

# 20 años de investigaciones y aplicaciones en Cuba de los radiotrazadores y el escaneo en la industria y el medioambiente

**Jorge I. Borroto Portela, Judith Domínguez Catasús**

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC)

Ave. Salvador Allende y Luaces. La Habana, Cuba

borroto@instec.cu

## Resumen

Las tecnologías de radiotrazadores y de escaneo son herramientas bien consolidadas para el estudio, análisis y evaluación de los procesos industriales y medioambientales. En este trabajo se sintetizan los principales resultados alcanzados por el Grupo de Aplicaciones Industriales y Medioambientales de los Radiotrazadores en el Departamento de Radioquímica. La tecnología de radiotrazadores se ha empleado con éxito para la caracterización del mezclado en reactores discontinuos, los estudios sobre el comportamiento del  $^{99m}\text{Tc}$  en aguas naturales y residuales, la calibración y validación del modelo de calidad de agua del río Almendares, la caracterización de un reactor anaerobio para el tratamiento de los residuales en el CAI "Pablo Noriega", la verificación y validación del modelo DFC en un cristizador azucarero, el desarrollo de un generador radisotópico de  $^{137}\text{Cs}/^{137m}\text{Ba}$ , la modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó, y para la modelación de la calidad del agua en el río Guaire, Caracas, Venezuela. En los últimos años el grupo ha desarrollado y evaluado a nivel de laboratorio radiotrazadores para fluidos orgánicos, particularmente relacionados con la industria del petróleo y para sólidos, empleando como precursor al  $^{99m}\text{TcO}_4$ . Mientras la técnica de escaneo se ha utilizado para el perfilaje gamma en torres de destilación de alcohol de los CAI "Héctor Molina" "Heriberto Duquesne" y "Jesús Rabí".

*Palabras clave:* validación; Cuba; técnicas de trazadores; exploración por radisótopos; industria; medio ambiente; tecnecio 99; ríos; cesio 137; bario 137; calidad del agua

## 20 years of Cuban radiotracer and scanning researches and applications at the industry and the environment

### Abstract

Radiotracers and scanning technologies are much consolidated tools for the study, analysis and evaluation of the industrial and environmental processes. This paper sums up the main results reached by the Group of Industrial and Environmental Applications of Radiotracers of the Department of Radiochemistry. Radiotracer technology has been successfully used for the characterization of discontinuous reactors, the studies of the behavior of  $^{99m}\text{Tc}$  in natural and wastewaters, the calibration and validation of the water quality pattern of the Almendares river, the characterization of an anaerobic reactor for wastewater treatment in the "Pablo Noriega" sugar mill, the verification and validation of the DFC model in a sugar crystallizer, the development of a  $^{137}\text{Cs}/^{137m}\text{Ba}$  radioisotope generator, the modeling of the water quality in the half segment of the Luyanó river, the modeling of water quality at the Guaire river, Caracas, Venezuela, the development and validation of a kit for label in oil derivatives with  $^{99m}\text{Tc}$  and solids. On the other hand, scanning techniques have been successfully used for gamma scanning in alcohol distillation towers at the "Héctor Molina", "Heriberto Duquesne" and "Jesús Rabí" sugar mills.

*Key words:* validation; Cuba; tracer techniques; radioisotope scanning; industry; environment; technetium 99; rivers; cesium 137; barium 137; water quality

## Introducción

Los radiotrazadores se aplicaron por primera vez para resolver problemas industriales y medioambientales en la mitad del pasado siglo. Desde esa fecha su uso se ha incrementado paulatinamente, de modo que han alcanzado un rol primordial para la identificación de problemas y la optimización de procesos. Aunque el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) juega un papel fundamental en todo este proceso, facilitando la transferencia de tecnología, queda el esfuerzo del país para lograr avances en el tema. No obstante, existieron algunos intentos formativos anteriores como el inicio de la escuela cubana de aplicaciones de los radiotrazadores y las técnicas de escaneo en abril de 1995, cuando se organizó el curso OIEA/ARCAL-XVI "Aplicaciones de los radiotrazadores en las industrias minera y agroalimentaria", en el que participaron investigadores y profesores de varios países como el Dr. J. Griffith, Cuba; Dr. A. Niemi, Dinamarca; Dr. P. Brisset, Francia; Dra. N. Héresi, Chile; Dr. J. Thýn, República Checa. Entre los temas del curso estuvieron: consideraciones de protección radiológica, metodología de los radiotrazadores, concepto de radiotrazador, selección y optimización de los radiotrazadores, potenciales radiotrazadores para aplicaciones industriales (mineras y alimentarias) y medioambientales, inyección (estimación de la distancia de buena mezcla), detección y medición, análisis de datos, modelación, análisis de la distribución de tiempos de residencia (DTR); y finalmente, como parte de la tecnología de los radiotrazadores, se estudiaron algunos casos y aplicaciones en los países de los profesores involucrados.

### Caracterización del mezclado en reactores "BATCH"

La primera aplicación de radiotrazadores en la industria constituyó la tesis de maestría de la profesora Aida Mary Abreu Díaz. El trabajo consistió en evaluar el ajuste del modelo de tanques en serie con recirculación para describir el flujo dentro de un reactor con agitador tipo ancla y en caracterizar un mezclador discontinuo de 100 L (figura 1) en la planta del Instituto Cubano de Investigaciones y Desarrollo de la Caña de Azúcar (ICID-CA), utilizando  $^{99m}\text{Tc}$  como radiotrazador [1,2].

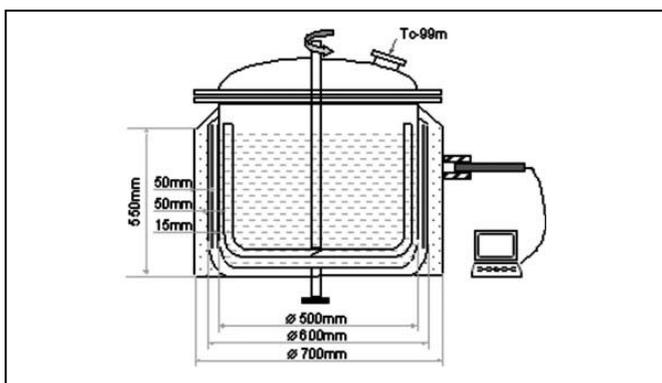


Figura 1. Esquema del mezclador y diseño experimental.

Los resultados demostraron que el modelo de tanques en serie con recirculación describe adecuadamente el mezclado en reactores discontinuos con agitadores tipo ancla y que la interrelación entre los números de mezcla y Reynolds para el sistema estudiado (reactor-impelente) tiende a que el número de mezcla sea constante e igual a 7.8 en régimen turbulento.

### Estudio del comportamiento del $^{99m}\text{Tc}$ en aguas naturales y residuales

En el marco del Contrato de Investigaciones con el OIEACUB-10227 se estudió, bajo condiciones de laboratorio y campo, la sorción del  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  desde aguas residuales contaminadas a los sedimentos ricos en sustancias orgánicas. Los experimentos "BATCH" se usaron en los ensayos de laboratorio para estudiar la influencia de la concentración de tecnecio, el potencial redox y la relación sólido-líquido. Mientras en las aguas oxigenadas (aerobias) no se observó ninguna sorción del tecnecio, en las aguas con una elevada carga de albañales (y bajo fuertes condiciones anóxicas) sí se detectó una leve sorción que indica que el tecnecio se puede reducir bajo estas condiciones. La tasa de reducción no mostró una marcada dependencia con la concentración de Tc en el rango entre  $5 \times 10^{-16}$  y  $5 \times 10^{-9}$  mol/L; sin embargo, sí se observó alguna influencia de la relación sólido-líquido.

Estos estudios a escala de laboratorio se confirmaron tras sendos experimentos de doble trazado con  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  y rodamina-wt en dos locaciones de la cuenca del río Almendares donde se registraron las correspondientes curvas de DTR. Los cálculos del recobrado y la forma de las curvas muestran que no hubo retardo o pérdida de tecnecio bajo esas condiciones experimentales reales. Este resultado es consistente con el comportamiento de laboratorio previamente observado y soporta la hipótesis de que la sorción del Tc está dada fundamentalmente por el potencial redox del sistema. Se concluye sobre la factibilidad del empleo de la especie  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  en estudios hidrológicos de aguas naturales y albañales. Bajo el amparo de estas investigaciones se defendió una tesis de doctorado [3].

### Calibración y validación del modelo de calidad de agua del río Almendares

Este estudio fue una contribución importante para la recuperación del río. Con la ayuda de radiotrazadores se obtuvo un modelo matemático que describe la calidad del agua en términos de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno carbonacea (DBO<sub>c</sub>) y nitrogenada (DBO<sub>n</sub>), en función de las características morfológicas y de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el río. Este modelo fue una herramienta de gran valor en la evaluación del impacto de sistemas de tratamiento de aguas y del vertimiento de efluentes industriales sobre la calidad del agua del río Almendares y, por tanto, en la planificación de su saneamiento.

Se estudió la zona comprendida entre la Estación de Depuración de Residuales (EDAR) de María del Carmen y el Puente del Bosque de La Habana (figura 2).

Para la caracterización hidrodinámica del río se utilizaron el  $^{99m}\text{Tc}$  y la rodamina-wt como trazadores. Se estableció además una red de 22 puntos de muestreo para las mediciones de calidad de agua: OD, DBO5, amonio, nitritos, nitratos, conductividad, salinidad, sólidos totales disueltos y temperatura.

Las características de explotación del río fomentan que derrames tóxicos accidentales lleguen a su cauce. Teniendo en cuenta que las aguas del Almendares se utilizan para el riego agrícola, con fines recreativos y que en sus riberas se potencia el uso no controlado por la

alta densidad poblacional, se realizaron estudios dirigidos al pronóstico de la evolución de esos derrames que revisten gran importancia desde el punto de vista de la protección ambiental. En el trabajo se brinda la información básica para la predicción de la evolución temporal y espacial de un derrame y para su cuantificación aproximada (figura 3).

Por otra parte, en estudios sobre la contaminación de los sistemas fluviales, adquiere especial importancia el conocimiento del contenido de metales pesados en las aguas y en los sedimentos, ya que la presencia de estos elementos en concentraciones elevadas, constituye una fuente potencial de contaminación en el hidrociclo, por cuanto se pueden transferir nuevamente al medio acuático (figura 4).

Para estudiar este proceso fue necesario conocer cuál es el grado de asociación de los metales pesados en las distintas fases químicas: carbonatos, sulfuros, materia orgánica, óxidos de Fe y Mn y arcilla. Se determinó la concentración total de metales por extracción secuencial, lo que constituyó una modificación general al procedimiento propuesto por Tessier. En correspondencia, se estudió el comportamiento sortivo del Pb, Cd, Ni, Cu y Zn (indicadores por excelencia de la contaminación ambiental en ciudades) en los sedimentos. Se aplicó el protocolo propuesto por el "Bureau Community of Reference (BCR)", porque sus requisitos experimentales se ajustaban adecuadamente a las condiciones de este estudio. En general, para el cumplimiento de los objetivos se plantearon ocho tareas.

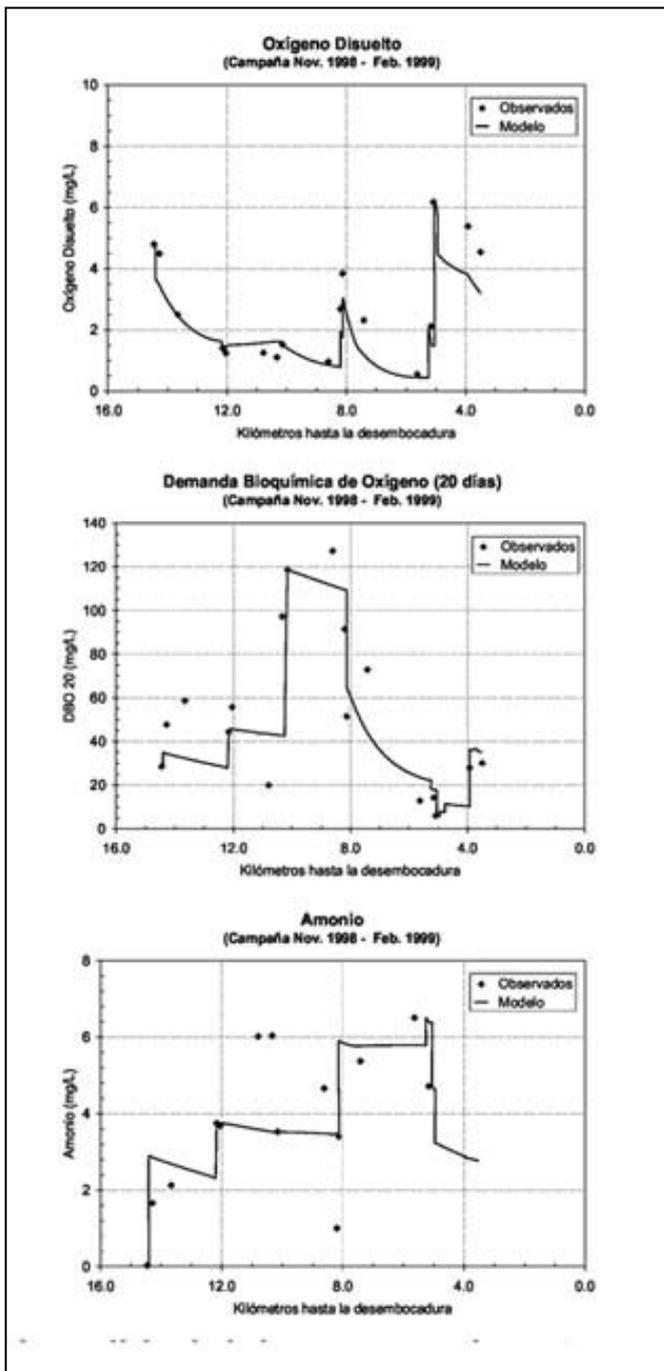


Figura 2. Modelos de calidad del agua en el sector comprendido entre la EDAR de María del Carmen y el Puente del Bosque.

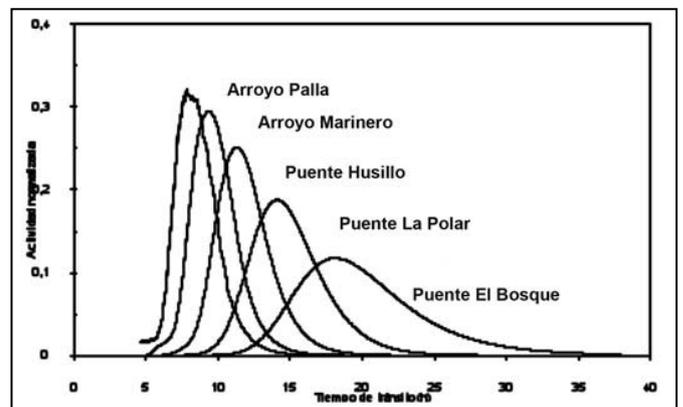


Figura 3. Modelo de alarma ante el derrame de tóxicos.

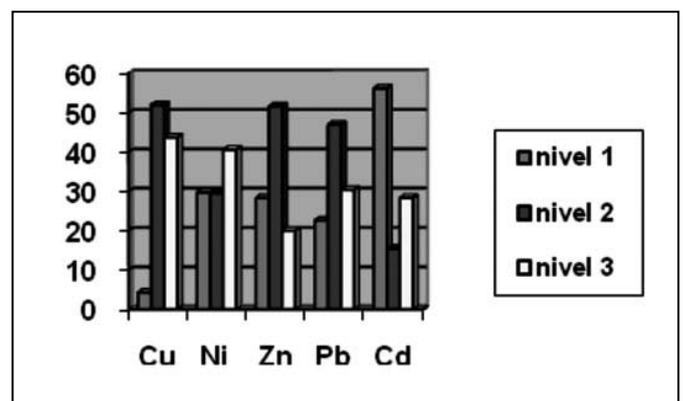


Figura 4. Coeficientes de partición de los metales en sedimentos.

A partir del estudio se arribaron a las conclusiones siguientes:

Se puede predecir el impacto de las cargas de OD, DBOc y amonio sobre la calidad de las aguas; por tanto, se pueden utilizar el  $^{99m}\text{Tc}$  y la rodamina-wt para la planificación de estrategias de saneamiento del río.

Estos dos trazadores junto a los procedimientos de convolución matemática permiten pronosticar el comportamiento temporal y espacial de derrames tóxicos puntuales en los residuales de la EDAR de María de Carmen [4].

El esquema de extracción secuencial utilizado permite obtener valores con una reproducibilidad aceptable para los cinco elementos estudiados. Se detectaron concentraciones significativas de Cu, Ni, Pb, Zn y Cd en la mayoría de las fracciones de sedimento estudiadas; por lo tanto, es alta la probabilidad de que estos elementos sean transferidos nuevamente al medio acuático. Los sedimentos constituyen un potencial depósito de metales pesados. Bajo el amparo de este proyecto se defendió otra tesis de doctorado [5-8].

### Caracterización de un reactor anaerobio para el tratamiento de los residuales en el CAI "Pablo Noriega"

El objetivo de este trabajo fue estudiar la posibilidad de usar el pertecnectato eluido de un generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  como radiotrazador para medir la DTR de la fase líquida en digestores anaerobios opacos. Para ello se seleccionó el digestor (figura 5) de una planta de tratamiento de residuales de la industria azucarera cubana, específicamente en el CAI "Pablo Noriega" [9].

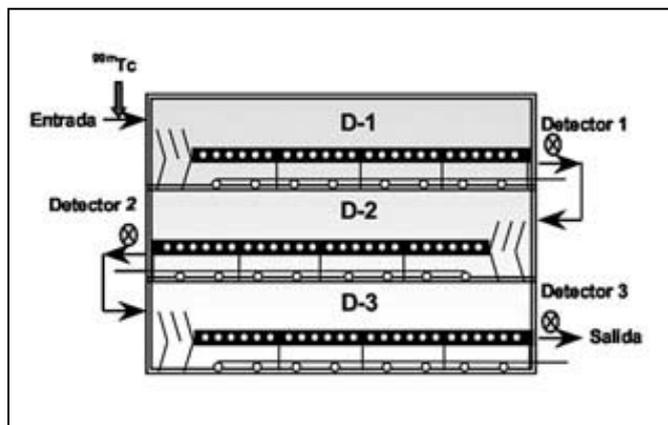


Figura 5. Esquema de la batería de reactores anaerobios de la planta de tratamiento de residuales azucareros.

Los ensayos de laboratorio demostraron que el potencial redox del medio es insuficiente para reducir a la especie  $\text{TcO}_4^-$  hasta  $\text{TcO}(\text{OH})_2$ . Sin embargo, se observó una tasa de sorción entre 0.045 y 0.083 % probablemente asociada a la retención del trazador en la biomasa, su metabolización y reducción catalítica por la actividad microbológica. Se demostró que este fenómeno no afecta la estimación del tiempo de residencia promedio del digestor ni la modelación de su flujo (figuras 6 y 7).

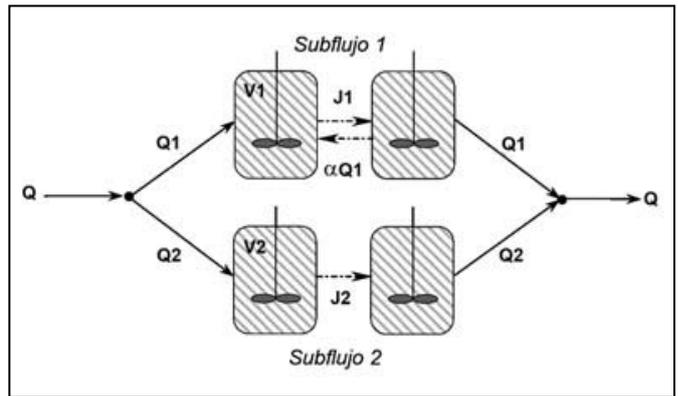


Figura 6. Modelo de flujo propuesto para el reactor D1.

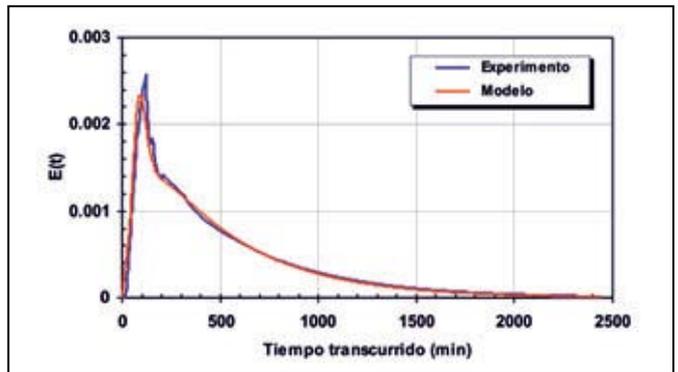


Figura 7. Comparación entre las DTR experimental y teórica.

### Verificación y validación del modelo DFC en un cristalizador azucarero

Bajo el amparo de un Programa Coordinado de Investigaciones del OIEA y del Departamento de Trazadores del Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ) se diseñó un cristalizador azucarero piloto (figura 8) y el grupo seleccionó el trazador apropiado para alcanzar resultados viables tras la simulación DFC [10].

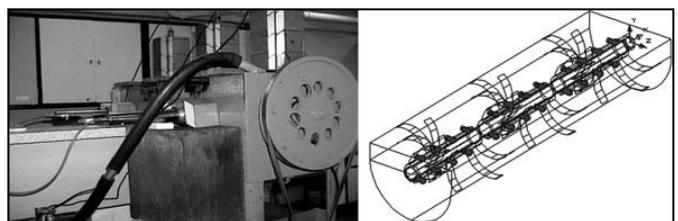


Figura 8. Foto y vista del cristalizador piloto.

Se realizó una nueva aproximación para caracterizar el patrón de flujo de fluidos no newtonianos en esas instalaciones y se demostró la complejidad de los sistemas. Con ese objetivo se llevaron a cabo procesos discontinuos de mezcla y se determinó que el tiempo de homogeneización de la masa cocida alcanza aproximadamente las siete horas, por lo que se predijo que la eficiencia del cristalizador sería muy baja con significativas pérdidas de azúcar.

Como no se contó con el código FLUENT fue necesario realizar toda la simulación con el código FLOTTRAN del paquete ANSYS 5.4. Ello minimizó las posibilidades para predecir la DTR, ya que se requirió de una geometría más simplificada y de un análisis transiente (figuras 9 y 10).

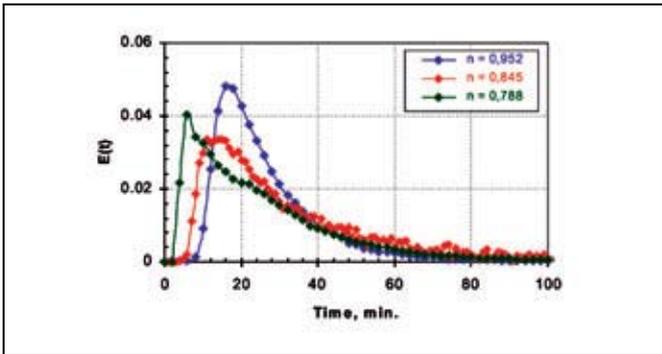


Figura 9. Influencia del índice de flujo sobre la forma de la DTR.

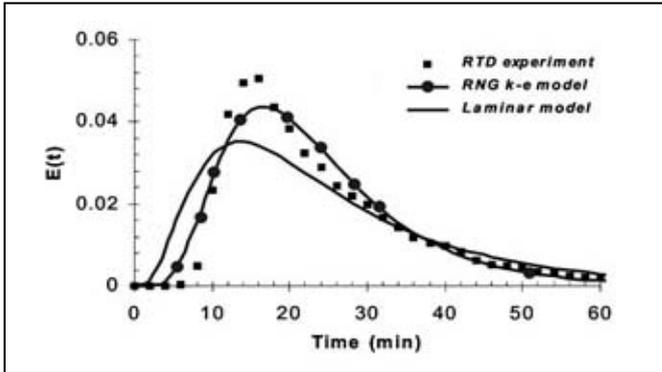


Figura 10. Comparación de las DTR obtenidas tras el experimento con trazadores y las evaluadas con un modelo laminar y otro RNGk-ε turbulento.

Finalmente, considerando la complejidad de la estructura del flujo, se diseñó un nuevo método de estímulo-respuesta basado en la respuesta a una fuente puntual de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  y se preparó un programa que permite interpolar la función respuesta del detector (figura 11).

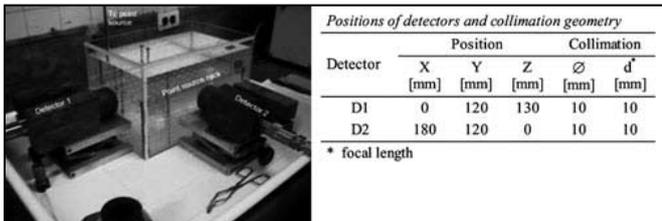


Figura 11. Instalación para obtener la respuesta de los detectores a una fuente puntual.

### Desarrollo de un generador radisotópico de $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$

Es una tendencia en los últimos años la disminución de proveedores de isótopos radiactivos para aplicaciones no médicas. Los productores se han redireccionado hacia un mercado mucho más lucrativo, los radisótopos para radiofarmacia y medicina nuclear. Por otro lado, se han incrementado las aplicaciones en sitios muy lejanos del centro productor de isótopos como las plataformas petrolíferas en alta mar. Unido a esto hay países como Cuba que no poseen instalaciones para su producción. Reconociendo esta problemática, agudizada en los últimos años a nivel internacional, el OIEA promovió y cofinanció este Programa Coordinado de Investigación dirigido a la obtención de radiotrazadores a partir de ge-

neradores radisotópicos ya existentes y la creación de nuevos generadores con interés industrial [11].

Bajo el auspicio de este programa del OIEA, el grupo avanzó en el desarrollo de un generador radisotópico de  $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$  para propósitos educacionales e industriales basado en el composito Silicagel/Cu-HCF, tratando de incrementar la actividad nominal y los parámetros de elución de un desarrollo anterior (figura 12).



Figura 12. Generadores de  $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ .

Tras dos años de intensas investigaciones con tres generadores de 0.85; 2.12 y 9.80 MBq desarrollados, se debieron abandonar esas investigaciones, pues se agotó el  $^{137}\text{Cs}$  del laboratorio y resultó imposible importar la nueva actividad desde China para escalar el diseño logrado.

### Modelación de la calidad del agua en el río Guaire, Caracas-Venezuela

Desde junio de 2006 y hasta agosto de 2008 el InS-TEC asistió a la República Bolivariana de Venezuela dentro del Proyecto "Diseño y aplicación de modelos matemáticos para la solución de problemas de calidad de aguas superficiales", firmado entre los ministerios CIT-MA de Cuba y MINAMB de Venezuela, en el marco de la VI Reunión Mixta Intergubernamental. Como objetivos generales de este proyecto se plantearon desarrollar las capacidades de la Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH), en función de las necesidades en el área de ingeniería sanitaria y ambiental en Venezuela y brindar asistencia técnica a esta institución en el diseño y aplicación de la modelación matemática para la solución de problemas de calidad de aguas superficiales, en particular, en el saneamiento del río Guaire [12].

Las principales actividades desarrolladas por los tres asesores cubanos estuvieron dirigidas al levantamiento de la línea base ambiental de calidad del agua en el área metropolitana de la cuenca del río Guaire, a la modelación de la calidad del agua de ríos aplicando el modelo modificado de Streeter y Phelps, al adiestramiento y montaje de la metodología para la determinación de parámetros hidrodinámicos en ríos y canales abiertos con trazadores, y el entrenamiento y capacitación de los profesionales del LNH en temas de calidad y sistemas para tratamiento de aguas.

Por su esencia el proyecto contribuyó positivamente a las labores de saneamiento del río Guaire y las obras de ingeniería estuvieron dirigidas a mejorar la recolección y tratamiento de las aguas servidas por los barrios y cerros de Caracas hacia esta arteria fluvial de la ciudad. Los resultados de este trabajo se presentaron en dos eventos: el III Simposio Internacional de Medio Ambiente y Habana Verde 2008 y el XIII Taller de la Cátedra de Medio Ambiente, y se publicaron en el volumen 8 de la revista Contribución a la Educación y Protección Ambiental.

### Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó

Se presenta la metodología seguida para la modelación de tres parámetros que caracterizan la calidad del agua: DBO, OD y NH<sub>4</sub> en un tramo del río Luyanó, empleando el software RIOSep® v.2.0 [13]. Durante el trabajo se combinaron acertadamente las técnicas de radiotrazadores para estimar los parámetros hidrodinámicos de la corriente del río con las técnicas de análisis físico-químico para determinar sus parámetros básicos.

El levantamiento de los parámetros hidrodinámicos en la corriente se realizó con el empleo del <sup>99m</sup>Tc. Simultáneamente con la determinación de caudales se muestreó en cinco estaciones en el cauce principal y dos tributarios, para determinar los parámetros físico-químicos de interés (figura 13).



Figura 13. Diagrama lineal de la segmentación del río Luyanó.

Como resultado se obtuvo un modelo (figura 14) que describe en más del 90 % el comportamiento de la DBO y del OD y en más del 65 % el comportamiento del NH<sub>4</sub>, por lo que caracteriza adecuadamente los procesos de autodepuración y el balance de oxígeno en las aguas del río.

### Desarrollo de radiotrazadores a partir del <sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub> para fluidos orgánicos relacionados con la industria del petróleo

En el marco del programa anterior se comenzaron las investigaciones dirigidas al desarrollo de radiotrazadores para fluidos orgánicos, particularmente los relacionados con la industria del petróleo.

Se determinaron las condiciones para la adecuación del <sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub> a fase orgánica mediante la extracción con la mezcla TBF-TOA/ciclohexano con más de un 99 % de rendimiento, se optimizó la formulación, se estableció el procedimiento de obtención del radiotrazador y se evaluaron como satisfactorias su homogeneidad en

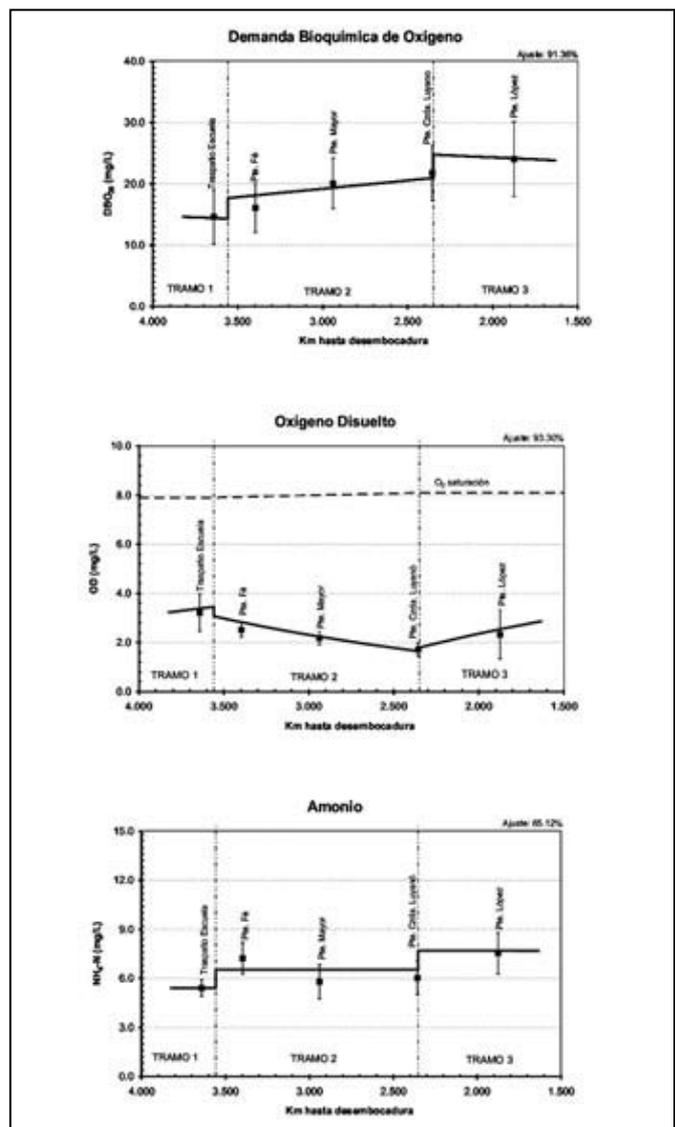


Figura 14. Modelos de calidad del agua en el sector medio del río Luyanó.

gasolina especial, diésel y dos crudos venezolanos, así como su estabilidad en el crudo en presencia de agua de capa acompañante al petróleo [14-17]. Este radiotrazador quedó listo para evaluarse a nivel industrial.

### Desarrollo de radiotrazadores sólidos a partir del <sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub>

Se sintetizaron ferrageles empleando sílicagel y zeolita natural como soportes. Los ferrageles se utilizaron para reducir el <sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub> eluido del generador de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc y se obtuvieron sílicagel y zeolita marcadas, con un 99 % de incorporación del tecnecio en ambas matrices [18]. Se optimizó la síntesis del ferragel base sílicagel determinando que 95 MBq/g es la capacidad máxima de adsorción de tecnecio. Los estudios de estabilidad mostraron que más del 82 % de la actividad inicial del radiotrazador se mantiene en la fase sólida en presencia de soluciones acuosas con un rango amplio de pH (3-11) y de regímenes de agitación (40-110 rpm), obteniéndose mayor estabilidad a pH neutros o ácidos (<sup>99m</sup>Tc<sub>acuosa</sub> (%) <10) debido, probablemente, a la presencia de especies cargadas de <sup>99m</sup>Tc (Tc<sup>2+</sup>), enlazadas

químicamente con el Fe/SiO<sub>2</sub> sólido. El <sup>99m</sup>Tc-Ferragel resulta muy perspectivo como radiotrazador sólido para estudios de sistemas de flujo multifásico, líquido-sólido bajo las condiciones de pH y agitación estudiadas.

Adicionalmente, y con el objetivo de contar con una gama de radiotrazadores sólidos, se realizó el marcaje de la arena sílice previamente tratada con HNO<sub>3</sub> y NaOH y sin tratar, empleando concentraciones variables de cloruro y fluoruro estañoso como agentes reductores del <sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub><sup>-</sup> y diferentes tiempos de marcaje. Se determinó que el fluoruro estañoso es mejor agente reductor en este caso. Se analizó la influencia de diferentes parámetros del tratamiento previo de la arena en los rendimientos de marcaje obtenidos y se comprobó que con el ajuste de la relación volumen de HNO<sub>3</sub> /masa arena y el tiempo de contacto se logra incrementar la retención del <sup>99m</sup>Tc hasta un 74 %. La arena sílice marcada es también un radiotrazador sólido perspectivo.

### Diagnóstico preventivo de torres de destilación de alcohol por técnicas nucleares

Se presentan los perfiles gamma de las torres de destilación de alcohol en las destilerías de los CAI “Héctor Molina” (Mayabeque), “Heriberto Duquesne” (Cienfuegos) y “Jesús Rabi” (Matanzas) [19].

Los perfiles se realizaron en dirección ascendente (desde los platos inferiores hacia los superiores) con una fuente puntual de <sup>60</sup>Co. Siempre fue necesario construir

un aditamento de izaje compuesto por un angular, un cepo y las rondanas. Este dispositivo se sujetó a la tubería de salida del vapor hacia la torre rectificadora.

En la figura 15 se presenta el perfil de la torre de destilación del CAI “Jesús Rabi” y en la tabla se muestra un análisis de las anomalías encontradas en los platos.

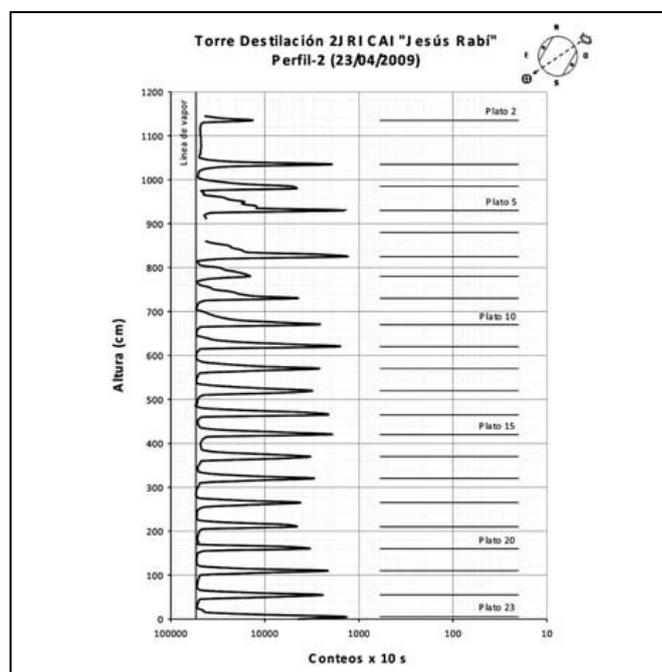


Figura 15. Perfil de la torre de destilación de la empresa Jesús Rabi.

Resumen de posibles anomalías en la torre

Plato No.	Anomalía						Resumen de funcionamiento
	Plato caído	Arrastre	Lluvia	Incrustación/ obstrucción	Inundación	Espuma	
Plato 2	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 3	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 4	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 5	No	No	No	Sí	Ligera	Sí	Con problema
Plato 6	No	No	No	Sí	Ligera	Sí	Con problema
Plato 7	No	No	No	Sí	Ligera	Sí	Con problema
Plato 8	No	No	No	Sí	Ligera	Sí	Con problema
Plato 9	No	No	No	Sí	Ligera	Probable	Con problema
Plato 10	No	No	No	Probable	No	No	Ligero problema
Plato 11	No	No	No	Probable	No	No	Ligero problema
Plato 12	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 13	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 14	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 15	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 16	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 17	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 18	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 19	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 20	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 21	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 22	No	No	No	No	No	No	Normal
Plato 23	No	No	No	No	No	No	Normal

Todas las anomalías se corroboraron cuando se abrieron las torres por lo que se concluyó que la técnica es apropiada para esos diagnósticos (figura 16).

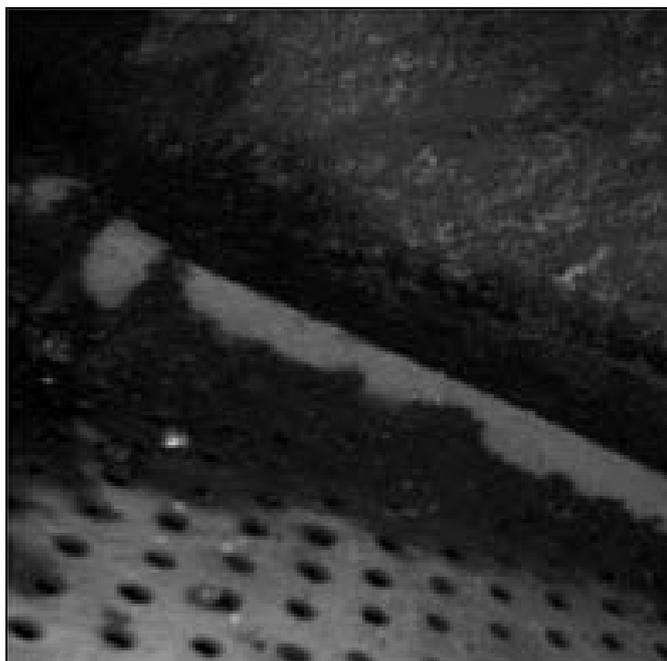


Figura 16. Incrustaciones observadas en el dique del bajante de un plato.

## Conclusiones

Cuba es un país que no cuenta con instalaciones nucleares para la producción de radisótopos, es por eso que en la mayoría de las aplicaciones el Grupo de Aplicaciones Industriales y Medioambientales de los Radiotrazadores ha empleado el  $^{99m}\text{TcO}_4$  eluido del generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ , de amplio uso en la Medicina Nuclear. Por el interés que representan, desde el 2007 el OIEA coauspicia estas investigaciones dirigidas a la obtención de radiotrazadores a partir del  $^{99m}\text{TcO}_4$ ; por lo que se puede hablar de una escuela cubana en la temática.

Este trabajo es un breve resumen de los principales progresos alcanzados por el InSTEC, en colaboración con otras instituciones, en el empleo de la técnica de radiotrazadores y los métodos nucleónicos.

## Referencias

- [1] DOMÍNGUEZ J, ABREU AM, BORROTO J, et. al. Mixing characterization in batch reactors using radiotracer techniques. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1999; 241(2): 337-340.
- [2] DOMÍNGUEZ J, ABREU AM, BORROTO J, et. al. Validación del modelo de tanques en serie con recirculación para la caracterización del mezclado en reactores discontinuos con agitador tipo ancla. *Nucleus.* 1998; (25): 24-28.
- [3] BORROTO J. Comportamiento del  $^{99m}\text{Tc}$  como radiotrazador en aguas superficiales y residuales [tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Químicas]. La Habana: InSTEC, 2003.

- [4] DOMÍNGUEZ J, BORROTO J, et. al. Use of  $^{99m}\text{TcO}_4$ - and rhodamine-wtas tracers and the mathematical convolution procedure to establish the alarm model in the Almendaresriver. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2004; 260(2): 417-420.
- [5] DOMÍNGUEZ J. Modelación de la calidad del agua del río Almendares [tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas]. La Habana: InSTEC, 2005.
- [6] DOMÍNGUEZ J, BORROTO J & HERNÁNDEZ A. Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río Almendares. *Revista CENIC. Ciencias Químicas.* 2005; 36(2): 98-105.
- [7] DOMÍNGUEZ J, HERNÁNDEZ A & BORROTO J. Calibración del modelo de Streeter y Phelps modificado para describir y predecir la calidad del agua del río Almendares. 18 Conferencia de Química. *Revista Cubana de Química.* 2005. XVII(2): 72.
- [8] DOMÍNGUEZ J, BORROTO J, HERNÁNDEZ A. A methodology to planing environmental strategies for the river water management in the event of emergency by accidental spills using the alarm models. Case study - the Almendares river, En: *Contribución a la Protección y Educación Ambiental.* 2006. Vol.7. ISBN 959-7-136-43-0.
- [9] BORROTO J, et. al. Technetium-99m as tracer for the liquid RTD measurement in opaque anaerobic digester - application in a sugar wastewater treatment plant. *Chem. Eng. Proc.* 2003; 42(11): 857-865.
- [10] GRIFFITH J, BORROTO J, et. al. Tracer experimental techniques for CFD model verification and validation in a sugar crystallizer. In: *Integration of Tracing with CFD for Industrial Process Investigation.* IAEA TECDOC-1412. Vienna: IAEA, 2004. p.67-84
- [11] AMOR A, GRIFFITH J, BORROTO J, et. al. Development of a new type of  $^{137}\text{Cs}/^{137m}\text{Ba}$  radioisotope generator. In: *Proceedings of Tracer IV Conference - Tracers and Tracing Methods (CD-ROM).* Autrans/Grenoble, France: IAEA, 3-5 octubre 2006.
- [12] RODRÍGUEZ I, PERRUOLO R, APONTE C, et. al. Caracterización hidrodinámica, fisicoquímica y bacteriológica de las aguas del río Guaire y algunos de sus tributarios más importantes. En: *Contribución a la Protección y Educación Ambiental.* 8. 2008. ISBN 959-7-136-33-3.
- [13] VALCÁRCEL L, BORROTO J, et. al. Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. *Nucleus.* 2010; (47): 16-23.
- [14] DOMÍNGUEZ J, LEÓN J, ABREU A, et. al. Development of  $^{99m}\text{Tc}$  radiotracers in organic phase for industrial applications. In: *Proceedings of WONP/NURT'11.* 2011. ISBN 978-959-7136-79-8.
- [15] DOMÍNGUEZ J, LEÓN Y, GAMBOA R, et. al. Evaluación del TBF, la TOA y la MEC como extraentes para obtener radiotrazadores de  $^{99m}\text{Tc}$  en fase orgánica a partir del generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ . *Nucleus.* 2012; (51): 26-31.
- [16] DOMÍNGUEZ J, PIJEIRA M, MARTÍNEZ E & BORROTO J. Extracción del  $^{99m}\text{TcO}_4$ -eluido del generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  empleando diferentes formulaciones de la mezcla TBF-TOA/ciclohexano como solvente. *Nucleus.* 2014 (55): 1-6.
- [17] PIJEIRA M, DOMÍNGUEZ J, MARTÍNEZ E & BORROTO J. Extracción del  $^{99m}\text{TcO}_4$ - con la mezcla 30% tributilfosfato -16% trioctilamina / ciclohexano. Evaluación del radiotrazador. *Revista CENIC Ciencias Químicas.* 2014; 45: 60-65.
- [18] MARTÍNEZ E, DOMÍNGUEZ J, SAHILI M, et. al. Synthesis and evaluation of ferragels as prospective solid  $^{99m}\text{Tc}$  radiotracer. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2015; 304(1): 267-272.
- [19] DERIVET M, BORROTO J, et. al. Informe de inspección a torres de destilerías por la técnica de perfilaje gamma. *Contrato No.0010320.* 2009.

**Recibido:** 22 de octubre de 2015

**Aceptado:** 27 de noviembre de 2015