

# Revisión sobre la producción de radionúclidos en reactores nucleares y sus aplicaciones como radiotrazadores

## Radionuclides produced in nuclear reactors and its applications as radiotracers: A review

D.L. Alonso <sup>1,a)</sup>, V.M. Pabón <sup>2</sup>, G.A. Parrado <sup>1</sup> y J.C. Parada <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dirección de Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano, Carrera 50 No. 26-20, Bogotá, D.C., Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología Nuclear, Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Carrera 4 No. 26B-54, Bogotá, D.C., Colombia

Autor para correspondencia: <sup>a)</sup>dalonso@sgc.gov.co

### Resumen

Se presenta una revisión acerca de los radionúclidos que se producen en reactores nucleares y sus aplicaciones como radiotrazadores en hidrología, agricultura, industria, medicina, medio ambiente e investigación en general, tanto en Latinoamérica como los que se produjeron en Colombia desde 1965 con el Reactor Nuclear de Investigación IAN-R1, para que bajo esa mirada sea posible reactivar la producción de radionúclidos como <sup>198</sup>Au, <sup>24</sup>Na, <sup>32</sup>P y <sup>82</sup>Br en el país.

**Palabras clave:** Flujo neutrónico, Pureza radionuclídica, Pureza radioquímica, Radionúclido.

### Abstract

A review of the radionuclides produced in nuclear reactors and their applications as radiotracers in hydrology, agriculture, industry, medicine, the environment and research in general are presented, both in Latin America and those produced in Colombia since 1965 with the Research Nuclear Reactor IAN-R1, so that under that view it is possible to reactivate the production of radionuclides in the country as <sup>198</sup>Au, <sup>24</sup>Na, <sup>32</sup>P and <sup>82</sup>Br.

**Keywords:** Neutron flux, Radionuclidic purity, Radiochemical purity, Radionuclide.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología nuclear se utiliza ampliamente en el mundo en diferentes campos de la ciencia y la industria, por el ahorro significativo de tiempo y esfuerzo que representan sus diversas aplicaciones, en comparación con las técnicas convencionales [1].

La primera aplicación de un radionúclido como radiotrazador o indicador radiactivo se llevó a cabo en 1913 por parte de George de Hevesy<sup>1</sup> y Frederic Paneth, quienes utilizaron el llamado RadioD (<sup>210</sup>Pb, cuyo origen

natural proviene de la desintegración de la familia del <sup>238</sup>U), para estudiar la solubilidad del sulfuro y cromato de plomo [2, 3]. Desde entonces, los radiotrazadores se usan ampliamente para detectar y hacer el seguimiento de la presencia de compuestos en diversos procesos físicos, químicos y biológicos.

En Colombia la producción de radionúclidos en el Reactor Nuclear de Investigación IAN-R1, inició a finales de los años 60, alcanzando su mayor productividad en la década de los 80, y finalizó en 1992 debido al cambio del combustible del reactor nuclear y la modernización de los sistemas de control, proceso que se llevó a cabo desde 1993 hasta 1997 [4]. Este último año coincidió con el cierre del Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA), encargado de su operación en esa

1 Premio Nobel de Química en 1943 “por su trabajo sobre el uso de los isótopos como trazadores en el estudio de los procesos químicos”.

época, y desde entonces, pese a que dicho reactor fue reactivado en 2005, no se producen radionúclidos por esta vía en el país.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión del estado del arte en cuanto a la producción de radionúclidos en reactores nucleares, con énfasis en los que se producen en Latinoamérica y su aplicación como radiotrazadores, así como hacer una evaluación de cuáles radionúclidos pueden ser factibles de producir en el Reactor Nuclear de Investigación IAN-R1, operado actualmente por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), con fines de divulgar e intentar despertar en la comunidad científica nacional y en el sector industrial el interés de reactivar a corto plazo la producción y aplicación de dicha tecnología en Colombia.

## 2. PRODUCCIÓN Y APLICACIONES

El uso de los radionúclidos como radiotrazadores se basa en la idea que todos los isótopos (estables y radiactivos) de un elemento dado, se comportan químicamente del mismo modo. Por tanto un radiotrazador es un compuesto químico en el que uno o más átomos se han sustituido por un radionúclido. De esta forma se puede realizar el *radiomarcado* de un elemento estable presente en un compuesto químico, permitiendo hacer seguimiento al sistema donde se encuentra, mediante la medición de las radiaciones que emite en virtud de su desintegración, la cual se hace mediante instrumentación nuclear apropiada. Así por ejemplo, es más fácil hacer el seguimiento de los átomos de  $^{24}\text{Na}$  (radiactivo), para detectar los átomos de  $^{23}\text{Na}$  (estable), ya que basta tan solo un átomo, pues una desintegración detectada corresponde directamente a la emisión gamma de un átomo de este radionúclido [5]. En contraste con técnicas de análisis químico convencional, hoy en día se pueden detectar pequeñas cantidades de una sustancia en el orden de  $\mu\text{g}$  o  $\text{ng}$ , que para el caso del  $^{23}\text{Na}$ , estas cantidades corresponderían a tener entre  $10^{13}$  -  $10^{16}$  átomos para obtener una respuesta analítica.

El radiotrazador se puede utilizar para explorar el mecanismo de las reacciones químicas mediante el seguimiento de la ruta que este toma en un sistema dado. Esta técnica emplea detectores que permiten la localización y seguimiento del radionúclido en función del tiempo, con lo cual se determinan diferentes características del

proceso en estudio con la posibilidad de proyectar modelos bi y tridimensionales del mismo [6].

Para que un compuesto pueda usarse como radiotrazador debe cumplir las siguientes condiciones: (a) el comportamiento o interacción con el sistema a estudiar debe ser conocido y reproducible, (b) no debe alterar ni perturbar el sistema y (c) que su concentración se pueda medir con facilidad [7].

Como ventajas del uso de radiotrazadores están las siguientes: (a) son fáciles de detectar y medir con gran precisión con sensibilidades de  $10^{-16}$  hasta  $10^{-6}$  g, (b) la radiactividad es independiente de la presión, la temperatura, el estado físico y químico del sistema, (c) no afectan el sistema en estudio y se pueden utilizar en técnicas no destructivas, (d) si es radioquímicamente puro, no hay interferencias de otros elementos, (e) su medición es independiente de la matriz [8], (f) la mayoría tienen vida media relativamente corta, como se ve en la Tabla 1 (desde horas hasta pocos días), lo cual implica para el personal que los manipula, una dosis baja de exposición a la radiación, ya que los experimentos se deben realizar en tiempos cortos antes que el radionúclido se desintegre y desaparezca totalmente, por lo cual la gestión de residuos radiactivos se reduce al mínimo. En cuanto a desventajas, la más importante es la necesidad de tener un acelerador de partículas o una fuente de neutrones para producirlos cerca al lugar en donde se aplicará el radiotrazador [7].

### 2.1 Métodos de Producción de Radionúclidos

Inicialmente, los radionúclidos que se utilizaron como radiotrazadores fueron los isótopos radiactivos de elementos de origen natural. Sin embargo, con la invención de Ernest Lawrence en 1932 del primer ciclotrón de protones de 1 MeV (precursor de los actuales aceleradores de partículas de alta energía) y el desarrollo del proceso de fisión durante la Segunda Guerra Mundial (construcción del primer reactor nuclear artificial en 1942), la mayoría de los radionúclidos, especialmente los de interés médico, comenzaron a producirse artificialmente en reactores nucleares y en aceleradores de partículas.

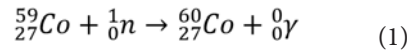
El reactor tiene la ventaja de producir varios radionúclidos por la posibilidad de irradiar simultáneamente diferentes blancos, en comparación con los aceleradores, que solamente pueden producir un radionúclido a la vez [9]. La producción artificial se inició a gran escala en varios países con la puesta en marcha de los reacto-

res de investigación a finales de 1950, construcción que continuó hasta 1970 con múltiples facilidades para la producción de radionúclidos. A partir de 1980, debido a la clausura de algunos reactores viejos (con más de 30 años de uso) y la entrada en operación de otros nuevos, el número de reactores en funcionamiento se ha mantenido constante hasta la actualidad. La mayor parte de la producción mundial de radionúclidos se lleva a cabo en reactores nucleares de alta potencia (> 1 MW), los cuales ofrecen flujos neutrónicos que oscilan entre valores intermedios ( $10^{13}$  -  $10^{14}$  n cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) a valores altos (>  $10^{14}$  n cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) [10-12].

La producción de radionúclidos mediante una reacción nuclear en un reactor, se logra irradiando un blanco apropiado con los neutrones que se emiten de la fisión del <sup>235</sup>U. Los factores que determinan el tipo de reacción nuclear que tiene lugar y la tasa de producción son: (a) la energía de los neutrones (ε) y su flujo (φ), (b) las características y cantidad del blanco y (c) la sección eficaz de activación (σ) de los átomos

que componen el blanco [13], parámetros que corresponden a la ecuación de activación. En general existen varios métodos de producción de radionúclidos en reactores, los cuales se describen a continuación:

**Activación neutrónica:** la principal reacción nuclear que se utiliza para producir radionúclidos es la denominada captura neutrónica (n, γ) [8], que ocurre típicamente con neutrones térmicos de 0,025 eV como proyectiles (Ec. 1).



El radionúclido producto, como el <sup>60</sup>Co, generalmente se desintegra hasta convertirse en un núclido estable, por emisión de radiación β<sup>-</sup> y γ en el proceso (Figura 1).

Algunos reactores utilizan neutrones rápidos, cuya energía es > 1 MeV, para producir radionúclidos mediante otras reacciones nucleares como (n, p), por ejemplo en la producción de <sup>58</sup>Co a partir de <sup>58</sup>Ni (Ec. 2) o con la reacción (n, α) [7].

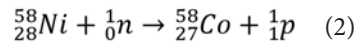
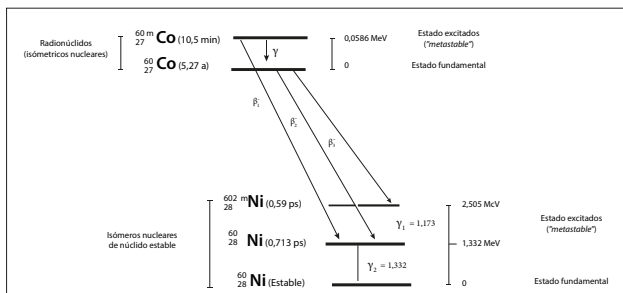


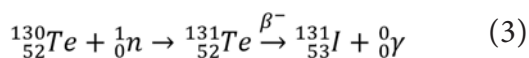
Tabla 1. Principales radionúclidos producidos en reactores nucleares, modificado de [5, 14]

Radionúclido	Vida media	Material blanco	Reacción Nuclear
<sup>24</sup> Na	15,02 h	NaCO <sub>3</sub> (natural)	<sup>23</sup> Na(n,γ) <sup>24</sup> Na
<sup>32</sup> P	14,3 d	S (natural)	<sup>32</sup> S(n,p) <sup>32</sup> P
<sup>35</sup> S	87,4 d	KCl (natural)	<sup>35</sup> Cl(n,p) <sup>35</sup> S
<sup>46</sup> Sc	83,8 d	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (natural)	<sup>45</sup> Sc(n,γ) <sup>46</sup> Sc
<sup>47</sup> Ca	4,54 d	CaCO <sub>3</sub> ( <sup>46</sup> Ca al 50%)	<sup>46</sup> Ca(n,γ) <sup>47</sup> Ca
<sup>51</sup> Cr	27,7 d	Cr ( <sup>50</sup> Cr al 94,6%)	<sup>50</sup> Cr(n,γ) <sup>51</sup> Cr
<sup>58</sup> Co	70,8 d	Ni (natural)	<sup>58</sup> Ni(n,p) <sup>58</sup> Co
<sup>59</sup> Fe	44,6 d	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <sup>58</sup> Fe al 90%)	<sup>58</sup> Fe(n,γ) <sup>59</sup> Fe
<sup>64</sup> Cu	12,7 h	CuO o Cu (natural)	<sup>63</sup> Cu(n,γ) <sup>64</sup> Cu
<sup>75</sup> Se	119,8 d	Se ( <sup>74</sup> Se al 99%)	<sup>74</sup> Se(n,γ) <sup>75</sup> Se
<sup>82</sup> Br	36 h	CaBr <sub>2</sub> (natural)	<sup>81</sup> Br(n,γ) <sup>82</sup> Br
<sup>85</sup> Sr	64,8 d	SrCO <sub>3</sub> ( <sup>84</sup> Sr al 57%)	<sup>84</sup> Sr(n,γ) <sup>85</sup> Sr
<sup>89</sup> Sr	50,5 d	SrCO <sub>3</sub> ( <sup>88</sup> Sr al 90%)	<sup>88</sup> Sr(n,γ) <sup>89</sup> Sr
<sup>90</sup> Y	64,1 h	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (natural)	<sup>89</sup> Y(n,γ) <sup>90</sup> Y
<sup>99m</sup> Tc	6,02 h	Producto de fisión	<sup>235</sup> U(n,f) <sup>99</sup> Mo → <sup>99m</sup> Tc
<sup>113m</sup> In	1,66 h	Sn ( <sup>112</sup> Sn al 80%)	<sup>112</sup> Sn(n,γ) <sup>113</sup> Sn → <sup>113m</sup> In
<sup>125</sup> I	60,0 d	Xe ( <sup>124</sup> Xe al 25%)	<sup>124</sup> Xe(n,γ) <sup>125</sup> Xe → <sup>125</sup> I
<sup>131</sup> I	8,04 d	TeO <sub>2</sub> o Te <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (natural)	<sup>130</sup> Te(n,γ) <sup>131</sup> Te → <sup>131</sup> I
<sup>133</sup> Xe	5,25 d	Producto de fisión	<sup>235</sup> U(n,f) <sup>133</sup> Xe
<sup>140</sup> La	1,68 d	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (natural)	<sup>139</sup> La(n,γ) <sup>140</sup> La
<sup>153</sup> Sm	1,9 d	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <sup>152</sup> Sm al 99%)	<sup>152</sup> Sm(n,γ) <sup>153</sup> Sm
<sup>165</sup> Dy	2,3 h	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <sup>164</sup> Dy al 98,4%)	<sup>164</sup> Dy(n,γ) <sup>165</sup> Dy
<sup>170</sup> Tm	128,6 d	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> o Tm (natural)	<sup>169</sup> Tm(n,γ) <sup>170</sup> Tm
<sup>177</sup> Lu	6,7 d	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <sup>176</sup> Lu al 72%)	<sup>176</sup> Lu(n,γ) <sup>177</sup> Lu
<sup>186</sup> Re	3,7 d	<sup>185</sup> Re al 99,7%	<sup>185</sup> Re(n,γ) <sup>186</sup> Re
<sup>192</sup> Ir	74,0 d	Ir (natural)	<sup>191</sup> Ir(n,γ) <sup>192</sup> Ir
<sup>198</sup> Au	2,70 d	Au (natural)	<sup>197</sup> Au(n,γ) <sup>198</sup> Au

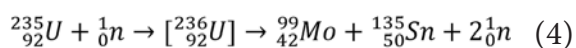
**Figura 1. Esquema de desintegración del  $^{60}\text{Co}$  [3]**



**Transmutación neutrónica:** tiene el mismo principio de la reacción  $(n, \gamma)$  seguida por desintegración  $\beta^-$ , pero a diferencia de la anterior, conduce a un producto inestable con vida media corta que se desintegra por emisión  $\beta^-$  al radionúclido de interés, el cual posteriormente se separa radioquímicamente del padre, como ocurre en la producción de  $^{131}\text{I}$  (Ec. 3).



**Productos de fisión nuclear:** son los radionúclidos que se obtienen por separación radioquímica de productos de fisión del  $^{235}\text{U}$ , como por ejemplo el  $^{99}\text{Mo}$  (Ec. 4).



En la Tabla 1 se presenta una recopilación de los principales radionúclidos producidos en reactores nucleares, su vida media, el blanco y la reacción nuclear que se emplea para su producción.

## 2.2. Síntesis de Radiotrazadores

Una vez producido el radionúclido por alguno de los métodos expuestos anteriormente, es necesario llevarlo a una forma química adecuada para que se pueda emplear en el sistema objeto de estudio. Para ello se selecciona un compuesto químico apropiado (orgánico o inorgánico), dependiendo de las características del medio y sus condiciones fisicoquímicas (pH, temperatura, solubilidad, potencial de oxidación-reducción, entre otras). La obtención del compuesto se realiza mediante una

síntesis química, considerando los parámetros de protección radiológica adecuados, como blindajes y tiempos de exposición, dependiendo del tipo de radiación ( $\beta$  y/o  $\gamma$ ) que emita el radionúclido a manipular.

Normalmente, la calidad del producto sintetizado se determina mediante el cumplimiento de las siguientes condiciones: (1) *actividad específica*: entendida como el número de átomos radiactivos por unidad de volumen, la cual depende de las propiedades físicas y químicas del blanco irradiado y de las condiciones de irradiación (flujo neutrónico y tiempo de irradiación), (2) *pureza química*: hace referencia a la posible contaminación por otras especies químicas estables que puedan afectar el desempeño del radiotrazador y que por ende, no debe exceder cierto límite establecido, dependiendo de las necesidades del usuario o el propósito buscado con el estudio, y (3) *pureza radionuclídica*: entendida como la ausencia de contaminación debida a otros radionúclidos que hayan podido formarse durante el proceso de activación o como producto de la propia desintegración de los radionúclidos formados inicialmente [9]. Estos controles se deben realizar previamente como parte de la optimización del proceso de síntesis, con el fin de seleccionar el compuesto radioquímico adecuado para el estudio que se pretende desarrollar.

## 2.3. Aplicaciones de los Radiotrazadores

Los radiotrazadores se utilizan para seguir el comportamiento de un sistema a gran escala, como el medio ambiente o en un proceso químico simple de laboratorio. Entre las principales aplicaciones de los radionúclidos como radiotrazadores en diferentes campos del conocimiento están las siguientes:

### Aplicaciones Médicas

La medicina nuclear hace uso del hecho de que ciertos radionúclidos emiten radiación (gamma, electrones o positrones) con la energía suficiente para ser detectados fuera del cuerpo [15]. Al unir tales radionúclidos a compuestos biológicamente activos, la actividad se localiza bien sea dentro de los tejidos corporales particulares, o tienen la libertad de seguir una ruta bioquímica específica. Dichos radiotrazadores que se utilizan con propósitos de diagnóstico y/o con fines terapéuticos se conocen comúnmente como *radiofármacos* [16]. El término se ha utilizado debido

a las propiedades similares entre estos marcadores y las drogas o productos farmacéuticos que se han desarrollado para tratar enfermedades.

Además, existe otro tipo de radionúclidos que se emplean en compuestos específicos o en forma metálica para el tratamiento de tumores. Si las radiaciones proceden de una fuente externa al organismo se llama *teleterapia*, si vienen de un radionúclido implantado en él, *braquiterapia* o *radioterapia interna*. En la Tabla 2 se relacionan los principales radionúclidos de uso médico, discriminados por el tipo de aplicación y radiación emitida.

Es importante resaltar que el radionúclido que más se utiliza a nivel mundial es el  $^{99m}\text{Tc}$ , que abarca el 80% de las aplicaciones médicas, el cual se emplea en la obtención de imágenes diagnósticas. En segundo lugar está el  $^{131}\text{I}$  con el 15%, aplicado en el tratamiento del hipertiroidismo y cáncer de tiroides, así como en estudios radiológicos [16].

En los últimos años se han realizado varias investigaciones con radionúclidos de tierras raras (denominados *radiolantánidos*) como  $^{140}\text{La}$ ,  $^{153}\text{Sm}$  y  $^{177}\text{Lu}$ , los cuales se utilizan principalmente para tratamientos oncológicos y obtención de imágenes diagnósticas [17-20]. En especial, el  $^{177}\text{Lu}$  ( $t_{1/2} = 6,7$  d) lo ha promocionado la comunidad médica internacional como un nuevo radionúclido para el tratamiento del cáncer, con la ventaja de emitir partículas  $\beta^-$  de energía media (498 keV) y fotones gamma de 113 y 208 keV sin afectar al tejido sano circundante. Este radionúclido permite obtener imágenes en vivo de su biodistribución en los pacientes, con lo cual se consigue una estimación más precisa de la dosis suministrada al órgano crítico [9].

#### *Aplicaciones Ambientales*

Los radionúclidos se pueden usar para entender la química y los procesos biológicos en el medio ambiente [7], como la evaluación del comportamiento de contaminantes (disueltos o suspendidos) en ríos, estuarios, playas costeras, acuíferos, vertederos de residuos, petróleo, gas o reservorios geotérmicos [21]. También para optimizar y evaluar la eficiencia de descontaminación aplicada en plantas de tratamiento

de aguas residuales y el comportamiento de los lodos que se generan durante dichos tratamientos.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), publicó en el año 2008 una recopilación de diferentes experimentos realizados con radiotrazadores de  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{140}\text{La}$  y  $^{198}\text{Au}$ , para evaluar el tiempo de residencia en diversas aplicaciones ambientales, especialmente para la optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales [22].

#### *Aplicaciones Agrícolas*

Con la aplicación de los radionúclidos como radiotrazadores en la agricultura es posible estudiar la velocidad y trayectoria de un elemento dado en una planta, de gran utilidad para investigar la nutrición vegetal, fertilidad de los suelos y relaciones suelo-agua-planta. Nutrientes vegetales como calcio, fósforo, hierro, potasio, cobre, sodio, azufre y cinc, tienen radionúclidos con vidas medias y modos de desintegración apropiadas para utilizarse como radiotrazadores. Estos elementos se pueden incorporar en los fertilizantes para aplicarlos en suelos, con el fin de determinar su efecto en la planta y las vías metabólicas de asimilación. La absorción del fertilizante marcado se puede medir y distinguir fácilmente de la absorción de otro tipo de compuestos presentes naturalmente en el suelo. Como ejemplo, se resalta la utilización de radionúclidos de sodio y potasio ( $^{24}\text{Na}$  y  $^{42}\text{K}$ ), en forma de sales tipo cloruros, para medir la cantidad de estos elementos esenciales absorbidos por la planta [13].

También es posible marcar fertilizantes fosfatados con  $^{32}\text{P}$  que se usan en cultivos de papa, maíz, habas y otros cereales. De esta forma es posible diferenciar la cantidad de fósforo absorbido por las hojas, tallos, ramas y flores con independencia de la época, la forma de aplicar el fertilizante y las características del suelo [23, 24]. Igualmente, el  $^{86}\text{Rb}$  se puede utilizar para cuantificar y evaluar la eficiencia de diferentes fertilizantes.



**Tabla 2. Principales radionúclidos de uso médico, modificado de [16, 21]**

Aplicación	Radionúclidos		Tipo de emisión radiactiva
	Producidos en acelerador	Producidos en reactor nuclear	
Radiodiagnóstico	<sup>89</sup> Sr, <sup>90</sup> Y, <sup>103</sup> Pd, <sup>111</sup> In, <sup>166</sup> Dy, <sup>166</sup> Ho, <sup>175</sup> Yb, <sup>201</sup> Tl	<sup>51</sup> Cr, <sup>64</sup> Cu, <sup>99m</sup> Tc, <sup>131</sup> I, <sup>133</sup> Xe, <sup>153</sup> Sm, <sup>153</sup> Gd, <sup>192</sup> Ir	beta / gamma
	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>30</sup> P, <sup>34m</sup> Cl, <sup>57</sup> Co, <sup>60</sup> Cu, <sup>61</sup> Cu, <sup>66</sup> Ga, <sup>67</sup> Ga, <sup>68</sup> Ge/ <sup>68</sup> Ga, <sup>68</sup> Ge, <sup>74</sup> As, <sup>76</sup> Br, <sup>77</sup> Br, <sup>81m</sup> Kr, <sup>82</sup> Rb, <sup>86</sup> Y, <sup>89</sup> Zr, <sup>94m</sup> Tc, <sup>97</sup> Ru, <sup>124</sup> I		positrones
	<sup>111</sup> In, <sup>123</sup> I	<sup>125</sup> I, <sup>195m</sup> Pt	electrones Auger
Radioterapia interna	<sup>64</sup> Cu, <sup>67</sup> Cu, <sup>105</sup> Rh, <sup>111</sup> Ag, <sup>117m</sup> Sn, <sup>149</sup> Pm, <sup>186</sup> Re	<sup>32</sup> P, <sup>47</sup> Sc, <sup>64</sup> Cu, <sup>89</sup> Sr, <sup>90</sup> Y, <sup>109</sup> Cd, <sup>131</sup> I, <sup>153</sup> Sm, <sup>165</sup> Dy, <sup>166</sup> Ho, <sup>169</sup> Er, <sup>169</sup> Yb, <sup>170</sup> Tm, <sup>175</sup> Yb, <sup>177</sup> Lu, <sup>186</sup> Re, <sup>188</sup> Re <sup>192</sup> Ir, <sup>198</sup> Au, <sup>199</sup> Au	beta / gamma
	<sup>64</sup> Cu, <sup>66</sup> Ga		positrones
	<sup>211</sup> At, <sup>212</sup> Bi, <sup>149</sup> Tb, <sup>223</sup> Ra, <sup>224</sup> Ra, <sup>225</sup> Ac, <sup>227</sup> Th, <sup>255</sup> Fm	<sup>213</sup> Bi,	alfa
	<sup>51</sup> Cr, <sup>67</sup> Ga, <sup>77</sup> Br, <sup>111</sup> In, <sup>123</sup> I, <sup>140</sup> Nd, <sup>201</sup> Tl	<sup>125</sup> I, <sup>195m</sup> Pt	electrones Auger

Estudios de este tipo también se realizan con soluciones de cinc (<sup>65</sup>Zn) o de hierro (<sup>59</sup>Fe) para evaluar la movilidad de estos elementos en diferentes variedades de trigo [25] y tomate [26], respectivamente, así como magnesio (<sup>28</sup>Mg) para el estudio de absorción en cultivos de arroz a diferentes condiciones de pH [27].

Otros ejemplos de aplicaciones agrícolas muestran el uso de radiotrazadores de <sup>24</sup>Na, <sup>32</sup>P, <sup>42</sup>K, <sup>65</sup>Zn y <sup>86</sup>Rb, para evidenciar que los árboles frutales absorben el cinc a través del follaje, mientras que las plantas de algodón lo hacen por medio de la semilla [28], así como para lograr mejores rendimientos en la producción de leche de vaca y huevos de gallina a partir de la información obtenida mediante el seguimiento de dichos radionúclidos en el metabolismo animal [29].

#### *Ciencias de la Tierra y el Mar*

Los radiotrazadores se utilizan en el estudio de la producción biológica en los ambientes acuáticos. Por ejemplo, el <sup>32</sup>Si se utiliza para estimar las tasas de captación de silicio por diatomeas, un grupo de algas acuáticas que se constituyen en los mayores contribuyentes a la fijación de carbono, que representan hasta un 75% de la producción marina primaria. Igualmente precipitan la sílice hidratada amorfa en sus paredes celulares, por lo que controlan el ciclo del silicio y contribuyen de manera significativa al flujo

de la sílice, el nitrógeno y el carbono biológicamente producido en la mayoría de las regiones oceánicas. La determinación precisa del crecimiento de las diatomeas es esencial para la comprensión del ciclo de nutrientes marinos a nivel global.

Otros radiotrazadores que se utilizan para mejorar la comprensión del ciclo del carbono en los océanos son el <sup>67</sup>Cu y el <sup>59</sup>Fe. Estos micronutrientes son esenciales para el crecimiento del fitoplancton, permitiendo el control de la productividad primaria en grandes regiones oceánicas. Dadas sus vidas medias, de 62 h y 44,6 d, respectivamente, es posible utilizarlos en estudios del océano profundo, sin tener que almacenar y transportar muestras hasta un laboratorio [7].

#### *Recursos Hídricos*

Pese a que el agua es esencial para la vida, en muchas partes del mundo es escasa y en otras, la cantidad disponible ha disminuido rápidamente en los últimos años, por ello el estudio del recurso hídrico resulta esencial para la supervivencia humana y la conservación medioambiental.

Entre las muchas técnicas de estudio en este campo, está la hidrología isotópica, la cual emplea tanto isótopos estables como radiactivos, para hacer seguimiento preciso a los recursos hídricos, subterráneos y superficiales. El uso de trazadores estables y radiactivos

ha ido en aumento considerable y hoy es un método esencial en estudios hidroquímicos [30]. Esta técnica es una herramienta analítica importante para la gestión y conservación de los suministros de agua existentes y para la identificación de nuevas fuentes.

Con el uso de radiotrazadores en aguas superficiales se obtiene información acerca de posibles fugas en represas y canales de riego, la dinámica de lagos y embalses, caudales, la velocidad de descarga de los ríos, tasas de sedimentación y transporte de sedimentos en cuencas hidrográficas [6, 31]. Para aguas superficiales y subterráneas, el  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{131}\text{I}$  y  $^{51}\text{Cr-EDTA}$ , son los más utilizados para seguir su movimiento y cuantificar el volumen de sus reservas [8, 13].

#### *Aplicaciones Industriales*

Radionúclidos como el  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  y  $^{198}\text{Au}$ , tienen una gran variedad de aplicaciones en la industria dadas sus ventajas en cuanto a fácil identificación y seguimiento en diferentes procesos [5, 32, 33].

En la industria petrolera es muy común la utilización de compuestos marcados con radionúclidos miscibles en petróleo, como el  $\text{NH}_4^{82}\text{Br}$  [34] y complejos orgánicos con  $^{198}\text{Au}$  [35], para detectar fugas en las tuberías, determinar el tamaño de un pozo o para la recuperación secundaria de petróleo. También se utilizan radiotrazadores solubles en agua, como  $^{24}\text{NaCl}$ ,  $^{51}\text{Cr-EDTA}$ ,  $\text{Na}^{131}\text{I}$  y  $\text{H}^{198}\text{AuCl}_4$ , los cuales se inyectan a fluidos de fracturación hidráulica para determinar el perfil de inyección y la ubicación de las fracturas creadas [36, 37].

En la industria manufacturera, se utiliza la técnica del trazador para la realización de ensayos de homogeneidad de mezclas. Un ejemplo es la producción de chocolate, donde una pequeña cantidad de radionúclidos de corta vida como  $^{24}\text{Na}$  o  $^{56}\text{Mn}$ , se añaden a los ingredientes principales, con el fin de estudiar la eficiencia de la mezcla, el efecto de la geometría de la cámara, el tiempo de residencia en los reactores químicos, las velocidades de flujo, absorción, etc. [13]. Otros usos frecuentes para evaluar la homogeneidad de mezcla de diferentes materiales, son la adición de  $^{24}\text{NaHCO}_3$  a la masa fundida para el control de calidad en la producción de vidrio, o de compuestos orgánicos marcados con  $^{95}\text{Zr}$  ( $t_{1/2} = 64,02$  d) para seguir la homogeneización de productos derivados del petróleo [8].

En los últimos años se han investigado nuevas aplicaciones industriales, como por ejemplo la preparación de nanopartículas especiales de  $^{198}\text{Au-SiO}_2$ , para su uso como radiotrazadores en petroquímica y procesos industriales de refinación. Dado que en este tipo de aplicaciones las temperaturas internas son extremadamente altas, los compuestos orgánicos radiomarcados que se utilizan convencionalmente se descomponen, perdiendo su integridad como radiotrazadores, siendo este tipo de nanopartículas una alternativa para solucionar este problema [38].

#### *Aplicaciones en Investigación Científica*

Los radionúclidos de fósforo ( $^{32}\text{P}$ ), azufre ( $^{35}\text{S}$ ), calcio ( $^{45}\text{Ca}$  y  $^{47}\text{Ca}$ ), escandio ( $^{46}\text{Sc}$ ), hierro ( $^{55}\text{Fe}$  y  $^{59}\text{Fe}$ ), cobre ( $^{64}\text{Cu}$ ), cinc ( $^{65}\text{Zn}$ ) y yodo ( $^{125}\text{I}$  y  $^{131}\text{I}$ ) se utilizan ampliamente para rastrear la ruta de reacciones bioquímicas [39], así como para realizar el seguimiento de la distribución de una sustancia o su flujo en un sistema natural tal como una célula o un tejido [40]. Otras aplicaciones en el campo de la investigación están relacionadas con la determinación de la eficiencia de reacciones químicas específicas desarrolladas en laboratorios de síntesis química [21].

## 3. PANORAMA MUNDIAL Y REGIONAL

### 3.1. Producción Mundial

Actualmente están en operación 243 reactores nucleares en el mundo [41], sin embargo, según Mushtaq [12] solamente 73 reactores se utilizan regularmente para producir radionúclidos.

Dado que el  $^{99}\text{Mo}$  ( $t_{1/2} = 66$  h) es el radionúclido más utilizado a nivel mundial, con una producción total de aproximadamente 400 TBq/semana ( $\approx 12.000$  Ci/semana), su producción sirve como referente para definir los países que mayor volumen de radionúclidos generan [42]. Bajo esta premisa, se establece que alrededor del 95% de la producción mundial de  $^{99}\text{Mo}$  se realiza en solo siete reactores, los cuales se mencionan a continuación junto con su aporte correspondiente [43, 44]:



- NRU: *National Research Universal* (135 MWt), situado en Canadá y puesto en servicio en 1957, suministra el 40% a nivel mundial.
- HFR: *High Flux Reactor* (45 MWt), situado en Holanda y puesto en servicio en 1961, suministra el 30% de la producción mundial.
- SAFARI-1: *South African Fundamental Atomic Research Installation* (20 MWt), en Suráfrica desde 1965, con una participación del 10%.
- BR-2: *Nuclear Research Centre* (100 MWt), en Bélgica desde 1961, con una participación del 9%.
- OPAL: *Open Pool Australian Light Water Reactor* (20 MWt), en Australia desde 2007, con una participación inferior al 3%.
- LVR-15 *REZ Reactor* (10 MWt), en República Checa desde 1957, con una participación inferior al 3%.
- *María Research Reactor* (30 MWt), en Polonia desde 1974, con una participación inferior al 2%.

Además de estos, el reactor de investigación OSIRIS en Francia produjo  $^{99}\text{Mo}$  para uso médico desde 1966 hasta su apagado permanente en diciembre de 2015 [43]. El restante 5% de la producción mundial se lleva a cabo principalmente para uso regional en reactores nucleares situados en Rusia, Indonesia, Argentina, Chile, Rumania, Pakistán y Egipto. A su vez, Japón, China y Corea del Sur, desarrollan actualmente ambiciosos proyectos para lograr una mayor participación en la producción mundial de este importante radionúclido.

Como ya se dijo anteriormente, la mayoría de radionúclidos producidos se utilizan en aplicaciones médicas (diagnóstico y terapia), cuyo mercado mundial reportado en el 2014 ascendió a la cifra de US\$12 billones y se espera un incremento de hasta US\$68 billones para el 2030 [42].

### 3.2. Producción en Latinoamérica

Respecto a la producción de radionúclidos en Latinoamérica, actualmente existen siete reactores nucleares ubicados en México, Argentina, Perú, Chile y Brasil (Tabla 3), que cubren un amplio espectro de aplicaciones, principalmente médicas e industriales [45]. Además, otros dos reactores multipropósito

iniciaron en el 2017 su etapa de planeación, el RA-10 de Argentina y el RMB de Brasil, ambos de 30 MWt tipo piscina [41].

No obstante la producción de radionúclidos a gran escala en los reactores mencionados no cubre la totalidad de la demanda local, y por tanto un porcentaje significativo se importa [45], principalmente el  $^{99}\text{Mo}$  (de fisión) y el  $^{131}\text{I}$  de Canadá, debido a que actualmente tan solo cinco de los veintinueve países de Latinoamérica cuentan con reactores y facilidades adecuadas para ello.

A continuación se describen brevemente las actividades relacionadas con la producción de radionúclidos y sus aplicaciones en cada uno de estos países:

En Argentina, según la recopilación histórica realizada por De Dicco [46], para satisfacer la demanda local se inició en 1970 la producción de radionúclidos en el Reactor RA-3 (10 MW de potencia térmica y flujo neutrónico de  $10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ubicado en el Centro Atómico Ezeiza de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Además en esta facilidad funciona desde 1973 la Planta de Producción de Radioisótopos, que cuenta con cinco celdas para este fin, y desde 1985 la Planta de Producción de Productos de Fisión (con ocho celdas) en la cual se producen industrialmente  $^{131}\text{I}$  y  $^{99}\text{Mo}$ , a partir de la irradiación durante cuatro días, de una aleación aluminio/uranio en placas, con uranio enriquecido inicialmente al 90% en su isótopo  $^{235}\text{U}$  y desde el 2002 a menos del 20%, con la posterior separación radioquímica de los productos de fisión relacionados anteriormente; además de otros de interés comercial como el  $^{90}\text{Sr}$  y el  $^{137}\text{Cs}$ . De esta manera, se satisface la demanda de estos radionúclidos en Argentina y se genera un saldo exportable capaz de cubrir las necesidades de otros países suramericanos que no cuentan con producción propia [47, 48]. Vale la pena destacar que Argentina es el único país de la región que produce actualmente  $^{99}\text{Mo}$  de fisión. También exporta otros radionúclidos como  $^{32}\text{P}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ , así como la obtención esporádica de  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  y  $^{125}\text{I}$ , por solicitudes especiales. La cantidad de  $^{99}\text{Mo}$ , que en el 2015 alcanzó los 10.228 Ci, posiciona al reactor RA-3 como el principal productor de radionúclidos en Latinoamérica [49].

Por otra parte, el reactor experimental multipropósito RA-6 (1 MWt de potencia y flujo neutrónico de  $10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ubicado en el Centro Atómico Bariloche, se utiliza exclusivamente para actividades



de formación de recursos humanos en diferentes campos de la ciencia y la tecnología nuclear, mediante la realización de experimentos con neutrones que incluyen la irradiación, activación de materiales y producción a escala de laboratorio de algunos radionúclidos [50].

En México, el único reactor nuclear disponible para este tipo de aplicaciones se encuentra en el Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores" del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), el TRIGA Mark III (1 MWt de potencia y flujo neutrónico de  $10^{13}$  n cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) [51], que produce grandes cantidades de los siguientes radionúclidos: <sup>24</sup>Na, <sup>32</sup>P, <sup>82</sup>Br, <sup>131</sup>I, <sup>153</sup>Sm y <sup>203</sup>Hg. En los últimos años se ha profundizado en la investigación de elementos radiolantánidos como <sup>149</sup>Pm, <sup>161</sup>Tb, <sup>165</sup>Dy, <sup>166</sup>Ho y <sup>177</sup>Lu [52]. Hay que resaltar, que el <sup>153</sup>Sm se aprovecha para la producción y comercialización a nivel local y regional de dos radiofármacos, el <sup>153</sup>Sm-EDTMP que se utiliza como paliativo del dolor generado por el cáncer óseo y el <sup>153</sup>Sm-MH que se emplea para el tratamiento de la artritis reumatoide [53].

Además de las aplicaciones médicas, los radionúclidos se usan en investigación, agricultura e industria, como el caso del estudio realizado por Vizuet y col. [54], que emplearon <sup>24</sup>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (100 mCi) como radiotrazador para la detección de fugas en varios ductos colectores de agua de una planta embotelladora ubicada en Lerma (Estado de México).

En Perú cuentan con el reactor nuclear de experimentación RP-10 (10 MWt y flujo neutrónico de  $10^{14}$  n cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) ubicado en el Centro Nuclear RACSO del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) y la Planta de Producción de Radioisótopos, en donde se producen a escala industrial los radionúclidos <sup>131</sup>I, <sup>99m</sup>Tc y <sup>153</sup>Sm, que se emplean en la comercialización de radiofármacos para uso en diagnóstico médico y tratamientos oncológicos [55]. Algunos trabajos de aplicación de <sup>131</sup>I y <sup>99m</sup>Tc en medicina y biología, fueron publicados por el IPEN en su Informe Científico y Tecnológico del 2010 [56].

En Brasil, la producción de radionúclidos inicia en 1963 en el reactor nuclear IEA-R1 (5 MW de potencia térmica y flujo neutrónico de  $10^{13}$  n cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) ubicado en Sao Paulo. Los principales radionúclidos que se producen son <sup>24</sup>Na, <sup>32</sup>P, <sup>35</sup>S, <sup>51</sup>Cr, <sup>60</sup>Co, <sup>82</sup>Br, <sup>131</sup>I, <sup>153</sup>Sm, <sup>192</sup>Ir y <sup>203</sup>Hg, la mayoría para uso médico [21, 57]; siendo el <sup>131</sup>I el de mayor producción con una cantidad de aproximadamente 25 Ci/semana [58]. Otras aplicaciones, incluyen el uso de radiotrazadores en la industria, la agricultura y la investigación.

En Chile, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) en sus instalaciones del Centro de Estudios Nucleares La Reina, disponen del reactor nuclear RECH-1 (5 MW y flujo neutrónico de  $10^{13}$  n cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). La producción de radionúclidos se orienta hacia aplicaciones en medicina, industria, agricultura e investigación científica, siendo los siguientes los de mayor demanda: <sup>24</sup>Na, <sup>32</sup>P, <sup>51</sup>Cr, <sup>82</sup>Br, <sup>86</sup>Rb, <sup>99m</sup>Tc, <sup>131</sup>I, <sup>153</sup>Sm y <sup>192</sup>Ir [21].

Además, investigaciones realizadas por Chandía [59] y Sierralta [60] demostraron la posibilidad de producir <sup>18</sup>F en el RECH-1 a partir de la irradiación de blancos de Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> enriquecidos, cuyas reacciones nucleares son <sup>6</sup>Li(n,α)<sup>3</sup>H y <sup>16</sup>O(<sup>3</sup>H,n)<sup>18</sup>F; dicho radionúclido se emplea para la marcación del radiofármaco [<sup>18</sup>F]-FDG, utilizado para estudiar el metabolismo celular a nivel cerebral, miocárdico y tumoral. Por otra parte, en el trabajo de Pinto y Godoy [61] irradiaron óxidos de holmio (Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, <sup>165</sup>Ho al 100%) y lutecio (Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, <sup>176</sup>Lu al 2,6%) en el reactor para producir <sup>166</sup>Ho y <sup>177</sup>Lu de uso médico.

Los reactores de Argentina, Brasil y Chile reportan casi el 100% del tiempo de operación dedicado a la producción de radionúclidos, el 66% en México y el 48% en Perú. El número efectivo de horas de irradiación no exceden en ningún caso las 100 h semanales; Argentina en un extremo con 90 h y Perú con 12 h semanales en el otro extremo.



Tabla 3. Reactores para producción de radionúclidos en Latinoamérica [41]

País	Reactor	Lugar	Tipo	Potencia (kW)	Primera fecha criticidad
Argentina	RA-3	Buenos Aires	Piscina/ Investigación	10.000	17/05/1967
Argentina	RA-6	Bariloche	Piscina/ Investigación	1.000	23/09/1982
Brasil	IEA-R1	Sao Paulo	Piscina/ Investigación	5.000	16/09/1957
Brasil	IPR-R1	Belo Horizonte	TRIGA Mark I	100	06/11/1960
Chile	RECH-1	Santiago	Piscina/ Investigación	5.000	13/10/1974
México	TRIGA Mark III	Ocoyoacac	TRIGA Mark III	1.000	08/11/1968
Perú	RP-10	Huarangal	Piscina/ Investigación	10.000	30/11/1988

Finalmente, a partir de la recopilación de información realizada por el OIEA en el marco del Proyecto de Cooperación Técnica RLA/0/037 en el año 2013, se concluye que “los radioisótopos producidos en los reactores nucleares de Latinoamérica con mayor volumen de demanda anual en la región son, en orden decreciente:  $^{99}\text{Mo}$  (77%),  $^{131}\text{I}$  (13%),  $^{192}\text{Ir}$  (6%),  $^{177}\text{Lu}$  (2%),  $^{153}\text{Sm}$  (1%),  $^{90}\text{Y}$  (1%)  $^{125}\text{I}$  (<1%) y  $^{32}\text{P}$  (<1%)”. En tanto que, “la producción regional solamente cubre el 52% de la demanda de  $^{99}\text{Mo}$ , el 37% del  $^{131}\text{I}$ , el 96% del  $^{153}\text{Sm}$  y, como máximo, el 23% del  $^{192}\text{Ir}$  y el 42% del  $^{90}\text{Y}$ ” [45].

## 4. SITUACIÓN EN COLOMBIA

Desde 1960 el país se encuentra vinculado al OIEA<sup>2</sup> y en 1965 inició sus actividades nucleares con la puesta a crítico del Reactor Nuclear de Investigación IAN-R1. A partir de 1970 se inició la producción de algunos radionúclidos de gran aplicación en diferentes campos como la medicina, la investigación, la hidrología y la industria, entre ellos  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{82}\text{Br}$  y  $^{198}\text{Au}$  como los más importantes, pero con el cierre del INEA en 1997 y el apagado del Reactor IAN-R1 en 1998 [62], hasta la fecha han dejado de producirse, con el consecuente retraso tecnológico y la reducción casi en su totalidad del uso de radiotrazadores en nuestro país. Se describe a continuación ese recorrido histórico:

### 4.1. De 1965 a 1993

El 20 de enero de 1965, el Instituto de Asuntos Nucleares (IAN) llevó a crítico el reactor nuclear de investigación IAN-R1 a una potencia térmica de 10 kWt [63], reactor que fue donado a Colombia bajo el programa “Átomos para la Paz” del presidente Dwight Eisenhower de Estados Unidos. El reactor lo diseñó y construyó la compañía *Lockheed Nuclear Products*, cuyo combustible del núcleo original era del tipo MTR (*Material Testing Reactor*) de alto enriquecimiento (HEU, al 93% en  $^{235}\text{U}$ ). Este combustible estaba dispuesto en una matriz de 4 x 4 elementos, rodeada a su vez por 20 elementos reflectores de grafito, así como por otros 6 elementos de grafito con espacios circulares para la irradiación de muestras. El IAN-R1 operó a 10 kWt hasta el 12 de junio de 1967, fecha en la cual comenzó a operarse a 20 kWt [64]. En 1980 se aumentó la potencia para operarlo a 30 kWt [65].

A partir de 1987 con la cooperación del OIEA se llevó a cabo un programa gradual de modernización del reactor, el cual se inició con la instalación de nuevos sistemas de monitoreo de la radiación, cambio del sistema de control y estudios detallados para aumentar su potencia hasta un máximo de 1 MWt [66, 67]. Luego, en 1992 el IAN se reestructuró y cambió su nombre a Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA) [68].

En cuanto a la producción de radionúclidos en Colombia, el primer acercamiento al tema lo llevó a cabo en 1961 la radioquímica argentina Sonia Nassif, quien en representación del OIEA realizó varias charlas en Bogotá enfocadas a divulgar las aplicaciones de

2 Ley 16 del 25 de septiembre de 1960 “por la cual se aprueba el Estatuto del Organismo Internacional de Energía Atómica”, suscrito por Colombia el 26 de octubre de 1956 en New York.

los radionúclidos como trazadores. Una vez entró en operación el Reactor IAN-R1 los primeros trabajos con los que se empezó a estudiar la factibilidad de producción de algunos de ellos fueron los realizados por Páez y Nassif [69], quienes hicieron una revisión de los principales métodos de la época y su adaptación a las condiciones operacionales del IAN-R1, así como la recopilación realizada por Toro y Múnera [70] sobre los diferentes métodos para producirlos en reactores nucleares y tablas con sus correspondientes actividades de saturación ( $\mu\text{Ci/g}$ ), trabajo en el que se estableció como valor de referencia para este reactor, un flujo neutrónico promedio de  $10^{11} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para una potencia de operación de 20 kW, el cual concuerda con el valor mencionado por Toro en su informe de 1972 [64].

Dado el bajo flujo neutrónico de este reactor, no fue posible que el IAN ejecutara un programa intensivo de producción de radionúclidos, como lo hicieron otros países latinoamericanos desde finales de la década de 1960 e inicios de la de 1970, debido a que resultaba inviable la producción de la mayoría de radionúclidos de uso médico frecuentemente utilizados en la época. Por ejemplo, para producir tan solo 20 mCi de  $^{131}\text{I}$  se necesitaba irradiar 100 g de dióxido de telurio ( $\text{TeO}_2$ ) durante 90 horas continuas, lo que resultaba ser sumamente peligroso e impráctico [64].

A pesar de las limitaciones, el IAN realizó continuamente desde 1970 la producción de algunos radionúclidos de vida media corta, como el  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{82}\text{Br}$  y  $^{198}\text{Au}$ , los cuales se utilizaban en la industria, hidrología e ingeniería en general, además pequeñas cantidades de  $^{32}\text{P}$  en experimentos agrícolas de invernadero [62, 71]. Adicionalmente, se hicieron pruebas en el IAN-R1 para producir algunos radionúclidos de uso médico, como por ejemplo la irradiación de óxido de molibdeno natural ( $\text{MoO}_3$ ) para la obtención de pequeñas cantidades de  $^{99}\text{Mo}$  empleadas en investigaciones para evaluar la factibilidad de generar  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . También se irradiaron semillas de oro para implantación hipofisiaria de  $^{198}\text{Au}$ , que se llevó a cabo en el Instituto Nacional de Cancerología de Bogotá [64, 72].

Es importante resaltar, que desde 1984, el IAN creó el Fondo Especial de Radioisótopos, mediante el cual se importaba  $^{131}\text{I}$  (cerca de 36 Ci/año) y generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  (580 Ci/año) para uso médico que se distribuían internamente a unos 150 usuarios en todo el país (en 1987: 63% en Bogotá, 13% en Medellín y

9% Cali). El  $^{131}\text{I}$  se dosificaba en la celda caliente del Instituto y se comercializaba en presentaciones de unidosis, mientras que el  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  se distribuía como multidosis en estuches para marcación (kits de cinco viales). Adicionalmente, el IAN realizó la importación de fuentes radiactivas selladas, especialmente de  $^{192}\text{Ir}$ , para utilizarlas en ensayos no destructivos en diversas aplicaciones industriales [73, 74].

A continuación se presentan algunos estudios realizados en Colombia a partir de 1970 y hasta 1992, sobre la utilización de radionúclidos producidos en el IAN-R1, como radiotrazadores en diferentes campos del conocimiento:

#### *Hidrología*

La aplicación de radiotrazadores en hidrología se inició en 1972, siendo el  $^{82}\text{Br}$  el de mayor uso. Su producción llegó a ser tan alta que en 1987 alcanzó una actividad total de 12.200 mCi [73], la más alta para un radionúclido producido en el IAN-R1. Los estudios hidrológicos que se llevaron a cabo en esta época, se realizaron en ríos, represas, mares y aguas subterráneas, con el propósito de evaluar parámetros hidráulicos como fugas, filtraciones, tiempos de tránsito, tiempos de residencia y aforos, parámetros hidrogeológicos como porosidad, permeabilidad y transmisibilidad [75].

Cabe destacar el estudio realizado por Plata y col. [76], en el cual el IAN y la empresa de servicios públicos EMPOISLAS, ante el grave problema de abastecimiento de agua potable en la isla de San Andrés, emprendieron el estudio del comportamiento del acuífero kárstico ubicado en la isla, para lo cual emplearon  $^{82}\text{Br}$  con el fin de determinar parámetros hidrogeológicos, sitios de recarga, tiempos de residencia, estudios de la intrusión salina, porosidad y transmisibilidad de dicho acuífero.

En otros estudios, realizados por Sánchez y col., se utilizó el radiotrazador  $\text{NH}_4^{82}\text{Br}$  para localizar posibles fugas en los embalses de Tominé y Chingaza (departamento de Cundinamarca) [77, 78]. Este radiotrazador también se usó para evaluar tiempos de tránsito y coeficientes de dispersión de algunos ríos importantes como el Suárez y el Fonce en el departamento de Santander, el río Cabrera en Huila y Tolima [79], el río Bogotá y sus afluentes en Cundinamarca y el río Magdalena en su paso por los departamentos del Tolima y Cundinamarca [73, 75].

### Agricultura

El  $^{32}\text{P}$  se utilizó para la marcación de fertilizantes fosforados en el estudio de diversos cultivos de interés nacional. Para ello, el área de aplicaciones en agricultura del IAN contaba con un laboratorio de radionúclidos en donde se preparaban soluciones de  $^{32}\text{P}$ ,  $^{59}\text{Fe}$  y  $^{65}\text{Zn}$ , cuya radiación  $\beta^-$  emitida se medía en un contador de centelleo líquido [75].

Se resaltan los estudios realizados en cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L) situados en Chocontá (Cundinamarca), para evaluar la influencia de la época de aplicación del  $^{32}\text{P}$ -Superfosfato triple, en la eficiencia de fertilización y productividad de la papa [80], así como los realizados con la variedad *Pardo Pastusa* en un suelo volcánico ubicado en la Granja de Experimentación e Investigaciones Agrícolas de Obonuco en Pasto (Nariño), como parte de un trabajo conjunto con el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), investigación en la que se compararon diferentes dosis y formas de aplicación de fósforo al utilizar superfosfato triple marcado con  $^{32}\text{P}$ , para luego evaluar la eficiencia de fertilizantes fosforados y su influencia en el desarrollo radicular [81].

Igualmente, se realizaron experimentos en cultivos de arroz ubicados en el Centro Regional de Investigaciones Agrícolas del ICA en El Espinal (Tolima), para evaluar la actividad radicular de la variedad de arroz (*Oriza Sativa*, L) por la absorción de  $^{32}\text{P}$  y  $^{15}\text{N}$  a diferentes distancias y profundidades de la planta (5, 10 y 15 cm) [81], así como en cultivos de trigo la variedad *Bonza 63* en el Centro Regional de Investigación San Jorge del ICA en Soacha (Cundinamarca), en donde se determinó la eficiencia de varias fuentes naturales de fósforo usadas como fertilizantes por los agricultores [73].

### Industria

Aunque este tipo de aplicaciones estaban limitadas por la baja *actividad específica* alcanzada al irradiar los blancos en el reactor IAN-R1, en 1984 se produjeron 860 mCi de oro radiactivo ( $^{198}\text{Au}$ ) para su utilización como radiotrazador en la industria petrolera [81]; en 1987 dicha producción ascendió a 3.315 mCi [72]. El  $^{198}\text{Au}$  producido se utilizaba para marcar compuestos químicos solubles en agua y en petróleo, los cuales en esa época tuvieron una alta demanda por parte de grandes compañías de exploración petrolera como *GO International*, *Wellex Corp.*, *Halliburton*, *Western Atlas International* y *Core Laboratories* [82]. Dicho

radionúclido empezó a producirse para aplicaciones en la industria petrolera a partir de 1970 [83] y se produjo continuamente hasta 1992 [62], siendo la investigación desarrollada por Martínez y Rodríguez [84], una de las últimas realizadas en este campo. En ella, se sintetizó un complejo marcado con  $^{198}\text{Au}$  miscible en hidrocarburos para su utilización en la recuperación primaria y secundaria de petróleo.

También se utilizó el  $^{82}\text{Br}$  como radiotrazador en trabajos conjuntos del IAN con la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) en 1985, con el propósito de detectar fugas en un depósito de agua contra incendio en la planta de producción de Facatativá (Cundinamarca) [79].

### 4.2 . De 1994 a 1998

En 1994, el OIEA y el INEA suscribieron un contrato tripartito con *General Atomics* para realizar una conversión del combustible nuclear del IAN-R1 de HEU a LEU [4], que incluía la fabricación de los conjuntos de combustible tipo TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomics*) con LEU (19,7%, de bajo enriquecimiento en  $^{235}\text{U}$ ) para reemplazar los conjuntos originales de placas de combustible tipo MTR HEU, capacitación de los operadores, aumento de la potencia del reactor a 100 kWt, modernización de los sistemas de control y sistemas auxiliares.

Finalmente el nuevo núcleo se entregó oficialmente en 1997, con la capacidad de operar a una potencia nominal de 100 kWt. Este núcleo está conformado por 8 grupos de combustible TRIGA estándar, con 3 barras de combustible cada uno y un tubo guía para las barras de control; su reflector radial consta de 20 elementos de grafito, 6 de los cuales se utilizan como posiciones para la irradiación de muestras [85]. Esta nueva configuración fue puesta a crítico con éxito el 29 de agosto de 1997 [68] y operado con una licencia parcial de funcionamiento hasta el 31 de marzo de 1998, fecha en la cual fue puesto en condición de parada prolongada por término indefinido [86], situación debida a la liquidación del INEA en 1997 y su cierre definitivo en 1998.

### 4.3. De 1999 a 2016

Desde el cierre de dicho Instituto la utilización de radiotrazadores en la industria, hidrología e investigaciones en general se redujo casi en su



totalidad, siendo el  $^{131}\text{I}$  el único que se sigue empleando esporádicamente en aplicaciones industriales. Esto se debe principalmente a que gracias a su vida media relativamente prolongada ( $t_{1/2} = 8,04$  d), es posible utilizarlo sin pérdidas considerables de actividad, luego del tiempo que toma su transporte aéreo desde el país de producción, los trámites de importación y el transporte hasta su sitio de aplicación.

En 1999 el Gobierno nacional le asignó al Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), la responsabilidad de operar el Reactor Nuclear IAN-R1 y sus facilidades, quien en su momento se encargó de su mantenimiento y el aseguramiento de la condición de parada prolongada. En el 2005, el Gobierno decidió reactivar el reactor bajo la supervisión técnica del OIEA, alcanzando criticidad el 21 de octubre de ese año, con una operación inicial a 100 W durante una hora y en los días posteriores incrementándose su potencia hasta 30 kW [87]. Desde entonces, el IAN-R1 ha tenido licencias de operación y autorizaciones especiales otorgadas por la Autoridad Reguladora Nuclear del Ministerio de Minas y Energía, enfocándose principalmente en actividades de entrenamiento de personal, caracterización de flujo neutrónico e irradiación de muestras para análisis por activación neutrónica y datación por huellas de fisión.

Pese a que desde 1992 han dejado de producirse radiotrazadores en el IAN-R1, se han realizado importantes esfuerzos por reactivar la investigación en este campo, como los trabajos conjuntos realizados entre Ingeominas y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas del 2006 al 2008, periodo en que se lograron sintetizar tres radiotrazadores de  $^{198}\text{Au}$ . Estos se produjeron con una fuente isotópica de neutrones de  $^{241}\text{Am-Be}$  (flujo neutrónico de  $10^6$  n  $\text{cm}^{-2}$   $\text{s}^{-1}$ ); en estos trabajos se sintetizaron el sulfato de sodio,  $\text{Na}_3^{198}\text{Au}(\text{SO}_3)_2$ , soluble en agua para su utilización en aplicaciones hidrológicas [88], así como los complejos orgánicos marcados con  $^{198}\text{Au}$ , cloruro áurico de trioctil y tridodecilamina, los cuales son miscibles en petróleo y con aplicaciones en el perfilaje de pozos y la recuperación secundaria de petróleo [35]. Estos trabajos fueron proyectados como una alternativa para el entrenamiento del personal en el campo de la producción de radionúclidos y la síntesis radioquímica.

En la actualidad, el Servicio Geológico Colombiano (anteriormente Ingeominas), cuenta con infraestructura y personal técnico especializado necesario para

reactivar la investigación básica en este tema. Se dispone de los blancos para la producción de  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{140}\text{La}$  y  $^{198}\text{Au}$  (de acuerdo con la información de la Tabla 1), dos sistemas neumáticos para la irradiación de blancos tanto en la periferia como en el interior del núcleo del Reactor IAN-R1, una celda caliente con telemanipuladores para el manejo de material radiactivo, una cabina de extracción con blindaje de plomo, blindajes móviles, sistemas de espectrometría gamma de alta y baja resolución, GeHp y NaI(Tl), así como equipos básicos para el monitoreo de niveles de radiación y contaminación superficial. Si bien es posible reactivar esta línea de investigación con los recursos disponibles actualmente, para lograr una producción de radionúclidos a gran escala, se requiere una inversión considerable para la construcción de una planta piloto para síntesis de radiotrazadores que cumpla con las condiciones mínimas establecidas por el OIEA [89, 90], así como la ampliación del tiempo de operación diaria del reactor con el fin de alcanzar las actividades específicas necesarias para la mayoría de aplicaciones relacionadas en el presente trabajo.

#### 4.4. Discusión final

En reactores nucleares de bajo flujo neutrónico ( $< 10^{12}$  n  $\text{cm}^{-2}$   $\text{s}^{-1}$ ) como lo es el IAN-R1, la fluencia disponible también suele ser baja debido a que el reactor solamente se opera durante un turno (9 h/día, como máximo). Debido a esto, el tiempo de desplazamiento hacia el sitio de aplicación del radiotrazador, limita la producción de radionúclidos de vida media corta, incluso si se logra la actividad de saturación, ya que debido a su rápida desintegración se deben aplicar rápidamente. Según el OIEA [9, 10], para reactores con este tipo de limitaciones, los radionúclidos generalmente se producen a petición de usuarios locales, como  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{82}\text{Br}$  y  $^{198}\text{Au}$ ; aunque no se debe descartar la realización de investigación básica, mediante irradiación de blancos enriquecidos de  $^{99}\text{Mo}$ , así como la producción de bajas actividades de otros radionúclidos de vida media más larga para usarlos con fines de investigación, como por ejemplo  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{186}\text{Re}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{90}\text{Y}$  y  $^{169}\text{Yb}$ .

Lo más importante, es necesaria la vinculación del talento humano multiprofesional estable, con conocimientos profundos y experiencia en física





nuclear, radioquímica, radiofarmacia, radiogeología, protección radiológica y últimamente en radiobiología, pues la formación de expertos en el campo nuclear es un proceso que requiere un tiempo considerable, para que ese grupo interdisciplinario, amante de la investigación y sus aplicaciones, se encargue de hacer realidad el propósito de reactivar la producción de radionúclidos en el reactor colombiano y fomentar el uso de los radiotrazadores en los diferentes campos del conocimiento.

## 5. CONCLUSIONES

Los radionúclidos se utilizan ampliamente a nivel mundial en diversas aplicaciones, siendo la medicina el campo que demanda la mayor parte de la producción, especialmente de  $^{99}\text{Mo}$  y de  $^{131}\text{I}$ .

En Latinoamérica solamente cinco países cuentan actualmente con las facilidades necesarias para la producción de radionúclidos a gran escala; siendo el reactor nuclear RA-3 de Argentina el principal productor en la región.

Con base en los argumentos expuestos en esta revisión sobre la producción de radionúclidos en el Reactor IAN-R1 en la época del IAN y del INEA, y dadas las nuevas condiciones de potencia y facilidades de irradiación de blancos dentro del núcleo, es posible retomar dicha producción e intentar mediante investigación, la posibilidad de obtener nuevos radionúclidos que permitan ampliar las posibilidades de aplicación en diferentes campos del conocimiento, teniendo en cuenta en todo momento que los reactores tipo TRIGA, debido a su poder limitado, solo pueden producir radionúclidos con una vida media corta de algunas horas y máximo de unos pocos días.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al grupo del Reactor Nuclear IAN-R1 por permitir el acceso a documentos históricos de la instalación. Igualmente, al personal de la Biblioteca Central del Servicio Geológico Colombiano y del Archivo General del Ministerio de Minas y Energía, por la valiosa información suministrada.

## REFERENCIAS

- [1] IAEA, Nuclear Technology for a Sustainable Future, Vienna: IAEA, 2012.
- [2] I. Cohen y J. Furnari, “Las Tendencias Modernas de la Radioquímica y sus Aplicaciones,” *Revista Química Viva*, vol. 11, n° 2, 2012. Disponible: <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v11n2/cohen.html> [Último acceso: 15 marzo 2017].
- [3] V.M. Pabón, Radioquímica Básica, Bogotá, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (en edición), 2017.
- [4] H. Múnera, Tecnología nuclear no médica en Colombia. Pasado, presente y futuro, Bogotá: Tecnicontrol S.A., 2011.
- [5] W. Loveland, D. Morrissey y G. Seaborg, Modern Nuclear Chemistry, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [6] IAEA, Use of radiotracers to study surface water processes, IAEA-TECDOC-1760, 2015, p. 4-64.
- [7] T. Ruth, “The uses of radiotracers in the life sciences,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 72, n° 1, 2009.
- [8] G. Choppin, J-O Liljenzin and J. Rydberg, Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Amsterdam: Academic Press, Fourth edition, 2013, p. 513-590.
- [9] IAEA, Applications of Research Reactors, Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, 2014, p. 28-37.
- [10] IAEA, The applications of research reactors, IAEA-TECDOC-1234, 2001, p. 17-19.
- [11] V. Raina et al., “Multipurpose research reactor,” *Nuclear Engineering and Design*, 236, p. 770-783, 2006.
- [12] A. Mushtaq, “Producing radioisotopes in power reactors,” *J Radioanal Nucl Chem*, 292, p. 793-802, 2012.
- [13] S. Sukadev y S. Sonali, “Production and Applications of Radioisotopes,” *Physics Education*, p. 5-11, 2006.
- [14] INDC - International Nuclear Data Committee, Proceedings of the IAEA Consultants’ Meeting on data requirements for Medical Radioisotope Production, IAEA, 1988, p. 37.

- [15] R. Dahl, T. Chaly y R. Maticchieri, "Production of radioisotopes at North Shore University Hospital," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 99, p. 817-820, 1995.
- [16] K. Matthews et al., The Workshop on Signatures of Medical and Industrial Isotope Production - WOSMIP, Strassoldo, Italy, 1-3 July 2009. *Journal of Environmental Radioactivity*, 110, p. 1-6, 2012.
- [17] G. Ehrhardt, A. Ketring y L. Ayres, "Reactor-produced radionuclides at the University of Missouri Research Reactor," *Appl. Radiat. Isot.*, 49, p. 295-297, 1998.
- [18] F. Knapp et al., "Production of therapeutic radioisotopes in the ORNL High Flux Isotope Reactor (HFIR) for applications in nuclear medicine, oncology and interventional cardiology," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 263, p. 503-509, 2005.
- [19] M. Venkatesh y S. Chakraborty, Production of therapeutic radionuclides in medium flux Research Reactors, p. 285- 298. En: Trends in Radiopharmaceuticals (ISTR-2005), Vienna, International Atomic Energy Agency, Vol. 1, 2007.
- [20] V. Le, "Specific Radioactivity of Neutron Induced Radioisotopes: Assessment Methods and Application for Medically Useful  $^{177}\text{Lu}$  Production as a Case," *Molecules*, 16, p. 818-846, 2011.
- [21] Nuclear Energy Agency - NEA, Beneficial uses and production of isotopes, 2004 update, Paris, OECD, No. 5293, 2005, p. 9-36.
- [22] IAEA, Radiotracer residence time distribution method for industrial and environmental applications, Training Course Series No. 31, 2008, p. 57-144.
- [23] L. Bezzola, S. López y N. Bárbaro, "Effectiveness of different phosphatic fertilizers measured using labelled superphosphate and phosphorus taken up by plants," *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 39, vol. 1, p. 31-37, 1994.
- [24] A. Asfary, R. Al-Merey y M. Al-Hameish, "Fractionation of applied  $^{32}\text{P}$  labeled TSP in calcareous soils," *Plant & Soil*, 264, p. 171-183, 2004.
- [25] B. Erenoglu et al., "Uptake and transport of foliar applied zinc ( $^{65}\text{Zn}$ ) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency," *Plant & Soil*, 241, vol. 2, p. 251-257, 2002.
- [26] G. Miller et al., "Absorption and translocation of  $^{59}\text{Fe}$  and  $^{14}\text{C}$ -rhodotorulate in iron-stressed tomato," *Journal of Plant Nutrition*, 13, vol. 2, p. 201-214, 1990.
- [27] N. Kobayashi et al., "Application of  $^{28}\text{Mg}$  for characterization of Mg uptake in rice seedling under different pH conditions," *J Radioanal Nucl Chem*, 296, vol. 1, p. 531-534, 2013.
- [28] N. Longnecker y A. Robson, Distribution and Transport of Zinc in Plants, In: A. Robson, (ed.), Zinc in soils and plants, Australia: Kluwer Academic Publishers, 1993, p. 79-89.
- [29] Z. Kolar, T. Verburg y H. van Dijk, Radiotracer study of phosphate exchange between whey and casein micelles in cow's milk, *13<sup>th</sup> Radiochemical Conference. Booklet of Abstracts*, Jachymov, 1998, p. 343-355.
- [30] J. Pernía et al., Aplicación de técnicas especiales al estudio hidrológico de zonas de baja permeabilidad: Isótopos y Trazadores, Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España, p. 189-365, 1991.
- [31] S.M. Rao, Practical Isotope Hydrology, New Delhi: New India Publishing Agency, p. 23-163, 2006.
- [32] IAEA, Radiotracer technology as applied to industry, Final report of a co-ordinated research project 1997-2000, IAEA-TECDOC-1262, 2001, p. 2-91.
- [33] IAEA, Radiation protection and the Management of Radioactive Waste in the oil and gas industry, IAEA, Safety Reports Series No. 34, 2003, p. 38-49.
- [34] J. Kónya y N. Nagy, Radio and Nuclear Chemistry, London: Elsevier Inc., 1st Ed., p. 200-350, 2012.
- [35] J.C. Parada y D.M. Murcia, La fuente isotópica  $^{241}\text{Am}$ -Be como medio para la síntesis de los radiotrazadores cloruro aúrico de trioctil y tridodecilamina, Tesis: Universidad Distrital, 2008, 153 p.
- [36] IAEA, Radiotracer Applications in Industry - A Guidebook, Technical Reports Series No. 423, 2004, p. 7-270.



- [37] IAEA, Application of radiotracer techniques for interwell studies, Radiation Technology Series No. 3, 2012, p. 8-86.
- [38] S. Jung et al., "Preparation of radioactive core-shell type  $^{198}\text{Au}@SiO_2$  nanoparticles as a radiotracer for industrial process applications," *Applied Radiation and Isotopes*, 68, p. 1025-1029, 2010.
- [39] J. Adelstein y F. Manning, *Isotopes for Medicine and the Life Sciences*, Washington: National Academic Press, 1995, p. 35-52. Disponible: <https://www.nap.edu/catalog/4818/isotopes-for-medicine-and-the-life-sciences> [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [40] M. Rennie, "An introduction to the use of tracers in nutrition and metabolism," *Proc Nutr Soc.*, 58, vol. 4, p. 935-944, 1999.
- [41] IAEA, Research Reactor Database, 2016. Disponible: <https://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx?rf=1> [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [42] B. Zhuikov, "Production of medical radionuclides in Russia: Status and future - a review," *Applied Radiation and Isotopes*, 84, p. 48-56, 2014.
- [43] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Molybdenum-99 for Medical Imaging*. Washington: The National Academies Press, 2016, p. 51-86. Disponible: <https://www.nap.edu/read/23563/chapter/6#85> [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [44] IAEA, Nuclear Technology Review 2010, Report GC(54)/INF/3, 2010. Disponible: [https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/GC54InfDocuments/English/gc54inf-3-att7\\_en.pdf](https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/GC54InfDocuments/English/gc54inf-3-att7_en.pdf) [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [45] OIEA, Informe Final: Producción y usos de radioisótopos producidos en Reactores de Investigación en América Latina y el Caribe, OIEA, Proyecto de Cooperación Técnica RLA/0/037 ARCAL CXIX, 2013, 28 p.
- [46] R. De Dicco, Breve historia de los Reactores Nucleares de Investigación y Producción de Radioisótopos de la CNEA, Buenos Aires: Centro Latinoamericano de Investigaciones Científicas y Técnicas, 60 p., 2013.
- [47] P. Cristini et al., Actividades de producción de radioisótopos por fisión en la Argentina, *Memorias del X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica*, Buenos Aires, 2015, 12 p.
- [48] CNEA, Radioisótopos para el desarrollo nacional, Buenos Aires: CNEA, 2015, p. 51-52. Disponible: <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/05-Radiosotopos.pdf> [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [49] CNEA, Memoria y Balance 2015, Buenos Aires: CRE Gráfica S.A., 2016, p. 39-59. Disponible: <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/Memoria-Balance-2015.pdf> [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [50] INVAP, RA-6 de Argentina. Disponible: <http://www.invap.com.ar/es/area-nuclear-de-invap/proyectos/reactores-ra6-de-argentina.html> [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [51] ININ, "Aplicaciones del TRIGA Mark III," *Revista Contacto Nuclear*, 51, Vol. 27, p. 35-38, 2008.
- [52] ININ, Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México, Edición Conmemorativa, Ciudad de México: ININ, 2010, p. 67-84.
- [53] J. Ortega, "Nueva Planta de Producción de Radioisótopos del ININ," *Revista Contacto Nuclear*, 29, vol. 7, p. 12-15, 2002.
- [54] J. Vizuet, J. Reyes y G. Molina, Estudio de detección de fugas mediante trazadores en una planta embotelladora en México, *International congress on radiological protection*, 4, p. 11, 2005.
- [55] R. Radicella, "El Proyecto Perú," *Revista de la Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA*, p. 5-9, 2008 Disponible: <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/peru.pdf> [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [56] IPEN, Informe Científico Tecnológico 2010, Lima: IPEN, 2011, p. 111-129.
- [57] IPEN, IPEN 60 anos irradiando qualidade de vida, *Revista IPEN 60 anos*, Triunfal Gráfica e Editora, p. 22-25, 2016. Disponible: [https://issuu.com/anapaula.freire/docs/ipen\\_60\\_anos](https://issuu.com/anapaula.freire/docs/ipen_60_anos) [Último acceso: 15 de marzo 2017].

- [58] R. Saxena, The IEA-R1 Research Reactor: 50 years of operating experience and utilization for research, teaching and radioisotopes production, *International Conference on Research Reactors*, Sydney, 2007.
- [59] M. Chandía et al., "Experiencia Chilena en la producción de [<sup>18</sup>F]-FDG con <sup>18</sup>F de Reactor," *Nucleotécnica*, año 19, N° 33, p. 53-63, 1999.
- [60] P. Sierralta et al., "Distribución biológica del <sup>18</sup>F-Fluorodeoxiglucosa utilizando [<sup>18</sup>F] producido en Reactor," *Nucleotécnica*, año 22, n° 36, p. 7-13, 2002.
- [61] L. Pinto y N. Godoy, "The <sup>166</sup>Ho and <sup>177</sup>Lu production for nuclear medicine applications at the RECH-1," *Nucleotécnica*, año 22, n° 36, p. 133, 2002.
- [62] IAN/INEA, Libro de Registro de Operación del Reactor IAN-R1, Libros 1 al 10, Bogotá: INEA, 1965-1998.
- [63] E. Sandoval, "Experimento de criticidad con el Reactor de enseñanza e investigación IAN-R1," *Revista Colombiana de Física*, 2, vol. 1-2, p. 22-27, 1966.
- [64] J. Toro, Reactor IAN-RI del Instituto de Asuntos Nucleares de Colombia - 6 años de operación, Washington, D.C, International Atomic Energy Agency, Inter-American Nuclear Energy Commission, 1972, p. 253-262. Disponible: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/04/059/4059286.pdf?r=1](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/04/059/4059286.pdf?r=1) [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [65] J. Sarta, L. Castiblanco y J. Razvi, Conversion of the IAN-R1 Reactor from MTR HEU Fuel to TRIGA LEU Fuel, *Proceeding of 1997 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Jackson Hole, p. 1-6, 1997.
- [66] I. Concha, Neutronic calculations for the IAN-R1 Research Reactor core conversion, *Proceedings of the 1988 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and test reactor*, San Diego, p. 358-371, 1988.
- [67] A. Spin, R. Chesworth y G. West, Power upgrade and conversion of the Colombia R-1 Reactor to TRIGA-LEU fuel, *Proceedings of the 1990 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and test Reactors*, Newport, p. 368-385, 1990.
- [68] IAEA, History, Development and Future of TRIGA Research Reactors, Vienna, Technical Reports Series No. 482, p. 46-69, 2016.
- [69] E. Páez y S. Nassif, Producción de radioisótopos en el Reactor IAN-R1, Bogotá: IAN, IAN-Q-6, 1966.
- [70] J. Toro y H. Múnera, Cálculos y nomogramas para la producción de radioisótopos en reactores, Bogotá: IAN-ARI-2, 1969.
- [71] A. Spin et al., "Reactor nuclear IAN-R1: Características técnicas y aplicaciones," *Nucleares*, 5-6, vol. 3, p. 57-64, 1988.
- [72] IAN, Informe de labores 1988, Bogotá: IAN, 1989.
- [73] IAN, Informe de labores 1987, Bogotá: IAN, 1988.
- [74] J. Ahumada y A. Spin, Modificación del Reactor IAN-R1, International symposium on research reactor safety operations and modifications, IAEA-SM-310/32, Chalk River, 1989. Disponible: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/22/047/22047708.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/047/22047708.pdf) [Último acceso: 15 de marzo 2017].
- [75] IAN, Instituto de Asuntos Nucleares: Ciencia y tecnología para el progreso 30 años, Bogotá: IAN, 1989, p. 36-205.
- [76] A. Plata, H. Múnera y C. Rodríguez, Estudio de los acuíferos de la isla de San Andrés, empleando técnicas nucleares, Bogotá: IAN-ARI-28, Informe 2, 1972.
- [77] L. Sánchez, Estudio de filtraciones de la presa de Guatavita utilizando trazadores radiactivos, Bogotá: IAN, No. 13, 1978.
- [78] L. Sánchez et al., "Determinación de filtraciones en el dique auxiliar del embalse de Chingaza utilizando trazadores radiactivos," *Nucleares*, 1, vol. 1, p. 29-33, 1986.
- [79] IAN, Informe de labores 1985, Bogotá: IAN, 1986.
- [80] O. Bastidas, S. Urquiaga y A. Álvarez, "Influencia de la época de aplicación del <sup>32</sup>P-Superfosfato triple en la eficiencia de la fertilización fosfatada y en la productividad de la papa (*Solanum tuberosum* L)," *Nucleares*, 2, vol. 1, p. 11-18, 1986.
- [81] IAN, Informe de labores 1984, Bogotá: IAN, 1985.
- [82] R.H. Espinosa, <sup>198</sup>Au como radiotrazador en la industria del petróleo, Bogotá: IAN, 1989.



- [83] H. Múnera, Aplicaciones de radioisótopos en la industria del petróleo en Colombia, Bogotá: IAN, 1971, p. 52.
- [84] M.A. Martínez y G.Y. Rodríguez, Obtención de un compuesto de Au-198 miscible en petróleo como radiotrazador industrial, Tesis: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1991, 79 p.
- [85] J. Sarta y L. Castiblanco, Neutronic calculations in core conversion of the IAN-R1 research reactor from MTR HEU to TRIGA LEU fuel, *International meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Chicago, p. 1-7, 2003.
- [86] T. Rivero, “El ININ contribuye a la puesta en operación del Reactor Nuclear Colombiano,” *Revista Contacto Nuclear*, 42, vol. 28, p. 4-6, 2005.
- [87] A. Mesquita, R. do Prado Souza y T. Rivero, IAEA Expert Missions in the recommissioning of the IAN-R1 TRIGA research reactor, *3rd World TRIGA Users Conference*, Belo Horizonte, p. 1-6, 2006.
- [88] D.L. Alonso, Factibilidad de síntesis del  $^{198}\text{Au}$  con la fuente  $^{241}\text{Am-Be}$  y del radiotrazador sulfitoaurato de sodio, Tesis: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2007.
- [89] IAEA, Manual for Reactor Produced Radioisotopes, IAEA-TECDOC 1340, 2003, p. 63-65.
- [90] IAEA, Radioisotope handling facilities and automation of radioisotope production, IAEA-TECDOC-1430, 2004, p. 2-40.