

Radionucleidos en corales de Costa Rica

Luis Guillermo Loría M.¹, Antonio Banichevich² y Jorge Cortés³

¹ Laboratorio de Física Nuclear Aplicada, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. 2060, San José, Costa Rica. Correo electrónico: lloria@cariari.ucr.ac.cr

² Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias y Laboratorio de Física Nuclear Aplicada, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. 2060, San José, Costa Rica. Correo electrónico: abaniche@cariari.ucr.ac.cr

³ Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología y Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica. 2060, San José, Costa Rica. Correo electrónico: jcortes@cariari.ucr.ac.cr

(Rec. 25-VII-1997. Rev. 2-V-1998. Acep. 5-V-1998)

Abstract: Using Low Level Gamma Spectrometry it has been evaluated the activity (Bq/kg) of ⁴⁰K, the gamma emisor daughters of ²³⁸U and ²³²Th and the presence of artificial isotopes due to anthropogenic contamination. The probes used are coral as biodynamic captors. The results show a presence between low and *mittel* of natural isotopes compared to other accumulation processes like sedimentation in soil and agricultural production. The Caribbean side show a higher activity than Pacific for ⁴⁰K and a similar for ²²⁶Ra. Results show low activity for artificial radionuclides with short life (¹³⁷Cs).

Keywords: Coral, radio, cesium, desintegration of uranium and thorium.

Con el comienzo de la era nucleo-militar, en Alamo Gordo, Nuevo Mexico (E.U.) el 16 de julio de 1945, se dió inicio a una importante era de contaminación ambiental, cuyos efectos y ámbitos han sido de enorme importancia. Esta era se caracteriza principalmente por tres fases: 1) la detonación de una serie de "bombas atómicas" cuya intensidad se encuentra dentro del rango de los kilotones, entre 1945 y 1974 (Junge 1963); 2) el desarrollo y detonación de "bombas termonucleares" entre 1951 y 1996, cuya intensidad es más de mil veces de las precedentes (rango de cientos de megatonnes) y cuyo alcance bélico es de mayor envergadura, (Junge 1963, WMO 1965, Crutzen 1970, Johnston *et al.* 1972, McEwan 1975, WMO 1988). La última fase de este desarrollo se da cuando se comienza a utilizar la técnica nuclear

para la producción de energía con fines pacíficos, resultando el desarrollo de diferentes tipos de plantas nucleares. De esta última fase, los accidentes de mayor envergadura para el medio atmosférico (IAEA 1989), son el de Three Miles (E.U., 1979; Michelsen *et al.* 1980) y el de Chernobyl (ex URSS, 1986; Clooth 1988). Junto con esta actividad, se suma además la que se tiene como el estándar del sistema planetario en general, o sea, la radiactividad de origen natural asociada a: 1) los descendientes del uranio: ²³⁸U, y del torio: ²³²Th (Junge 1963, Benninger y Dodge 1986), y 2) la del potasio: ⁴⁰K, como una fuente más de radiación.

Desde el punto de vista de desintegración de un núcleo inestable, existen tres grupos principales de desintegración: 1) la de partículas altamente másicas o desintegración alfa (núcleos

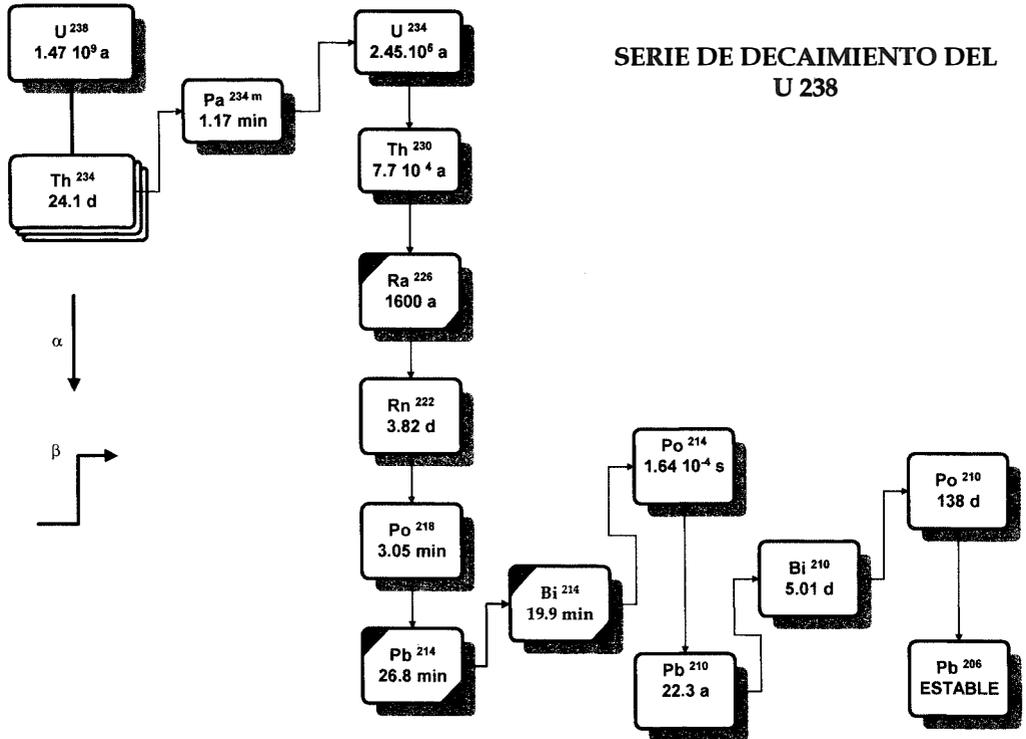


Fig. 1. Serie del decaimiento del uranio 238, dado en función de la desintegración alfa y beta, así como también del tiempo de vida de las hijas. En el presente trabajo se observan: ^{226}Ra , ^{214}Pb y ^{214}Bi .

de helio), 2) la de partículas mínimamente másicas o desintegración beta (electrones o positrones), y 3) la de partículas no másicas pero altamente energéticas o desintegración gamma (fotones; aquí también se puede observar la radiación X). En conjunto, se tienen cerca de 2000 diferentes tipos de núcleos inestables.

Los corales, por ser entes de relativo lento crecimiento, y altamente correlacionados al medio circundante en que viven (Guzmán y Cortés 1993), formando sistemas coralinos de enormes edades, pueden ser excelentes entes biocaptadores y biotrazadores de núclidos naturales o antropogénicos (Flor y Moore 1977, Frost 1977, Dunbar y Cole 1993, Linsley *et al.* 1994). Al estar disueltos los elementos radiactivos en el agua de mar, se forma una solución que -en muchos casos-, solo por acumulación durante largos lapsos de tiempo son observables. Así es posible a través de los corales establecer el tipo y el nivel de la contaminación.

El radio (^{226}Ra), procedente de la cadena de desintegración de ^{238}U al igual que el fósforo fluyen hacia el interior y hacia el exterior del coral a través de diferentes mecanismos, lo que sugiere que estos intercambian nutrientes esenciales con sus compañeras simbióticas: las algas, y más aún, el coral retiene el radio en los pólipos. Esto explicaría la alta presencia de este descendiente del uranio en los tejidos coralinos (Flor y Moore, 1977). La pérdida de radio en los corales no puede explicarse a través del decaimiento radiactivo, ya que la vida media de este núclido es de 1600 años, si no más bien en términos de la descomposición de la materia orgánica presente en ellos, dado que el núclido no es absorbido por el carbonato de calcio.

Los esqueletos de coral muerto pueden contener material orgánico atrapado, el cual puede absorber elementos adicionales con otros valores isotópicos. Uno de esos elementos podría ser el radio (Flor y Moore 1977, Benninger y

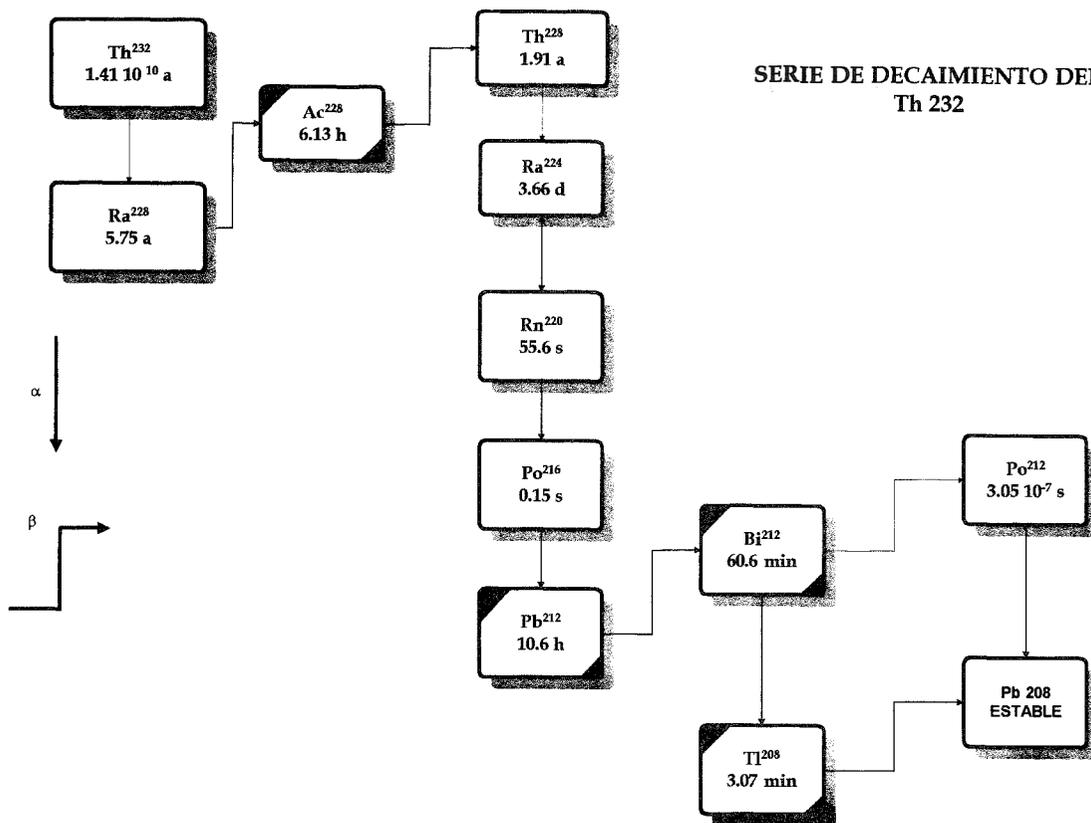
SERIE DE DECAIMIENTO DEL
Th 232

Fig. 2. Serie del decaimiento del torio 232, dado en función de la desintegración alfa y beta, así como también del tiempo de vida de las hijas. En el presente trabajo se observan: ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi y ^{208}Tl .

Dodge 1986), el cual: 1) podría permutarse con el calcio del carbonato esquelético, lo que explicaría concentraciones ligeramente más altas de él en los corales muertos estudiados, pero también, 2) podría deberse a una mayor concentración de radio en las aguas del Caribe.

Siempre y cuando las parejas Pb/Bi aparezcan simultáneamente como resultado de un equilibrio secular, la presencia de las series: 1) ^{214}Pb , ^{214}Bi (Fig.1), y 2) ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi y ^{208}Tl (Fig.2) sólo puede explicarse en términos de la desintegración de ^{226}Ra y ^{224}Ra , respectivamente.

El objetivo del presente trabajo es determinar la presencia de emisores gamma, específicamente, de ^{137}Cs (origen antropogénico) y de los descendientes de ^{238}U y ^{232}Th , en corales de diferentes especies, provenientes de las cuencas del Pacífico y del Caribe en Costa Rica, utilizando la técnica de Espectrometría Gamma.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales: los corales utilizados en este trabajo, vivos y muertos, corresponden a un total de 13 especies diferentes, provenientes de las cuencas pacífica y caribeña de Costa Rica, siendo los vivos recolectados a profundidades que oscilan entre los 2 y los 13 m, y de los muertos hasta 1 m de profundidad. La edad de los corales vivos que son muestreados, oscilan entre 7 y 65 años, mientras que la edad de los corales muertos se desconoce. La Figura 3 muestra los sitios de recolección de las muestras y en los Cuadros 1 y 2 se incluyen las especies de los corales recolectados por región.

Protocolo experimental: los corales se secaron al aire libre hasta por lapsos mayores de seis semanas, luego fueron molidos hasta un tamaño de partícula de 0.5 mm y depositados en

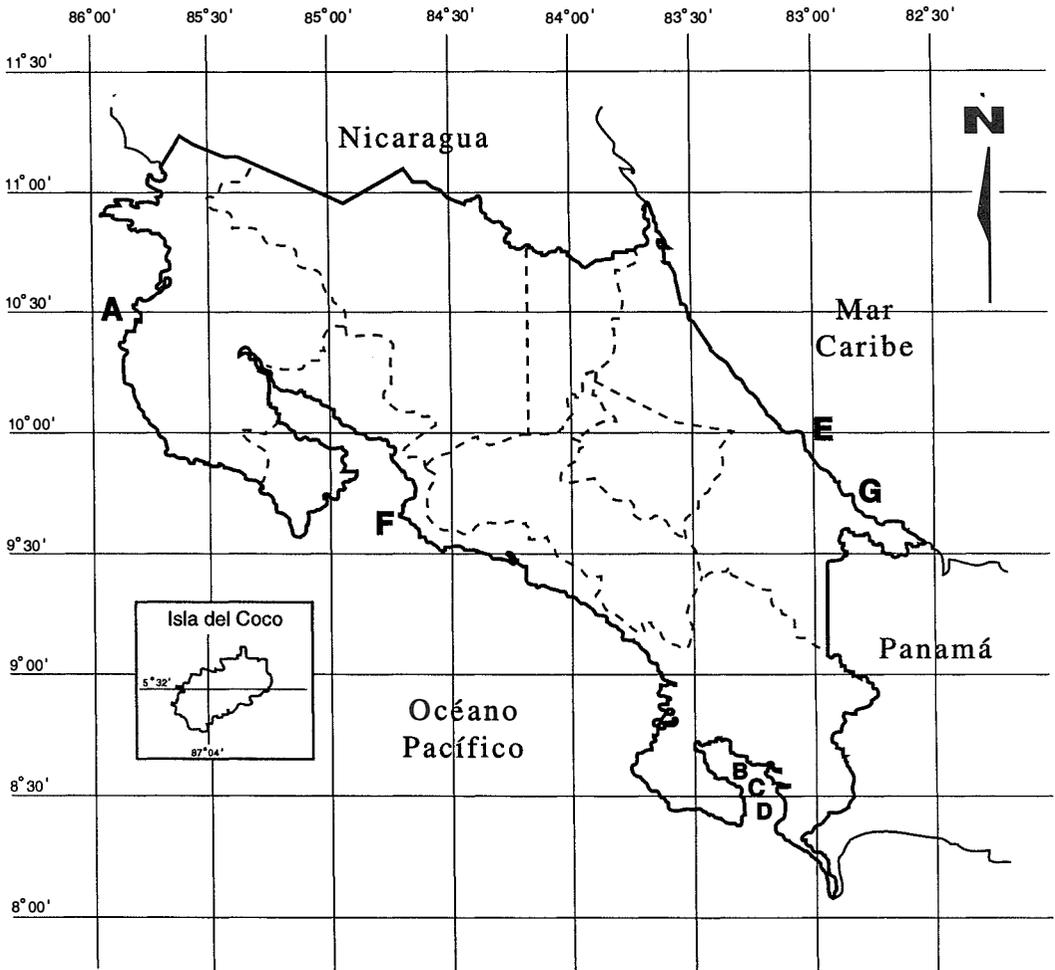


Fig. 3. Mapa de los sitios de recolección en función de la nomenclatura del Cuadro 1: A: Murciélago, B: Sándalo, C: Punta Islotes, D: Isla Caño, E: Isla Uvita, F: Punta Leona, G: Cahuita.

CUADRO 1

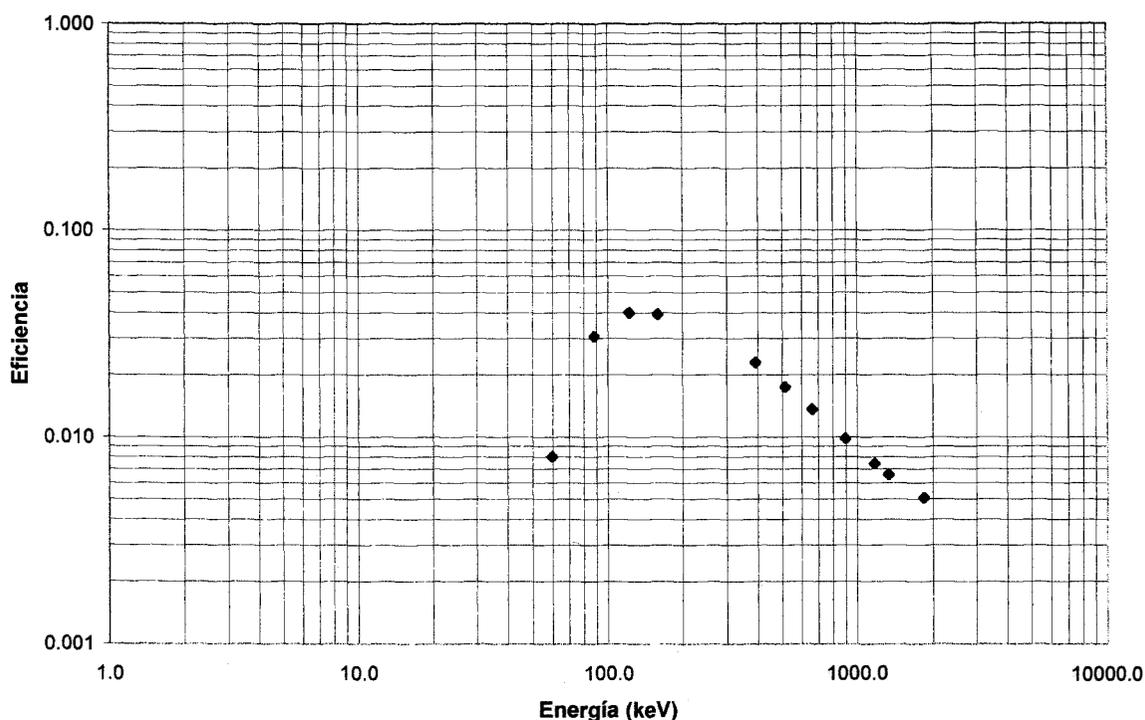
Especies de coral vivo recolectado y sus localidades

Cuenca	Zona	Región	Nombre	Especie
Pacífico	norte	Murciélago	Archipiélago	A.1 <i>Pavona gigantea</i>
		Golfo Dulce	Sándalo	B.2 <i>Porites lobata</i>
	sur		Punta Islotes	B.3 <i>Pocillopora damicornis</i>
				B.4 <i>Pavona frondifera</i>
				C.1 <i>Pavona gigantea</i>
Caribe	centro	Limón centro	C.2 <i>Porites lobata</i>	
			C.5 <i>Psammocora stellata</i>	
			D.2 <i>Porites lobata</i>	
		Isla del Caño	D.6 <i>Pavona clavus</i>	
			E.7 <i>Siderastrea siderea</i>	
			E.8 <i>Montastrea franksi</i>	

CUADRO 2

Especies de coral muerto recolectado y sus localidades

Cuenca	Zona	Región	Nombre	Especie
Pacífico	centro	Punta Leona	Playa Mantas	F.9 <i>Pocillopora elegans</i>
Caribe	sur	Cahuita	Parque Nacional	G.10 <i>Acropora palmata</i> G.8 <i>Montastrea franksi</i> G.11 <i>Montastrea cavernosa</i> G.12 <i>Diploria strigosa</i>

Eficiencia para marinelli de 500 ml en arena (Ortec)**Fig.4.** Curva de eficiencia del sistema de detección en función de la energía (keV; escala logarítmica).

un recipiente de polietileno, denominado comercialmente como marinelli, lo que no le permite a la muestra alcanzar el equilibrio secular entre padres e hijas de las cadenas de ^{238}U y ^{232}Th . La capacidad de estos marinellis es de 500 ml, lo que permite depositar en ellos hasta alrededor de 700 g de muestra, según la densidad de la especie considerada.

Espectrometría Gamma: la Espectrometría Gamma de las muestras, mediante la cual se identifica y se mide la actividad de los núclidos presentes, se realiza con un detector de Germanio H.P. (Ortec), blindado con plomo, cobre y plexiglass para proteger la muestra de la radiación cósmica. El detector está acoplado a un amplificador lineal (Canberra 2025) y éste a su vez a una analizador multicanal de 4096 cana-

les (Canberra S - 100), previamente calibrado en energía para la identificación de cada uno de los emisores gamma presentes en las muestras. Simultáneamente con la calibración se mide al sistema de detección su eficiencia, utilizando estándares cuyas energías oscilan desde 59 a 1860 keV y siguiendo el protocolo establecido para esta medición (Loría y Jiménez 1992). La Figura 4 muestra la curva de eficiencia para la geometría utilizada en la medición de la actividad de los núclidos presentes en los corales.

Utilizando el software "Conti", se identifica y se cuantifica la actividad específica de cada núclido observable por la técnica. La concentración en ppm de los núclidos presentes en los corales se puede obtener a partir de la actividad específica de cada uno de ellos, por la ecuación:

$$C = A_c * A * I^{-1} * q^{-1} * N_o^{-1}$$

donde,

A_c: actividad específica del núclido en Bq * kg⁻¹

A: masa atómica del núclido

I: constante de desintegración

q: abundancia isotópica

N_o: número de Avogadro (6,02 x 10²³ átomos mol⁻¹)

RESULTADOS

Se recogieron en total 13 especies diferentes de corales en 7 sitios específicos. En subcategorías se tiene respectivamente: a) coral vivo: 6 especies en 4 sitios distintos para el Pacífico, y 2 especies en un sitio para el Atlántico; b) coral muerto: una especie en un sitio para el Pacífico, y 4 especies en un sitio para el Atlántico.

Los Cuadros 3-6 presentan los resultados de la actividad específica de los núclidos presentes en cada uno de los corales, en función de la cuenca de procedencia, de la especie y de la línea de decaimiento, así como de si son vivos o muertos.

CUADRO 3

Resumen de los resultados obtenidos para la presencia de radionúclidos en la serie de decaimiento del uranio y otros (en Bq/kg), en función del coral vivo recolectado (nomenclatura del cuadro 1)

Cuenca/localidad/especie	Elementos				
	de la serie del uranio			Propio	Artificial
	Ra-226	Pb-214	Bi-214	K-40	Cs-137
Pacífico:					
Murciélagos					
A.1 <i>P. gigantea</i>	35.3±6.0	1.3±0.6	1.22±6.6	< 7.2	< 0.5
Sándalo					
B.2 <i>P. lobata</i>	27.0±7.0	2.0±0.7	1.4±0.8	< 8.9	< 0.6
B.3 <i>P. damicornis</i>	18.0±7.0	1.4±0.7	1.8±0.8	< 8.5	< 0.6
B.4 <i>P. frondifera</i>	27.0±8.0	< 1.0	< 2.0	< 7.2	< 0.6
Punta Islotes					
C.1 <i>P. gigantea</i>	38.0±6.0	1.0±0.6	< 1.0	< 7.2	< 0.5
C.2 <i>P. lobata</i>	21.5±5.7	1.1±0.6	2.3±0.7	< 7.1	< 0.5
C.5 <i>P. stellata</i>	25.6±7.9	1.8±0.8	3.0±0.9	11.9±6.4	< 0.7
Isla Caño					
D.2 <i>P. lobata</i>	19.6±6.2	1.5±0.6	2.0±0.7	< 7.9	< 0.6
D.6 <i>P. clavus</i>	22.0±6.1	< 1.0	< 1.1	< 7.8	< 0.6
Caribe:	Ra-226	Pb-214	Bi-214	K-40	Cs-137
Isla Uvita					
E.7 <i>S. siderea</i>	42.0±6.5	4.1±0.7	4.3±0.8	< 7.5	< 0.5
E.8 <i>M. franksi</i>	28.0±7.0	1.4±0.7	2.0±0.7	< 6.0	< 0.5

CUADRO 4

Resumen de los resultados obtenidos para la presencia de radionucleidos en la serie de decaimiento del torio (en Bq/kg), en función del coral vivo recolectado (nomenclatura del cuadro 1)

Cuenca/localidad/especie	Elementos de la serie del Torio			
	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208
Pacífico:				
Murciélago				
A.1 <i>P. gigantea</i>	< 2.0	0.8±0.5	< 6.0	< 0.5
Sándalo				
B.2 <i>P. lobata</i>	< 2.4	< 0.9	< 7.5	< 0.6
B.3 <i>P. damicornis</i>	< 2.3	< 0.9	< 7.2	< 0.6
B.4 <i>P. frondifera</i>	< 2.0	< 0.9	< 6.0	< 1.0
Punta Islotes				
C.1 <i>P. gigantea</i>	< 2.0	< 0.9	< 1.0	< 0.6
C.2 <i>P. lobata</i>	< 2.0	< 0.7	< 5.8	< 0.5
C.5 <i>P. stellata</i>	< 2.7	1.1±0.6	< 8.5	< 0.7
Isla Caño				
D.2 <i>P. lobata</i>	< 2.1	< 0.8	< 6.6	< 0.5
D.6 <i>P. clavus</i>	< 2.1	< 0.7	< 6.4	0.6±0.3
Caribe:	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208
Isla Uvita				
E.7 <i>S. siderea</i>	3.4±1.3	3.7±0.5	< 6.4	0.7±0.3
E.8 <i>M. franksi</i>	< 2.0	< 1.0	< 6.0	< 0.5

CUADRO 5

Resumen de los resultados obtenidos para la presencia de radionucleidos en la serie de decaimiento del uranio y otros (en Bq/kg), en función del coral muerto recolectado (nomenclatura del cuadro 2)

Cuenca/localidad/especie	Elementos de la serie del Uranio				Artificial
	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Propio	
Pacífico:					
Punta Leona					
F.9 <i>P. elegans</i>	20.6±5.4	1.1±0.6	1.9±0.6	24.8±4.7	< 0.5
Caribe:	Ra-226	Pb-214	Bi-214	K-40	Cs-137
Cahuita					
G.10 <i>A. palmata</i>	33.8±6.2	3.1±0.7	2.4±0.7	< 7.4	0.9±0.3
G.8 <i>M. franksi</i>	31.9±5.9	2.5±0.6	2.6±0.7	< 7.3	< 0.5
G.11 <i>M. cavernosa</i>	26.5±5.8	2.8±0.6	2.8±0.7	16.1±4.7	< 0.5
G.12 <i>D. strigosa</i>	23.5±5.7	3.3±0.6	2.7±0.7	14.5±4.6	0.8±0.3

CUADRO 6

Resumen de los resultados obtenidos para la presencia de radionúclidos en la serie de decaimiento del torio (en Bq/kg), en función del coral muerto recolectado (nomenclatura del cuadro 2)

Cuenca/localidad/especie	Elementos de la serie del Torio			
	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208
Pacífico:				
Punta Leona F9 <i>P. elegans</i>	< 1.9	< 0.7	< 5.6	< 0.5
Caribe:				
Cahuita				
G.10 <i>A. palmata</i>	0.9±0.5	< 6.2	< 0.5	
G.8 <i>M. franksi</i>	< 1.9	0.8±0.5	< 6.0	< 0.5
G.11 <i>M. cavernosa</i>	< 1.9	1.2±0.5	< 6.0	0.7±0.3
G.12 <i>D. strigosa</i>	< 1.9	1.4±0.5	< 6.0	< 0.5

Coral vivo: Los corales, independientemente de la cuenca y de la zona de muestreo casi no revelan la presencia de ^{137}Cs (< 0,5 Bq kg^{-1}) ni de ningún otro emisor gamma antropogénico, lo que insinúa una relativa independencia de contaminación radiactiva artificial.

Coral muerto: Las especies de coral provenientes del Caribe presentan una actividad específica de ^{226}Ra comparativamente similar a las especies vivas *Pavona gigantea* y *Siderastrea siderea*.

DISCUSIÓN

Coral vivo: De las muestras, la especie *Pavona gigantea*, recogida en dos sitios de la costa del Pacífico, así como la especie *Siderastrea siderea* de la región caribeña, son las que presentan la mayor actividad de ^{226}Ra . Entretanto, los corales de la especie *Porites lobata*, recogidos en tres sitios de recolección del pacífico -geográficamente alejados uno del otro-, presentan una actividad en promedio de este núclido semejante al resto de las especies estudiadas, es decir, el valor mínimo del ^{226}Ra en el Caribe concuerda con el promedio del Pacífico. Estos hechos señalan que el coral del Caribe posiblemente posee una mayor afinidad a captar radio que las especies del Pacífico.

Los otros núclidos naturales encontrados en los corales del Pacífico (^{214}Pb y ^{214}Bi), se dan en la mayoría de las muestras con una actividad específica -en promedio- 20 veces menor, y es de esperarse que provengan de la desintegración del ^{226}Ra . Los corales de la costa Pacífica no muestran la presencia de descendientes de ^{232}Th , mientras que en la especie *Siderastrea siderea* del Caribe hay una ligera presencia de ellos (en su orden correspondiente: ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi y ^{208}Tl).

Considerando la columna en la tabla periódica de los alcalinos térreos: ^4He , ^9Be , ^{24}Mg , ^{40}Ca , ^{87}Sr , ^{137}Ba , ^{226}Ra , se puede observar la presencia del calcio y del estroncio en los corales por medio de la técnica de los Rayos X (Zapata 1997). Además, la relación calcio/estroncio concuerda con otros resultados experimentales (Flor y Moore 1977, Benninger y Dodge 1986, Dunbar y Cole 1993), lo que implica que para la región se puede observar una tendencia general.

Coral muerto: De los resultados se tiene que los descendientes de ^{238}U y ^{232}Th están presentes -en cantidad similar al coral vivo- en la mayoría de las muestras. Si bien estos resultados insinúan que ambos decaimientos están presentes en la cuenca del Caribe, mientras en el Pacífico solamente la del uranio, otra fuente

que puede influenciar fuertemente los presentes resultados -debido a la falta de una clara señal del ^{208}Tl y del ^{212}Bi como emisores-, es que las señales del plomo ^{212}Pb , y por consiguiente, su presencia en el coral, tengan también como posible fuente a los hidrocarburos que se riegan en la cuenca del Caribe. Esta actividad antropogénica diferencia fuertemente la vertiente caribeña de la pacífica, por cuanto mientras una posee características de ser una región semicerrada (Caribe), la otra es oceánica (Pacífico) y con grandes potenciales de homogenización.

En algunas especies del Caribe: *Acropora palmata* y *Diploria strigosa*, hay una leve actividad específica de ^{137}Cs y ^{40}K que sobrepasa del promedio.

Ambos casos en comparación: Las especies vivas del Caribe, al igual que *Pavona gigantea* del Pacífico, parecen tener ligeramente una mayor afinidad por el ^{226}Ra que las otras especies. Pero las diferencias encontradas no son lo suficientemente significativas. La diferencia tendría significado si superara uno o dos órdenes de magnitud como la encontrada en la especie *Agaricia agaricites* en la Isla de Gran Caymán (Flor y Moore 1977).

Las diferencias en cuanto a la actividad específica del ^{226}Ra en los corales muertos y vivos de la costa caribeña, no son tampoco significativas, pero la actividad de este núclido es ligeramente mayor que en la costa pacífica. El valor mínimo de ^{226}Ra en el Caribe concuerda con el promedio del Pacífico. Esto también podría ser un indicador de que la concentración del núclido en el Mar Caribe es levemente mayor que el Océano Pacífico. Lo anterior concuerda con los estudios realizados en suelos los cuales mostraron una mayor concentración específica de descendientes de ^{238}U en la costa caribeña que en la pacífica (Mora y Salazar 1996)

La presencia de ^{137}Cs en dos especies de coral muerto es probable que lo hayan obtenido por deposición desde la atmósfera y la actividad medida es semejante a la encontrada en café, leche y atún en Costa Rica (Loría y Mora 1994, Mora y Loría 1997).

AGRADECIMIENTOS

Los autores dejamos patente nuestro agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por el apoyo recibido a través de los proyectos 112-95-563 y 808-92-237, y a la Agencia Internacional de Energía Atómica a través del Convenio Bilateral Cos 2/004. Se le agradece a José Brenes y Manuel Zapata por las valiosas discusiones y comentarios. Se le agradece a Mauricio Badilla por su cooperación en el análisis instrumental de las muestras.

RESUMEN

Mediante la técnica de "Espectrometría Gamma de Bajo Nivel", se evalúa la actividad específica en Bq/kg de ^{40}K y de las hijas emisoras de la radiación gamma de ^{238}U y ^{232}Th , así como la presencia de isótopos artificiales, provenientes de la contaminación ambiental. Las muestras utilizadas provienen de tres diferentes y potenciales fuentes de radionúclidos: 1) líquido, 2) sedimento, y 3) corales, estos últimos como captadores biodinámicos. En función del muestreo de las aguas marinas para ambas vertientes marinas, a las cuales se les puede asociar un factor de mezcla muy alto (homogenización), los resultados muestran entre una débil y mediana presencia de isótopos naturales con dominancia en la vertiente del Caribe, en comparación con los niveles encontrados en suelos y algunos productos de consumo antropogénico. Se encontró una dependencia según la vertiente considerada para la presencia de ^{40}K y una importante presencia de ^{226}Ra que es independiente de la vertiente. Dentro de los radionúclidos artificiales de corta vida (^{134}Cs), los resultados muestran poca presencia en los corales.

REFERENCIAS

- Benninger, L.K. & R.E. Dodge. 1986. Fallout plutonium and natural radionuclides in annual bands of the coral *Montastrea annularis*, St. Croix, U.S. Virgin Islands. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50: 2785-2797.
- Clooth, G. 1988. Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl auf die Biosphäre im Bonner Raum. Tesis de Doctorado. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Bonn: 16-65.
- Crutzen, J.P. 1970. The Influence of Nitrogen Oxide on the atmospheric ozone content, *Q.J.R. Met. Soc.* 96: 320-327.
- Dunbar, R.B. & J.E. Cole (eds.). 1993. Coral records of ocean-atmosphere variability. Report from the workshop on coral paleoclimate reconstruction. NOAA. La Parguera, Puerto Rico: 3-32.

- Flor, T.H. & W.S. Moore. 1977. Radium/Calcium and Uranium/Calcium determinations for western atlantic reef corals. Proc. 3rd Int. Coral Reef Symp., Miami: 555-561.
- Frost, S.H. 1977. Miocene to Holocene evolution of Caribbean province reef-building corals. Proc. 3rd. Int. Coral Reef Symp., Miami: 353-359.
- Guzmán, H.M. & J. Cortés. 1993. Arrecifes coralinos del Pacífico Oriental Tropical: Revisión y perspectivas. Rev. Biol. Trop. 41: 535-557.
- IAEA, 1989. Measurement of radionuclides in food and the environment. A guidebook:4-6, 139-144. International Atomic Energy Agency, Viena.
- Johnston, H.S., G. Whitten & J. Birks. 1972. Lawrence Berkeley Laboratory Report UCRL-1421, University of California, Berkeley.
- Junge, C.E. 1963. Air Chemistry and Radioactivity. Academic Press, Nueva York y Londres: 111-208.
- Linsley, B.K, R. Dunbar, G.M. Wellington, D.A. Mucciaronne. 1994. A coral-based reconstruction of Intertropical Convergence Zone variability over Central America since 1707. J. of Geophys. Res. 99: 9977-9994.
- Loría, L.G. y R. Jiménez, 1992. Cuantificación de la concentración de elementos naturales y contaminantes radiactivos emisores gamma en suelos de la Península de Nicoya, Guanacaste, utilizando la técnica de conteo de bajo nivel. Tecnología en Marcha 11: 61-72.
- Loría, L.G., y P. Mora. 1994. Specific activity and derived intervention levels of Cesium 137 in Costa Rica export goods: fish, coffee and powdered milk. Radiation Measurements 23: 731-736.
- McEwan M.J. & L.F. Phillips. 1975. Chemistry of the Atmosphere. Editorial Arnold Publishers Ltd., Londres: 231-237.
- Michelsen, G., F. Kalberlah & Öko-Institut Freiburg/Br (eds). 1980. Der Fischer Öko-Almanach. Fischer Taschenbuch Verlag GmbH. Frankfurt am Main: 206-207.
- Mora, P. & A. Salazar. 1996. Natural radioactivity in soil samples in Costa Rica. J. Trace Microprobe Techn. 14: 727-738.
- Mora, P. y L.G. Loría. 1997. Radioactive assessment of fish products market by Costa Rica. J. Traces Microprobe Tech. 15: *in press*.
- WMO. 1965. Meteorological aspects of atmospheric radioactivity. Technical Note No.68, p. 27-67, 117-146, World Meteorological Organization, Ginebra.
- WMO. 1988. Global Ozone Research and Monitoring Project Report No.18: *Report of the International Ozone Trends Panel*, p.503-542, World Meteorological Organization, Ginebra.
- Zapata, M., 1997. *Comunicación privada*. Laboratorio de Física Nuclear Aplicada, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, San José.