

Estudios de contaminación ambiental en La Habana mediante técnicas nucleares y conexas

Oscar Díaz Rizo, Susana Olivares Rieumont, Alina Gelen Rudnikas, Katia D'Alessandro Rodríguez, Lázaro Lima Cazorla, Damaris García Céspedes, Amaya O. Casanova Díaz, César García Trápaga, Michel Manduca Artiles

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de la Universidad de La Habana (InSTECUH),
Avenida Salvador Allende y Luaces, La Habana, Cuba.
odrizo@instec.cu

Resumen

Se resumen las diferentes experiencias en la aplicación de las técnicas nucleares y conexas en el estudio de diversos problemas ambientales de la Ciudad de La Habana. El análisis medioambiental mediante las técnicas de Análisis por Activación Neutrónica (AAN) y Gamma (AAG), Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectrometría por Absorción Atómica (EAA) y por Inducción de plasma acoplado (ICP), así como la Espectrometría Gamma de Bajo Fondo (EGBF), han permitido obtener información muy relevante sobre el comportamiento de los metales pesados, antibióticos y radionúclidos en los sedimentos marinos y fluviales, suelos urbanos y agrícolas, aguas, arenas de balnearios, polvos urbanos y productos de la agricultura urbana de la ciudad de La Habana.

Palabras clave: medio ambiente; impacto social; Cuba; análisis por activación neutrónica; análisis por fluorescencia de rayos X; espectroscopía gamma; áreas urbanas; protección medioambiental.

Assessment of environmental pollution in Havana city using nuclear and related techniques

Abstract

Various nuclear and related analytical techniques applied to study different environmental problems in Havana city are presented. The environmental analysis by means of Neutron and Gamma Activation analyses, X-ray Fluorescence Atomic Absorption and Induced Coupled Plasma spectroscopies and Low Background, Gamma Spectrometry, have allowed to obtain important information about the behavior of heavy metals, antibiotics and radionuclides in sediments, urban and agricultural soils, waters, beach sands, urban dusts and agricultural products farmed in the Havana city.

Key words: environment; social impact; Cuba; neutron activation analysis; x-ray fluorescence analysis; gamma spectroscopy; urban areas; environmental protection.

Introducción

Las actividades económicas e industriales están fundamentalmente concentradas en áreas urbanas, lo que ha provocado que las ciudades se hayan convertido en focos geográficos de consumo de recursos y emisiones químicas, las cuales pueden causar una gran variedad de problemas, incluyendo la degradación del ecosistema, riesgos a la salud pública y la disminución de la biodiversidad, entre otros.

La Habana es la ciudad más poblada de Cuba (más de 2 millones de habitantes), así como el mayor centro industrial y portuario del país, contando con muchas industrias fuertemente contaminantes (refinerías, termoeléctricas, de cemento, farmacéuticas, etc.) en su territorio, cuyas emanaciones a la atmósfera se depositan posteriormente en el suelo y cuyos residuales (domésticos e industriales) son vertidos al mar de ma-

nera directa o indirecta, a través de ríos que vierten sus aguas en la costa o en la bahía de La Habana. Por su parte, la bahía, principal puerto del país, estuvo considerada entre las más contaminadas del Caribe [1, 2], lo que motivó que haya sido objeto de un amplio estudio a través de programas, investigaciones y proyectos que han respondido al desarrollo del país. Ello ha requerido del conocimiento de los contaminantes fundamentales de dicho ecosistema, y sus posibles fuentes, así como de establecer medidas imprescindibles para su preservación de la contaminación, la rehabilitación de sus fondos marinos y la calidad de sus aguas [1-3].

Por otra parte, la capital tiene el mayor y mejor desarrollado sistema de agricultura urbana de Cuba. Más de 5000 huertos populares se han desarrollado a lo largo de todos sus municipios [4]. Estos huertos son instalados en terrenos baldíos, escuelas, centros de trabajo y se localizan, fundamentalmente, en la vecindad de

importantes zonas urbanas. Además, es bien conocido que los vertederos de desechos sólidos representan una fuente significativa de metales pesados al entorno [5-7]. Por muchos años, el destino final principal de los desechos sólidos de La Habana fue el vertedero abierto de Cayo Cruz, ubicado en las inmediaciones de la bahía de La Habana.

Durante casi 100 años, en Cayo Cruz se depositó aproximadamente el 80% de los residuos sólidos (industriales, domésticos, etc.) de la ciudad. En la actualidad, Cayo Cruz es uno de los terrenos baldíos que pudiera estar disponible para la agricultura urbana. Hoy día, el vertedero fundamental de la ciudad es el Vertedero de Calle 100, en cuyas inmediaciones se ha fomentado un número importantes de fincas de la agricultura urbana.

Adicionalmente, en el litoral de la ciudad se encuentran ubicadas varias playas urbanas y suburbanas que son visitadas anualmente por cientos de miles de personas (residentes y turistas) en cualquier época del año. En cambio, el contenido de metales pesados en las arenas de estos balnearios nunca se había estudiado, de ahí la importancia de determinar el contenido de metales pesados en las arena de los balnearios ubicados en el litoral habanero, con el fin de evaluar su calidad desde el punto de vista ambiental, así como el posible riesgo que podrían inducir a la salud humana.

El polvo acumulado en zonas urbanas contiene una diversidad de materiales que van, desde compuestos minerales hasta materiales orgánicos e inorgánicos de origen antropogénico, los que pueden ser depositados en la superficie de las calles y techos [8]. Los metales pesados de la superficie del suelo y el polvo de las calles son buenos indicadores de la acumulación de estos metales en el entorno urbano [9]. En años recientes se han incrementado los estudios en la caracterización espacial de los niveles de contaminación de metales en muestras de polvos urbanos, debido a su influencia en la seguridad ecológica de zonas urbanas y en la salud humana, fundamentalmente de los niños [10].

Por otra parte, es bien conocido que los radionúclidos naturales y artificiales permiten conocer los procesos ambientales que dominan en un ecosistema, su evolución en el tiempo y el monitoreo en tiempo real, pudiéndose conocer las tendencias del comportamiento de un ecosistema ante una emergencia o, simplemente, poder evaluar el impacto ambiental de una práctica rutinaria en el ecosistema. Estos conocimientos son brindados de forma exclusiva mediante el uso de las técnicas analíticas nucleares e isotópicas.

Las técnicas analíticas que se han empleado con mayor frecuencia en nuestro país para la determinación de los metales pesados en el medioambiente, han sido la Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) y, en menor medida, la Espectrometría por Plasma acoplado inducido (ICP) [11-13]. Ambas técnicas presentan ventajas y desventajas, la EAA tiene bajos costos de inversión, no así el ICP, sin embargo los costos de operación de ambas técnicas son elevados; la EAA presenta limitantes en cuanto a los posibles elementos a determinar, no así el ICP, técnica con la que se pueden cuantificar

hasta 60 elementos. Sin embargo una gran desventaja para ambos métodos es la laboriosidad necesaria durante su empleo, así como la destrucción de la muestra a analizar. En estudios medioambientales también han sido empleadas las técnicas nucleares de Análisis por Activación Neutrónica (AAN) y Gamma (AAG) [14-20]. Estas técnicas tienen la peculiaridad de ser no destructivas, de alta sensibilidad, eficaces y de gran reproducibilidad en el análisis de elevados números de muestras, entre otras ventajas, por lo que se han convertido en técnicas analíticas de gran competitividad en estudios ambientales. La Fluorescencia por Rayos X (FRX), atendiendo a sus principales características (relativamente bajo costo, no destructiva, análisis multielemental sencillo por lo simple del espectro de Rayos X, etc.), es otra técnica analítica que también se ha venido empleando con éxito en la determinación de metales pesados en diversos ecosistemas.

Principales experiencias de estudios en el medioambiente habanero

Bahía de La Habana: Se estableció un sistema de procedimientos [21] que integró los resultados obtenidos mediante técnicas nucleares e isotópicas, con diversos métodos de normalización, análisis estadísticos y guías de toxicidad establecidas a nivel internacional, permitiendo valorar los niveles de contaminación y toxicidad de los sedimentos y estado ambiental de los ecosistemas acuáticos. Se obtuvo la distribución de radionúclidos naturales y artificiales presentes en los sedimentos del enclave, con lo que se estableció la línea base de los niveles de radiactividad ambiental en los fondos marinos de la Bahía de La Habana [22]. Adicionalmente, se determinó la edad de los sedimentos marinos y las tasas de sedimentación en las diferentes ensenadas de la Bahía de La Habana [23] (por ejemplo, figura 1), lo que permitió conocer acerca de los procesos ambientales que han dominado este ecosistema en un período largo de tiempo.

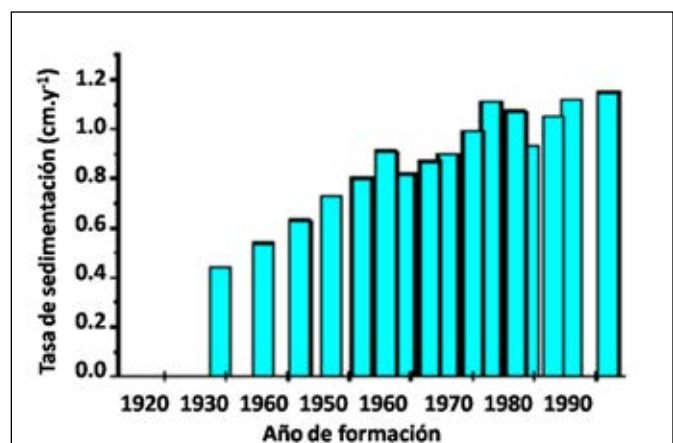


Figura 1. Tasa de sedimentación Ensenada de Marimelena, tras la datación de sus sedimentos por el contenido de ²¹⁰Pb, de importancia para los procesos de dragado.

Se obtuvo información científica sobre el estado de deterioro ambiental del ecosistema Bahía de La Habana [24] (por ejemplo, ver figura 2), considerando las tendencias históricas a lo largo del último siglo [25], su estado

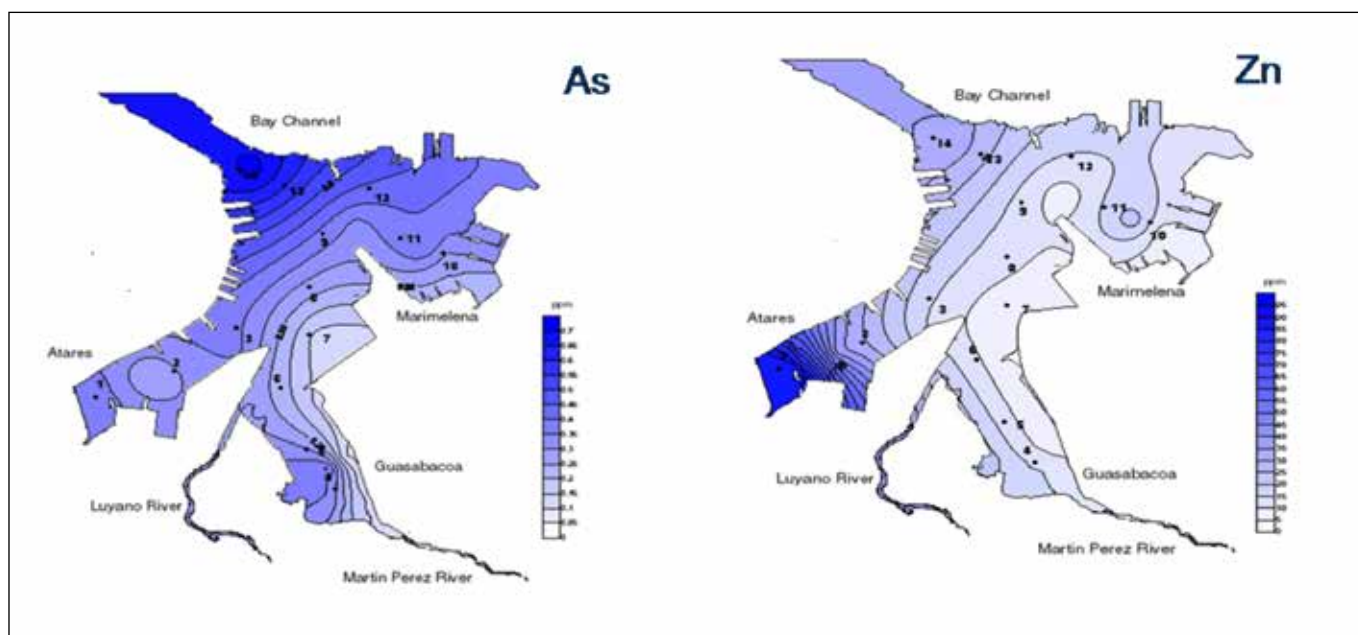


Figura 2. Distribución de los contenidos de Arsénico y Zinc, determinados por AAN, en los sedimentos superficiales de la Bahía de La Habana.

de contaminación actual y evaluando el impacto de las medidas tomadas para mejorar su estado de salubridad. Se favoreció, mediante gran cantidad de resultados experimentales fiables, la toma de decisiones para estructurar estrategias de gestión relativas a diferentes procesos dentro del ecosistema, por ejemplo, el proceso de dragado de la Bahía de La Habana, el tratamiento de residuales de las principales industrias-fuentes de contaminación, el control de vertimientos albañales a las aguas de la Bahía, entre otros.

Se determinaron los contenidos de Elementos Típicos Raros (ETR) en los sedimentos de la bahía [26] mediante la técnica de Análisis por Activación Neutrónica. Los contenidos de ETR siguen el siguiente ordenamiento: $Ce > La > Nd > Sm > Eu, Yb, Tb, Lu$. Los resultados muestran que el contenido de ETR depende del lugar de muestreo, lo que sugiere la posible presencia de fuentes de contaminación por ETR en la bahía. La normalización respecto a las condritas y a la corteza terrestre, mostró que los sedimentos de la bahía se encuentran enriquecidos en ETR, respecto a los sedimentos de la costa norte occidental de Cuba.

Río Almendares: Se determinaron las concentraciones de metales pesados en los sedimentos del Río Almendares [27, 28], comprobándose el elevado nivel de contaminación de los mismos, así como que las fuentes contaminantes fundamentales son el Río Mordazo, la siderúrgica del Cotorro y el vertedero de la calle 100 (figura 3). Los resultados sugieren prestar la máxima atención al posible proceso de remobilización de los metales pesados, pues el 62% de los metales presentes en los sedimentos, están asociados a la materia orgánica presente en los mismos, por lo que pueden regresar a la columna de agua.

Se desarrolló una metodología que permitió la caracterización de los niveles de tres antibióticos de uso común en nuestro país (Tetraciclina, Ampicilina y Ben-

zylpenicilina) en las aguas del río Almendares (figura 4), así como la identificación de 10 genes resistentes a los antibióticos de interés en las aguas y sedimentos del río [29] y su comportamiento en los períodos de seca y lluvia característicos de nuestro país [30].

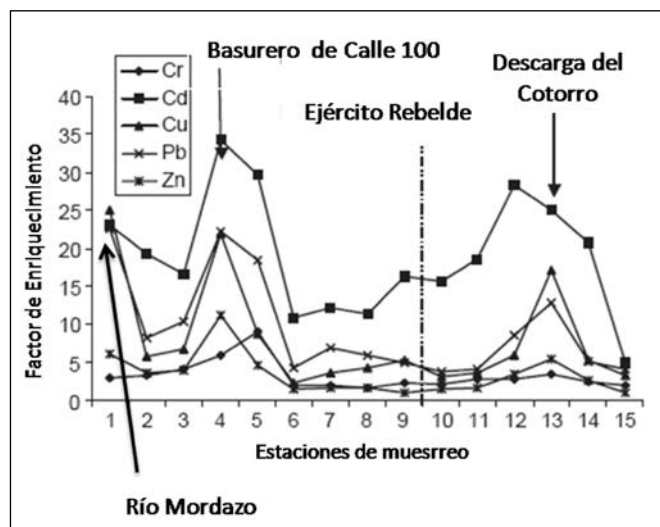


Figura 3. Comportamiento del enriquecimiento de los metales pesados en los sedimentos del Río Almendares a lo largo de su cauce.

Suelos urbanos y agrícolas: Se determinó la línea base de las concentraciones de Co, Ni, Cu, Zn y Pb (13.9 ± 4.1 , 66 ± 26 , 101 ± 51 , 240 ± 132 y 101 ± 161 $mg \cdot kg^{-1}$, respectivamente) en suelos superficiales (0–10 cm) de áreas urbanas y no urbanizadas de La Habana mediante la técnica de FRX [31]. Los resultados (tabla 1) mostraron que las mayores concentraciones se encontraron en los suelos industriales y las más bajas en los suelos no urbanizados. La normalización de los resultados a un metal de referencia en relación con la corteza terrestre, mostró que los suelos de las zonas urbanas de la ciudad (industriales, parques y escuelas) están moderadamente contaminados por Zn, de moderado a

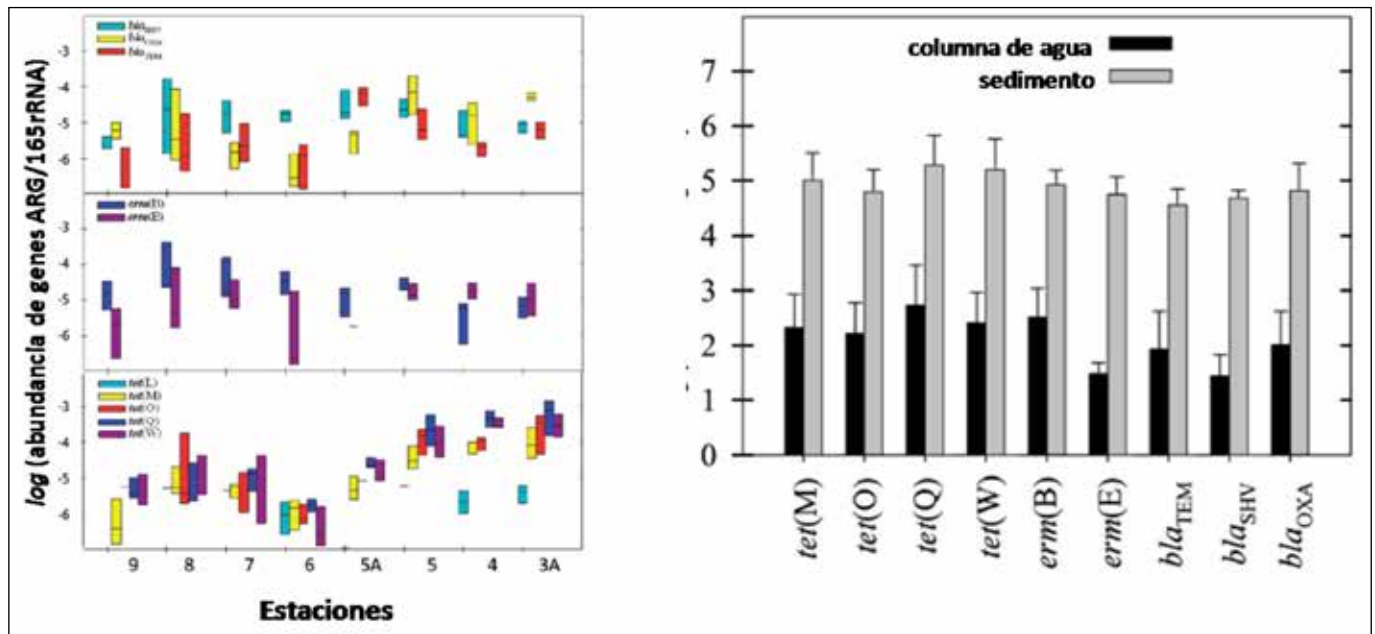


Figura 4. Abundancia de genes resistentes a antibióticos en el Río Almendares (izquierda) y su comportamiento en los períodos de seca y lluvia (derecha).

Tabla 1. Concentraciones de metales pesados (promedio ± DE, en mg.kg⁻¹) determinados en suelos urbanos de La Habana

Elemento	Zonas industriales	Parques	Escuelas	Áreas no urbanizadas	Regulación holandesa	
	(n=48)	(n=48)	(n=48)	(n=48)	Valor de referencia	Valor de intervención
Co	14.5 ± 4.5	12.5 ± 5.5	12.9 ± 1.5	14.8 ± 2.4	9	240
Un	69 ± 31	65 ± 24	62 ± 19	59 ± 13	35	210
Cu	105 ± 59	87 ± 57	116 ± 26	83 ± 25	36	190
Zn	292 ± 152	161 ± 59	196 ± 61	151 ± 6	140	720
Pb	140 ± 207	49 ± 18	59 ± 38	28 ± 5	85	530
Fe (%)	3.9 ± 1.9	3.2 ± 1.9	3.6 ± 1.0	4.7 ± 0.8	-	-

severo (parques y escuelas) y severamente contaminados (industriales) por Pb. Los indicadores ambientales mostraron que los suelos industriales de la ciudad de La Habana están entre medianamente y severamente contaminados por metales pesados, aunque no superan los límites permisibles para la agricultura urbana, excepto en las zonas aledañas a las centrales termoeléctricas y plantas metalúrgicas.

Se determinaron las concentraciones de Co, Ni, Cu, Zn y Pb en suelos superficiales del antiguo vertedero de Cayo Cruz [32], los que fueron comparados con los valores promedios de concentración reportados para los suelos urbanos de La Habana y de otros vertederos de desechos sólidos del mundo. La comparación con las Normas Holandesas de calidad de suelos [33] (figura 5) muestra la presencia de una severa contaminación por cobre y una ligera contaminación por el resto de los metales pesados determinados. Los valores del Índice de Polución Integral (IPI_{promedio} = 3.5) indican que los suelos del vertedero están fuertemente contaminados por metales pesados, en tanto los valores del Índice de Enriquecimiento muestran que el contenido de metales en la zona estudiada supera los niveles permisibles de metales pesados en suelos de uso agrícola.

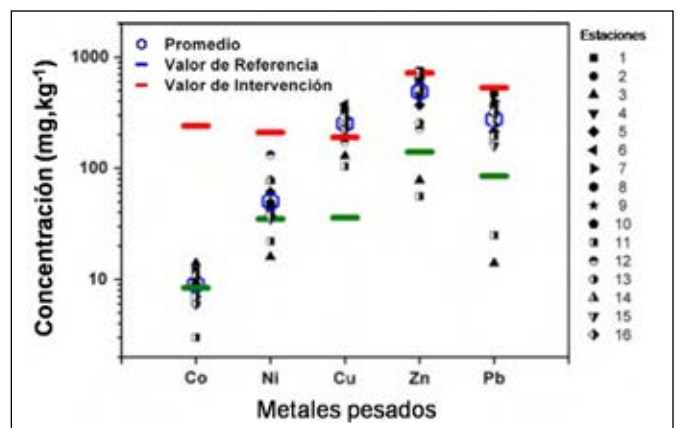


Figura 5. Niveles de metales pesados en los suelos superficiales de Cayo Cruz y su comparación con las guías de calidad de suelos.

Se estudió el nivel de contaminación por metales pesados en los suelos superficiales de diez granjas agrícolas ubicadas en las inmediaciones de Antillana de Acero [34], la mayor fundición del país, y que radica en el municipio del Cotorro. Los rangos de concentraciones determinados para Cr, Co, Ni, Cu, Zn y Pb fueron de 54-186, 15-39, 19-137, 50-945, 91-7739 y 21-731 mg.kg⁻¹, respectivamente. La normalización de los resultados y el cálculo de índices de contaminación permitieron de-

terminar que los suelos más contaminados por metales pesados, son los correspondientes a las granjas agrícolas que se encuentran en la dirección preferencial de los vientos respecto a la industria. Los valores del Índice Enriquecimiento (IE) (figura 6) mostraron que las concentraciones de metales de estas granjas superan los límites permisibles para uso agrícola de los suelos.



Figura 6. Enriquecimiento de metales pesados en suelos de fincas aledañas a Antillana de Acero.

Se determinaron los niveles de plomo en suelos (figura 7) y hortalizas cultivadas en un área urbana cercana al vertedero de “Calle 100” en La Habana [35, 36], comprobándose que en el 23% de las fincas, los niveles de plomo superan los contenidos considerados como fitotóxicos y que el 12.5% de las hortalizas analizadas presentaron valores de plomo superiores a las normas para consumo humano [37]. Además, en las fincas asociadas a la zona se evaluó el rol de las prácticas productivas ejecutadas por los trabajadores agrícolas en la contaminación por metales pesados [38] y los riesgos por exposición a metales pesados a la salud de los productores agrícolas y sus familiares, comprobándose la no existencia de riesgo a la salud por concepto de ingestión de metales pesados para los niños y trabajadores agrícolas del área [39].

Adicionalmente, se reportaron los contenidos de zinc y su bioacumulación en 19 cultivos (arroz, vegetales y condimentos) procedentes de 18 áreas de agricul-

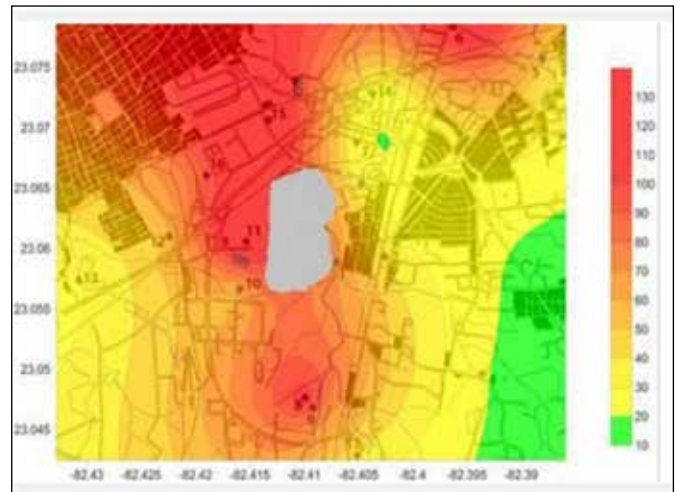


Figura 7. Distribución del contenido de plomo en fincas urbanas ubicadas en las inmediaciones del vertedero de Calle 100.

tura urbana y suburbana de la provincia de La Habana, mediante el empleo de las técnicas de FRX y Absorción Atómica [40, 41]. Los resultados mostraron al arroz como el cultivo de mayor bioacumulación de Zn y como la principal fuente de este esencial elemento en la dieta de nuestra población.

Balnearios y playas habaneras: Se determinaron las concentraciones de Ni, Cu, Zn y Pb en arenas de playa y duna de trece balnearios urbanos y suburbanos de La Habana, empleando para ello la técnica de FRX. Los valores promedios de concentraciones (en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) determinados en las arenas de playa fueron de 8 ± 12 para el Ni, 35 ± 12 para el Cu, 31 ± 11 para el Zn y 6.0 ± 1.8 para el Pb; en tanto para las arenas de duna fueron de 30 ± 15 , 38 ± 22 , 37 ± 15 y 6.8 ± 2.9 , respectivamente [42]. La normalización a un metal de referencia de los resultados obtenidos (figura 8), reflejó la presencia de enriquecimiento por Cu entre moderadamente severo y severo en los balnearios estudiados. Por otra parte, la comparación con las guías de calidad de sedimen-

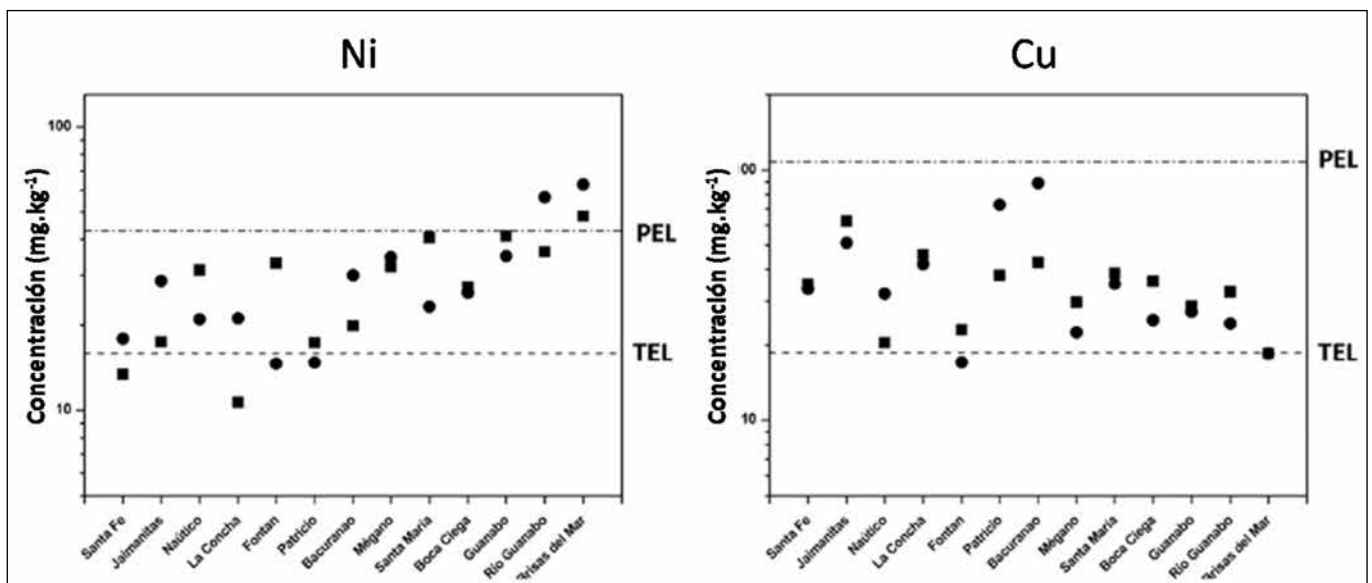


Figura 8. Niveles de enriquecimiento de Ni, Cu, Zn y Pb en las arenas de playa y duna de los balnearios habaneros.

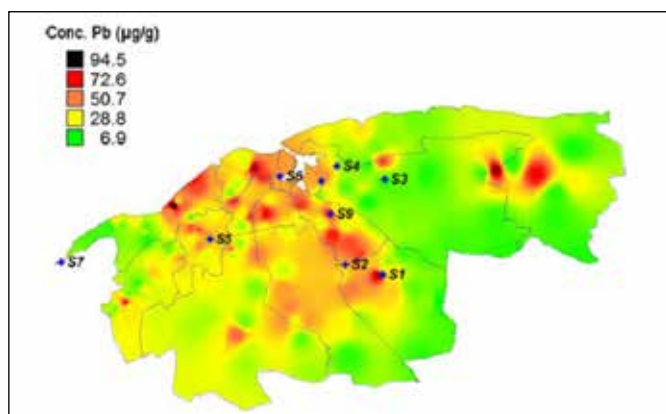


Figura 9. Patrón de distribución de plomo determinado en líquenes colectados en La Habana.

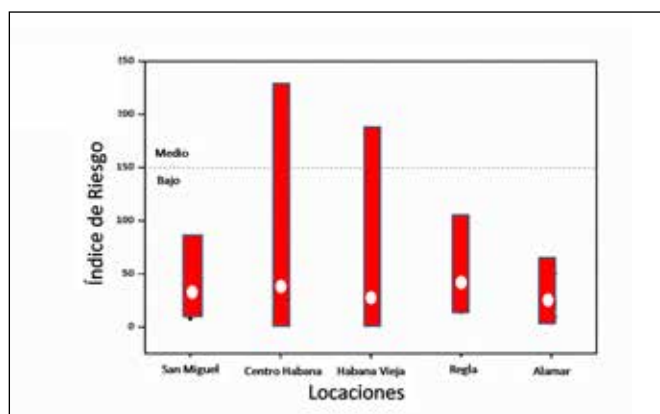


Figura 10. Valores medios (O) y rangos del Índice de Riesgo del contenido de metales en polvos urbanos de las zonas habaneras estudiadas.

Tabla 2. Concentraciones de metales pesados (promedio \pm DE, en mg.kg⁻¹) determinados en las zonas estudiadas y su comparación con los valores reportados para Camagüey y otras ciudades del mundo.

Ciudad, País	Ni	Cu	Zn	Pb	Cita
La Habana, Cuba	68 \pm 131	65 \pm 152	369 \pm 375	88 \pm 114	-
Camagüey, Cuba	66	36	222	63	[46]
Beijing, China	25	70	222	105	[47]
Madrid, España	44	188	476	1930	[48]
Luanda, Angola	10	42	317	257	[49]
Teherán, Irán	35	225	873	257	[50]

tos [43] mostró que las arenas de duna de varios de los balnearios estudiados pueden ser consideradas como fuertemente contaminadas por Cu y Ni, pues sus concentraciones superan los valores permisibles, aunque la comparación con las concentraciones reportadas para los suelos urbanos de La Habana [31] indicó la posibilidad de que el origen de los contenidos de Ni y Cu sea natural.

Contaminación atmosférica y polvos urbanos: En un trabajo conjunto con el Centro de Estudios Avanzados del Desarrollo Nuclear (CEADEN), se estudió la distribución espacial del contenido de plomo en líquenes *Physcia alba* (Fée) Müll tomados de palmas reales en 119 puntos de muestreo de la capital, con el objetivo de identificar las fuentes de contaminación atmosférica por plomo de La Habana [44]. La medición de las relaciones isotópicas de Plomo en muestras de líquenes, suelos, gasolina y crudos mediante espectrometría de masas con plasma inducido acoplado y tiempo de vuelo (ICP-ToF-MS), permitió corroborar que en nuestro país ya no se utiliza combustible plomado (figura 9).

En la actualidad se ha comenzado el estudio de la composición de metales pesados en los polvos urbanos de la ciudad. En un primer momento, se tomaron muestras de polvo urbano en 155 puntos de los municipios aledaños a la Bahía de La Habana: Habana Vieja (33), Centro Habana (35), San Miguel del Padrón (39) y Regla (27), así como en la comunidad de Alamar (21), uno de los repartos más jóvenes de la capital, comprobándose que las zonas de mayor concentración de metales

pesados, son aquellas que están asociadas al tráfico vehicular intenso, gasolineras, plantas eléctricas, así como las áreas dónde se encontraban construyendo o reparando edificaciones. Independientemente de ello, los valores medios de concentración de Cu, Zn y Pb en los polvos urbanos capitalinos (tabla 2), si bien son algo superiores a los determinados en los polvos urbanos de la ciudad de Camagüey, son inferiores a los reportados en polvos urbanos de otras capitales del mundo. Por otra parte, es de señalar que el valor medio del Índice de Riesgo [45] califica como Bajo (figura 10) para la gran mayoría de las estaciones estudiadas, y solo en unas pocas califica como Medio, lo que indica que, hasta el momento, no existe riesgo alguno para la población de las áreas estudiadas, fundamentalmente para los niños y adolescentes.

Impacto en la formación de profesionales y en el reconocimiento de la comunidad universitaria

Es conocido que la vinculación de los estudiantes a los proyectos de investigación que desarrolla el claustro [51], fortalece considerablemente la disciplina de trabajo científico estudiantil contemplada en los planes de estudios de las carreras universitarias y de los programas de postgrado (maestrías y doctorados). En tal sentido, a los resultados presentados están asociados 20 Tesis de Licenciatura en las especialidades nucleares del InSTEC-UH, cinco tesis de maestría y tres integrantes del claustro defendieron exitosamente sus tesis de doctorado.

Se ha incrementado considerablemente la visibilidad de la universidad, así como la relevancia del empleo de las técnicas nucleares en estudios ambientales y otras ramas del conocimiento. A ello han contribuido notablemente:

- La certificación de introducción de los resultados obtenidos por parte del Centro de Ingeniería Ambiental de Bahías y Costas (2001, 2003, 2016), del Grupo Estatal de la Bahía de la Habana (2009), de la Delegación del MINAGRI de La Habana (2011) y del Consejo de Administración Municipal del Cotorro (2013), así como su presentación ante el Grupo de Expertos en Medioambiente de la Delegación del CITMA en la capital (2018).
- La publicación de 37 artículos científicos en revistas nacionales e internacionales y la presentación de más de 60 ponencias científicas en 36 eventos científicos nacionales e internacionales y
- El haber sido reconocidos con tres Premios Anuales de la Academia de Ciencias de Cuba y cinco Resultados Científicos Relevantes de la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada del CITMA.

Conclusiones

Los estudios de contaminación ambiental en La Habana mediante el empleo de técnicas nucleares y conexas brindaron la posibilidad de:

1. Evaluar los niveles de polución de la Bahía de La Habana en los últimos 60 años, incluyendo el grado de enriquecimiento de los elementos tierras raras, así como la determinación de la línea de base de las concentraciones de elementos radioactivos
2. Determinar las concentraciones de metales pesados presentes en los sedimentos del río Almendares, identificándose las tres principales fuentes de contaminación, Se desarrolló, además, una metodología que permitió evaluar las concentraciones de tres antibióticos (Tetraciclina, Ampicilina y Benzylpenicilina) en las aguas del río, así como identificar diez genes resistentes a éstos antibióticos.
3. Conocer los niveles de metales pesados en los suelos urbanos de La Habana, evaluando los mismos, tanto desde el punto de vista ambiental, como su calidad para la agricultura urbana. Se reporta el contenido de Zinc y su bioacumulación en diferentes cultivos de múltiples huertas urbanas, determinándose que el arroz es el de mayor aporte de este metal esencial a la dieta.
4. Determinar el contenido de metales pesados en las arenas de los balnearios y playas de la costa habanera, estableciéndose, por primera vez, las líneas de base de los mismos.

5. Reportar, por primera vez, el contenido de metales pesados en polvos urbanos de varios municipios habaneros.

Referencias

- [1]. Proyecto Regional "Planificación y manejo ambiental de bahías y zonas costeras fuertemente contaminadas del Gran Caribe". Estudio de caso Bahía de La Habana, Cuba. GEF/RLA/93/G41. Informe Final del Resultado 1.2: Inventarios actualizados de fuentes puntuales y no puntuales de contaminación. Cimab, 1998. 153p.
- [2]. Proyecto Regional "Planificación y manejo ambiental de bahías y zonas costeras fuertemente contaminadas del Gran Caribe". Estudio de caso Bahía de La Habana, Cuba. Informe Final del Resultado 1.4.4: Rehabilitación de los fondos contaminados. GEF/RLA/93/G41. Cimab, 1998. 148p.
- [3]. Proyecto "Investigación y Control de la Contaminación Marina en la Bahía de la Habana". CUB/80/001. Instituto de Investigaciones del Transporte, PNUD, PNUMA, UNESCO. 1985. p. 681.
- [4]. ALTIERI MA, COMPANIONI N, CAÑIZARES K, et. al. The greening of the "barrios": urban agriculture for food security in Cuba. *Agricultural Human Values*. 1999; 16(2): 131-140.
- [5]. BRETZEL FC, CALDERISI M. Contribution of a municipal solid waste incinerator to the trace metals in the surrounding soil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011; 182(1-4): 523-533.
- [6]. WAHEED S, SIDDIQUE N, HAMID Q, CHAUDHRY M. Assessing soil pollution from a municipal waste dump in Islamabad, Pakistan: a study by INAA and AAS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2010; 285(3): 723-732.
- [7]. FERRÉ-HUGUET N, NADAL M, MARI M, et. al. Monitoring metals near a hazardous waste incinerator. Temporal trend in soils and herbage. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2007; 79(2): 130-134.
- [8]. BIASIOLI M, GREMAN H, KRALJ T, et. al. Potentially toxic elements contamination in urban soils: A comparison of three European cities. *Journal of Environmental Quality*. 2007; 36: 70-79.
- [9]. SHI G, CHEN Z, BI C, et. al. Comprehensive assessment of toxic metals in urban and suburban street deposited sediments (SDSs) in the biggest metropolitan area of China. *Environmental Pollution*. 2010; 158(3): 694-703.
- [10]. DE MIGUEL E, IRIBARREN I, CHACÓN E, et. al. Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain). *Chemosphere*. 2007; 66(3): 505-5013.
- [11]. GONZÁLEZ H. Heavy metals surveys in sediments of five important Cuban bays. *Biochemistry*. 1991; 14(2):113-128.
- [12]. Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas (Cimab). Calidad del agua y los sedimentos de la Bahía de La Habana. Evolución de la contaminación. Informe anual. La Habana: Cimab, 2000.
- [13]. BOLAÑOS Y, ALONSO C, DÍAZ M, et. al. Niveles de mercurio en perfiles de sedimentos, algas, peces de dos ecosistemas cubanos, río-estuario Sagua la Grande y Bahía de Cienfuegos. *Memorias del VII Congreso de Ciencias del Mar: MarCuba*, 2006.
- [14]. GARCÍA G. Metodología para el análisis por activación neutrónica de sedimentos marinos de la plataforma de Cuba. *Nucleus*. 1988; (4):12-19.
- [15]. DÍAZ RIZO O, GRIFFITH J, GÓMEZ SAUNDERDS M, ZHUK LI. NAA of different types of cuban sugars. *Nucleus*. 1992; (13): 15-17.
- [16]. DÍAZ RIZO O, SUÁREZ GARCÍA JC, GÓMEZ SAUNDERS M, ZHUK LI. Análisis por activación con neutrones térmicos de zeolitas naturales cubanas. *Nucleus*. 1993; (14): 9-13.
- [17]. DÍAZ RIZO O, GÓMEZ M, HERRERA E, et. al. Elemental study of sugar cane leaves and soils by NAA. In: *Activation Analysis in Environment Protection*. D14-93-325. Dubna, 1993. p. 387-392.
- [18]. GRIFFITH J, ROSENBERG RJ, DÍAZ RIZO O, et. al. Neutron activation analysis of final molasses from cuban sugar industry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. Letters*. 1996; 213(1): 71-78.
- [19]. DÍAZ RIZO O, GRIFFITH J. Soil-plant relation in sugar cane by INAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. Letters*. 1996; 213/5: 377-384.

- [20]. DÍAZ RIZO O, HERRERA PERAZA EF. Multi-elemental characterization of Cuban natural zeolites. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters*. 1997; 221/2: 255-258.
- [21]. GELEN RUDNIKAS A. Caracterización espacial y temporal de los sedimentos en ecosistemas acuáticos, por un sistema de procedimientos que integra las técnicas nucleares e isotópicas [tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas]. InSTEC, 2009.
- [22]. GELEN A, SOTO J, DÍAZ O, et. al. Radiological evaluation of sediments from the Havana Bay. *Nucleus*. 2002; (32): 16-21.
- [23]. GELEN A, DÍAZ O. et. al. ²¹⁰Pb of sediments from Havana Bay. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2003; 256(3): 561-564.
- [24]. DÍAZ RIZO O, GELEN A, GRACIANO AM, et. al. Análisis Ambiental por Activación Neutrónica de Sedimentos de la Bahía de La Habana. *Nucleus*. 2008; (44): 15-23.
- [25]. DÍAZ RIZO O, GRACIANO AM, NOGUEIRA CA, et. al. Estudio de Perfiles de Sedimentos de la Bahía de La Habana por activación Neutrónica. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. 2003. Volumen 4. ISBN 959-7136-20-1.
- [26]. DÍAZ RIZO O, GELEN A, FIGUEREIDO AMG, et. al. REE enrichment in Havana bay Surface sediments using INAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012; 292: 81-84.
- [27]. OLIVARES S, DE LA ROSA D, LIMA L, et. al. Assessment of heavy metal levels in Almendares river sediments. *Water Research*. 2005; 39: 3945-3953.
- [28]. OLIVARES-RIEUMONT S, LIMA L, DE LA ROSA D, et. al. Water hyacinths (*Eichhornia crassipes*) as indicators of heavy metal impact of a large land fill on the Almendares River near Havana, Cuba. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2007; 79: 583-587.
- [29]. GRAHAM DW, OLIVARES S, KNAPP CW, et. al. Antibiotic resistance gene abundances associated with waste discharges to the Almendares River near Havana, Cuba. *Environmental Sciences and Technology*. 2011; 45: 418-424.
- [30]. KNAPP CW, LIMA L, OLIVARES RIEUMONT S, et. al. Seasonal variations in antibiotic resistance gene transport in the Almendares river, Havana, Cuba. *Front Microbiol*. 2012; 3: 396.
- [31]. DÍAZ RIZO O, ECHEVARRÍA CASTILLO F, ARADO LÓPEZ JO, HERNÁNDEZ MERLO O. Concentrations of heavy metals in urban soils of Havana city, Cuba. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2011; 87(4): 414-419.
- [32]. DÍAZ RIZO O, HERNÁNDEZ MERLO M, et. al. Assessment of metal pollution in soils from a former Havana (Cuba) solid waste open dump. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2012; 88(2): 182-186.
- [33]. SWARTJES AF. Risk-based assessment of soil and groundwater quality in The Netherlands: standards and remediation urgency. *Risk Analysis*. 1999; 19(6): 1235-1249.
- [34]. DÍAZ RIZO O, LIMA CAZORLA L, GARCÍA D, et. al. Assessment of heavy metal pollution in urban agricultural soils from the surrounding of steel-smelter plant at Cotorro (Havana, Cuba). *Nucleus*. 2013; (57): 38-43.
- [35]. OLIVARES RIEUMONT S, GARCÍA CÉSPEDES D, LIMA CAZORLA L, et. al. Niveles de cadmio, plomo, cobre y zinc en hortalizas cultivadas en una zona altamente urbanizada de la ciudad de La Habana, Cuba. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2013; 29(4): 285-294.
- [36]. OLIVARES RIEUMONT S, LIMA CAZORLA L, GARCÍA CÉSPEDES D, et. al. Niveles de plomo en suelos y hortalizas cultivadas en zonas urbanas de ciudad de La Habana. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. 2010. 9: E60-E67.
- [37]. Norma Cubana NC-493. Contaminantes metálicos en alimentos. Regulaciones sanitarias. ININ/Oficina Nacional de Normalización. CITMA. ICS: 67.020, 2006.
- [38]. GARCÍA CÉSPEDES D, SANTANA ROMERO JL, OLIVARES RIEUMONT S, et. al. Evaluación de la incorporación de metales pesados al agroecosistema. Rol de las prácticas productivas ejecutadas por los trabajadores agrícolas. *Revista Cubana de Salud y Trabajo*. 2012; 13(1): 3-9.
- [39]. GARCÍA CÉSPEDES D, OLIVARES RIEUMONT S, SANTANA ROMERO JL, et. al. Evaluación de riesgos a la salud por exposición a metales pesados en cercanías de sitios potencialmente peligrosos con actividad agrícola. *Revista Cubana de Salud y Trabajo*. 2012; 13(1): 10-18.
- [40]. DENIS ALPÍZAR O, DÍAZ RIZO O. Zinc content in rice and other agriproduct by X-ray fluorescence. *Nucleus*. 2009; (46): 34-39.
- [41]. DÍAZ RIZO O, OLIVARES REUMONT S, DENIS ALPÍZAR O, et. al. Bioaccumulation of zinc in crops and its contribution to Zn intake by Cuban population. *Nucleus*. 2013; (54): 8-11.
- [42]. DÍAZ RIZO O, BUZÓN GONZÁLEZ F, ARADO LÓPEZ JO. Assessment of Ni, Cu, Zn and Pb levels in beach and dune sands from Havana resorts, Cuba. *Mar Pollut Bull*. 2015; 100(1): 571-576.
- [43]. LONG ER, MACDONALD DD, SMITH SL, CALDER FD. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*. 1995; 19(1): 81-97.
- [44]. MONTERO ALVAREZ A, ESTÉVEZ ALVAREZ JR, ARAUJO CW, et. al. Lead isotopes ratios in lichen simples evaluated by ICP-ToF-MS to assess possible atmospheric pollution sources in Havana, Cuba. *Environ Monit Assess*. 2017; 189(1): 28.
- [45]. SOLTANI N, KESHAVARZI B, MOORE F et. al. Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran. *Sci Total Environ*. 2015; 506:712 -723.
- [46]. DÍAZ RIZO O, RIVERO PALMA O, D'ALESSANDRO RODRÍGUEZ K, GARCÍA TRÁPAGA C. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in street dust from Camagüey city (Cuba) using X-ray fluorescence. *Nucleus*. 2015; (58): 34-38.
- [47]. WEI X, GAO B, WONG P, et. al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metal in street dust from different functional areas of Beijing, China. *Ecotoxicology and Environmental Safe*. 2015; 112: 186-192.
- [48]. DE MIGUEL E, IRIBARREN I, CHACÓN E, et. al. Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain). *Chemosphere*. 2007; 66(3): 505-513.
- [49]. FERREIRA BAPTISTA F, DE MIGUEL E. Geochemistry and risk assessment of street dust of Luanda, Angola. A tropical urban environment. *Atmospheric Environment*. 2005; 39(25): 4501-4512.
- [50]. SAEEDI M, LI LY, SALMANZADEH M. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: Pollution and ecological risk assessment in street dust of Tehran. *Journal of Hazardous Materials*. 2012; 227-228: 9-17.
- [51]. DÍAZ RIZO O, LÓPEZ PINO N, D'ALESSANDRO RODRÍGUEZ K. Vinculación del trabajo científico estudiantil a la investigación del claustro: experiencias de la disciplina de física nuclear experimental en el período 2006-2010. *Revista Congreso Universidad*. 2012; 1(3):1-12.

Recibido: 17 de junio de 2019
Aceptado: 31 de julio de 2019