbolos se escriben dejando un espacio entre dicho valor y la primera letra del símbolo. Ejemplos: 15 %, 10 °C.

Para la redacción de manuscritos a publicar en **Otras Secciones**

Los artículos de las demás secciones de la revista deben tener como objetivo difundir, con rigor científico y de forma asequible al público en general, temas relacionados con la energética nuclear, las diversas aplicaciones de las técnicas nucleares, energía nuclear, la seguridad nuclear, la protección radiológica, salvaguardias y no proliferación. Los trabajos no deben exceder las 10 cuartillas, incluidas ilustraciones y tablas. Deben contener resumen y título en español e inglés. El título, las tablas e ilustraciones, así como las referencias bibliográficas, seguirán las mismas indicaciones que rigen para los artículos de la sección Ciencias Nucleares e Innovación Tecnológica. Las secciones son las siguientes:

- Panorama Nuclear
- Ámbito Regulatorio
- Salvaguardias y No Proliferación
- En la Espiral
- De Interés.

Los artículos de estas secciones están sujetos a la aprobación del Consejo Editorial. A consideración del Consejo Editorial podrán ser sometidos también a arbitraje.

INFORMACIÓN GENERAL

La revista será publicada únicamente en versión digital, excepto que previamente se confirme por la editorial la publicación también en la variante impresa. Nucleus es revista arbitrada, certificada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, que acredita oficialmente el carácter científico-tecnológico de la publicación seriada, y que contribuye a su homologación internacional. Los autores serán informados oportunamente acerca del estado del proceso editorial de sus trabajos. En particular, acerca de la acep-

tación o no por el Consejo Editorial de los artículos para su publicación en la revista.

Cuando la revista se publique en versión impresa, los autores recibirán de forma gratuita dos ejemplares de la revista en la que aparece publicado su artículo.

VÍAS DE PRESENTACIÓN DE LOS MANUSCRITOS

En la redacción de la revista:

Calle 20 No 4111–4113 e/ 18–A y 47, Playa, Ciudad de La Habana, Cuba

Por correo electrónico: nucleus@cubaenergia.cu

Por la web: www.cubaenergia.cu/nucleus/nucleus.htm

Instructions for AUTHORS to publisher on nucleus...



Devoted to **Nuclear Science** and **Technological Innovation**

- Original papers should not exceed 10 pages (one column) including tables (up to 5) and illustrations (up to 5). Papers shall be either sent by email, in Word format, Arial 12th size font with 1,5 line spacing, or shall be directly delivered to the Editorial Department of the journal in an electronic medium. There is a maximum of 30 lines per page.
- Papers shall have the following order: Summary (in English and Spanish) Introduction, Materials and methods, Results, Discussion, Conclusions, Recommendations (optional), Acknowledgements (optional) and Bibliographic References. These sections should be well defined, though not necessarily with headlines.
- Each work must be accompanied by a letter signed by the corresponding author, stating that there is no **Conflict of Interest** between the authors and also confirming that said work has not been previously submitted to another publication.
- Papers are subject to a peer review and approval of the Editorial Board.
- Contributions to the journal are distributed free of charge to authors. Once selected for their approval, copyright is owned by the publishing house.

Author(s): Specify full name(s) and surname(s) as well as the institution.

Title: It should be both in English and Spanish and should not exceed 120 characters, or 20 words, nor include acronyms, abbreviations, chemical formulas or registered names (instead of generic names). Exceptionally, including acronyms of general use in Scientific and technical literature shall be accepted.

Abstract: It should not exceed 250 words, nor should contain acronyms, abbreviations or references. It should indicate the main objectives and scope of the research, describe the used methods, summarize the results and state the main conclusions. It should be written impersonally, in past tense in both Spanish and English. The document content will be based on 3 to 10 key words at the bottom of the abstract, arranged in order of importance, both in Spanish and in English at the bottom of the corresponding abstract in each language. INIS shall include its appropriate descriptor index(es) in each paper.

ORCID: (unique identification code for researchers): Represents an unequivocal identification of an author of a publication. This code is free and to acquire it is necessary to register on the site <https://orcid.org/register>.

Introduction: Explain the nature and scope of the research as clearly as possible, review relevant literature; indicate the research methods, if necessary; mention the main research results and state the conclusion or main conclusions drawn by the results.

Materials and methods: Most of this section should be written in past tense and full details shall be provided. The main purpose is to make a description and reproduce the results. The materials should include technical specifications, the exact quantities used, as well as the source or preparation method. Generic or chemical names should be used.

Results: A broad, clear and simple description of experiments should be made, providing an overview but without repeating the details on the materials and methods used in the experiments. The most representative data should be provided. The statement should be written in the past tense.

Discussion: Principles, relationships and generalizations from the results must be set out. Exceptions of lack of correlation should be noted, and unresolved issues should be identified. It is important to show how consistent (or not) are the results and interpretations with previously published papers. The theoretical implications of the work and its possible practical applications should be stated. Evidence supporting each conclusion should be summarized. Present and past tenses are to be used.

Conclusions: It should be made as clear as possible. Bibliographic references shall not be included.

Recommendations (optional): Only options considered to provide a sound basis to support the topic of the article and feasible to be implemented shall be included.

Acknowledgements (optional): Include acknowledgements for any major technical assistance received from any person who has contributed to the review and submission of a paper, experiment or provision of equipment, special materials, etc.

Bibliographic References: All consulted documents must be listed under this heading. Footnotes are not to be used. Only important and recently published papers should be included by priority order. Manuscripts should not exceed 20 quotations, revisions – from 25 to 50. All parts of each reference listing should be checked against the original before submitting the article. The references in the text should be numbered with Arabic numerals in square brackets in their corresponding place in the paper and following a consecutive order of appearance. References with all its required data i.e. last name, name of author(s), title, journal title, year, volume (number): initial page – final page are to be included after the Conclusions or Acknowledgments in case there are some of the latter. If there are 5 or more authors, only the first 4 should be mentioned, followed by “et al.” The titles of journals must conform to the INIS System (see IAEA–INIS–11).

Two bibliographic references of journals are included here below as examples:

[12] HILLEGONDS DJ, FRANKLIN S, SHELTON DK, VIJAYAKUMAR S, VIJAYAKUMAR V. The Management of Painful Bone Metastases with an Emphasis on Radionuclide Therapy. *J. Natl. Med. Assoc.* 2007; (99): 785–794.

[24] SRIVASTAVA SC. Treatment of joint and bone pain with electron emitting radiopharmaceuticals. *Indian J. Nucl. Med.* 2004; 19(3): 89–97.

References to papers published in the Proceedings of a meeting or conference should include the following information: surname, author’s name (s), title of the paper; it should also specify in which meeting or conference Proceedings it was included (its denomination in the original language or transliteration in case of language with an alphabet other than Latin), place and date of the event, as well as the organizing institution and date of publication. The following references are included as an example:

[13] WHITE JR, CHAPMAN DM, BISWAS D. Fuel Management Optimization Based on Generalized Perturbation Theory. Proceedings of the Conference on Advances in fuel Management. Toronto, Canada, June 9–12 1986. Canadian Nuclear Society. 1986.

[4] DI GEORGIO M. Respuesta multidisciplinaria desarrollada en Argentina ante un suceso radiológico. VIII Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. I Congreso Latinoamericano del IRPA. V Congreso Nacional de Protección Radiológica. 11 al 15 de octubre 2010. Medellín, Colombia. 2010.

References to articles published in internet should include:

The authors (4 as maximum, et al). Title of the article. Abbreviation of the journal. Year; Volume (Number): pages. Available in: the article’s webpage. As for example:

[17] GUPTA M, CHOUDHURY PS. Systemic radionuclide therapy for bone pain palliation in cancer patients. *Cancer News.* 2014, (consulted on June 20th 2016). 18(2): 12–14. Available in: <http://www.rgcirc.org/UserFiles/cancer-news-june-2014.pdf>

Authorship contribution (CREDIT): The authorship roles will be identified in the following order, each author is included in the role that corresponds to him and omitting the roles that are not applicable in each case:

1. Conceptualization
2. Data curation
3. Formal analysis
4. Acquisition of funds
5. Research
6. Methodology
7. Project administration
8. Resources
9. Software
10. Supervision
11. Validation
12. Visualization
13. Writing – original draft
14. Writing – proofreading and editing

Each role is defined as follows:

1. Conceptualization: ideas; formulation or evolution of the objectives and general goals of the investigation.
2. Data curation: Management activities to annotate (produce metadata), clean data, and maintain research data (including software code, where necessary to interpret the data itself) for initial use and subsequent reuse.
3. Formal analysis: application of statistical, mathematical, computational or other formal techniques to analyze or synthesize study data.
4. Acquisition of Funds: Acquisition of financial support for the project leading to this publication.
5. Investigation: conducting an investigation and investigative process, specifically conducting the experiments, or collecting data/evidence.
6. Methodology: development or design of the methodology; model creation.
7. Project administration: responsibility for managing and coordinating the planning and execution of the research activity.
8. Resources: supply of study materials, reagents, materials, patients, laboratory samples, animals, instrumentation, computer resources or other analysis tools.
9. Software: programming, software development; computer software design; implementation of computer code and supporting algorithms; Test existing code components.
10. Supervision: responsibility for supervision and leadership in the planning and execution of research activities, including external mentoring to the core team.
11. Validation: Verification, either as part of the activity or separately, of the overall replicability/reproducibility of the results/experiments and other products of the research.
12. Display: Preparation, creation, or presentation of published work, specifically the display/presentation of data.
13. Writing–original draft: preparation, creation, or presentation of published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).
14. Writing – revision and editing: preparation, creation or presentation of the published work by the members of the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including the pre- or post-publication stages.

aenta

Agencia de Energía Nuclear
y Tecnologías de Avanzada

Ciencias nucleares y tecnologías de avanzada para el desarrollo sostenible

Misión:

Gestionar conocimientos, servicios y productos relacionados con la tecnología nuclear, fuentes renovables de energía y otras tecnologías de avanzada, de acuerdo con las prioridades de desarrollo sostenible del país.

Aplicaciones tecnológicas en:

Salud, Industria, Agricultura,
Energías Renovables y Medio Ambiente

Instituciones:

- Centro de Isótopos (CENTIS)
- Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR)
- Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)
- Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA)
- Centro de Ingeniería Ambiental de Camagüey (CIAC)
- Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF)



Calle 20 No. 4109 e/ 41 y 47 Miramar, Playa, La Habana
Teléf.: 202 2524 Fax: (537) 204 1188
www.aenta.cu
Contacto AENTA: presidencia@aenta.cu