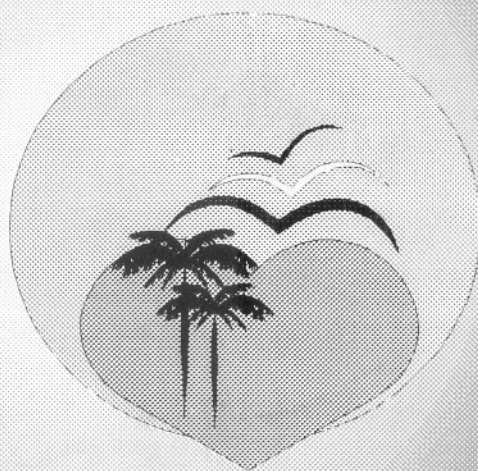


nucleus

No. 24

1998

ISSN 0864-084X



SEGURIDAD RADIOLÓGICA Y NUCLEAR
**4to CONGRESO
REGIONAL**

Congreso Regional IRPA

Consejo Editorial

Doctor en Ciencias Físicas
Omar Aguilar Martínez

Licenciado Danilo Alonso Mederos

Master en Física Nuclear
Luis Cimino Quinones

Master en Ciencias Físicas
Luis Felipe Desdín García

Ingeniero Rubén Ferro Fernández

Doctor en Ciencias Físico-Matemáticas
Dario Gandarias Cruz

Doctor en Ciencias Biológicas
Omar García Lima

Doctor en Ciencias Químicas
José Morín Zorrilla

Director: Danilo Alonso Mederos

Editor Jefe: Jorge Petinaud Martínez

Redactor Técnico: Marta Contreras Izquierdo

Edición: Ana María Mariña Leyva

Diseño: Ofelia Flores Valdés,
Caridad García Ramírez

Fotografía: Francisco Díaz López

Composición: Magaly Cruz Jorge

Referencias: Katia González Sánchez

Relaciones Públicas: Guillermo Triana Prieto

Canje: Irida Oviedo Rivero

Producción: Adolfo Estévez González,
Ricardo Gavilla Moreno,

Encuadernación: Gladys Llacobet Boffill,
Carmen Cartaya Echevarría
Revista arbitrada

Referenciada en la Base de Datos INIS

Publicación semestral
de la Agencia de Energía Nuclear
del Ministerio de Ciencia, Tecnología
y Medio Ambiente de la República de Cuba

Edición e Impresión

Centro de Información de la Energía
de la Agencia de Energía Nuclear.

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

Apartado Postal 6093, La Habana 6

Registro Nacional de Publicaciones Seriadas
No. 0061

Inscripta en la Dirección de Correos y Telégrafos
con el No. 9402/184

Sumario

- 2 Dosis efectiva colectiva impartida a la población de Córdoba y Jaén por el servicio de medicina nuclear en 1997 *M. del C. Arias, M. Torres, M. Gálvez*
- 6 Tolerancia a la salinidad y caracterización morfoagronómica de mutantes de arroz obtenidos por inducción de mutaciones *L. M. González Núñez, R. Ramírez Fernández, S. Pérez Talavera*
- 12 Irradiaciones gamma de polen en piña y fecundación con polen irradiado *R. Benega, A. Cisneros, J. Martínez, E. Arias, L. Yabor, E. Castillo, M. Romero, M. Isidró, J. Fernández*
- 15 Sustitución del yodo 131 por el tecnecio 99m en la aplicación de radiotrazadores en la industria azucarera *D. Aguila Manresa, J. Griffith Martínez*

PANORAMA NUCLEAR

- 22 Bajas dosis de radiación y respuestas adaptativas *Jesús Soto Torres, Ana Martín Sañudo*
- 28 Dosimetría personal y protección radiológica *Xavier Ortega Aramburu*
- 36 Seguridad y protección radiológicas en el diseño del centro de producción de radiofármacos y compuestos marcados de Cuba *Saúl Pérez Pijuán, Ana María Gatti, Rubén Reyes*
- 45 Infraestructura organizativa de la autoridad reguladora de Cuba para hacer frente a las emergencias radiológicas *Yamil López Forteza, José R. Quevedo García, Pablo Jerez Veguería, Rubén Ferro Fernández*

Correspondencia con los lectores

- 50 Tomografía por emisión de fotones en la neurología
Carlos Alfredo Sánchez Catasús, Rafael Rodríguez Rojas, Angel Aguila Ruiz
- 60 Recomendaciones a los autores

Summary

- 2 Effective collective dose imparted by a medicine nuclear service to Córdoba and Jaén populations in 1997 *M. del C. Arias, M. Torres, M. Gálvez*
- 6 Tolerance for salinity and morphoagronomic characterization of rice mutants obtained by radioinduction *L.M. González Núñez, R. Ramírez Fernández, S. Pérez Talavera*
- 12 Pollen-gamma irradiation on pineapple and pollination using irradiated pollen *R. Benega, A. Cisneros, J. Martínez, E. Arias, L. Yabor, E. Castillo, M. Romero, M. Isidró, J. Fernández*
- 15 The substitution of iodine 131 by technetium 99m in the application of radiotracers in the sugar cane industry *D. Aguila Manresa, J. Griffith Martínez*

NUCLEAR OUTLOOK

- 22 Low-dose radiations and adaptative responses *Jesús Soto Torres, Ana Martín Sañudo*
- 28 Personal dosimetry and radiological protection *Xavier Ortega Aramburu*
- 36 Radiation safety and protection in the design of Cuba's radiopharmaceutical and labelled compounds production center *Saúl Pérez Pijuán, Ana María Gatti, Rubén Reyes*
- 45 Organizational infrastructure of the Cuban regulatory authority for dealing with radiological emergencies *Yamil López Forteza, José R. Quevedo García, Pablo Jerez Veguería, Rubén Ferro Fernández*

Letters

- 50 Photon emission tomography in neurosurgery *Carlos Alfredo Sánchez Catasús, Rafael Rodríguez Rojas, Angel Aguila Ruiz*
- 60 Information for authors

DOSIS EFECTIVA COLECTIVA IMPARTIDA A LA POBLACION DE CORDOBA Y JAEN POR EL SERVICIO DE MEDICINA NUCLEAR EN 1997

M. del C. Arias¹, M. Torres², M. Gálvez¹

¹Facultad de Medicina, Servicio de Protección Radiológica, Universidad de Córdoba, España

²Servicio de Medicina Nuclear, Hospital Universitario Reina Sofía de Córdoba, España

RESUMEN

El uso de las técnicas diagnósticas en medicina nuclear va en aumento. Aunque se trata de exploraciones de riesgo clínico despreciable, la incorporación al organismo de sustancias radiactivas hace que sea necesario determinar la dosis efectiva aplicada al paciente con el fin de disminuirla en lo posible y consecuentemente reducir al mínimo los efectos estocásticos de la radiación, tanto al paciente como a la población.

Nuestro trabajo ha consistido en conocer la dosis efectiva colectiva impartida por el Servicio de Medicina Nuclear durante el año 1997 a una población de 1 448 988 habitantes, subsidiarios de este Servicio que corresponde a las provincias de Córdoba y Jaén.

Las exploraciones óseas con 11 454 mSv-persona (4,6 mSv/exploración) y las tiroideas con 6181 mSv-persona (7,0 mSv/exploración) son las técnicas principalmente implicadas en la contribución relativa a la dosis efectiva colectiva total que ha sido de 35 901,2 mSv-persona.

La estimación de riesgos asociados a la realización de las técnicas diagnósticas del Servicio de Medicina Nuclear muestran valores bajos (detrimento total: 2,62), de orden de magnitud similar a los publicados en otros trabajos.

EFFECTIVE COLLECTIVE DOSE IMPARTED BY A MEDICINE NUCLEAR SERVICE TO CORDOBA AND JAEN POPULATIONS IN 1997

ABSTRACT

The application of diagnostic techniques in nuclear medicine is ever growing as part of clinical daily routine. Although the diagnostic procedures carry a negligible clinical risk, the introduction of radioactive substances into the patient makes it imperative to determine the effective dose to minimize the stochastic effects to the patient thus establishing the collective effective dose to the community.

The aim of our work is to study the collective effective dose imparted by Nuclear Medicine Service during 1997 to Córdoba and Jaén inhabitants (1 448 988).

The nuclear medicine techniques of bone exploration with 11 454 mSv-person (4,6 mSv/exploration) and thyroid scintigraphy with 6181 mSv-person (7,0 mSv/exploration) are the main techniques implicated in the relative contribution to the total annual effective collective dose of 35 901,2 mSv-person.

The risks estimation in association with diagnostic techniques in our Nuclear Medicine Service are globally low (total detriment: 2,62), similar than others published data.

Key words: nuclear medicine; human population; dose equivalent; radiation monitoring; radiation doses

INTRODUCCION

Las técnicas diagnósticas de medicina nuclear son absolutamente necesarias para complementar determinados estudios clínicos, los pacientes sometidos a este tipo de exploraciones reciben un gran beneficio de su uso, a pesar de que la intervención de radiaciones ionizantes en ellas hace necesario tener en cuenta la presencia de un factor de riesgo. Por este motivo las exploraciones deben estar justificadas y optimizadas en función de sus beneficios y riesgos asociados. Para ello, un paso previo es conocer la dosis de radiación que conlleva para el paciente cada tipo de exploración, y a partir de ahí sus riesgos derivados [1-3]. Dado que su uso va en aumento, tanto la aparición de nuevas técnicas,

como la aparición de diferentes radionúclidos, se hace necesario el estudio estadístico de las dosis efectivas colectivas impartidas a la población y considerar los posibles efectos no deseados.

MATERIAL Y METODOS

La población de las provincias de Córdoba (782 221 personas) y Jaén (666 767 personas) en el año 1997, constituyen un total de 1 448 988 habitantes que han sido los subsidiarios del Servicio de Medicina Nuclear del Hospital Universitario Reina Sofía de Córdoba.

Una vez conocido el número de personas que se sometieron en 1997 a un tipo determinado de prueba calculamos la dosis efectiva anual utilizando las dosis efectivas unitarias por tipo de exploración, ob-

tenidas tanto de la ICRP 60 [4] como de las especificaciones técnicas de los productos utilizados.

El desglose de las exploraciones realizadas, así como el número de exploraciones de cada tipo que se han efectuado se ofrecen en la tabla 1. A partir

de estos datos y de las dosis efectivas unitarias consideradas para cada exploración, hemos calculado las siguientes estimaciones:

- Dosis efectiva colectiva (mSv-persona)
- Dosis efectiva media por exploración (mSv)

Tabla 1

Estadísticas de la actividad en 1997 de las dosis efectivas colectivas en función de las dosis efectivas unitarias por exploración en nuestro servicio

Denominación de la técnica	No. de exploraciones	Dosis efectiva unitaria (mSv)	Dosis efectiva colectiva (mSv-P)	Dosis relativa %
Rastreo óseo	2490	4,6	11 454	31,90
Gamma hepatoesplénica con coloide	20	1,5	30,0	0,08
Cuerpo entero con galio	94	26,4	2481,6	6,91
Estudio pulmonar con galio	98	13,2	1293,6	3,6
Hemangiomas	3	2,7	8,1	0,02
Gammagrafía tiroides	883	7,0	6181,0	17,22
Rastreo con I-131	53	12,5	662,5	1,85
Perfusión pulmonar	384	1,2	460,8	1,28
Flebografías	121	1,2	145,2	0,40
Linfografías	6	0,7	4,2	0,01
Gamma corteza suprarrenal	8	149,8	1198,4	3,33
Gammagrafía de paratiroides	31	13,6	421,6	1,17
Spect cerebral perfusión	66	8,4	554,4	1,54
Spect cardiaco reposo con tetrafosmina con isonitrilos (MIBI)	215	9,0	1935,0	5,39
	25	15,0	375,0	1,04
Spect cardiaco esfuerzo con tetrafosmina con isonitrilos (MIBI)	233	6,8	1584,4	4,41
	25	12,0	300,0	0,83
Función ventricular en equilibrio	495	5,3	2623,5	7,30
Imagen positiva en miocardio	68	4,6	312,6	0,87
Detección de mucosa gástrica	38	7,0	266,0	0,74
Gamma hepatobiliar para hígado enfermo	38	3,2	121,6	0,34
Detección de pérdidas digestivas	30	2,7	81,0	0,22
Renograma con MAG-3	343	2,9	994,7	2,77
Gamma renal con DMSA	362	1,4	506,8	1,41
Cistogammagrafía	13	0,9	11,7	0,03
Rastreo MIBG	12	3,1	37,2	0,10
Anticuerpos antimiosina	73	17,1	1248,3	3,48
Talio en cáncer de mama	12	42,5	510,0	1,42
Glándulas salivares	14	7,0	98,0	0,27
Totales anuales	6253		35 901,2 mSv-P	
Dosis media por exploración (mSv)		13,21		
Totales por 1000 habitantes	4,31		24,77 mSv-P	

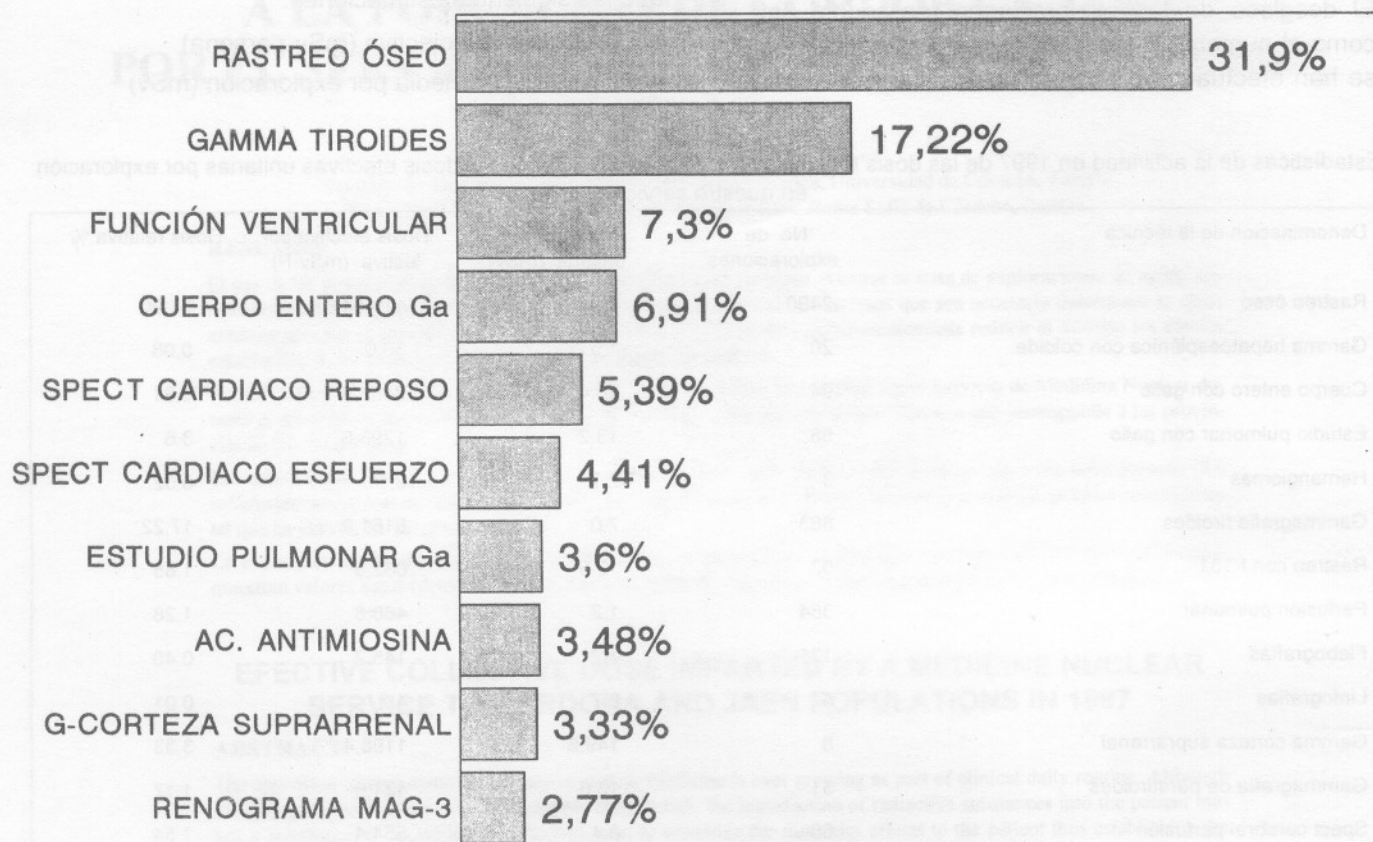


Figura 1

Exploraciones que más contribuyen a la dosis efectiva relativa.

- Dosis efectiva colectiva (mSv-persona) por 1000 habitantes
- Número de exploraciones por 1000 habitantes.
- Contribución relativa (%) de cada exploración a la dosis efectiva colectiva.

Partiendo de la dosis efectiva colectiva durante el año en estudio hemos estimado el detrimento producido a los pacientes sometidos a las exploraciones diagnósticas en el Servicio de Medicina Nuclear, utilizando los coeficientes nominales de probabilidad que propone la ICRP 60 [4].

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la dosis efectiva unitaria, la dosis efectiva colectiva y la dosis relativa, aparecen en la tabla 1. En la Fig. 1 representamos la contribución relativa (%) de la dosis efectiva correspondiente a las pruebas principalmente implicadas.

Las exploraciones que más contribuyen son el rastreo óseo (31,90%) y la gammagrafía tiroidea (17,22%), seguidas de la función ventricular en

Tabla 2

Detrimento producido a los pacientes sometidos a exploraciones

	Coeficientes nominales de probabilidad (mSv)			Detrimento total
	Cáncer mortal	Cáncer no mortal	Efectos hereditarios graves	
Población general (ICRP 60)	0,050	0,01	0,013	0,073
Detrimento causado a los pacientes examinados	1,79	0,39	0,46	2,62

equilibrio (7,30%), la técnica de rastreo de cuerpo entero con galio (6,91%) y las pruebas de SPECT cardiaco con tetrafosmina en reposo y en esfuerzo respectivamente (5,39% y 4,41%).

Los resultados se muestran en la tabla 2. El Servicio de Medicina Nuclear del Hospital Universitario Reina Sofía de Córdoba habrá producido un detrimento total de 2,62 como resultado de la realización de 6253 pruebas diagnósticas, impartiendo una dosis colectiva de 24,77 mSv-persona.

DISCUSION

Los resultados que obtuvimos de la dosis efectiva colectiva anual (35 901,2 mSv-persona) son similares a los encontrados por otros autores como Martí Vidal y cols. (31 499 mSv-persona) [3], De Sequera y cols. (47 120 mSv-persona) [5] o Hernández Vitoria y cols. (25 917 mSv-persona) [1]. Encontramos diferencias importantes con autores de otros países como Huda y cols. en Canadá con valores de dosis efectiva colectiva de 130 000 mSv-persona [6-8]. El valor de la dosis efectiva por exploración es mayor al de los registros recogidos por los autores de nuestro entorno geográfico [1-3, 5], debido a que en nuestro Servicio se ha realizado un mayor número de exploraciones de: SPECT cardiaco en reposo y de esfuerzo con tetrafosmina (215 y 233 respectivamente), función ventricular en equilibrio (495), cuerpo entero con galio (94), gamma corteza suprarrenal (8), que aportan mayor dosis efectiva unitaria. Hay que considerar, también, la aparición de nuevas técnicas como la de talio para cáncer de mama que aporta una dosis efectiva unitaria considerable (42,5), o la introducción de radionúclidos nuevos como los isonitrilos en el estudio cardiaco.

CONCLUSIONES

1. La dosis efectiva colectiva impartida en 1997 a las poblaciones de Córdoba y Jaén por el Servi-

cio de Medicina Nuclear se encuentra dentro de límites aceptables.

2. Las técnicas que contribuyen principalmente a la dosis efectiva relativa son las de rastreo óseo y la gammagrafía de tiroides, seguidas en orden de contribución por las pruebas de función ventricular en equilibrio, rastreo de cuerpo entero con galio, SPECT cardiaco en reposo y de esfuerzo con tetrafosmina, principalmente.
3. En nuestro Servicio se realizaron en 1997 más pruebas de las que aportan mayor dosis efectiva por lo que la dosis media por técnica fue más elevada.
4. La estimación de riesgos asociados a la realización de las pruebas diagnósticas en nuestro Servicio ofreció valores bajos, de similar magnitud a los reportados por otros estudios [3].

BIBLIOGRAFIA

- [1] HERNANDEZ VITORIA, A., MILLAN CEBRIAN, PE., NAVARRETE CAMPOS, S. y otros, Dosis absorbida de radiación en exploraciones en medicina nuclear y riesgos asociados. Rev. Esp. Med. Nuclear 1993;12 (1):13-19.
- [2] BEA GILABERT, J., MARTI VIDAL, JF., Dosis impartida al paciente en medicina nuclear diagnóstica, Radioprotección 1996, 11(IV):18-26.
- [3] MARTI VIDAL, JF., BEA GILABERT, J., Evolución de la dosis colectiva impartida a la población por un servicio de medicina nuclear diagnóstica. Rev. Esp. Med. Nuclear, 1996;5: 311-316.
- [4] International Commission of Radioprotection. 1990 recommendations of the ICRP. Report, No. 60, 1990.
- [5] DE SEQUERA, M., ALLENDE, A., CARDENAS, C., HERNANDEZ ARMAS, J., Dosimetría en medicina nuclear diagnóstica, IX Congreso de la Sociedad Española de Física Médica, Santa Cruz de Tenerife, 1993.
- [6] FTACNIKOVA, S., RAGAN, P., Radiation dose to the population of Slovak Republic from diagnostic nuclear medicine. Health Physics, 1995;69(1):16-20.
- [7] HUDA, W., GORDON, K., Nuclear medicine staff and patients doses in Manitoba (1981-1985), Health Physics 1989;58:277-285.
- [8] MOHAMMADI, H., TABEIE, F., SAGHARI, M., Trends of population radiation absorbed dose from diagnostic nuclear medicine procedures in Iran: 1985-1989, Health Physics, 1995;68(4):503-508.

TOLERANCIA A LA SALINIDAD Y CARACTERIZACION MORFOAGRONOMICA DE MUTANTES DE ARROZ OBTENIDOS POR INDUCCION DE MUTACIONES

L.M. González Núñez¹, R. Ramírez Fernández¹, S. Pérez Talavera²

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias "Jorge Dimitrov", Granma, Cuba

²Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt", Ciudad de La Habana, Cuba

RESUMEN

Se valoró la tolerancia a la salinidad, el rendimiento agroindustrial y la resistencia a enfermedades en un grupo de mutantes de arroz obtenidos a través de la radioinducción de mutaciones, a partir de la variedad J-112. Los resultados indicaron diferencias significativas en los caracteres analizados de los radiomutantes y de éstos a su vez con la variedad donante. Los radiomutantes RM-12, RM-41 y RM-62, además de destacarse por su alta tolerancia a la salinidad, presentaron los mayores rendimientos agroindustriales y buen comportamiento frente a las principales plagas y enfermedades, por lo que se presentan con perspectivas para utilizarlos como nuevas variedades en la producción de áreas afectadas por la salinidad.

TOLERANCE FOR SALINITY AND MORPHOAGRONOMIC CHARACTERIZATION OF RICE MUTANTS OBTAINED BY RADIOINDUCTION

ABSTRACT

Tolerance for salinity, agroindustrial efficiency, and resistance to diseases were appraised in a group of rice mutants obtained by means of mutation radioinduction, starting from the J-112 variety. Results show significant differences in the analyzed characteristics of radiomutants, and differences between those radiomutants and the donating variety. Radiomutants RM-12, RM-41, and RM-42, besides standing out for their high tolerance for salinity, boasted the highest agroindustrial efficiency and a good behavior against the main plagues and diseases, which makes of them likely candidates for new varieties in the production from areas affected by salinity.

Key words: plant breeding; rice; radiosensitivity; dose-response relationships; Cuba; salinity

INTRODUCCION

Los exitosos resultados obtenidos por diversos investigadores demuestran que la radioinducción de mutaciones puede ser muy útil para obtener variedades mejoradas de arroz, con alta productividad y resistencia a factores bióticos y abióticos; con la ventaja de que esta técnica permite acortar los períodos de selección, y aportar nuevos genes que no estén restringidos a la constitución genética de los progenitores [1-3].

En el primer trabajo de esta serie [4] se determinaron las dosis de radiaciones gamma útiles al mejoramiento; y se mostraron las líneas radiomutantes obtenidas. En el presente, se valora la tolerancia a la salinidad, el rendimiento agrícola e industrial y la resistencia a las principales plagas y enfermedades que atacan al cultivo, con la finalidad de establecer las posibles diferencias con la variedad donante y definir su utilización práctica, bien sea dentro de la política varietal o como fuente de caracteres útiles

para ser empleados como progenitores en programas de mejora por cruzamiento.

MATERIALES Y METODOS

Los mutantes incluidos en este estudio se obtuvieron a partir de la variedad J-112, con el empleo de los rayos gamma de Co-60 [4].

Para la valoración del rendimiento agrícola y sus componentes, las semillas de los radiomutantes se sembraron en época de seca, durante dos años (generación M4 y M5), sobre un suelo de tipo Oscuro Plástico Gleyzado [5], con afectaciones de salinidad (2000 ppm de sales solubles totales), con un diseño de parcelas con testigo intercalado (variedad donante), cada cinco líneas.

El análisis industrial, y la resistencia a *Piricularia oryzae*, a *Sogatodes* sp., al virus de la Hoja blanca, al acame y al desgrane, se realizaron por las metodologías propuestas en los sistemas de evaluación estándar del arroz [6].

Para conocer el grado de tolerancia a la salinidad, en fase de plántula y en la cosecha, las semillas de los radiomutantes y de un grupo de variedades comerciales y precomerciales, se sembraron en condiciones de laboratorio y de campo, de acuerdo con la metodología descrita por González et al. [7].

Los datos de tolerancia a la salinidad se procesaron mediante análisis de conglomerados o cluster [8], y los del rendimiento agrícola e industrial por la prueba de *t* de Student [9].

RESULTADOS Y DISCUSION

Tolerancia a la salinidad

Al comparar los radiomutantes con un grupo de variedades comerciales y precomerciales, incluyendo la donante (J-112) en fase de plántula, se observó

un alto grado de diversidad genética (Fig. 1), que se destaca por formar un mismo grupo con los valores de distancia euclidiana más cercanos al testigo teórico y por tanto presentar el mayor grado de tolerancia. Este comportamiento era esperado, si se tiene en cuenta que las variedades se seleccionaron atendiendo a estos caracteres, y de gran importancia, pues da la medida de que los mutantes sufren menores daños en su velocidad de crecimiento en condiciones salinas, respecto a las variedades comerciales actualmente en producción, y que son severamente afectados en el estadio de plántula [10-12]; por lo que su empleo en condiciones de salinidad permitirá mantener una adecuada densidad de población y alcanzar un mayor rendimiento por área.

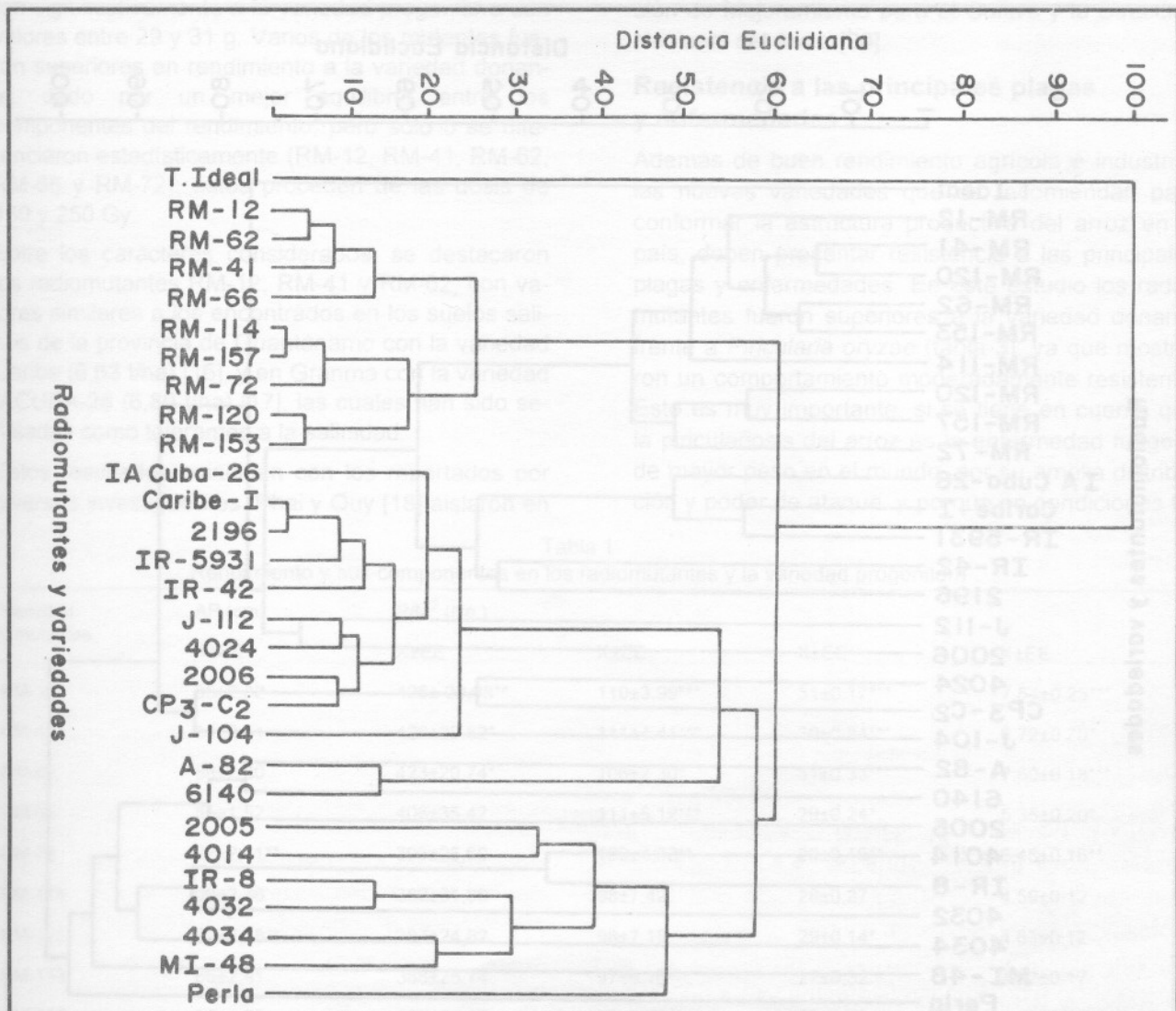


Figura 1

Dendrograma con el agrupamiento de los radiomutantes y las variedades sobre la base de los índices de tolerancia relativa a la salinidad (fase de plántula).

Con relación a la resistencia, según el rendimiento y sus componentes, el material examinado quedó separado del testigo teórico y agrupado en tres grupos fundamentales (Fig. 2); donde los radiomutantes (Grupo I), al igual que en el estadio de plántula, presentaron los valores de distancia euclidiana más cercanos al testigo ideal, y por tanto el mayor grado de tolerancia. Merece destacar que dentro de las variedades, la IACUBA-26 ocupó la posición más cercana a los radiomutantes; aspecto de consideración, ya que la misma se encuentra en extensión agrícola para su explotación en los suelos afectados por salinidad, por presentar cierto grado de tolerancia.

El mejor comportamiento de la tolerancia a la salinidad, en las líneas radiomutantes, pudiera ser de utilidad en la conformación de la estructura varietal

para las áreas afectadas por la salinidad, o para emplearlas como progenitores en el desarrollo de programas de mejoramiento genético que se efectúan en el cultivo.

Estos resultados apoyan la utilidad del empleo de la radioinducción de mutaciones para ampliar la variedad genética disponible en la dirección de la tolerancia a la salinidad, anteriormente señalada por varios investigadores [1, 13, 14].

Rendimiento agrícola

A pesar de que los radiomutantes fueron similares a la variedad donante (J-112) en su ciclo vegetativo (160 días), mostraron diferencias estadísticas significativas en los restantes indicadores evaluados (tabla 1).

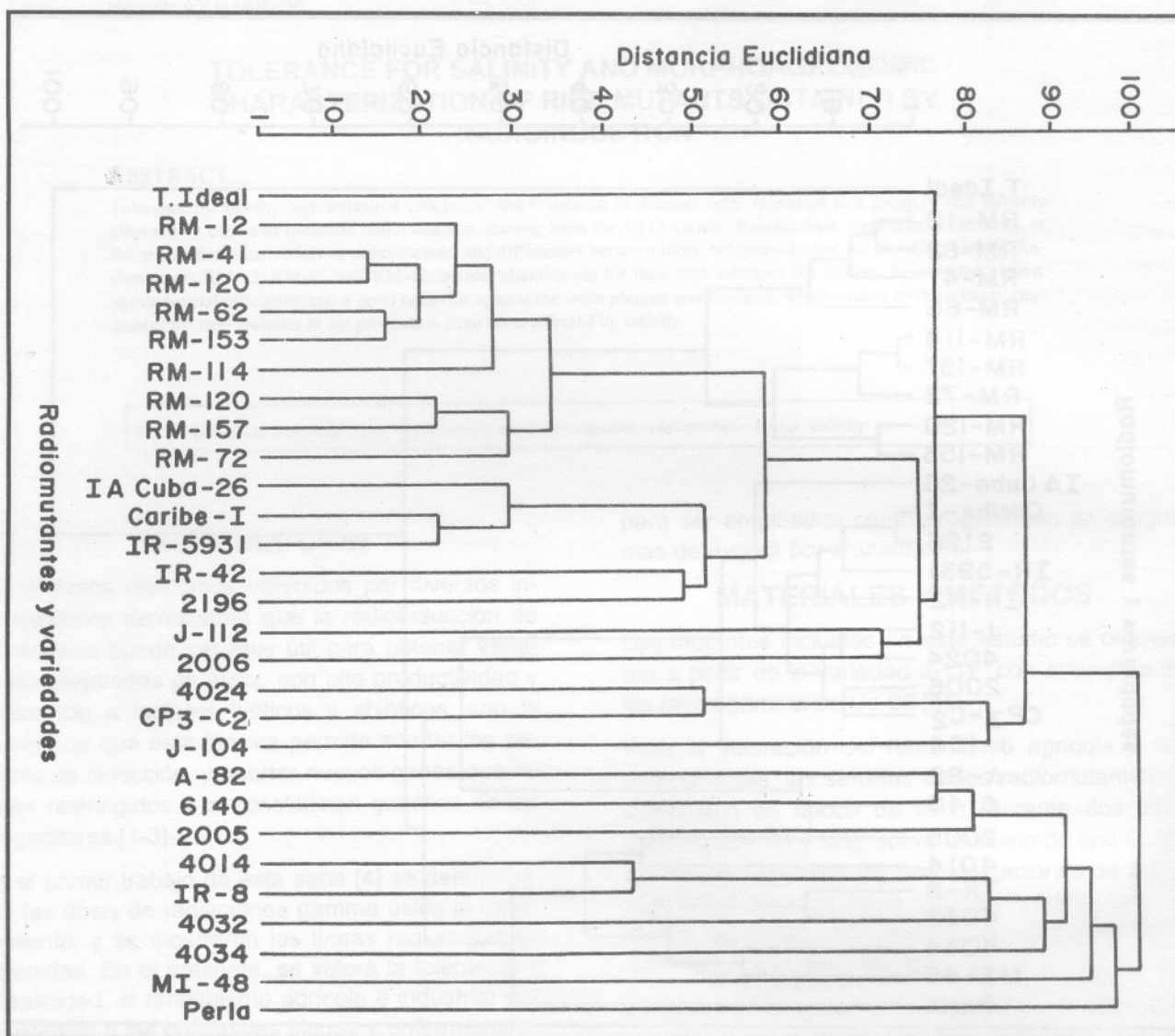


Figura 2

Dendrograma con el agrupamiento de los radiomutantes y las variedades sobre la base de los índices de tolerancia relativa a la salinidad (cosecha).

No obstante presentar mayor altura los radiomutantes RM-72 y RM-120, con diferencias significativas respecto al donante, todas las líneas radiomutantes mantuvieron el porte semienano inherente a la variedad progenitora; lo que es característico de las variedades tropicales [15].

Respecto al número de panículas por metro cuadrado, se diferenciaron significativamente del donante los radiomutantes RM-12, RM-41 y RM-62 con valores superiores a los 420 P/m², mientras que en el número de granos llenos por panícula, la mayoría de los mutantes superaron a la variedad progenitora, pero sólo se manifestaron diferencias estadísticas para RM-12, RM-41, RM-62, RM-66 y RM-72.

En el peso de mil granos los radiomutantes (RM-12, RM-41, RM-62, RM-66, RM-72 y RM-120) superaron significativamente a la variedad progenitora con valores entre 29 y 31 g. Varios de los mutantes fueron superiores en rendimiento a la variedad donante; dado por un mejor equilibrio entre los componentes del rendimiento; pero sólo 5 se diferenciaron estadísticamente (RM-12, RM-41, RM-62, RM-66 y RM-72); éstos proceden de las dosis de 150 y 250 Gy.

Entre los caracteres considerados, se destacaron los radiomutantes RM-12, RM-41 y RM-62, con valores similares a los encontrados en los suelos salinos de la provincia de Guantánamo con la variedad Caribe (6,63 t/ha) [16], y en Granma con la variedad IACUBA-26 (6,80 t/ha) [17], las cuales han sido señaladas como tolerantes a la salinidad.

Estos resultados coinciden con los reportados por diversos investigadores. Phai y Quy [18] aislaron en

una población irradiada con 250 Gy de rayos gamma de Co-60, un mutante con buenas características agronómicas y tolerante a la salinidad; Azam et al. [19] refiere la obtención de tres mutantes con buenas características agronómicas, buen rendimiento industrial y alta tolerancia a la salinidad, los cuales fueron introducidos como nuevas variedades a la producción.

Rendimiento industrial

El rendimiento industrial, representado por los granos enteros, partidos y pulidos, reveló diferencias significativas entre los materiales estudiados (tabla 2). Se destacan los radiomutantes RM-12, RM-41 y RM-62, con valores superiores en granos enteros y pulidos a los de la variedad donante y cercano a los satisfactorios, según los lineamientos de la Comisión de Mejoramiento para el Cultivo y la Dirección Nacional del Arroz [20].

Resistencia a las principales plagas y enfermedades

Además de buen rendimiento agrícola e industrial, las nuevas variedades que se recomiendan para conformar la estructura productiva del arroz en el país, deben presentar resistencia a las principales plagas y enfermedades. En este estudio los radiomutantes fueron superiores a la variedad donante frente a *Piricularia oryzae* (tabla 3), ya que mostraron un comportamiento moderadamente resistente. Esto es muy importante, si se tiene en cuenta que la piriculariosis del arroz es la enfermedad fungosa de mayor peso en el mundo, por su amplia distribución y poder de ataque, y porque en condiciones fa-

Tabla 1
Rendimiento y sus componentes en los radiomutantes y la variedad progenitora

Variedad y mutantes	AP (cm)	P/M ² (No.)			
	X±EE	X±EE	X±EE	X±EE	X±EE
RM-12	85±2,32	426±20,08**	110±3,99***	31±0,17***	7,54±0,25***
RM-41	84±2,41	426±22,62*	111±4,41***	30±0,24***	6,72±0,20*
RM-62	86±2,80	423±20,74*	106±2,30*	31±0,33***	7,60±0,18***
RM-66	85±1,52	406±35,42	111±5,12***	29±0,24*	5,35±0,20*
RM-72	92±2,41**	393±26,60	109±4,32**	29±0,18**	6,48±0,16**
RM-114	90±2,36	382±31,06	98±7,42	28±0,27	4,59±0,12
RM-120	92±2,38**	387±24,82	98±7,18	29±0,14*	4,63±0,12
RM-153	86±2,41	388±25,74	97±8,16	27±0,32	4,62±0,17
RM-157	85±1,82	390±31,32	96±7,15	28±0,30	4,48±0,22
J-112	86±2,30	388±22,13	96±7,62	28±0,25	4,44±0,25

* Significativo para P<0,05 / ** Significativo para P<0,01/ *** Significativo para P<0,001

Tabla 2
Rendimiento industrial en las líneas radiomutantes y la variedad progenitora

Variedad y mutantes	Granos enteros (%)	Granos partidos(%)	Granos pulidos (%)
	X±EE	X±EE	X±EE
RM-12	52±0,31***	10±0,23***	67±0,32***
RM-41	50±0,12***	10±0,20***	66±0,40**
RM-62	51±0,43***	11±0,14***	66±0,36**
RM-66	48±0,12*	12±0,21*	62±0,42
RM-72	49±0,27**	12±0,29*	63±0,38
RM-114	47±0,18	13±0,26	61±0,32
RM-120	47±0,22	13±0,32	63±0,42
RM-153	46±0,58	13±0,18	61±0,40
RM-157	46±0,52	13±0,22	62±0,38
J-112	47±0,51	13±0,32	63±0,32

* Significativo para $P < 0,05$ / ** Significativo para $P < 0,01$ / *** Significativo para $P < 0,001$

Tabla 3
Resistencia a las principales plagas y enfermedades en las líneas radiomutantes y la variedad donante

Variedad y radiomutantes	Resistencia				
	P.O.	S.O.	VHB	Acame	Desgrane
RM-12	MR	R	MS	R	R
RM-41	MR	R	MS	MR	R
RM-62	MR	MR	MS	R	R
RM-66	MR	MR	MS	MR	R
RM-72	MR	MR	MS	MR	MR
RM-114	MR	S	MS	R	MR
RM-120	MR	MR	MS	MR	R
RM-153	MR	MR	MS	MR	R
RM-157	MR	S	MS	MR	MR
J-112	MR	S	S	MR	MR

R: resistente
MR: medianamente resistente
S: susceptible
MS: medianamente susceptible
P.O: Piricularia oryzae
S.O.: Sogatodes oryzaicola
VHB: virus de la Hoja Blanca

vorables puede provocar pérdidas de hasta un 80% en la cosecha [22]. En Cuba esta plaga está presente en todas las provincias del país [23].

Frente a *Sogatodes oryzaicola* Muir, los radiomutantes RM-12 y RM-41 se destacaron como resistentes, mientras que RM-114 y RM-157 fueron susceptibles, los restantes fueron moderadamente resistentes. El comportamiento resistente de los mutantes RM-12 y RM-41 pudiera ser de utilidad en

programas de mejoramiento genético, pues el empleo de variedades resistentes es el método más eficiente para el control de dicho insecto [24].

Respecto al virus de la Hoja blanca no se encontró resistencia, pero sí un mejor comportamiento de los radiomutantes con respecto a la variedad donante.

La obtención de resistencia a las principales plagas y enfermedades del arroz, en programas de mejoramiento genético, a través de la radioinducción de

mutaciones, ha sido señalada por diversos investigadores. Notteghen [25], Kaur et al. [26] y Yamasaqui y Kawai [27], lograron inducir resistencia en variedades de alta productividad a través de mutaciones indicadas.

Micke et al. [13] y Wang [2], reportaron la obtención de radiomutantes con resistencia a *Sogatodes oryzicola* y al virus de la Hoja blanca y algunos mutantes con resistencia simultánea a ambos.

Tanto al acamado, como al desgrane, los radiomutantes y la variedad progenitora mostraron buena resistencia, aunque algunos la superaron. Esto es muy importante, ya que la falta de resistencia tanto a un factor como a otro provoca grandes pérdidas de los rendimientos en la producción de arroz.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Entre los radiomutantes analizados: RM-12, RM-41 y RM-62, además de por su alta tolerancia a la salinidad, se destacaron por presentar los mayores rendimientos agroindustriales, por lo que se presentan con perspectivas para utilizarlos como nuevas variedades en la producción de las áreas afectadas por la salinidad.

Se recomienda acelerar la producción de semillas de los radiomutantes RM-12, RM-41 y RM-62 para su introducción en las áreas afectadas por la salinidad.

Se recomienda el empleo de los radiomutantes obtenidos como progenitores en los programas de mejoramiento genético que se desarrollan en este cultivo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IAEA, IAEA Technical Report Series, 132 (1990)1-14.
- [2] WANG, L.D., Mutation breeding program in P.R. China, Proceeding of a Symposium of Plant Breeding for Crop Improvement, IAEA, Vienna, 1(1991)20-38.
- [3] DEUS, J.E., LEYVA, B. y otros, Use of induce mutations and tissue culture in the rice (*Oryza sativa*, L.) improvement programme in Cuba. En Plant Mutation Breeding for Crop improvement, 2(1992)455-461.
- [4] GONZALEZ, L.M., PEREZ TALAVERA, S., Nucleus No. 23 (1997)2-7.

- [5] Instituto de Suelos, Clasificación genética de los suelos de Cuba, Editorial Academia, 28 (1980).
- [6] IRRI-CIAT, Sistema de evaluación estándar para el arroz CIAT, Cali, Colombia, 42 pp.
- [7] GONZALEZ, L.M., PRIETO, F. y otros, Desarrollo de metodologías de evaluación para resistencia a la salinidad en vertisuelos, Memorias del Coloquio Cubano-Francés sobre ENSAN/INRA, Montpellier, Francia, (1991)329-336.
- [8] SNEATH, P.H.A., SOKAL, R.R., Principles of numerical taxonomy (W.r. Freeman, ed.), San Francisco, 573 pp., 1973
- [9] LERCH, G., La experimentación en las ciencias biológicas y agrícolas, Editorial Científico-Técnica, La Habana (1977), 452 pp.
- [10] BRITO, E.R., IRIGOYEN, H.D., Ciencia y Técnica en la Agricultura, Arroz, 1 16 (1983)7-22.
- [11] MARIN, E., GONZALEZ, L.M. y otros, Centro Agrícola, 3 (1991)3-9.
- [12] GONZALEZ CEPERO, M.C., Uso de la variación somaclonal en el mejoramiento genético para la tolerancia a la salinidad en el cultivo del arroz (*Oryza sativa*, L.). Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas, INCA, La Habana (1993)100 pp.
- [13] MICKE, A., MALUSZYNSKI, M. y otros, Mutation Breeding Review, 3 (1985)1-92.
- [14] CHAUDRY, M.A. YOSHIDA, S. y otros, Mutation Breeding Newsletter, 33 (1989) 2-3.
- [15] LAJOVSKIN, A. LEYVA, B. y otros, Genofondo del arroz de la República de Cuba, III Jornada Científica del Arroz, La Habana, Cuba (1977), 15 pp.
- [16] BRITO, E.R., COBAS, M. y otros, Ciencia y Técnica en la Agricultura, Arroz, 9 1(1989)101-106.
- [17] MORALES, O., AVILA, J. y otros, Paquete tecnológico para el manejo y explotación de los suelos arroceros afectados por la salinidad, Informe Final de Tema de Investigación, Estación Territorial de Investigaciones del Arroz Jucarito, Granma (1993)25 pp.
- [18] PHAI, P., QUY, T.D, IRRI Newsletter, 11 4(1985) 21.
- [19] AZAM, M.A., HAKIN, L. y otros, IRRI Newsletter, 10 6 (1985)4.
- [20] MINAGRI, Instructivos técnicos para el cultivo del arroz. Dirección Nacional de Arroz, La Habana (1986)137pp
- [21] MINAGRI, Instructivos técnicos para el cultivo del arroz. Dirección Nacional de Arroz, La Habana (1990)175 pp.
- [22] FABREGAT, M., Aspectos bioecológicos y control de la Piricularia oryzae cav. en el arroz. Resumen de tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas, La Habana (1984)21 pp.
- [23] BARCELO, J.C., Boletín de Reseñas, Arroz, 14 (1984)1-30.
- [24] ATKINS, I.G., RABAI, C., Plant Disease Report, III 41 (1957) 6-14.
- [25] NOTTEGHEM, J.L., Etude de la resistance d *Oryza sativa* a la piricularia oryzae par application au parasite des techniques de mutagenese, Induce Mutations against Plant diseases, Proceeding of Symposium, IAEA/FAO/SIDA, Vienna (1997)121-128.
- [26] KAUR, S., PADMANABHAN, Induction of resistance to blast disease (*Piricularia oryzae*) in the high yielding variety Ratna (IRS x TKM-6), Induced Mutation against Plant Diseases, Proceeding of a symposium, IAEA/FAO/SIDA (1997)147-155.
- [27] YAMASAKI, Y., KAWAI, T., IAEA Technical Report Series, 25 (1967) 65-74.

IRRADIACIONES GAMMA DE POLEN EN PIÑA Y FECUNDACION CON POLEN IRRADIADO

R. Benega¹, A. Cisneros¹, J. Martínez¹, E. Arias¹, L. Yabor¹, E. Castillo², M. Romero², M. Isidró¹, J. Fernández²

¹Centro de Bioplasmas, Laboratorio de Genética, Universidad de Ciego de Avila, Ciego de Avila, Cuba

²Centro Nacional de Sanidad Vegetal, Laboratorio de Técnicas de Irradiación, La Habana, Cuba

RESUMEN

Con vistas a inducir plantas haploides en piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.), se irradiaron granos de polen con rayos gamma de Co⁶⁰ en un rango de dosis de 0-300 Gy. Se analizó el efecto de las irradiaciones gamma sobre la frecuencia de división del núcleo generativo y viabilidad *in vitro* del polen de Cayena lisa Serrana, así como el contenido de las semillas y plántulas obtenidas después de la fecundación en Española roja. Existieron reducciones en las frecuencias de división del núcleo generativo del polen en todas las dosis empleadas. La DL₅₀ se observó entre los 200 y 250 Gy. No existieron diferencias en la viabilidad del polen en los rangos de dosis empleados. El contenido de las semillas fue dependiente de las dosis de irradiación. Los porcentajes de semillas completas y semillas que presentaron sólo embrión disminuyeron con el incremento de las dosis. Efecto contrario se observó con las semillas vacías. Algunas plántulas regeneradas en las diferentes dosis de irradiación mostraron fenotipos con hojas pequeñas y finas e internudos cortos.

POLEN-GAMMA IRRADIATION ON PINEAPPLE AND POLLINATION USING IRRADIATED POLLEN

ABSTRACT

In order to try to induce haploid plants, pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) pollen grains were gamma-rays irradiated with a Co⁶⁰ source at rates of doses from 0 to 300 Gy. The effect of gamma-rays on the generative-nucleus division and *in vitro* pollen viability as well as, seed contents and plantlets obtained after pollinations was analysed. There were reducing in the division frequencies of generative nucleus at all assayed doses. The LD₅₀ was achieved among 200 and 250 Gy. There were not differences on pollen viability in the rates of assayed doses. Seed contents were dose-dependent. The percentages of seed full and seed containing only embryos decreases at increasing of irradiation doses. Contrary effect was observed on the seed empty. Some plantlets regenerated from the different irradiation doses showed phenotypes with small and thin leaves and short internodes.

Key words: pollen; gamma radiation; ananas; cobalt 60; plant breeding; radiation dose; dose-reponse relationships; seeds

INTRODUCCION

La haploidización *in vitro* no sólo es posible a partir de la androgénesis o ginogénesis. Recientemente Raquin (1985) indujo en *Petunia* partenogénesis *in situ* por cultivo *in vitro* de ovarios polinizados con polen irradiado. El uso de esta técnica permitió además la producción de plantas haploides en *Brassica oleraceae* L. spp *capitata* (Doré, 1989), *Malus x domestica* (Zhang y Lespinasse, 1991), y *Rosa x hybrida*, cv. Sonia (Meynet et al. 1994).

Una posible explicación del mecanismo de inducción de partenogénesis *in situ* con polen irradiado es que los núcleos polares son fertilizados por un núcleo generativo sin la fertilización de la oosfera, dando lugar a un albumen triploide normal y un embrión haploide (Falque et al. 1992). En piña, especie propagada vegetativamente y con un alto grado de heterocigosis, la producción de plantas haploides podría traer consigo un significativo avance en

la genética y mejoramiento de la especie. Sin embargo, la utilidad de esta vía es aún limitada en el mejoramiento por no existir resultados al respecto.

En este trabajo se estudia la influencia de las irradiaciones gamma sobre la división del núcleo generativo y características de las semillas y plántulas obtenidas por polinización con polen irradiado como paso previo para inducir plantas haploides en piña.

MATERIALES Y METODOS

Material vegetal. Se irradiaron anteras maduras de Cayena lisa Serrana con rayos gamma de Co⁶⁰ a dosis de 0, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 Gy (potencia de dosis, 16 Gy/min) en el Laboratorio de Técnicas de Irradiación del Centro Nacional de Sanidad Vegetal.

Cultivo *in vitro* de granos de polen irradiados. Los granos de polen recién irradiados en cada dosis se prepararon y se sembraron en un medio de cultivo estéril (Wee y Rao, 1979). La tinción y ob-

Tabla 1

Efecto de las irradiaciones gamma sobre la viabilidad *in vitro* del polen en Cayena lisa Serana y algunos parámetros obtenidos por polinización con polen irradiado en Española roja
(en cada parámetro analizado medias con igual denominación no difieren para $p < 0,05$)

Dosis (Gy)	Flores fecundadas	Viabilidad <i>in vitro</i>	Semillas formadas	Embriones germinados	Plantas obtenidas
0	10	27,20 a	61	50	46
50	13	21,08 ab	54	42	28
100	16	15,52 b	54	34	19
150	17	27,18 a	20	-	-
200	18	29,64 a	29	2	0
250	17	29,36 a	18	0	0
300	10	28,78 a	3	0	0

servación del núcleo generativo se realizó de acuerdo con Arias et al. (1997).

Polinización con polen irradiado. Extracción de semillas, siembra de embriones inmaduros y regeneración de plántulas. El polen irradiado de Cayena lisa Serrana a diferentes dosis se utilizó para fecundar las flores recién abiertas de Española roja. Entre los 45 y 50 días, se extrajeron en el Centro de Bioplasmas de la Universidad de Ciego de Avila las semillas formadas y se clasificaron en completas (SC), solo con embrión (SSE) y vacías (SV). Los embriones inmaduros formados se cultivaron en un medio modificado MS (1962) con el 50% de las sales, 2% de sacarosa, CH (300 mg/L) y una combinación BAP/AG₃/ANA (1:0,5:0,3 mg/L) en condiciones de oscuridad. A los 15 días los embriones germinados se transfirieron a medio fresco en condiciones de iluminación, alta humedad relativa y temperatura de 24±2 °C.

El análisis de los resultados de los contenidos de las semillas en las diferentes dosis de irradiación se realizó con respecto a la dosis de 0 Gy. Para ello se emplearon las siguientes formulaciones: SC = $(100 * TSD * TFC) / (TSC * TFD)$; SSE = $(100 * TED * TFC) / (TEC * TFD)$ y SV = $(100 * TSVD * TFC) / (TSVC * TFD)$; donde TSD fue el total de semillas obtenidas con las diferentes dosis de irradiación, TFC se refirió al total de flores fecundadas en la dosis de 0 Gy, TSC correspondió al total de semillas obtenidas con la dosis de 0 Gy, TFD el total de flores fecundadas con las diferentes dosis de irradiación, TED el total de embriones formados con la dosis de 0 Gy, TEC el total de semillas que presentaron sólo embriones en cada dosis de irradiación, TSVD el total de semillas vanas obtenidas a dosis de 0 Gy y TSVC el total de semillas vanas obtenidas en cada dosis de irradiación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los sucesos típicos de la mitosis se observaron en cada dosis de irradiación (Fig. 1). Durante la elongación del tubo polínico, el núcleo generativo inicialmente localizado en el grano migró en el tubo y se dividió en dos núcleos espermáticos. Sin embargo, las irradiaciones afectaron esta segunda división mitótica. Se encontraron correlaciones entre las diferentes dosis de irradiación y los porcentajes en las divisiones de los núcleos generativos ($r = -0,54$, $y = 102,67 - 0,22 * \text{dosis}$). La DL₅₀ se alcanzó entre los 200 y 250 Gy. Grant et al. (1980) encontraron inhibición de la segunda mitosis del polen a partir de 250 Gy. La no división del núcleo generativo puede estar relacionada con la explicación del mecanismo de inducción de partenogénesis *in situ* provocada por polinización con polen irradiado (Falque et al. 1992).

La viabilidad *in vitro* del polen no se afectó por las irradiaciones gamma. Los valores de viabilidad observados con la dosis de 0 Gy no fueron significati-

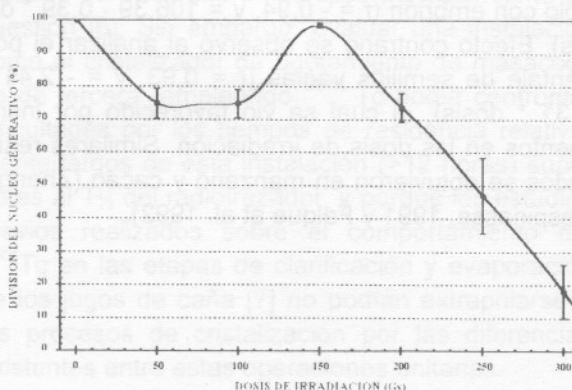


Figura 1

Efecto de las irradiaciones gamma sobre la división del núcleo generativo en polen de Cayena lisa Serrana
(I ± Error estándar de las medias).

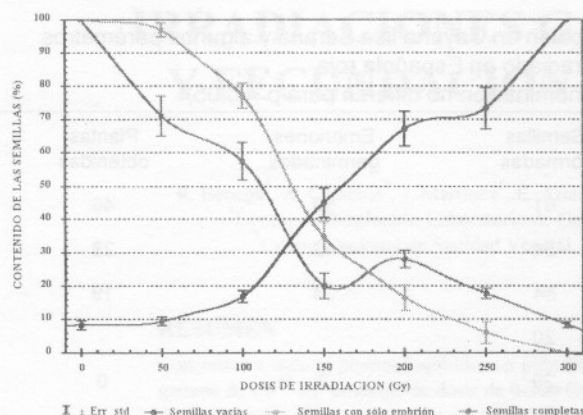


Figura 2

Efecto del polen irradiado con rayos gamma en Cayena lisa Serrana sobre el contenido de las semillas formadas en Española roja.

vamente diferentes a los obtenidos con las diferentes dosis de irradiación (tabla 1). Sin embargo, existió un decrecimiento en el número total de semillas formadas, embriones y plántulas regeneradas. Dosis superiores a 100 Gy no resultaron favorables tanto para la germinación de los embriones como para la regeneración de las plántulas. Benega et al. (1996) no obtuvieron diferencias significativas en los estudios realizados sobre la viabilidad *in vitro* del polen en dos cultivares de piña a dosis de 0 a 1 kGy. Sin embargo, ellos plantearon que se observó un decrecimiento tanto en los valores de viabilidad como en la longitud del tubo polínico en dosis superiores a 1 kGy y un decrecimiento absoluto a 6 kGy.

El efecto de las diferentes dosis de irradiación fue más marcado en el contenido de las semillas obtenidas por polinización con polen irradiado (Fig. 2). El incremento de las dosis de irradiación provocó un decrecimiento en los porcentajes de semillas completas ($r = -0,90$, $y = 88,03 - 0,30 \cdot \text{dosis}$) y sólo con embrión ($r = -0,94$, $y = 106,39 - 0,39 \cdot \text{dosis}$). Efecto contrario se observó al analizar el porcentaje de semillas vacías ($r = 0,93$, $y = -2,41 + 0,31 \cdot \text{dosis}$), el cual se vio favorecido por incrementos en las dosis de irradiación. Similares resultados se obtuvieron en manzano y cacao (Zhang y Lespinasse, 1991 y Falque et al. 1992).

En general, los estudios realizados permitieron conocer la influencia de las irradiaciones gamma sobre la frecuencia de división del núcleo generativo en granos de polen de piña y se obtuvieron las primeras plántulas a partir de las fecundaciones con polen irradiado. Algunas plántulas regeneradas en las diferentes dosis de irradiación presentaron hojas pequeñas y finas e internudos cortos. Los análisis citogenéticos o isoenzimáticos pudieran demostrar la inducción de plantas haploides o de doble haploides en piña, tal como se lograron en otras especies (Zhang y Lespinasse, 1991; Falque et al. 1992 y Meynet et al. 1994).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ARIAS, E., BENEGA, R., ISIDRON, M., y otros, Tinción de núcleos polínicos en piña para evaluar su división *in vitro* en programas de mejoramiento, Cultivos Tropicales 18(1):(1997)24-26.
- [2] BENEGA, R., VICIEDO, L., MARTINEZ, J. y otros, Effect of gamma irradiations on pineapple pollen germination and tube growth, Fruits 51(6):(1996)425-428.
- [3] DORE, C., Obtention de plantes haploïdes de chou cabus (*Brassica oleracea* L ssp *capitata*) apres culture *in vitro* d'ovules pollinisés par du pollen irradié, CR Acad Sci Paris Sér III, (1989)729-734.
- [4] FALQUE, M., KODIA, A.A., SOUNIGO, O., y otros, Gamma irradiation of cacao (*Theobroma cacao* L.) pollen: Effect on pollen grain viability, germination and mitosis and on fruit set, Euphytica 64:(1992)167-172.
- [5] GRANT, J.E., PANDYE, K.K., WILLIAMS, E.G., Pollen nuclei after ionizing irradiation for egg transformation in nicotiana, N.Z.J. Bot. 18:(1980)339-341.
- [6] MEYNET, J., BARRADE, R., DUCLOS, A., SIADOUS, R., Dihaploid plant of roses (*Rosa x hybrida*, cv 'Sonia') obtained by parthenogenesis induced using irradiated pollen and *in vitro* culture of immature seeds, Agronomie 2:(1994)169-175.
- [7] MURASHIGE, T., SKOOG, F., A revise medium for rapid growth and bio-assay with tobacco tissue cultures, Physiol Plant 15:(1962)473-497.
- [8] RAQUIN, C., Induction of haploid plants by *in vitro* culture of petunia ovaries pollinated with irradiated pollen, Z. Pflanzenzüchtg 94:(1985)166-169.
- [9] WEE, Y.C., RAO, A.N., Ananas pollen germination. Grana. 18:(1979)33-39.
- [10] ZHANG, Y.X., LESPINASSE, Y., Pollination with gamma-irradiated pollen and development of fruits, seed and parthenogenetic plants in apple, Euphytica 54:(1991)101-109.

SUSTITUCION DEL YODO 131 POR TECNECIO 99M EN LA APLICACION DE RADIOTRAZADORES EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

D. Aguila Manresa, J. Griffith Martínez

Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras, La Habana, Cuba

RESUMEN

Se realiza un estudio del comportamiento de tecnecio 99m para conocer si es posible su uso como trazador físico en la evaluación del cristalizador de masacocida C o de tercera. Después de resultados positivos se hizo un estudio comparativo de las tasas de dosis provocadas por el empleo del yodo 131 y del tecnecio 99m en esta instalación azucarera. Se concluyó que el tecnecio 99m es un sustituto obligado del yodo 131 por ser un radiotrazador con mejores características radiológicas para poder ser utilizado en una industria alimenticia como la industria azucarera.

THE SUBSTITUTION OF IODINE 131 BY TECHNETIUM 99M IN THE APPLICATION OF RADIOTRACERS IN THE SUGAR CANE INDUSTRY

ABSTRACT

A study of the behavior of technetium 99m is performed to know if it is possible its use as radiotracer in the evaluation of massecuite crystalizer C or of third. After positive results, it was done a comparative study of the measured dosis provoked by the use of iodine 131 and of technetium 99m on this sugar cane installation. We reached the conclusion that technetium 99m is an obliged substitute of iodine 131 because it is a radiotracer with better radiologic characteristics to be used on the food-production industry, for example in the sugar cane industry.

Key words: radioactive tracer logging; iodine 131; technetium 99; sugar cane; industry; crystallization; residence half-time.

INTRODUCCION

Hasta mediados de la década de los 80, la mayoría de los trabajos relacionados con la aplicación de los radiotrazadores en la industria azucarera cañera utilizaban preferentemente el ^{131}I [1-3]. En esa época el Grupo de Aplicaciones de las Técnicas Nucleares del Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras, comenzó a aplicar los radiotrazadores empleando también el ^{131}I como radiotrazador en los estudios de los procesos de cristalización en las diferentes instalaciones ubicadas con este propósito en la industria azucarera cubana [4, 5].

Sin embargo, la posterior inclusión del ^{131}I en el grupo B de radiotoxicidad limitó su uso en una industria alimenticia como la azucarera y planteó la disyuntiva de buscar otro radiotrazador con características más adecuadas para estos trabajos. Además impuso la necesidad de almacenar por medidas de protección radiológica, durante las pruebas industriales los productos contaminados (miel y azúcar) durante períodos que excedían los establecidos por las fábricas de azúcar (≈ 2 meses), creando interrupciones en el flujo tecnológico de todo el proceso industrial.

La elección preliminar del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ se debió a sus datos nucleares y radiológicos más favorables y principalmente porque la primera elución de este generador constituía un desecho para las aplicaciones médicas, por su contenido relativamente alto en alúmina (proveniente de la columna de intercambio iónico) y por un exceso del ^{99}Tc que interfiere en el rendimiento de marcaje de los radiofármacos empleados para los diferentes tipos de tratamiento en cuestión [6]. Sin embargo, evaluar una instalación como el cristalizador de agotamiento de masacocida de tercera empleando $^{99\text{m}}\text{Tc}$ podía confrontar dificultades por los tiempos de residencia relativamente largos de esta instalación (>12 horas) superiores al $T_{1/2}$ del radiotrazador, y porque los estudios previos realizados sobre el comportamiento del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en las etapas de clarificación y evaporación de los jugos de caña [7] no podían extrapolarse a los procesos de cristalización por las diferencias existentes entre estas operaciones unitarias.

El cristalizador de agotamiento de masacocida de tercera es una instalación azucarera que se diseña para que impere un determinado patrón de flujo (cercano al flujo en pistón) y un tiempo de residen-

cia en concordancia con sus dimensiones geométricas y la velocidad del flujo, que garanticen el crecimiento de los cristales sin la reproducción de éstos en la última etapa del proceso de cristalización evitando distorsiones en el fluido que propicien la presencia de zonas muertas o canalizaciones en el fluido, y en este sentido el empleo de los radiotrazadores combinado con la técnica del estímulo-respuesta puede brindar una información muy valiosa sobre las características hidrodinámicas de estas instalaciones [8].

Comoquiera que era necesario evaluar si el ^{99m}Tc cumplía los requisitos de trazador en este medio de acuerdo con [9], se emplearon conjuntamente ambos trazadores en la instalación (asumiendo el ^{131}I como trazador ideal según los resultados de otros autores [8, 10]), y si se alcanzaban resultados similares que avalaran el uso del ^{99m}Tc como trazador (objetivo preliminar del trabajo), evaluar después ambos trazadores por separado en la misma instalación para estimar las tasas de dosis que individualmente provocaban durante su aplicación y obtener datos experimentales que justificaran la sustitución del ^{131}I , que constituye el principal objetivo del presente trabajo.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizó como medio de marcaje: solución radiactiva de ^{99m}Tc sin portador en forma de pertecnetato de sodio con una actividad de 18,5 GBq, procedente de una primera elución de un generador radioisotópico de ^{99}Mo - ^{99m}Tc y solución radiactiva de ^{131}I con portador en forma de yoduro de sodio con una actividad de 370 MBq, tanto en la experiencia en conjunto para evaluar el comportamiento del ^{99m}Tc en el cristalizador, como por separado para la estimación de las dosis que individualmente ambos creaban.

El hecho de que la actividad inyectada del ^{99m}Tc superara en 50 veces a la del ^{131}I respondió a la necesidad de asegurar que al final de la experiencia (las últimas muestras se toman a las 36 horas), teniendo en cuenta el decaimiento de ambos, se alcanzarán estadísticas de conteo del primero (^{99m}Tc) superiores como mínimo en tres veces la raíz del segundo (^{131}I) de acuerdo con criterios establecidos al efecto [11] y teniendo en cuenta la mayor eficiencia del detector para el ^{99m}Tc .

Para la inyección, la solución de ambos trazadores se mezcló homogéneamente (muestras aleatorias mostraron actividades específicas iguales) con 1 kg de masacocida y se añadió de una sola vez en la entrada normal de alimentación de masacocida en

la instalación. La duración de la adición no fue superior a los 30 segundos por lo que teniendo en cuenta el tiempo de residencia promedio de esta instalación puede considerarse que se alcanzó una inyección en disparo muy cercana a una función delta (s) de Dirac [4].

Las tomas de muestras se tomaron periódicamente a la salida de la instalación con un tomamuestra que eliminaba la posibilidad de introducción de perturbaciones en el fluido de masacocida, controlándose además el flujo y el régimen de temperatura durante toda la experiencia.

El recuento de la actividad en las muestras se realizó en un analizador multicanal (1024 canales) tipo Canberra con detector de centelleo de NaI(Tl) de 63x63mm, con una resolución de un 9% para la línea gamma de 661 keV del ^{137}Cs , suficiente para que de forma nítida se resuelvan las líneas analíticas del ^{99m}Tc (140 keV) y del ^{131}I (364 keV). El espectrómetro se calibró con fuentes gamma patrones resultando lineal en todo el espectro energético empleado.

Para las mediciones del nivel de radiaciones gamma se utilizó el dosímetro universal RKP-1 de la firma POLON graduado en mrem/h previamente calibrado para estos ensayos. Los valores de las tasas de dosis suministrados por el dosímetro fueron convertidos en $\mu\text{Sv/h}$ para compararlos con los valores en los que actualmente se expresa esta magnitud.

Para el control radiológico del trabajo se tomaron muestras de miel final y de azúcar C o semilla a partir de la centrifuga, así como azúcar comercial, para separar aquellos lotes que presentaran velocidades de conteo superiores al fondo natural y establecer la correspondiente zona de vigilancia en el área destinada al almacenamiento temporal de este producto.

RESULTADOS Y DISCUSION

Estudio del comportamiento del ^{99m}Tc en la evaluación del cristalizador de masacocida C

Las curvas de distribución de tiempo de residencia (DTR) normalizadas obtenidas a la salida del cristalizador fueron similares para ambos isótopos (Fig.1), lo cual en primera instancia nos inclinó a suponer que el comportamiento del ^{99m}Tc como trazador físico en el sistema es semejante a la del ^{131}I normalmente utilizado en este tipo de investigación.

Partiendo de trabajos anteriores [4, 5], asumimos que el patrón de flujo del fluido de masacocida en

este cristizador se asemejaba a un flujo disperso en pistón, y sobre la base de programas confeccionados al efecto en una microcomputadora TI 99/4A se calcularon los tiempos de residencia promedios (τ), la dispersión de la distribución (σ^2) y los módulos de dispersión (D/uL) a partir de los datos experimentales de las curvas DTR para ambos isótopos.

Los valores de estos parámetros se muestran en la tabla 1, en cuyo cálculo se tomó en consideración

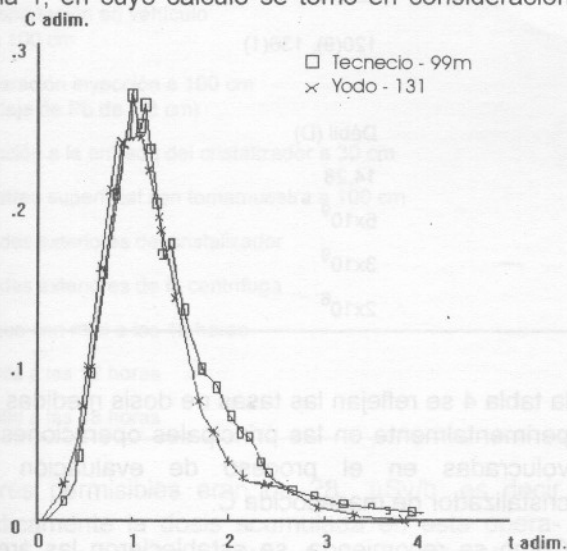


Figura 1
DTR del cristizador de agotamiento.

la mutua interferencia radiométrica de ambos radionúclidos debido al procesamiento manual empleado.

Así, la posible interferencia del ^{131}I , producto de la dispersión Compton de su línea gamma de 364 keV sobre el fotopico de 140 keV del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ se evaluó introduciendo un factor de corrección k_1 a través de la expresión:

$$K_1 = \frac{\text{conteos } ^{131}\text{I}_{(364)}}{\text{conteos } ^{131}\text{I}_{(140)}}$$

donde conteos $^{131}\text{I}_{(364)}$ y conteos $^{131}\text{I}_{(140)}$, son las áreas en las regiones de 364 y 140 keV respectivamente que se obtienen de una solución patrón de ^{131}I medida en las mismas condiciones que las muestras analizadas.

Por otra parte, en la medición del ^{131}I , la corrección respecto a la influencia del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (que aunque posee menor energía gamma al utilizarse con mayor actividad que el ^{131}I , puede provocar un efecto del tipo *pile up*) se evaluó realizando una segunda medición de las muestras al cabo de las 24 horas, tiempo suficiente para casi el total decaimiento del

Tabla 1
Principales parámetros de las curvas DTR obtenidas con $^{99\text{m}}\text{Tc}$ y ^{131}I

Parámetros de distribución	Tecnecio-99m		Yodo-131	
	Sin correc.	Con correc.	Sin correc.	Con correc.
	1	2	3	4
Media (τ) horas	12,36	12,15	12,94	13,05
Dispersión (σ^2)	16,75	17,10	14,69	13,83
Disp. norm. (σ_0)	0,1097	0,1159	0,0876	0,0812
Mod. disp. (D/uL)	0,0067	0,0060	0,0038	0,0033

Tabla 2
Hipótesis estadística y su verificación

Combinación			Combinación		
Prueba "F"			Prueba "T"		
F	Calc.	Teor.	T	Calc.	Teor.
F(1,2)	1,02	2,6	T(1,2)	0,261	2,16
F(3,4)	1,05	2,6	T(3,4)	0,162	2,16
F(1,3)	1,14	2,6	T(1,3)	0,778	2,16
F(2,4)	1,23	2,6	T(2,4)	0,936	2,16

(N= 14; G1= 13; α = 0,05)

Tabla 3
Datos nucleares y radiológicos del ^{99m}Tc y ^{131}I [13]

Características	^{131}I	^{99m}Tc
Nucleares		
$T_{1/2}$, h	193,4	6,02
$E_{x,\gamma}$ (%), keV	284(6), 365(82), 637(80)	18(6), 21(1), 141(89)
$E_{\max\beta}$ (%), keV	248(2), 334(7), 606(90)	—
e^- , keV	48(4), 330(2)	120(9), 136(1)
Radiológicas		
Radiotoxicidad	Fuerte (B)	Débil (D)
$K_{\gamma,\text{H}}$ Gy 2 /GBq.h	49,80	14,28
LAI Inh., Bq/A	2×10^6	6×10^9
LAI Ing., Bq/A	1×10^6	3×10^9
LCDA, Bq/m 3	700	2×10^6

^{99m}Tc , obteniéndose de esta forma un espectro casi puro del ^{131}I . El factor de corrección k_2 en este caso será:

$$K_2 = \frac{\text{conteos } ^{131}\text{I}_{(24\text{h})}}{\text{conteos } ^{131}\text{I}_{(0)}}$$

Como puede apreciarse de dicha tabla, los valores de los parámetros en todos los casos están muy cercanos entre sí y la comprobación estadística sobre la base de las pruebas "T" y "F" (tabla 2) mostró que no existen diferencias significativas entre los tiempos de residencia promedios y las dispersiones de distribución, de lo que se infiere que el ^{99m}Tc puede sustituir como trazador al ^{131}I en este tipo de evaluación.

Comparación de las tasas de dosis provocadas por el empleo por separado del ^{99m}Tc y el ^{131}I

La tabla 3 muestra los principales datos nucleares y radiológicos de ambos trazadores. Como se observa, los datos del ^{99m}Tc justificaron preliminarmente su elección desde el punto de vista de la protección radiológica para su estudio como trazador, por su menor período de semidesintegración (6,02 h), una energía gamma de radiación relativamente baja (140 keV), baja radiotoxicidad y límite anual de incorporación y límite derivado de concentración en aire mayores.

Se emplearon actividades similares a las utilizadas en la evaluación conjunta descrita más arriba. En

la tabla 4 se reflejan las tasas de dosis medidas experimentalmente en las principales operaciones involucradas en el proceso de evaluación del cristizador de masacocida C.

Como se recomienda, se establecieron las áreas: controlada (cristizador, el tanque de miel final, la centrifuga y el mezclador donde se prepara la semilla a partir del azúcar C); restringida (a la entrada del cristizador $\approx 4 \text{ m}^2$, donde se realiza la inyección y por lo tanto constituye la de mayor riesgo de exposición) y la supervisada o vigilada situada a la salida del azúcar comercial. En esta área, después de concluidas las experiencias, se tomaron muestras de azúcar ensacada durante un período de 60 días hasta tanto los niveles de actividad no alcanzan los valores del fondo normal previamente establecido.

Para la discusión de los resultados de estas evaluaciones se analizó el Decreto Nro. 137 Reglamento para la seguridad durante la transportación de las sustancias radiactivas y el Decreto Nro. 142 Reglamento para el trabajo con sustancias radiactivas y otras fuentes de radiaciones ionizantes, así como otras publicaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica sobre el tema [13, 14].

Del análisis de los datos plasmados en la última tabla, se observa que durante la transportación tanto manual como en vehículo, a una distancia de 30 cm en ningún caso se sobrepasó el límite impuesto por las normas cubanas (7,5 $\mu\text{Sv/h}$ para el público). En la operación de inyección, sólo para el ^{99m}Tc , a los 30 cm se supera la dosis permisible para los trabajadores ocupacionalmente expuestos (11 $\mu\text{Sv/h}$), aunque cuando se realizaron estas experiencias los

Tabla 4
Tasas de dosis provocadas por el ^{99m}Tc y ^{131}I ($\mu\text{Sv/h}$)

OPERACION	^{131}I	^{99m}Tc
Fondo	0,01	0,01
Transportación manual (Fuente dentro del contenedor)		
En la superficie	1,0	12,0
A los 30 cm	0,4	3,5
Transportación en vehículo		
A los 100 cm	0,01	0,01
Preparación inyección a 100 cm (blindaje de Pb de 1,3 cm)	0,6	5,7
Inyección a la entrada del cristizador a 30 cm	2,9	25,0
Muestreo superficial con tomamuestra a 100 cm	0,01	0,01
Paredes exteriores del cristizador	0,2	0,1
Paredes exteriores de la centrífuga	0,3	0,1
Tanque con miel a las 48 horas	2,0	0,06
Semilla a las 12 horas	1,0	0,1
Semilla a las 48 horas	0,8	0,01

valores permisibles eran de 28 $\mu\text{Sv/h}$, es decir prácticamente la dosis acumulada en esta operación se encontraba dentro de lo establecido. El tiempo tan pequeño empleado en la inyección evitó la sobreexposición del personal encargado de realizar esta operación, y como se recomienda, éste realiza posteriormente actividades donde las dosis son insignificantes (la medición). Durante las restantes operaciones (muestreo, monitoreo del cristizador, de la centrífuga, del tanque de miel y de la semilla), los niveles de radiación gamma estuvieron, especialmente para el ^{99m}Tc , muy por debajo de los permisibles para el público (0,5 $\mu\text{Sv/h}$), no así para el ^{131}I como se aprecia por las mediciones realizadas en el tanque de miel y en el área de preparación de la semilla, reflejando ello lo conveniente de la sustitución del ^{131}I por el ^{99m}Tc .

La situación se tornó aún más decisiva a favor del ^{99m}Tc en el monitoreo que a partir de las 48 horas se le realizó al azúcar comercial. En la experiencias con ^{99m}Tc , al cabo de dicho tiempo, muestras de ≈ 100 g no presentaban prácticamente indicios de contaminación (en algunos casos sólo 2 veces por encima del fondo) y el flujo tecnológico que incluye también el almacenamiento y despacho del azúcar no resultaba afectado por este concepto. Para el ^{131}I , los niveles de contaminación se mantuvieron altos y sólo al cabo de ≈ 60 días de almacenamiento del azúcar comercial, los niveles de actividad eran similares a los del fondo imperante en la fábrica, por esta razón durante ese tiempo el área donde

temporalmente se almacenó este producto, formó parte de la zona controlada y se tomaron medidas para evitar el acceso del público a dicho lugar.

Respecto a la miel final, donde se concentraba la mayor actividad del ^{131}I (porque al igual que el ^{99m}Tc el radiotrazador no pasa a formar parte de la estructura del cristal de azúcar, sacarosa, sino que permanece en la parte líquida de la masacocida, la miel como se ha demostrado [15]), se tuvo que cancelar por un tiempo la venta para alimento animal del lote de este producto contaminado, lo que ocasionó dificultades a la fábrica por la necesidad de almacenar el lote y obstrucciones en el flujo normal de las operaciones, las cuales fueron completamente superadas a partir de que el Grupo de Aplicaciones de las Técnicas Nucleares comenzó a emplear el ^{99m}Tc en las evaluaciones industriales.

CONCLUSIONES

1. No hay diferencias significativas, por la forma de las curvas DTR y estadísticamente, en los valores de los tiempos de residencia promedios determinados con el empleo como radiotrazadores de ^{99m}Tc y de ^{131}I en la evaluación de un cristizador de agotamiento de masacocida C y por lo tanto en estos trabajos el ^{99m}Tc puede ser un sustituto adecuado del ^{131}I como trazador físico.
2. Las tasas de dosis del empleo del ^{99m}Tc para el público, a medida que transcurre la experiencia se hacen cada vez menores, disminuyendo notablemente el riesgo de exposición de los traba-

jadores de la fábrica en comparación con los valores que provoca la utilización del ^{131}I , especialmente en el almacenamiento de los productos finales.

3. La sustitución del ^{131}I por el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ofrece las ventajas de que no se interrumpe el flujo tecnológico normal establecido por la fábrica en lo referente al almacenamiento de los productos finales (miel y azúcar comercial) y disminuyen considerablemente los riesgos por ingestión de estos productos al no presentar los mismos niveles de contaminación apreciables del trazador al finalizar las experiencias, lo que justifica su sustitución obligada en la aplicación de los radiotrazadores en una industria alimenticia como la industria azucarera.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BASCH, J.K., Application of radioisotopes to sugar factory control, Proc. 42th annual Cong. SASTA (1968).
- [2] BRAUER, L.D. Radioisotopes a versatile tool in sugar cane research. Int. Sugar Journal. 57, No. 677 (1965) 127.
- [3] ROUILLARD, E.E., SMITH, I.A., A look of tracer testing in sugar industry. Proc. SASTA (1981) 75-81.
- [4] GRIFFITH, J, DÍAZ, O. Características de flujo de los cristalizadores continuos en una fábrica cubana de azúcar empleando

el método de los trazadores radiactivos (sóster),. ISSCT XVIII Congress, La Habana, Cuba (1983).

[5] MESA, R., GRIFFITH, J., Determinación de los tiempos de residencia y patrones de flujo en el cristizador cassette RETO, Cuba-Azúcar (1985)46-49.

[6] ELUMATIC III Generador estéril de Tecnecio-99m. Instrucción para su utilización, CEA, SORIN, France.

[7] MESA, R., GRIFFITH, J., Comportamiento del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en forma de pertecnato de sodio en los jugos de caña durante la evaporación y clarificación, Cuba-Azúcar (1986).

[8] SMITH, S.W., BASON, J.K., SMITH, I.A., Radioactive tracer investigation of the flow characteristics in sugar crystallizers, Int. Journal Appl. Rad. & Isotopes, 28 (1977)839-847.

[9] IAEA Guidebook on Radioisotope Tracer in Industry, Technical Report Series, No. 316, Vienna (1990).

[10] CASTAÑEDA, J., FERNÁNDEZ, R., Evaluación de un cristizador para masacocidas de agotamiento, Memorias ATAC Cuba (1979)178-208.

[11] IAEA Practical aspects of operating a neutron activation analysis laboratory IAEA TECDOC-564, Vienna (1990).

[12] HOMERO, B. P., Curso regional de capacitación sobre sistemas de control nucleónico y técnicas de trazadores en la industria minera y metalúrgica, Comisión Chilena de Energía Atómica, Oct. (1994).

[13] Safety Series Nro 40, Safe use of radioactive tracers in industrial processes, IAEA, Vienna (1974).

[14] IAEA International basic safety standards for protection against ionizing radiation and the safety of radiation sources, Safety Series No.115, Vienna (1994)

[15] GRIFFITH, J., MESA, R., g. M., Método radioisotópico para la determinación del rendimiento de cristales en masas cocidas, Memorias XII Conf. Química., Univ. Oriente (1987)155-159.

BAJAS DOSIS DE RADIACION Y RESPUESTAS ADAPTATIVAS

Jesús Soto Torres, Ana Martín Sañudo
Cátedra de Física Médica,
Universidad de Cantabria, España.

INTRODUCCION

Existe en la actualidad una considerable polémica en torno a la existencia de un umbral como límite inferior de producción de determinados efectos por parte de las radiaciones ionizantes. Los partidarios de la no existencia de un umbral afirman que la producción de un efecto, tumores radioinducidos en general, tiene lugar hasta dosis cero como una extrapolación de lo que ocurre a dosis altas. Los partidarios de la existencia de umbral afirman, en cambio, que existe una zona de dosis próximas a cero en la que no se producen los efectos anteriores.

Quizás debido a la presión ejercida por una opinión pública muy adversa a las radiaciones, los organismos reguladores de la radioprotección parecen coincidir con la opinión de no existencia de umbral y, consecuentemente, se promulgan recomendaciones o normas en las que cada vez es menor la dosis máxima admisible. Este es el caso de las conocidas normas ALARA, dosis tan bajas como sea posible, o las recomendaciones de la International Commission on Radiological Protection de 1990 [1], en las que se fija como límite para personal profesionalmente expuesto una dosis efectiva de 20 mSv/año, incluyendo la debida a radiación de origen natural.

A pesar de lo anterior, el hecho evidente es que no puede comprobarse la inducción de efectos tales como la generación de tumores para dosis de radiación suficientemente bajas, ya que en este intervalo de dosis las frecuencias de estos efectos son indistinguibles de los que se producen de manera natural. Más aún, la existencia de una radiactividad ambiental induce a pensar que los organismos vivos han desarrollado mecanismos de adaptación a las dosis bajas que pueden generar efectos contrarios a los que se producen a dosis altas.

Esta interesante posibilidad ha llevado a realizar distintos estudios sobre los efectos de las bajas dosis de radiación. En este trabajo hemos hecho

un breve resumen de los resultados encontrados a niveles molecular y celular, siguiendo el realizado por la Comisión de las Naciones Unidas para el estudio de los efectos de las radiaciones atómicas [2].

GENERALIDADES SOBRE EFECTOS DE BAJAS DOSIS DE RADIACION

El hombre está expuesto a una dosis de radiación que se estima, en promedio, en 2 mSv/año. Las principales componentes de esta dosis son la debida a la radiación cósmica, la correspondiente a la radiación gamma procedente del suelo y la originada por la inhalación de radón. En diferentes regiones principalmente debido a factores como la altura sobre el nivel del mar y el tipo de suelos, se producen dosis de radiación menores o mayores que el valor medio indicado. En especial, en las llamadas regiones de alto nivel de radiación las dosis recibidas por la población pueden llegar a ser hasta 25 veces mayores que el valor promedio.

Debido a estos hechos, durante muchos años se ha considerado la posibilidad de que bajas dosis de radiación produzcan cambios en células y organismos que mejoren sus condiciones de adaptación, tanto en respuesta a dosis elevadas como a otros agentes ambientales. La existencia de esta radiactividad ambiental de origen natural lleva a suponer una adaptación de los organismos vivos y determinadas respuestas cuando las dosis son moderadamente superiores al valor promedio. Así, los organismos inferiores reaccionan aumentando su velocidad de reproducción cuando reciben dosis de valor superior al ambiental [3].

La misma respuesta adaptativa y estimuladora a la proliferación se encuentra en semillas y plantas [4]. Los estudios sobre este tema han sido muy extensos e, incluso, se han utilizado las radiaciones para la mejora de la producción agrícola extensiva.

Determinadas discrepancias entre las extrapolaciones de los efectos de altas dosis de radiación y las observaciones realizadas sobre incidencia de varias formas de cáncer [5],

inducen a considerar que las bajas dosis producen un efecto de protección. En células de mamífero expuestas a bajas dosis de radiación se encuentra un daño menor que el esperado cuando son sometidas a altas dosis, cancerígenas. Esta respuesta a las bajas dosis de radiación ionizante se conoce como respuesta adaptativa.

Dentro de un contexto más amplio, es también conocido que ocurren cambios semejantes a los inducidos por la radiación como consecuencia de modificaciones metabólicas o de la exposición a un conjunto de agentes físicos o químicos. Estos cambios se conocen como respuesta al estrés.

El estudio de los efectos de las bajas dosis de radiación se realiza en varias direcciones que tienen en común su interés por la modificación de los mecanismos de la carcinogénesis. Son característicos los estudios sobre respuesta adaptativa celular, sobre mecanismos de control del ciclo celular inducido por la radiación, sobre activación de genes y su expresión y sobre efectos en el sistema inmunitario.

RESPUESTA ADAPTATIVA CELULAR

La carcinogénesis es un proceso de múltiples etapas que puede ser dividido en tres fases: iniciación del cáncer, desarrollo del tumor y progresión tumoral. La respuesta adaptativa a baja dosis de radiación parece actuar introduciendo modificaciones en las tres fases.

La respuesta adaptativa de una población celular se estudia exponiendo las células a una dosis baja de radiación, dosis condicionante, y después a una dosis alta, dosis de prueba. Los efectos producidos en la población celular son comparados con los que se encuentran cuando las células se someten únicamente a la dosis de prueba, y no a la dosis condicionante.

La experiencia anterior se ha realizado con una gran variedad de tipos de células de mamífero incluyendo linfocitos, linfoblastos, espermatoцитos y fibroblastos. Los resultados encontrados indican que la dosis condicionante induce una mayor producción de las proteínas implicadas en la regulación del ciclo celular, una mayor expresión de los genes responsables de la proliferación celular [6] y una mayor síntesis de enzimas reparadoras del ADN [7].

Los estudios hechos con linfocitos humanos, los más numerosos, señalan una significativa disminución del número de aberraciones cromosómicas [8], y también de la frecuencia de micronúcleos en las células condicionadas [9].

Tanto el número de aberraciones cromosómicas como la frecuencia de micronúcleos son indicativos de la posibilidad de cancerización de las células expuestas. En ambos casos el efecto depende de la fase del ciclo celular en la que se aplican tanto la dosis condicionante como la dosis de prueba y también de la composición del medio de cultivo [10].

Es interesante mencionar aquí que en algunos estudios realizados *in vivo* como consecuencia del accidente de Chernobyl se encuentra una respuesta adaptativa mayor que la obtenida *in vitro* para el mismo tipo de células [11].

Al igual que la frecuencia de aberraciones cromosómicas, se ha estudiado la proporción de células supervivientes después de una dosis de prueba con o sin dosis condicionante previa. Los resultados parecen indicar [12] que se produce un aumento en la supervivencia, y también en la capacidad proliferativa, de las células previamente tratadas con una dosis baja. Del mismo modo parece disminuir la frecuencia de mutaciones espontáneas en células condicionadas.

De la misma manera que las radiaciones ionizantes, otros agentes físicos o químicos inducen una mayor resistencia a la subsiguiente exposición a dosis elevadas de radiación. Los agentes físicos y químicos que producen estos efectos son, entre otros, la radiación UV, los metales pesados, los mutágenos químicos y otros con propiedades oxidantes como el peróxido de hidrógeno [13]. Cuando se usan estos agentes como condicionantes y se usa una dosis alta de radiación como prueba, el fenómeno se llama adaptación cruzada.

Igual que anteriormente, la adaptación cruzada protege contra los efectos de altas dosis de radiación. Esta protección se manifiesta en la reducción de la frecuencia de micronúcleos en linfocitos [14] y también en la disminución del número de roturas cromosómicas.

Se han realizado un cierto número de estudios para establecer los mecanismos mediante los que opera la adaptación cruzada. De ellos se desprende que la exposición a bajas concentraciones de oxidantes produce enzimas reparadoras del ADN, protegiendo las células de posteriores agentes que producen su rotura [15].

ACTIVACION DE GENES Y PRODUCCION DE PROTEINAS

La mayor parte de los cánceres, si no todos, comienzan por una mutación del ADN en una

sola célula, que se transforma en una célula modificada y carcinogénica, con una falta de control en el ciclo de reproducción y de diferenciación. El ciclo de división celular es un proceso cuyo control está influenciado por mecanismos de *feed back* que reconocen el estado de la célula, y en particular del ADN, para detectar posibles anomalías y detener el ciclo [16].

La respuesta de células de mamífero a mutágenos, incluyendo la radiación supone también la activación de genes responsables de la proliferación celular y de su control. La reacción más inmediata de las células expuestas a un mutágeno es el retraso de la división celular y se han identificado un cierto número de genes que inhiben aquellas [17]. Entre ellos están el de parada de la proliferación y el inducido por daño al ADN. El retraso en la proliferación celular se acompaña por el aumento de la expresión de genes que producen enzimas reparadoras del ADN [18].

De particular interés es la respuesta a la radiación de los miembros del gen proteína quinasa C (PKC) que tiene una función importante en la promoción tumoral y en la regulación de la proliferación [19]. La exposición a radiación de bajo LET aumenta la expresión de PKC mRNA con una clara relación dosis-efecto. La activación de PKC estimula la transcripción de los protooncogenes c-fos y c-jun que, sin embargo, puede ser regulada por la expresión de otros también producidos por la radiación, como la interleuquina [20].

Además de los anteriores, las bajas dosis de radiación activan la expresión de genes que pueden inducir la muerte por apoptosis, muerte celular programada genéticamente, en las células tumorales [21]. Los estudios de este tipo abren una interesante vía a la aplicación de las bajas dosis en la práctica clínica como agentes sensibilizadores de las células tumorales.

Un cierto número de agentes, incluyendo calor, radiación, metales pesados y agentes oxidantes, inducen el fenómeno conocido como respuesta al estrés. Esta respuesta está caracterizada por la producción en las células de una serie de proteínas específicas que realizan una función protectora [22].

Existe buena evidencia de que la respuesta al estrés puede identificarse con, o es la causa de, la respuesta hormética, la inducción de efectos beneficiosos mediante dosis pequeñas de agentes dañinos. Esta identificación está

avalada por la similitud de los agentes productores de ambas respuestas y por la común forma de actuación de todos ellos, por producción de proteínas para adaptación al daño [23].

A pesar de la concordancia entre los efectos producidos por distintos agentes, existen claras diferencias entre ellos [24]. Así, la expresión de los genes c-fos y c-jun, implicados en la regulación de la proliferación celular, se incrementa por las radiaciones ionizantes y por el choque térmico [25], mientras que los agentes químicos inducen el aumento de la expresión del gen beta-polimerasa que afecta a la transcripción del ADN [26].

Los productos sintetizados en respuesta a bajas dosis de radiación pueden ser identificados usando electroforesis en gel bidimensional. Mediante esta técnica se encuentra que la radiación induce una mayor expresión de una serie de proteínas mientras que inhibe la producción de otras [27]. Este tipo de comportamiento es semejante al producido por otros agentes como la radiación UV o el choque térmico, aunque las proteínas inducidas y reprimidas son diferentes en cada caso. Cuando el agente es la radiación ionizante, el efecto proteínico producido se identifica con la capacidad de reparación del daño potencialmente letal a las células por doble rotura de la cadena del ADN [28].

EFFECTOS SOBRE EL SISTEMA INMUNITARIO

Las bajas dosis de radiación pueden ejercer una acción sobre la fase de progresión tumoral a través del efecto sobre el sistema inmunitario. Se han realizado un buen número de estudios para caracterizar esta respuesta [29], y, aunque las conclusiones obtenidas presentan muchas lagunas, pueden destacarse algunos resultados de interés.

El mecanismo genérico de acción de las bajas dosis sobre el sistema inmune parece implicar al calcio intracelular y a la PKC seguido por la transcripción del gen c-fos y de la producción de interleuquina 2 para la activación de células T [30]. El mecanismo es semejante al que ocurre en la apoptosis causada por la proliferación celular [31], y tiene una dependencia con la dosis total recibida por el animal de experimentación.

Es bien conocido que la irradiación con dosis altas inhibe la respuesta inmunitaria. Sin

embargo, las experiencias realizadas por irradiación de linfocitos T y animales muestran que las dosis bajas mejoran la respuesta. Esta mejora se refleja en el cambio de la relación entre el número de células en el timo y en el espacio esplénico. La magnitud de este cambio es diferente de acuerdo con el estado nutricional del animal irradiado y así los ratones deprimidos inmunológicamente son más sensibles a los cambios de dieta.

Se ha demostrado un efecto citotóxico de células T irradiadas sobre células tumorales. Las bajas dosis de radiación se han usado para aumentar el efecto de inmunización de animales a fin de reducir el tamaño de fibrosarcomas inducidos. Los resultados obtenidos muestran un grado variable de inmunización con aumento, en todos los casos, de las células T_s [32].

También ha sido probado el efecto de bajas dosis en otro tipo de tumor experimental, carcinoma de células de Lewis, observándose una reducción significativa del número de nódulos en los animales irradiados [33]. Igualmente ha sido probada la reducción en el desarrollo tumoral en el carcinoma de células escamosas [34].

Los estudios estadísticos sobre poblaciones humanas muestran conclusiones difíciles de interpretar indicando tanto disminución como aumento en la frecuencia de tumores en poblaciones expuestas a bajas dosis [35]. Estos datos contradictorios aparecen también cuando se estudia la respuesta a las bajas dosis de la esperanza de vida o la incidencia de otras enfermedades [36]. Las razones de estos datos contradictorios son metodológicas, debido al escaso poder estadístico de los estudios, y de raíz metabólica, ya que los anteriores efectos están influidos por la dieta, relacionada a su vez con los fenómenos de estrés por hipoxia y por privación de glucosa [37].

El estudio más interesante compara los niveles de células secretoras de interleuquina 2 en dos regiones de China, una de ellas de alto nivel de radiación natural debido al radón ambiental. Se encuentra que los habitantes de esta región poseen niveles de células excretoras significativamente mayores que los de las regiones de bajo nivel de radiación [38].

Las bajas dosis de radiación han sido usadas en la práctica clínica para el tratamiento de linfoma no-Hodgkin usando irradiación total o parcial con rayos X. Los resultados obtenidos indican respuestas mejores con irradiación parcial con un alto porcentaje de remisión completa o parcial de los tumores [39].

CONCLUSIONES

A tenor de todo lo expuesto, parece evidente una acción de las bajas dosis de radiación sobre los mecanismos de carcinogénesis que afectan a las poblaciones celulares. El fenómeno de la respuesta adaptativa a estas dosis parece proporcionar a las células instrumentos para resistir la acción de dosis altas de radiación o de otros agentes. Esto se realiza por aumento de la producción de proteínas reparadoras del ADN, por aumento de la expresión de genes que controlan la proliferación o la muerte celular y por mejora de los mecanismos de actuación del sistema inmunitario.

Dentro de este contexto, la discusión sobre la existencia de umbral parece poder contestarse diciendo que para dosis bajas se producen unos efectos característicos, siendo los correspondientes a dosis elevadas muy improbables. Estos efectos tienen un carácter que puede ser beneficioso, identificándose con la hormesis. Desde este punto de vista son criticables las regulaciones que intentan limitar los valores de la dosis por debajo de la que se puede recibir por causas naturales.

En todo lo anterior se ha establecido un paralelismo entre los efectos de las radiaciones y los de otros agentes. La razón de ello ha sido exponer que no existe una especificidad en los efectos que producen las bajas dosis de radiación. En este sentido se hecha en falta una teoría que describa los mecanismos de acción en este rango de dosis, supuesto que la acción directa sobre el ADN celular es muy improbable. Cabe apuntar aquí que existe, en cambio, una acción sobre el medio celular, mediado por una acción sobre la membrana plasmática, que puede actuar en procesos tales como el de maduración del RNA.

BIBLIOGRAFIA

- [1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP Publication 60 (1990).
- [2] UNSCEAR 1994 REPORT, Adaptive responses to radiation in cells and organisms, Anexo B (1994).
- [3] PLANEL, H., CARATERO, C., CROUTE, F., Investigations on the biological effects of very low doses of ionizing radiations. En: Low Dose Irradiation and Biological Defense Mechanisms, Holanda. Ed. Elsevier Science Publishers (1992).
- [4] LUCKEY, T.D., Hormesis with ionizing radiation, Boca Raton, USA, CRC Press (1980).
- [5] COHEN, B.L., Test of the lineal no threshold theory of radiation carcinogenesis. En: Biological Effects of Low Level Exposure. Dose Response Relationships, E.J. Calabrese, Ed. Lewis Publishers, Boca, Raton, USA (1994).

- [6] ADAMS, G.E., CHAN, W.S., STRATFORD, I.J., Radiation and other stress responses and their relevance to cancer: some general features. En: *Low Dose Irradiation and Biological Defense Mechanisms*, Holanda, Ed. Elsevier Science Publishers (1992).
- [7] MC CLINTOCK, B., The significance of response of the genome to challenge, *Science* (1984) 226, 792-801.
- [8] WIENCKE, J.K., AFZAL, V., OLIVERI, G., Evidence that the H-3 thymidine-induced adaptative response of human lymphocytes to subsequent doses of X-rays involves the induction of a chromosomal repair mechanism, *Mutagenesis* (1986) 1, 375-380.
- [9] OLIVERI, G., BOSI, R., GRILLO, R., Interaction of low dose irradiation with subsequent mutagenic treatment. Studies with human lymphocytes. En: *Low Dose Irradiation and Biological Defence Mechanisms*, Holanda, Ed. Elsevier Science Publishers (1992).
- [10] SHADLEY, J.D., AFZAL, V., WOLFF, S., Characterization of the adaptative response to ionizing radiation induced by low doses of X-rays to human lymphocytes. *Radiat. Res.* (1987) 111, 511-517.
- [11] PILINSKAYA, M.A., DIBSKIY, S.S., PEDAN, L.P., Modification by dimethyl of cytogenetic damages in blood lymphocytes of children exposed to constant low-rate irradiation. *Cytology and Genetic* (1993) 27/4, 87-90.
- [12] SHADLEY, J.D., DAI, G., Cytogenetic and survival adaptative responses in G1 phase human lymphocytes, *Mutat. Res.* (1992) 265, 273-281.
- [13] DEMPSEY, B., Regulation of bacterial oxidative stress genes, *Annu. Rev. Genet.* (1991) 25, 315-337.
- [14] DOMINGUEZ, I., PANNEERSEVAM, E., ESCALZA, P., Adaptive response to radiation damage in human lymphocytes conditioned with hydrogen peroxide as measured by the cytokinesis-block micronucleus technique, *Mutat. Res.* (1993) 307, 135-141.
- [15] TUSCHL, H., KOVAC, R., ALTMANN, H., UDS and SCE in lymphocytes of person occupationally exposed to low level of ionizing radiation, *Health Phys.* (1983) 45, 1-7.
- [16] STUDZINSKI, G.P., Invited review - oncogenes, growth, and the cell cycle: an overview, *Cell Tissue Kinet* (1989) 22, 405-424.
- [17] FORNACE, A.J., Mammalian genes induced by radiation: activation of genes associated with growth control, *Annu. Rev. Genet.* (1992) 26, 507-526.
- [18] ZHANG, Q.M., YONEL, S., KATO, M., Multiple pathways for repair of oxidative DNA damages caused by X rays and hydrogen peroxide in *Escherichia coli*, *Radiat. Res.* (1992) 132, 334-338.
- [19] HALLAHAN, D.E., VIRUDACHALAM, S., SHERMAN, M.L., TNF gene expression is mediated by PKC following activation by ionizing radiation, *Cancer Res.* (1991) 51, 4565-4569.
- [20] ISHINARA, H., TSUNEOKA, K., DIMCHEV, A.B., Induction of the expression of the interleukine-1 beta gene in mouse spleen by ionizing radiation, *Radiat. Res.* (1993) 133, 321-326.
- [21] SOTO, J., MARTIN, A., COS, S., GONZALEZ-LAMUÑO, D., Inducción de factores de apoptosis en células tumorales humanas por bajas dosis de radón, *International Conference on Low doses of ionizing radiation*, IAEA, Sevilla (1997) 647-650.
- [22] SÇIANDRA, J.J., SUBJECK, J.R., HUGHES, C.S., Induction of glucose regulated proteins during anaerobic exposure and of heat shock proteins after re-oxygenation, *Proc. Natl. Acad. Sci., USA* (1984) 81, 4843-4847.
- [23] SMITH-SONNEBORN, J., The role of the stress protein response in hormesis. En: *Biological Effects of Low Level Exposures to Chemical and Radiation*, Boca Raton, Lewis Publishers (1992).
- [24] SIERRA-RIVERA, E., VOURHEES, G.J., FREEMAN, M.L., Gamma irradiation increases hsp-70 in CHO cells, *Radiat. Res.* (1993) 135, 40-45.
- [25] SHERMAN, M.L., DATTA, R., HALLAHAN, D.E., Ionizing radiation regulates expression of the c-jun protooncogene, *Proc. Natl. Acad. Sci., USA* (1990) 87, 5663-5666.
- [26] SUZUKI, K., WATANABE, M., MIYOSHI, J., Differences in effects of oncogenes on resistance to gamma rays, ultraviolet light and heat shock, *Radiat. Res.* (1992) 129, 157-162.
- [27] BOOTHMAN, D.A., BOUVARD, U., HUGHES, E.N., Identification and characterization of x-ray induced proteins in human cells, *Cancer Res.* (1989) 49, 2871-2878.
- [28] HUGHES, E.N., BOOTHMAN, D.A., Effect of caffeine on the expression of a major X ray induced protein in human tumour cells, *Radiat. Res.* (1991) 125, 313-317.
- [29] ANDERSON, R.E., WARNER, N.L., Ionizing radiation and the immune response, *Adv. Immunol.* (1976) 24, 215-235.
- [30] KARANTA, A., KONITNY, E., JONDAL, M., Mitogen stimulation increases c-fos and c-jun protein levels, AP-1 binding and AP-1 transcription activity, *Cell Signal* (1992) 4, 275-286.
- [31] WYLLIE, A.H., KERR, J.F.R., CURRIE, A.R., Cell death: the significance of apoptosis, *Int. Rev. Cytol.* (1980) 68, 251-306.
- [32] ANDERSON, R.E., TOKUDA, S., WILLIAMS, W.L., Low doses irradiation permits immunization of A/J mice with subimmunogenic numbers of Sal cells, *B.J. Cancer* (1986) 54, 505-509.
- [33] LI, X.V., LI, I.J., FU, H.Q., Effects of low dose radiation on pulmonary dissemination of Lewis cells carcinoma in mice, *Int. Symposium on Biological Effects of Low Level Exposures to Radiation and Related Agents*, Changchun, China (1993).
- [34] MIYAMOTO, M., SAKAMOTO, K., Anti tumour effect of total body irradiation of low doses in WHT/Ht mice, *Jpn. J. Cancer Clin.* (1987), 33/10, 1211-1220.
- [35] BOSI, A., OLIVIERI, G., Variability of the adaptative response to ionizing radiations in humans, *Mutat. Res.* (1989) 211, 13-17.
- [36] GILBERT, E.S., OMONHUNDRO, E., BUCHANAN, J.A., Mortality of workers at the Hanford site: 1945-1986, *Health Phys.* (1993) 64/6, 577-590.
- [37] JAMES, S.J., ENGER, S.M., PETERSON, W.J., Immune potentiation after fractionated exposure to very low doses of ionizing radiation and/or caloric restriction in autoimmune prone and normal C57B1/6 mice, *Clin. Immunol. Immunopathol.* (1990) 55, 427-437.
- [38] YAO, J., CHA, Y.R., LIN, Z.X., Effects of long term low level radiation on the immune system in human beings, *Intern. Symposium on Biological Effects of Low Level Exposures to Radiation and Related Agents*, Changchun, China (1993).
- [39] TAKAI, Y., YAMADA, S., NEMOTO, K., Antitumour effect of low dose total or half body irradiation and changes of the functional subset of peripheral lymphocytes in non-Hodgkin's lymphoma patients after TBI, *Int. Conference on Low Dose Irradiation and Biological Defense Mechanisms*, Kyoto, Japan (1992).

DOSIMETRIA PERSONAL Y PROTECCION RADIOLOGICA

Dr. Xavier Ortega Aramburu
Catedrático de la Universidad Politécnica de Cataluña
Director del Instituto de Técnicas Energéticas
de la Universidad Politécnica de Cataluña

ANTECEDENTES

La radioprotección, por ser una disciplina ligada a los conocimientos que conducen a la salvaguardia de la salud humana y de los seres vivos frente a los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, ha estado vinculada a lo largo de varias décadas al desarrollo de la dosimetría. Entendiendo ésta como la disciplina que trata de determinar la dosis o energía absorbida por la materia viva como consecuencia de su interacción con un campo de radiaciones con la finalidad de evaluar el riesgo de las radiaciones ionizantes sobre el organismo vivo.

Las técnicas metrológicas y el avance progresivo de los conocimientos de la interacción de las radiaciones ionizantes sobre el organismo humano han marcado las diversas etapas del desarrollo de esta disciplina que se caracteriza por sus permanentes cambios tendentes a alcanzar, mediante medidas lo más simple posible, el control del riesgo radiológico de los profesionales y del público en presencia de diversos campos de radiaciones de origen

natural o artificial. Las principales organizaciones internacionales que han elaborado recomendaciones en torno a las magnitudes dosimétricas, unidades y sistemas de medida son:

- ❖ International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU).
- ❖ International Commission on Radiological Protection (ICRP).
- ❖ United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).
- ❖ International Atomic Energy Agency (IAEA).

Asimismo cabe destacar el esfuerzo realizado por numerosos organismos de normalización ISO, ANSI, IEC,... y la colaboración de grandes laboratorios de investigación. Todos ellos han llevado a cabo una permanente labor de actualización de los conocimientos en el campo de la radiobiología y en el de las técnicas metrológicas.

EVOLUCION DE LAS MAGNITUDES Y UNIDADES DOSIMETRICAS

En razón a lo expuesto anteriormente, las magnitudes y unidades utilizadas en la dosimetría aplicada a la protección radiológica han evolucionado continuamente en las últimas

Tabla 1 - Evolución de las magnitudes y unidades dosimétricas en Protección Radiológica

Fecha		Hecho destacable
1928	ICRU nº 2	Introducción del <i>Röntgen</i>
1953	ICRU nº 3	Concepto de <i>dosis absorbida</i>
1962	ICRU nº 7	Propuesta de la magnitud limitadora " <i>equivalent dose</i> ", traducida tal vez incorrectamente como " <i>dosis equivalente</i> ", se deja el concepto de RBA para la radiobiología.
1971	ICRU nº 19	Define los <i>índices de dosis</i> que relacionan al valor máximo de la <i>dosis equivalente</i> en el cuerpo humano, utilizando un maniquí de 30 cm de radio de material equivalente al tejido (76,2% de O, 10,1% H, 11,1% C y 2,6% N) y densidad 1g/cm ³
1977	ICRP nº 26	Incorpora la <i>dosis efectiva</i> H _E como nueva magnitud limitadora, en la que se tiene en cuenta los efectos estocásticos.
1991	ICRP nº 60	Introduce los factores de peso de la radiación en sustitución de los factores de calidad. Define la <i>dosis equivalente en órganos</i> y la <i>dosis efectiva</i> como magnitudes limitadoras.

seis décadas. La tabla 1 recoge algunas de las fechas más destacadas de dicho proceso [1-6].

De esos acontecimientos tiene particular relevancia en protección radiológica la fecha de 1962 en la que ICRU introduce una magnitud, la dosis equivalente como punto de referencia al establecimiento de un **sistema de limitación de dosis** que estaba basado en la consideración de unos límites anuales de dosis a los trabajadores a no sobrepasar teniendo en cuenta los efectos deterministas que pudieran producirse por encima de dichos niveles. No tomaba en consideración las sensibilidades diferentes de las diversas partes del cuerpo. En este sentido las medidas que se hacían mediante dosímetros aplicados a un punto del cuerpo eran válidas para cualquier zona del mismo. Esta limitación se palió posteriormente (en 1971) con la introducción de los índices de dosis y el maniquí esférico ICRU.

El segundo hito en el desarrollo de la dosimetría y la protección radiológica puede situarse en 1977 con la publicación del informe ICRP No. 26. En efecto, la consideración de los efectos estocásticos (somáticos y hereditarios) junto a los de tipo no estocástico o determinista, dio origen a un nuevo sistema de protección basado en criterios de **optimización** (criterio ALARA). Las prácticas con radiaciones deben ser optimizadas desde el punto de vista

dosimétrico, con el objetivo de alcanzar niveles de dosis más bajos, compatibles con las condiciones socioeconómicas del momento. Esta optimización se basa a partir de 1977 en una nueva magnitud que globaliza el riesgo a todo el organismo, **la dosis equivalente efectiva**.

El tercer acontecimiento de la máxima importancia, que está impulsando las modernas adaptaciones de las normas de protección radiológica, es la aparición del documento ICRP No. 60 (1991) que recoge las nuevas **magnitudes limitadoras: dosis equivalente en tejido u órgano y dosis efectiva** y recomienda los nuevos límites para trabajadores a 100 mSv en 5 años y de 1 mSv/año para el público.

En estos momentos en Europa la publicación de la Directiva Europea 96/29 [7] sobre las Normas básicas de Protección Radiológica obliga a los países miembros, entre ellos a España, a incorporar una serie de recomendaciones, basadas en el documento ICRP No. 60, a las legislaciones de cada Estado.

MAGNITUDES Y UNIDADES DOSIMÉTRICAS VIGENTES EN LA ACTUALIDAD

El sistema dosimétrico se basa en tres tipos de magnitudes: fundamentales o físicas, limitadoras y operacionales.

Tabla 2 - Magnitudes dosimétricas físicas

Denominación	Símbolo	Unidad	Definición*
Energía impartida	ϵ	(J)	$\epsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q$
Transferencia lineal de energía	L	$J \cdot m^{-1}$	$\frac{d\epsilon}{dx}$
Dosis absorbida	D	$(J \cdot kg^{-1})$ gray (Gy)	$\frac{d\epsilon}{dm}$
Distribución de dosis absorbida en función de la transferencia lineal de energía	D_L	(Gy)	$\frac{dD}{dL}$
Kerma	K	(Gy)	$\frac{d\epsilon_r}{dm}$
Exposición	X	$C \cdot kg^{-1}$	$\frac{dQ}{dm}$

* R_{in} =energía radiante incidente en el volumen. R_{out} =energía emergente del volumen. $\sum Q$ =suma de los cambios en las masas en reposo. $d\epsilon_r$ =energía transmitida a la masa dm .

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS FÍSICAS

En la tabla 2 se resumen las principales magnitudes dosimétricas físicas.

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS

LIMITADORAS

Dado que en protección radiológica la dosimetría física está al servicio de determinar y limitar los efectos biológicos de las radiaciones sobre el organismo humano, la ICRP-60 estableció unas magnitudes que intentan aproximar las medidas a los efectos biológicos estocásticos (es decir no deterministas) ocasionados por las radiaciones sobre el organismo humano. Estas magnitudes son la dosis equivalente en tejido u órgano H_T y la dosis efectiva H_E .

En la tabla 3 se recogen las definiciones de dichas magnitudes y de otras complementarias necesarias para su introducción [8].

MAGNITUDES OPERACIONALES

Las magnitudes operacionales que se utilizan en protección radiológica, tanto en lo que se refiere a la vigilancia individual como a la de área, son aplicables a cualquier radiación. Se expresan en función de las magnitudes limitadoras, son aditivas y definidas en un punto y se han de referir a un maniquí adecuado, representativo del cuerpo humano. La última versión de ellas ha estado propuesta por ICRU-39 [9], ICRU-43 [10] y modificadas ligeramente por ICRU 47 [11].

Vigilancia de área

Para introducir las magnitudes adecuadas se proponen los campos expandidos y los campos expandidos alineados, que aquí no definimos.

El maniquí seleccionado es el de la esfera ICRU.

- ❖ Dosis equivalente ambiental $H^*(d)$ (Sv) en un punto. Es la dosis equivalente que sería originada por el correspondiente campo expandido y alineado en la esfera ICRU a la profundidad d , en el radio opuesto a la dirección del campo alineado.
- ❖ Dosis equivalente direccional $H'(d, \Omega)$ (Sv). Es la dosis equivalente que sería producida por el correspondiente campo expandido en la esfera ICRU a la profundidad d , en un radio según la dirección Ω .

Vigilancia individual

El informe ICRU-47 introduce para la vigilancia individual la magnitud operacional:

- ❖ Dosis equivalente personal $H_p(d)$ (Sv) que es la dosis equivalente en tejido blando, situado en un punto específico del cuerpo humano a

una profundidad d . Se determina mediante un detector colocado sobre la superficie del cuerpo y recubierto por un material de composición equivalente al tejido y de espesor adecuado.

Tanto para la vigilancia de área como para la individual, para radiación poco penetrante se utiliza una profundidad de 0,07 mm para la piel y 3 mm para el cristalino. Para radiación penetrante se utiliza la profundidad de 10 mm.

DOSIMETRÍA PERSONAL

La determinación analítica de las dosis operacionales debe efectuarse mediante la exposición y lectura de un solo dosímetro adosado al cuerpo del individuo controlado, durante un intervalo de tiempo preestablecido.

El dosímetro está constituido por uno o varios elementos sensibles a las radiaciones recubiertos con diversos filtros, de manera que se pueda evaluar la dosis personal $H_p(10)$ y $H_p(0,07)$.

Los dosímetros personales pasivos, que son los más utilizados, necesitan de un sistema de lectura y posterior evaluación de la magnitud dosimétrica operacional.

En el sistema dosimétrico utilizado pueden influir un conjunto de factores que introducen incertidumbres en la medida. Pueden destacarse los siguientes:

- ❖ Naturaleza y energía de la radiación.
- ❖ Variación de la respuesta del detector utilizado.
- ❖ Isotropía de detección del dosímetro.
- ❖ Geometría del campo de radiación.
- ❖ Posicionamiento del dosímetro en el cuerpo del individuo.
- ❖ Sistema de calibración utilizado.
- ❖ Reproducibilidad del sistema de lectura.
- ❖ Influencia de parámetros físicos sobre el detector (temperatura, vibraciones, polución atmosférica...).
- ❖ Fading o extinción de la información contenida en el dosímetro irradiado.
- ❖ Otros factores.

La mayor parte de las fuentes de las incertidumbres introducidas por aquellos factores son conocidas y por tanto corregibles.

En cualquier caso es altamente recomendable el disponer de un sistema de calidad, con mayor o menor grado de elaboración, que permita comprobar fehacientemente los diversos

Tabla 3 - Magnitudes y unidades dosimétricas limitadoras

Denominación	Símbolo y unidades	Concepto
Dosis media absorbida en órgano	D_T (Gy)	$D_T = \frac{1}{m_T} \int D \, dm$ m_T (masa de tejido u órgano)
Factor de calidad en un punto	Q	$Q = \frac{1}{D} \int Q(L) D_L \, dL$ Pondera la dosis mediante un factor que tiene en cuenta la eficiencia biológica (dependiendo de L)
Factor de calidad medio en un órgano	Q_T	$Q_T = \frac{1}{m_T D_T} \int Q \cdot D \, dm$ Q, D: factor de calidad y dosis absorbida en dm
Equivalente de dosis (traducción del término inglés "dose equivalent")	H ($J \cdot kg^{-1}$ ó Sv)	$H = Q \cdot D$ Producto de Q y D en un punto
Factor de ponderación de la radiación	w_R	Factor adimensional que depende del tipo de radiación y de la energía.
Factor de ponderación del tejido	w_T	Factor de ponderación, función de la probabilidad de aparición de efectos estocásticos.
Dosis equivalente en órgano o tejido	H_T (Sv)	$H_T = \sum_R w_R D_{TR}$
Dosis efectiva	E (Sv)	$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{TR}$ Como puede observarse la dosis efectiva expresa la suma doblemente ponderada a los tejidos y a las radiaciones.

procesos llevados a cabo en el desarrollo de la medida.

Según UNSCEAR-93 [12] se controlan en el mundo alrededor de 3,6 millones de trabajadores. En España existe una base de datos nacional [13] que en el año 1996 recogía los historiales dosimétricos de 82,600 trabajadores. La distribución de dichos colectivos en función de su actividad profesional está recogida en la tabla 4.

La dosimetría legal u oficial está regulada en la mayoría de los países por organismos administrativos que controlan la calidad de los servicios de dosimetría.

En España hay 20 servicios autorizados por el Consejo de Seguridad Nuclear Español que impone unas condiciones previas para la concesión de autorizaciones y efectúa controles periódicos de sus sistemas de calidad. Organiza asimismo ejercicios de intercomparación entre todos los laboratorios. El último ejercicio se efectuó en el año 1995 [14]. Dos laboratorios acreditados secundarios (CIEMAT e INTE (Universidad Politécnica de Cataluña) proporcionaron respectivamente los haces de ^{137}Cs y rayos X en la calidad ISO de la serie estrecha para realizar las irradiaciones. Todos los servicios utilizaron dosimetría TLD con diversos materiales dosimétricos: LiF: Mg, Ti (80%), $\text{SO}_4\text{Ca:Dy}$ con $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (10%), $\text{SO}_4\text{Ca:Dy}$ (10%). Los lectores utilizados fueron de las marcas Harshaw, Panasonic, Alnor, Vinten y Teledyne. La aplicación de los criterios de niveles de tolerancia de la guía ANSI No. 13-11 [15] permitieron constatar el buen nivel de los servicios dosimétricos participantes

Tabla 4 - Porcentaje de usuarios de las radiaciones por campos de actividad

	Estadística mundial (%) (UNSCEAR 93)	España (%) (CSN 1996)
Medición	60	75
Industria nuclear	25	15
Otros usos de las radiaciones	15	10

y particularmente en lo que se refiere a los haces de fotones gamma.

MEDIDAS EN DOSIMETRIA OPERACIONAL

Como ya se ha señalado anteriormente el informe ICRP No. 60 recomienda un sistema de protección que incluye unos valores límite para los trabajadores y el público en general. En relación con la dosimetría personal las magnitudes operacionales para la vigilancia individual $H_p(10)$ y $H_p(0,07)$ deben tener unos valores de incertidumbre inferiores a un factor 1,5 (2σ) en los niveles de dosis anual.

La calibración de los dosímetros exige la utilización de maniqués, ya sea la esfera ICRU o, debido a su dificultad de fabricación y utilización, otros maniqués más simples como el cubo de agua (30 x 30 x 30 cm) preconizado por el IAEA o el maniquí de polimetil metacrilato (PMMA) (30 x 30 x 15 cm) recomendado por el ICRU-47. Los valores de referencia, generalmente el kerma en aire medido por los laboratorios, deben corregirse por los correspondientes coeficientes de conversión $H_p(10)/K_{\text{air}}$ y $H_p(0,07)/K_{\text{air}}$ (K_{air} siendo el valor de kerma en aire en la superficie del maniquí pero en ausencia del mismo). En las publicaciones ICRU 47 e ICRP 74 [16] se recogen los valores de los coeficientes de conversión en los rangos de energía (0,01-1,5 MeV). La publicación española CIEMAT 781 [17] propone los factores de paso para estimar la dosis equivalente personal en el maniquí de PMMA referenciado anteriormente para haces de ^{137}Cs y haces de rayos X de la serie ISO de espectro estrecho obtenidos en los laboratorios del CIEMAT en Madrid y el INTE en Barcelona, respectivamente.

DOSIMETRIA PASIVA

Los dosímetros más utilizados en el control individual de los trabajadores son los dosímetros pasivos, en los que la interacción de la radiación modifica alguna de sus propiedades físico-químicas, de manera casi permanente, permitiendo así tras el período de irradiación, la estimación de la dosis mediante técnicas de revelado y lectura en la dosimetría de película y de análisis de los espectros de luz emitida por estimulación térmica de los dosímetros irradiados, en la dosimetría de estado sólido termoluminiscente (TLD).

Como ya se ha señalado la dosimetría TLD reposa en gran medida en el compuesto LiF: Mg, Ti con diversos tipos comerciales y

Tabla 5 - Factores de paso para estimar la dosis equivalente personal en un maniquí en forma de bloque de tejido ICRU (30 cm x 30 cm x 15 cm) a partir del kerma en aire, utilizando un maniquí de PMMA de mismas dimensiones. [17]

Denominación de la calidad	$\frac{\bar{F}_k(10)}{\bar{k}_p^{(1)}}$ (Sv/Gy)	$\frac{\bar{F}_k(0,07)}{\bar{k}_p^{(2)}}$ (Sv/Gy)
INTE-EE-40	1,29	1,38
INTE-EE-60	1,81	1,69
INTE-EE-80	2,01	1,84
INTE-EE-100	1,97	1,82
INTE-EE-120	1,88	1,74
INTE-EE-150	1,79	1,66
INTE-EE-200	1,62	1,53
INTE-EE-250	1,51	1,46
INTE-EE-300	1,44	1,43
^{137}Cs (CIEMAT)	1,24	--

(1) $\bar{F}_k(10)$ es el coeficiente de conversión igual a $\frac{H_p(10)}{K_{\text{air}}}$ promediado para todo el espectro de radiación.

$\bar{k}_p^{(1)}$ es un factor de corrección que tiene en cuenta las diferencias en la retrodispersión producida por el maniquí de PMMA respecto al maniquí de material ICRU promediado para todo el haz de radiación.

(2) $\bar{F}_k(0,07)$ es el coeficiente de conversión igual a $\frac{H_p(0,07)}{K_{\text{air}}}$ promediado para todo el espectro de radiación.

$\bar{k}_p^{(2)}$ es un factor de corrección que tiene en cuenta las diferencias en la retrodispersión producida por el maniquí de PMMA respecto al maniquí de material ICRU promediado para todo el haz de radiación.

formas: pequeños discos, pastillas paralelepípedicas o en polvo, contenidas en sendos portadosímetros con filtros de espesores diversos para la determinación de dosis superficial y profunda. El límite inferior de detección es del orden de 10 μSv y el nivel inferior de detección es del orden de 10 μSv , el rango típico de dosis medible es de (0,02-10 mSv) con una reproductibilidad del 5% a una dosis de 0,1 mSv. El pequeño tamaño de las pastillas, algunos milímetros, las hacen muy aptas para la dosimetría en dedos de la mano o para su ubicación en regiones de pequeñas dimensiones. Tras el proceso de lectura y de un tratamiento térmico adecuado, los dosímetros TLD pueden ser reutilizados. Por otra parte cabe destacar su buen comportamiento frente al fenómeno del *fading* y su buena respuesta a la energía de los fotones. Este extremo no es tan favorable con otros materiales termoluminiscentes tales como el $\text{SO}_4\text{Ca:Dy}$. Los lectores de dosímetros suelen estar muy automatizados, permitiendo repetir los procesos

de tratamiento de lectura y estimación de la dosis de manera reproducible.

Las técnicas de estimulación térmica en el lector son diferentes según los diversos modelos. Destaca el uso de un gas inerte (N_2) caliente, la utilización de un vástago calentado eléctricamente y apoyado sobre la plancheta de acero que contiene el dosímetro y el uso de impulsos de radiación infrarroja.

Si bien la dosimetría TLD es probablemente la dosimetría pasiva de carácter oficial más utilizada existen países donde la dosimetría es efectuada mediante dosímetros de película.

La dosimetría de película fue la primera técnica de control de dosis personal utilizada en los servicios de dosimetría. Tiene la ventaja de su bajo costo económico, aunque tiene un costo elevado en personal, de no utilizarse sistemas muy automatizados. Tiene buen rendimiento de detección para rayos X y escaso para rayos gamma. Las dificultades que representa su mala respuesta en energía se salva con la utilización de filtros de diversos materiales y espesores. Tiene una sensibilidad aceptable, aunque inferior

a los dosímetros TLD y una mayor incertidumbre en las medidas. Los tiempos de exposición habitual son del orden de un mes.

DOSIMETRIA ELECTRONICA

La dosimetría electrónica viene utilizándose ampliamente en instalaciones radiactivas y sobre todo en las instalaciones del ciclo del combustible nuclear, como dosimetría secundaria, es decir redundante con los dosímetros pasivos que tienen carácter oficial.

Los dosímetros electrónicos disponen de uno o varios elementos sensibles a la radiación en forma de detectores de gas, generalmente Geiger-Müller, o más recientemente de semiconductores, conectados a un dispositivo electrónico de alimentación y de recuento. En los últimos tiempos la miniaturización de la electrónica ha permitido el desarrollo de detectores portátiles personales de pequeñas dimensiones y peso alimentados con pilas. Tienen la gran ventaja de poderse efectuar lecturas en tiempo real tanto de la dosis acumulada como de las tasas de dosis.

Existen en el mercado una docena de empresas que comercializan estos dispositivos con diversos modelos: de lectura directa, dotados de lector, con capacidad de acumulación de diversas lecturas, con presencia de niveles de alarma, etcétera.

En particular cabe destacar su contribución en la optimización de las operaciones de protección radiológica cuando el término de fuente de radiación es mal conocido o variable con el tiempo ya que permiten controlar permanentemente la dosis recibida.

Debe comprobarse en todos ellos la fiabilidad de las medidas realizadas con estos dispositivos, la posibilidad de medición de $H_p(10)$ y $H_p(0,07)$, su comportamiento en función de la temperatura y el efecto que pueden provocar las colisiones, estudiar la fiabilidad de los software que utilizan, su respuesta en energía y muy especialmente su grado de sensibilidad a los campos electromagnéticos.

Actualmente únicamente el NRPB del Reino Unido dispone de una licencia oficial para el uso de la dosimetría electrónica en algunas de sus instalaciones [18].

En España, en marzo de 1998, ha comenzado un estudio, de un año de duración, auspiciado por el Consejo de Seguridad Nuclear y la intervención del Instituto de Técnicas Energéticas de Barcelona para el análisis de los

principales equipos presentes en el mercado, a la luz de las normas propuestas por diversas organizaciones internacionales (IEC-1283, Draft-IEC-1526, ANSI 42-20), y la realización de ensayos dosimétricos, y de compatibilidad electromagnética con el objetivo último de formular una propuesta de requisitos para el uso de dosímetros electrónicos como dosímetros legales.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

En lo anteriormente expuesto no se ha hecho referencia a la dosimetría interna, ni a la dosimetría de neutrones. En este último caso la dosimetría actual es claramente mejorable. En efecto los detectores de albedo y de burbuja se han desarrollado continuamente, pero los niveles de incertidumbre que se alcanzan son muy superiores a los de la radiación electromagnética.

En cuanto a la dosimetría interna, cabe destacar que a pesar de los adelantos realizados en los últimos años en cuanto a las técnicas de medida de la actividad incorporada y excretada y los modelos de cálculo utilizados para la evaluación posterior de las dosis, existen incertidumbres importantes que requerirán esfuerzos de mejora.

En referencia a la dosimetría de estado sólido se puede señalar que la introducción de nuevos materiales TLD ultrasensibles tales como el LiF; Mg, Cu, P, permiten esperar unas mejoras significativas en las prestaciones de la dosimetría TLD [18].

Junto al desarrollo continuado de los dosímetros electrónicos son esperanzadores los resultados de una nueva técnica dosimétrica desarrollada por RADOS Technology en Finlandia [19,20]. Se trata de los dosímetros DIS (direct ion storage) que pueden actuar como dosímetros pasivos y que están basados en la combinación de una pequeña cámara de ionización acoplada a un transistor de efecto MOS. Pueden utilizarse también como dosímetros activos, sin necesidad por tanto de lector. Mediante el uso de varios detectores pueden evaluarse ambas magnitudes operacionales $H_p(10)$ y $H_p(0,07)$. El límite superior de dosis medible es de 50 mSv. La resolución del lector es de 0,01 mSv para dosis de 10 mSv. Aunque los resultados obtenidos hasta el momento no permitirían cumplir los requisitos a los sistemas dosimétricos actualmente homologados, es previsible que futuros desarrollos lo permitirán.

Finalmente y con una perspectiva de más largo plazo se puede presagiar que en algún momento podrían desarrollarse dosímetros personales que tengan en cuenta los criterios de la microdosimetría. En este caso cabe pronosticar que los nuevos materiales deberían estimar el riesgo radiobiológico de manera más próxima que los materiales actuales.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ICRU, Report No. 2, International X-ray unit of Intensity, Brit.J.Radiol. 1, 363 (1928).
- [2] ICRU, Report No. 3, Report of Committee on Standardization of X-ray Measurements, Radiology 22, 289 (1934).
- [3] ICRU, Report No.7, Recommendations of the International Committee for Radiological Units Radiology 62, 106 (1954).
- [4] ICRU, Report No. 19, Radiation Quantities and Units. ICRU, Washington (1971).
- [5] ICRP, Publication 26, Recommendations of the ICRP, Pergamon Press, New York (1977).
- [6] ICRP, Publication 60, Recommendations of the ICRP. Pergamon Press New York (1991).
- [7] Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996. Diario Oficial de las Comunidades Europeas No. L159 (1996).
- [8] ICRU, Report No. 51, Quantities and unities in Radiation Protection (1993).
- [9] ICRU, Report No. 39, Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources. Bethesda (1985).
- [10] ICRU, Report No. 43, Determination of dose equivalents for external radiation sources, Part 2, Bethesda (1988).
- [11] ICRU, Report 47, Measurements of dose equivalent from external photon and electron radiation, Bethesda (1992).
- [12] UNSCEAR 1993, Report to the General Assembly with Scientific Annexes - Sources and effects of Ionizing Radiation, United Nation, New York (1993).
- [13] CSN-1996. Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado, Segundo semestre, Madrid (1997).
- [14] GINJAUME, M., BROSED, A y otros, Análisis de los resultados de la campaña de intercomparación entre servicios de dosimetría personal autorizados por el CSN, usando haces de fotones Radioprotección, No. extraordinario, 54-56. (1996).
- [15] American National Standards Institute, Personal Dosimetry Performance, ANSI, N 13-11, New York. (1993).
- [16] ICRP, Publication 74, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against external Radiation, Pergamon Press, New York (1996).
- [17] BROSED, A., GINJAUME, M., Calibración de dosímetros personales usando haces externos de fotones. Control de los Servicios de Dosimetría Personal autorizados por el CSN. CIEMAT, Inf. Técnico 781. (1995).
- [18] SWINTH, K.C., Considerations in the application of the electronic dosimeter to close record, NUREG/CR-6581 Washington, (1997).
- [19] KAHILAINEN, J., The direct ion storage dosimeter. Radiation Protection Dosimetry. Vol. 6. (1996).
- [20] KOSNEN, A., VARTAINEN, E., Testing of a TLD and direct ion storage (DIS) dosimeter for use as a personnel dosimete, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 66, 1-4, (1996).

SEGURIDAD Y PROTECCION RADIOLOGICAS EN EL DISEÑO DEL CENTRO DE PRODUCCION DE RADIOFARMACOS Y COMPUESTOS MARCADOS DE CUBA

Saúl Pérez Pijuán

Centro de Isótopos, Ciudad de La Habana, Cuba

Ana María Gatti

Autoridad Regulatoria Nacional, Argentina

Rubén Reyes

Investigaciones Aplicadas S.E., Argentina

Introducción

La utilización de radiofármacos y otros compuestos marcados con radionúclidos es una práctica difundida internacionalmente con reconocidos beneficios en diversas ramas de la vida económica y social de un país, particularmente en la medicina. Su uso creciente en Cuba ha significado importantes erogaciones de moneda libremente convertible, en un contexto económico tenso y difícil. Esta situación justificó cuantitativamente la práctica de producción nacional de radiofármacos y compuestos marcados que llevó a la decisión de crear el Centro de Isótopos.

El Centro de Isótopos, inaugurado en diciembre de 1995, se ubica a unos 30 kilómetros al sudeste de la Ciudad de La Habana por el criterio de proximidad a las instalaciones de irradiación que se proyectaron construir en el país. Su proceso tecnológico comprende la importación de la materia prima radisotópica, la producción de los compuestos marcados y radiofármacos, los controles de calidad asociados y el embalaje, despacho y distribución de las producciones.

Formulación del diseño relacionado con la seguridad y protección radiológicas

El diseño del Centro de Isótopos se propuso alcanzar los siguientes objetivos de seguridad y protección:

- * Lograr que las exposiciones en operación normal de los trabajadores y miembros del

público sean tan bajas como razonablemente pueda alcanzarse (filosofía ALARA) e inferiores a restricciones anuales de dosis efectiva de 12 mSv para trabajadores y de 10 μ Sv para miembros del público.

*Prevenir y minimizar la ocurrencia de sucesos radiológicos y limitar las dosis efectivas para los trabajadores de intervención a valores inferiores a 50 mSv.

Los parámetros de entrada considerados en el proceso de diseño de seguridad son el inventario radiactivo, la documentación técnico-normalizativa del país y recomendaciones internacionales vigentes, las experiencias reportadas por diseñadores y explotadores y los sucesos radiológicos postulados.

Las actividades que se prevén manipular por ciclo de producción están en el orden de los TBq de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^3H , ^{14}C y ^{131}I y de los GBq de ^{125}I , ^{201}Tl , ^{35}S , ^{32}P , ^{153}Sm , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ y de ^{188}Re . La consideración del inventario radiactivo no debe limitar la adaptabilidad al cambio del diseño que permita responder al mercado, sin transgredir los objetivos de seguridad.

Es importante destacar el papel de las experiencias reportadas por diseñadores y explotadores de instalaciones similares que se hayan comprobado como buenas prácticas ingenieras. Esto ha introducido desde la etapa inicial de diseño una optimización genérica de tipo cualitativo.

Aplicación de principios de seguridad y protección al diseño

En los inicios del proceso de diseño se definieron las funciones de seguridad y protección radiológicas que deben cumplir los sistemas e instalaciones, para alcanzar los objetivos

propuestos. Posteriormente se identificaron los sistemas importantes para la seguridad como aquellos que cumplen una o varias de estas funciones y se categorizaron determinísticamente considerando su participación en la prevención o mitigación de los sucesos radiológicos postulados.

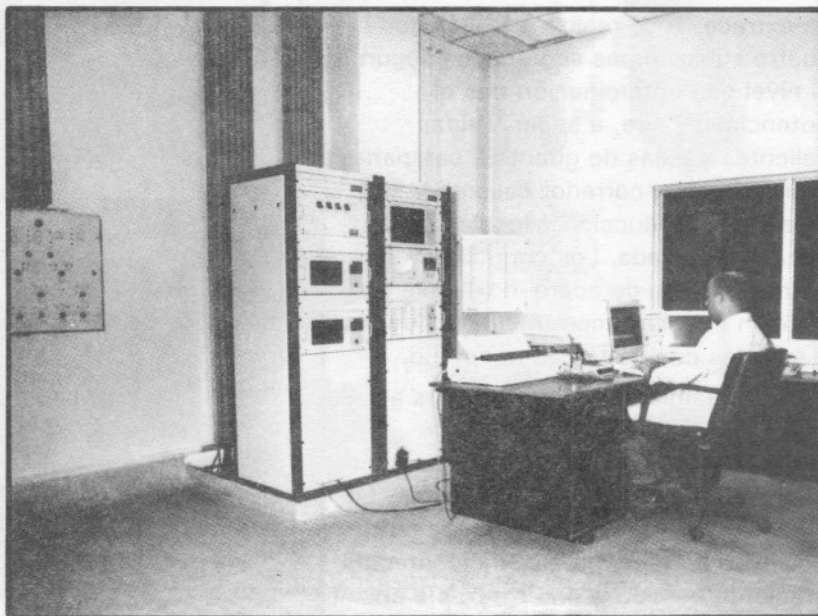
Los principios de seguridad y protección que se aplicaron al diseño de instalaciones y sistemas importantes para la seguridad son la reducción del tiempo de exposición, el aumento de la distancia a las fuentes, la dilución de contaminantes, la reducción de fuentes de exposición, la interposición de barreras entre las fuentes y los individuos (defensa en profundidad), la detección inmediata de fallas y la funcionalidad, disponibilidad, fiabilidad y calificación de los componentes.

Diseño arquitectónico

La disposición arquitectónica de zonas sigue el criterio de que los niveles de actividad y radiotoxicidad del material radiactivo que se manipula disminuyan hacia la periferia y planta alta del edificio de producción. Así, se conforma en el centro del edificio una zona controlada, compuesta de los locales de producción y el corredor caliente, rodeada de zonas supervisadas y de libre circulación, como aplicación del principio de interposición de barreras para el confinamiento de las fuentes. Los laboratorios de control de calidad, despacho y embalaje de la producción se agrupan alrededor del corredor caliente y se vinculan a éste mediante sistemas de transferencia, lo cual reduce los tiempos de exposición y la probabilidad de derrames debido a la circulación de material radiactivo. La sala de control radiológico, en zona supervisada, se encuentra en un extremo del corredor caliente con posibilidad de controlar visualmente las operaciones que se ejecutan en éste y así permitir una detección inmediata de fallas de los operadores. En las fronteras entre zonas existen esclusas sanitarias o puntos de control radiológico utilizados como barreras de protección para minimizar la probabilidad de contaminación de zonas de menor riesgo.

La adecuada selección de materiales y soluciones de terminación permite una fácil descontaminación o remplazo de superficies contaminadas, como una aplicación del principio

de reducción de fuentes de exposición. Se utiliza como terminación del piso láminas termosoldables de cloruro de polivinilo (PVC) de 2 mm de espesor, continuado en forma redondeada hasta 20 cm de altura sobre la pared. Las paredes son enmasilladas con dos manos de pintura de aceite. La carpintería



Sala de control radiológico.

exterior es de aluminio con paños fijos y sellados de cristal y la interior es de madera lisa recubierta con pintura de aceite. El falso techo es de losetas desmontables. Se utilizan mesetas de hormigón recubiertas con resina epóxica.

Ventilación y purificación del aire

El diseño de la ventilación del edificio de producción como un circuito cerrado introduce una barrera de protección dinámica para los miembros del público; en las zonas de trabajo se utiliza una combinación de circuitos cerrados y abiertos para lograr una adecuada economía y seguridad. El caudal total involucrado es de unos $60\,000\text{ m}^3/\text{h}$.

El sistema de inyección mantiene las concentraciones de actividad en los ambientes de trabajo en valores aceptables, aplicando el principio de dilución. Toma el 100% del aire exterior, lo filtra de forma absoluta, lo acondiciona y distribuye hacia pasillos y locales.

Los caudales óptimos calculados utilizando la técnica del costo-beneficio mostraron valores inferiores a los requeridos por confort personal y a los 3 cambios/hora adoptados como requisito mínimo para cada local [1]. Finalmente

se tomaron entre 6 y 10 cambios/hora para los locales de zona controlada y entre 3 y 10 para los de zona supervisada, según la experiencia de instalaciones similares. El corredor caliente, con un volumen de casi 3500 m³, tiene 7 cambios/hora.

La extracción se realiza a través de cuatro subsistemas segregados según el nivel de contaminación real o potencial del aire, a saber, celdas calientes y cajas de guantes, campanas radioquímicas, corredor caliente y sus locales de producción y locales de la zona supervisada. Los conductos de extracción son de acero inoxidable de sección circular y con uniones bridadas y selladas con juntas de neopreno.

El escalonamiento de depresiones entre zonas de diferente riesgo es una aplicación del principio de interposición de múltiples barreras de protección, en este caso para lograr el confinamiento dinámico ante eventuales incidentes. El gradiente comienza en -1 mm c.a en los pasillos de zonas supervisadas y termina en -8 mm c.a en el corredor caliente. El uso de esclusas de aire entre zonas y de persianas de no retorno entre locales ventilados por circuito abierto, favorecen el confinamiento dinámico. Con este gradiente la velocidad del aire en las aperturas ocasionales desde zonas de libre circulación a zonas supervisadas es de 0,75 a 1 m/s y desde zonas supervisadas a la zona controlada es ligeramente superior a 2 m/s.

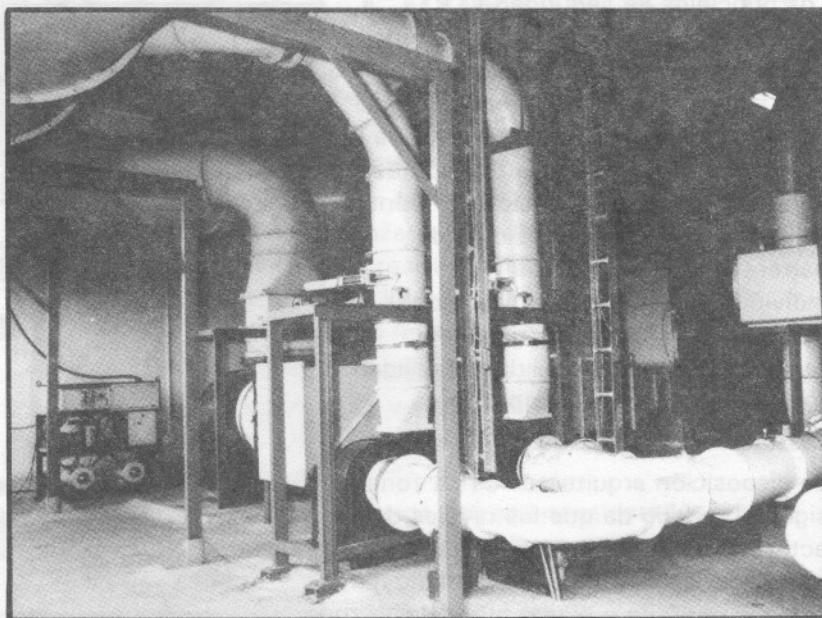
Los principios de funcionalidad, disponibilidad, fiabilidad y calificación de componentes son un denominador común en el diseño del sistema de ventilación.

Los ventiladores de inyección y extracción poseen redundancia total como aplicación del principio de fiabilidad, por la función convencional de mantener un grado alto de continuidad en los procesos de producción. A los ventiladores de extracción de celdas, cajas de guantes y campanas radioquímicas se les suma la función de seguridad de mantener en cualquier situación operacional el confinamiento de cantidades significativas de material radiactivo.

La purificación del aire extraído se realiza con filtros absolutos y absorbentes de carbón activado impregnado con KI. La utilización de

etapas de purificación es una aplicación combinada de los principios de reducción de fuentes e interposición de barreras múltiples de protección para los miembros del público.

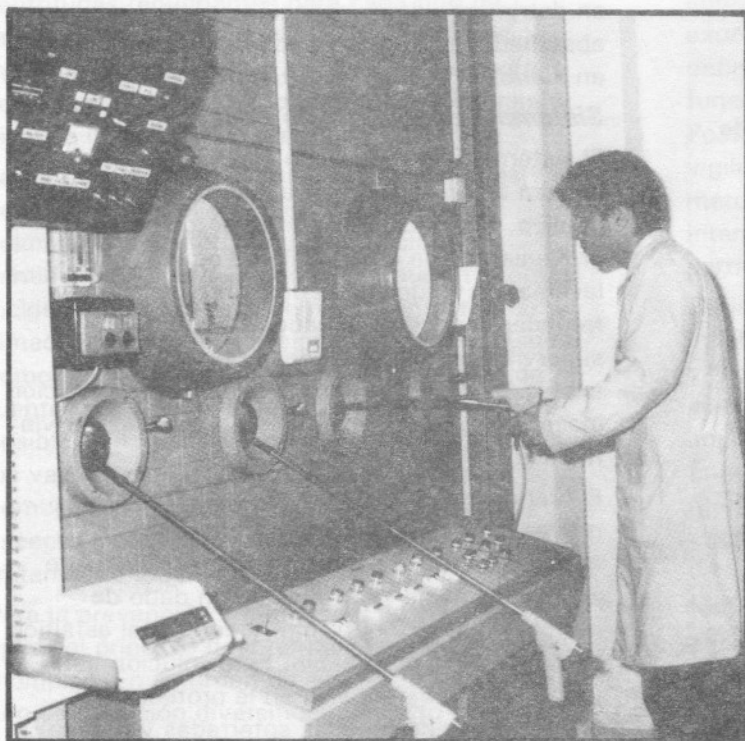
Existe una etapa de purificación con filtros absolutos para los subsistemas de extracción de locales de zona supervisada y del corredor



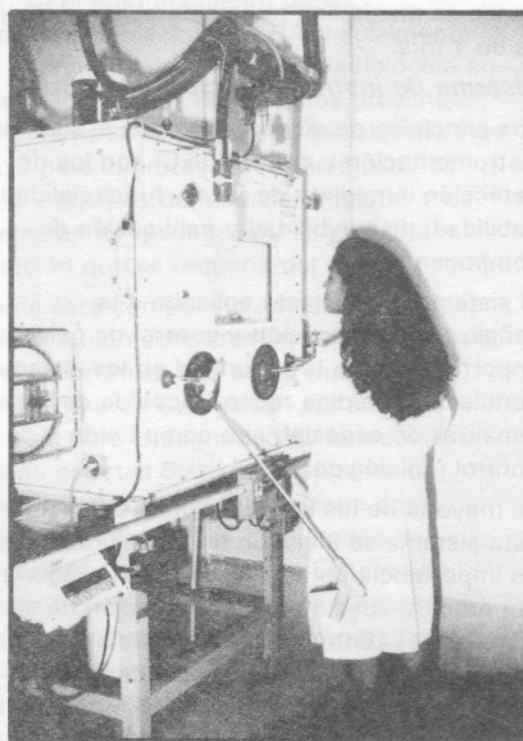
Vista parcial de ventiladores de extracción y sistemas de purificación del aire. A la izquierda el monitor continuo de efluentes gaseosos.

caliente, dos etapas de filtrado absoluto para la extracción de campanas y tres etapas de filtrado absoluto y una de carbón activado para la extracción de celdas y cajas de guantes. En caso de detección de una actividad de radioyodos en chimenea superior a 3,2 MBq por proceso, es posible habilitar una etapa adicional de carbón activado que funciona normalmente en *stand-by* para los subsistemas de extracción de corredor caliente y el de celdas y cajas de guantes.

La extensión a la operación del principio de calificación de componentes para las etapas de purificación se hace a través de los ensayos de penetración y eficiencia. Se utilizan tomas isocinéticas antes y después de las etapas de filtrado para la realización de ensayos de penetración *in situ* por el método DOP. El criterio de éxito del ensayo de una etapa de purificación es obtener una penetración inferior a 0,03%. Los ensayos de los absorbentes se realizan midiendo la concentración de ¹³¹I en aire antes y después de las etapas, en condiciones reales de operación. El criterio de éxito del ensayo



Lado operativo de una celda caliente de producción.



Caja de guantes blindada en zona controlada.

varía según la función de la etapa. Para las etapas en *stand-by* el criterio de éxito es una eficiencia superior al 99% y el resto debe ser superior al 90%.

La altura de la chimenea de expulsión es de 19 m sobre el nivel del terreno y se calculó según el criterio de altura mínima exigida en [2] para considerar los efectos de sombra aerodinámica, pues los cálculos de impacto radiológico no justifican una altura mayor.

Medios tecnológicos de defensa

El Centro de Isótopos cuenta con 11 celdas calientes, 22 cajas de guantes y 23 campanas radioquímicas distribuidas según los criterios referidos en [3]. Estos medios son una aplicación del principio de defensa en profundidad. Además, en su concepción se utilizan los principios de reducción del tiempo de exposición diseñando dispositivos de mínimo mantenimiento y remplazo fácil, de aumento de la distancia a las fuentes con el uso de telepinzas y telemanipuladores y la funcionalidad, disponibilidad, fiabilidad y calificación de sus componentes.

El diseño de blindajes responde a criterios cuantitativos de optimización basados en un análisis costo beneficio [1]. Como condición de frontera para este análisis se toma una restricción de tasa de dosis de $25 \mu\text{Sv/h}$ en

cualquier posición continuada de operación. Como resultado se adoptan blindajes de 1, 5, 10 y 20 cm de plomo antimonioso, en dependencia de las actividades a manipular.

Las celdas calientes con recintos herméticos y las cajas de guantes están diseñadas para mantener una tasa de fugas no mayor a 25% volumen/h, ensayadas según [4] en estado de funcionamiento. Esta barrera de confinamiento estático es mejorada con la operación de los recintos a una depresión entre 15 y 25 mm c.a. que es mantenida constante a través de una válvula de regulación tipo diafragma, individual para cada recinto. En caso de ruptura del confinamiento estático debido a la apertura de una puerta, caída de un guante o fuelle de telepinza, la válvula toma su posición de apertura máxima en un tiempo inferior a 2 s, garantizando una velocidad en la abertura mayor que 0,5 m/s y así se introduce otra barrera de protección, en este caso, de confinamiento dinámico.

Las campanas radioquímicas se ventilan con un sistema de caudal y velocidad constantes utilizando *by-pass* mecánico de aire. La barrera de protección que se interpone es el confinamiento dinámico asegurado por una velocidad en el vano de las campanas para la altura máxima de operación de 0,5 m/s, excepto

donde se manipulan radioyodos, ^3H y ^{14}C que es de 1 m/s.

Sistema de instrumentación y control

Los principios de diseño aplicados al sistema de instrumentación y control (I&C) son los de detección inmediata de fallas, funcionalidad, fiabilidad, disponibilidad y calificación de componentes.

El sistema de I&C está aplicado a la señalización, indicación y control de parámetros importantes para la seguridad en los sistemas de ventilación, medios tecnológicos de defensa, canalización especial, aire comprimido y de control radiológico.

La mayoría de las señalizaciones de alarma de este sistema se incluyen en la máxima categoría de importancia para la seguridad (Categoría I) por su participación en la prevención de sucesos radiológicos. Entre ellas están, las alarmas por baja depresión en celdas, cajas de guantes y corredor caliente, alarmas por bajo caudal de extracción o sobreelevación de ventana en las campanas donde se manipulan radioyodos, tritio y ^{14}C , y diversas alarmas del sistema de control radiológico como superación de los niveles de intervención de tasas de dosis en áreas y de contaminación superficial en manos, calzado o ropa a la salida de las zonas de trabajo.

Las alarmas de la Categoría I de seguridad están diversificadas, garantizan una información clara e inequívoca al operador, sus valores de disparo sólo son accesibles a personal autorizado y los sistemas son diseñados para detectar inmediatamente fallas del propio circuito, entre otras características.

El comando de equipos y elementos está diseñado de forma tal que éstos cumplen su función de seguridad aun en caso de fallas. Así, por ejemplo, si falla el suministro de aire comprimido, las persianas de regulación de presión quedan en su posición de regulación extrema favoreciendo la extracción

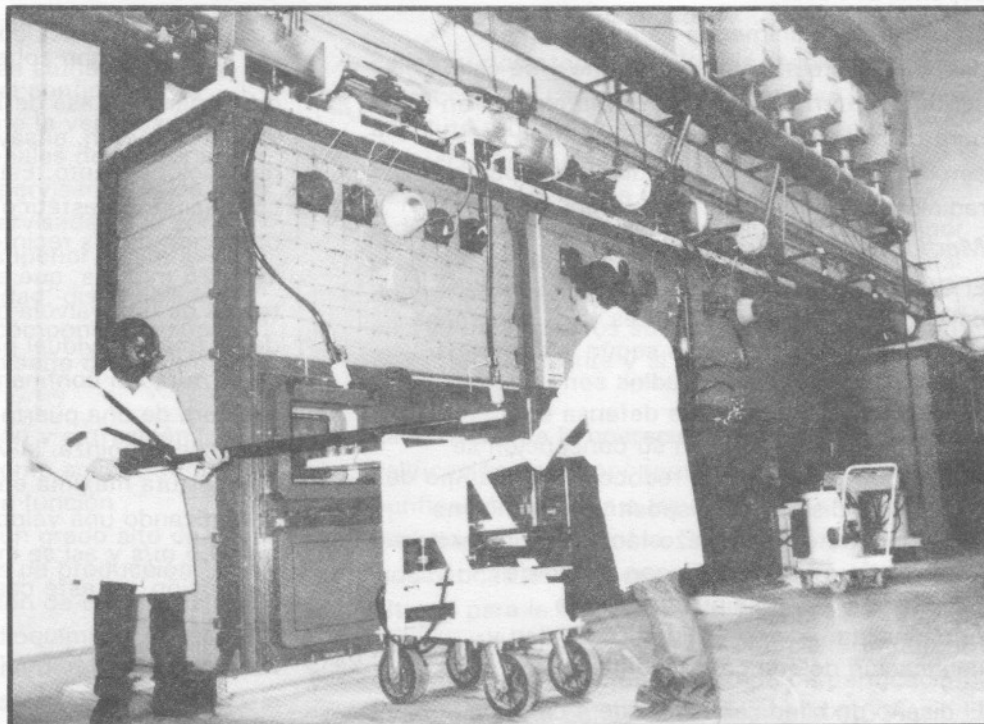
en detrimento de la inyección, y los absorbedores de carbón activado que funcionan en *stand-by* quedan habilitados.

Sistema de canalización especial

El sistema de canalización especial es una barrera de protección para los miembros del público. Su función es controlar los desagües provenientes de campanas radioquímicas, lavamanos y duchas de descontaminación, y fregaderos *activos* ubicados en zonas supervisadas y controladas antes de su expulsión al ambiente para evitar una exposición inaceptable de los miembros del público por vía hídrica.

El drenaje de estos líquidos se hace por gravedad hacia el edificio de desechos radiactivos. Se utilizan tuberías soterradas de acero inoxidable centradas en un dado de hormigón de 150x150 mm y con papel asfáltico como material intermedio. Esta solución tiene una demostrada eficacia en la protección anticorrosiva de tuberías soterradas y provee una doble barrera de protección de los líquidos conducidos.

El sistema de canalización especial comprende tres tanques de recolección y dos tanques de retención de 2 y 6 m³ de capacidad cada uno, respectivamente, sistemas de venteo, bombas



Operación de entrada de materiales a una celda en el corredor caliente. Nótese al fondo a la derecha el carro de extracción de desechos líquidos de las celdas calientes.

centrífugas redundantes para cada tipo de tanque, válvulas manuales, tuberías, filtros mecánicos de línea y un sistema de I&C para la señalización del estado de bombas, derrames y nivel de líquido en los tanques.

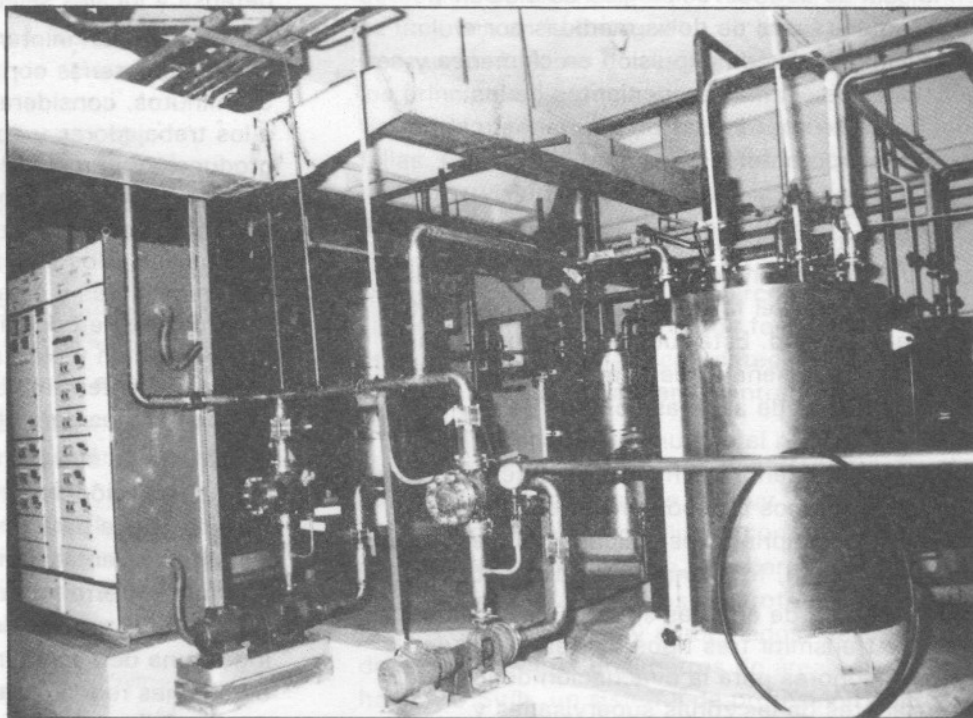
La función de los tanques de recolección es permitir el control y gestión de pequeños volúmenes evitando la contaminación de cantidades mayores de líquidos ante un eventual incidente. Los tanques de retención permiten un almacenamiento más prolongado de los líquidos como aplicación del principio de reducción de fuentes por decaimiento radiactivo; si no fuera posible así lograr niveles de actividad inferiores a los valores de desclasificación autorizados, se bombearían los líquidos hacia un transporte especial para su traslado a una planta de tratamiento externa.

Para la prevención y mitigación de derrames se aplica el principio de interposición de barreras múltiples. En su orden de actuación se cuenta con señalización diversificada de alto nivel de líquidos en los tanques, interconexión de los tanques a su nivel de reboso, barrera de contención secundaria con un volumen igual al del mayor tanque y colección de derrames en pozos de fugas desde donde se pueden bombear eventuales derrames a los tanques. Los pozos cuentan con señalización visual y sonora de presencia de líquidos que se activa en el local del operador del sistema.

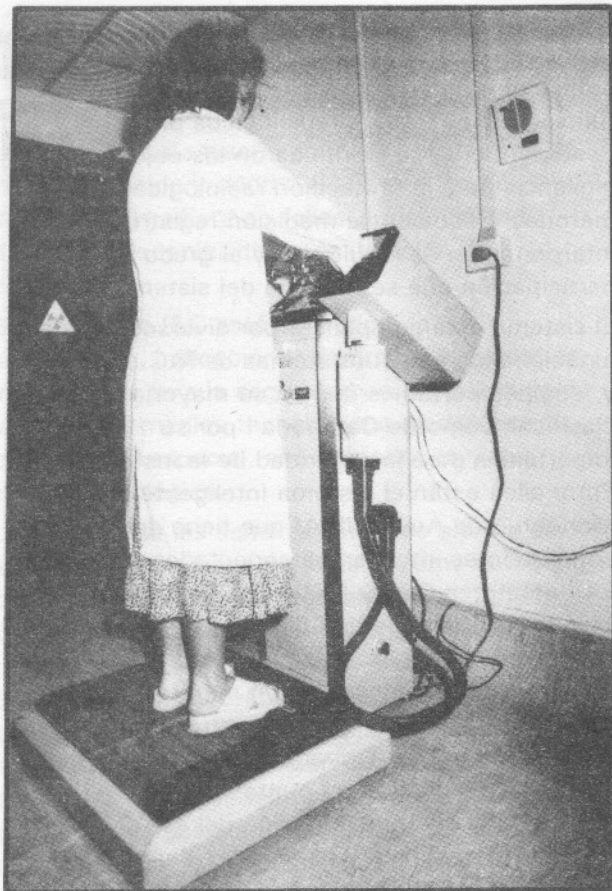
Control radiológico

El sistema cumple la función de seguridad de medir, indicar y señalar parámetros representativos de la exposición real o potencial de trabajadores y miembros del público y así alertar de la superación de condiciones normales de operación que pueden conducir a un suceso radiológico. Es esencial aplicar a sus componentes los principios de funcionalidad, disponibilidad, fiabilidad, calificación y detección inmediata de fallas por su

impacto en el mantenimiento de las exposiciones en niveles ALARA. Inicialmente se definió el programa de vigilancia radiológica en función de los riesgos radiológicos previstos. Posteriormente se identificaron los objetivos de vigilancia para la protección radiológica, los métodos y equipos de medición, registro y de interpretación de resultados y el grado de participación que se requería del sistema de I&C. El sistema está compuesto por diversos equipos estacionarios con subsistemas de I&C asociados y equipos portátiles que en su mayoría clasifican como de Categoría I por su importancia para la seguridad de la instalación. Entre ellos están el Sistema Inteligente de Monitoreo de Area (SIMA) que tiene dos controladores inteligentes conectados a 24 detectores Geiger Müller, el Sistema de Monitoreo Continuo de Efluentes Gaseosos, monitores de manos, calzado y ropa a las salidas de las zonas supervisadas, un monitor de cuerpo entero a la salida de la zona controlada, un sistema central de aspiración de aire conectado a bocas de muestreo en puntos de mayor probabilidad de contaminación del aire, muestreadores de aire personales y portátiles, monitores portátiles de tasas de dosis, dosis y contaminación superficial y un sistema de dosímetros de lectura directa con lector y software asociado, entre otros.



Sistema de canalización especial. En un primer plano los tanques de recolección y al fondo los tanques de retención.



Medición de contaminación en manos, calzado y ropa a la salida de una zona supervisada.

En la sala de control radiológico se indican y registran las tasas de dosis medidas por el SIMA, los niveles de expulsión en chimenea y se señalizan las alarmas provenientes de los monitores de contaminación en manos, calzado, ropa y cuerpo entero.

Comunicaciones

El sistema tiene la función de seguridad de proporcionar información que permita limitar las consecuencias del fallo de sistemas importantes para la seguridad. Esta función se expresa en la transmisión de señales de evacuación a través del subsistema de alarmas sonoras de emergencia y en la comunicación con autoridades exteriores en caso de emergencias a través de algunos componentes del subsistema telefónico. Los principios aplicados al diseño son los de fiabilidad, funcionalidad y disponibilidad.

El subsistema de alarmas sonoras de emergencia permite transmitir tres tipos diferenciados de señales sonoras para la evacuación de los trabajadores de las zonas supervisadas y controladas del edificio de producción, la reunión de los miembros de la brigada de protección contra incendios y para decretar el cese de las

operaciones. Es un subsistema con redundancia e independencia que cuenta con 10 amplificadores que alimentan a igual cantidad de altavoces distribuidos en el edificio de producción. El accionamiento de las señales es manual y se encuentra en la sala de control radiológico.

La comunicación con autoridades exteriores es redundante, utilizando teléfonos por cable y por radioenlace de dos plantas telefónicas externas.

Sistemas de apoyo

Los sistemas de alimentación eléctrica y de aire comprimido garantizan servicios auxiliares como función de apoyo a sistemas importantes para la seguridad. En consecuencia los principios de seguridad aplicables son lograr una alta disponibilidad, funcionalidad y fiabilidad de sus componentes.

El sistema de alimentación eléctrica comprende tres subsistemas, a saber, el de alimentación normal, de emergencia y el ininterrumpible. El subsistema de alimentación de emergencia cuenta con dos grupos generadores diesel con una autonomía de 8 horas. Las cargas principales conectadas a este subsistema son el sistema de ventilación y de aire comprimido en forma de cargas redundantes, bombas del sistema de canalización especial y la iluminación y tomacorrientes de los medios tecnológicos de defensa y locales seleccionados.

La alimentación ininterrumpible proviene de un banco de baterías con un tiempo de descarga de 30 minutos, considerado suficiente para evacuar a los trabajadores y conducir los procesos de producción a un estado seguro. Las cargas conectadas a este subsistema son el sistema de control radiológico, alarmas sonoras de evacuación y los sistemas de I&C de ventilación, celdas calientes y cajas de guantes. Los sistemas de detección de incendios, alumbrado de evacuación y planta telefónica se alimentan de forma ininterrumpible desde baterías independientes para ellos.

El sistema de aire comprimido de instrumentación suministra aire seco, limpio y libre de aceite para el comando de válvulas del sistema de ventilación y mecanismos de apertura y cierre de puertas de celdas calientes. Su diseño incorpora un subsistema de I&C para lograr una detección inmediata de fallas a través de alarmas redundantes y diversificadas.

Gestión de desechos radiactivos

Los radionúclidos que se prevén manipular determinan que la gestión de desechos esté

basada fundamentalmente en el principio de reducción de fuentes por decaimiento radiactivo. Así, se diseñan instalaciones para permitir el almacenamiento temporal de los desechos hasta su decaimiento por debajo de los niveles de desclasificación autorizados. La recolección se hace en los puntos de generación de los desechos por lo que es segregada mayoritariamente por radionúclidos. Se recogen separadamente los desechos líquidos, los sólidos, los solventes de centelleo líquido, el aceite contaminado y las soluciones acuosas.

Los medios de recolección utilizan el principio de interposición de barreras de protección (blindaje y/o confinamiento) en dependencia de las características de riesgo de los desechos.

Estimación de dosis para la operación normal

Miembros del público

La vía fundamental de exposición de los miembros del público en operación normal es la dispersión de efluentes gaseosos. Para la evaluación de las descargas anuales se toman fracciones de liberación (cociente de la actividad expulsada entre la actividad manipulada para un mismo período) de 5×10^{-8} para aerosoles, 10^{-5} para los radioyodos y de 10^{-3} para el tritio y el carbono, considerando la forma química en que se encuentran los radionúclidos, las características de los procesos, las etapas de purificación y sus eficiencias de retención en el momento de su cambio [1].

La evaluación de dosis efectiva para un hipotético grupo crítico compuesto de niños menores de un año y situados a 200 m del punto de emisión resultó ser del orden de $1 \mu\text{Sv}$. El radionúclido crítico es el ^{131}I con un aporte del 88% a la dosis total, seguido por el ^{125}I con un 9% y el tritio y el ^{14}C con un 3% [5].

Trabajadores ocupacionalmente expuestos

La vía de exposición evaluada con mayor aporte a las dosis colectivas es la irradiación externa, lo cual influyó en la decisión de contar con dosímetros de lectura directa para facilitar la aplicación de la filosofía ALARA. Las operaciones de mayor contribución a las dosis individuales son las producciones de radiofármacos marcados con ^{131}I y de producción de generadores de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$, con dosis efectivas anuales máximas entre 5 y 8 mSv y las operaciones de distribución de material radiactivo con dosis efectivas máximas entre 8 y 10 mSv por año [6].

Consideración de los sucesos radiológicos postulados en el diseño

En el diseño del Centro de Isótopos no existen procesos automatizados de envergadura que puedan causar pérdida de control de material radiactivo, en caso de fallas humanas y/o de equipamiento. Adicionalmente, el inventario radiactivo que se manipula no es potencialmente peligroso para los miembros del público. Estas razones hacen innecesario considerar el diseño de sistemas ingenieros que actúen sólo en emergencias como es usual en instalaciones nucleares.

El énfasis en el diseño para enfrentar sucesos radiológicos está en su prevención a través de la detección inmediata, clara e inequívoca de la superación de las condiciones normales de operación, ya que la mitigación de las consecuencias se logra con la actuación de los mismos sistemas ingenieros que funcionan en operación normal.

Por ejemplo, los incendios en lugares donde se concentran actividades significativas, como son el área de despacho y el depósito de desechos, se consideran como los sucesos más severos que pueden ocurrir con impacto a los miembros del público y afectación seria a las instalaciones. Se diseña entonces un sistema automático de detección de incendio cuyos lazos de detección se incluyen en la Categoría I de importancia para la seguridad. A sus componentes se les aplica los principios de funcionalidad, disponibilidad, fiabilidad, calificación y detección inmediata de fallas. Como resultado se concibe un sistema con supervisión las 24 horas del día, con alarmas diversificadas, redundantes y coincidentes, con posibilidad de intervención inmediata de los operadores, circuitos de supervisión redundantes en los focos más probables de incendio y con detección inmediata de fallas propias del sistema, entre otras características.

El análisis de los 16 sucesos postulados determina la necesidad de diseñar instalaciones y contar con medios auxiliares como trajes individuales de protección, máscaras de respiración *full-face*, filtros de protección respiratoria absolutos y combinados, dosímetros de lectura directa, dosímetros de área con rango hasta 10 Sv/h, un sistema de protección contra intrusos, instalaciones y medios de primeros auxilios y un 15% adicional de capacidad de almacenamiento de desechos radiactivos.

Estimación de dosis en caso de sucesos radiológicos

Miembros del público

Las evaluaciones de dosis en caso de incendios para los grupos críticos, muestran valores inferiores a 200 μSv de dosis efectiva y 4 mSv de dosis equivalente en tiroides [7]. La estimación de la actividad liberada, al ambiente se basó en la metodología utilizada por Flew y Lister [8], pero asumiendo los valores usados por McGuire [9] para la fracción del inventario radiactivo que se convierte en aerosol, vapor o gas.

Adicionalmente se evaluó el impacto de la descarga accidental de un tanque de retención del sistema de canalización especial que causaría exposición de los miembros del público por vía hídrica. Las evaluaciones de dosis muestran valores de dosis efectiva de 6 μSv y dosis equivalente en tiroides de 120 μSv para un grupo crítico similar a los considerados pero con diferente ubicación [7].

Tanto por vía atmosférica como hídrica la vía crítica de exposición es la ingestión de leche contaminada con radioyodos.

Trabajadores ocupacionalmente expuestos

Los estimados de dosis efectiva para los trabajadores de respuesta en caso de sucesos severos están en el orden de los 30 mSv, haciendo uso de medios individuales y otras medidas de protección [10]. La caída de contenedores con materia prima radisotópica, derrames de desechos líquidos de celdas calientes durante operaciones de transferencia y otros derrames aportan dosis efectivas en el orden de 1 mSv, considerando su ocurrencia en locales ventilados y tomando medidas de protección del personal.

Conclusiones

El proceso de diseño del Centro de Isótopos ha considerado aspectos como la formulación de objetivos de seguridad y protección radiológicas, la identificación y categorización de sistemas importantes para la seguridad y la aplicación de diversos principios de seguridad y protección. La utilización de las experiencias de diseño y operación de instalaciones similares ha

introducido desde los inicios del proceso de diseño una optimización cualitativa genérica. Adicionalmente se ha empleado el costo beneficio como técnica cuantitativa.

Las instalaciones y sistemas ingenieros resultantes del diseño garantizan ejecutar un proceso tecnológico viable y que cumple con los objetivos de seguridad y protección radiológicas propuestos. Se ha obtenido un diseño conceptualizado, funcional y evaluado, que ha permitido la concesión de licencias de construcción y operación por parte de la autoridad reguladora nacional.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a todos los colegas argentinos y cubanos que con su dedicación, conocimientos y experiencias hicieron posible el diseño del Centro de Isótopos.

Bibliografía

- [1] Gatti, A.M., Pérez Pijuán, S., Informe Preliminar de Seguridad del Centro de Isótopos, Doc. 0711-5301-OIADP-001-A, INVAP S.E, Bariloche, 1989.
- [2] Atmósfera. Requisitos Higiénicos Sanitarios: Concentraciones Máximas Admisibles, Alturas Mínimas de Expulsión y Zonas de Protección Sanitarias, Norma cubana NC 93-02-202, Comité Estatal de Normalización, Mayo 1988.
- [3] Pérez Pijuán, S., Distribución de los Medios Tecnológicos de Defensa, Nucleus 10 p. 41-43, (1991).
- [4] Seguridad Radiológica. Cajas de Guantes. Método de Ensayo de Estanqueidad, Norma IRAM 3 563, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Agosto 1987.
- [5] Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental del Centro de Isótopos, p. 4, Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, Febrero 1994.
- [6] Pérez Pijuán, S., Gatti, A.M. y otros, Informe Final de Seguridad del Centro de Isótopos, Cap. 8, Doc. CENTIS/DSR-144-001-A, Centro de Isótopos, Febrero 1997.
- [7] Evaluación del Impacto Ambiental de Tres Accidentes Postulados para el Centro de Isótopos, Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones. Diciembre 1994.
- [8] Flew, E.M., Lister, B.A.J., Assessment of the Potential Release of Radioactivity from Installations at AERE, Harwell. Implications for Emergency Planning, Handling of Radiation Accidents (Proc.Symp. 1969, Vienna), OIEA, Vienna (1969).
- [9] McGuire, S.A., A Regulatory Analysis on Emergency Preparedness for Fuel Cycle and Other Radioactive Material Licensees, Rep. NUREG1140 (Draft) USNRC, Washington, DC (1985).
- [10] Plan de Emergencia Radiológica del Centro de Isótopos, Doc. CENTIS/DSR-143-001-0, Centro de Isótopos, 1995..

INFRAESTRUCTURA ORGANIZATIVA DE LA AUTORIDAD REGULADORA DE CUBA PARA HACER FRENTE A LAS **EMERGENCIAS RADIOLOGICAS**

*Yamil López Forteza, José R. Quevedo García, Pablo Jerez Veguería, Rubén Ferro Fernández
Centro Nacional de Seguridad Nuclear,
Ciudad de La Habana, Cuba*

Introducción

La asignación a la Secretaría Ejecutiva de Asuntos Nucleares (SEAN) de las funciones regulatorias en seguridad nuclear y radiológica en 1980 por el Decreto Ley No. 56 Para la Regulación del Uso Pacífico de la Energía Nuclear constituyó la Autoridad Reguladora cubana en estas materias y sentó las bases para el establecimiento de una infraestructura organizativa nacional para hacer frente a las emergencias radiológicas.

En 1994, con el Decreto Ley No. 147 De la Reorganización de los Organismos de la Administración Central del Estado, la SEAN fue adscrita al Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) así como sus funciones.

En Cuba, el Decreto Ley No. 170 Del Sistema de Medidas de Defensa Civil de 1997 le asigna al Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil (EMNDC) la responsabilidad por la dirección y coordinación de los recursos materiales y humanos para hacer frente a cualquier tipo de catástrofe, incluyendo las emergencias radiológicas. Para la toma de decisiones esta autoridad se apoya en la asistencia técnica de los diferentes organismos de la Administración Central del Estado. En los casos de emergencias radiológicas es el CITMA, como Autoridad Reguladora, quien asiste técnicamente al EMNDC en la evaluación de los aspectos

radiológicos y la propuesta de las medidas de protección a adoptar. Este trabajo refleja y resume la organización adoptada por el CITMA en la respuesta a las emergencias radiológicas que pudieran ocurrir en el país.

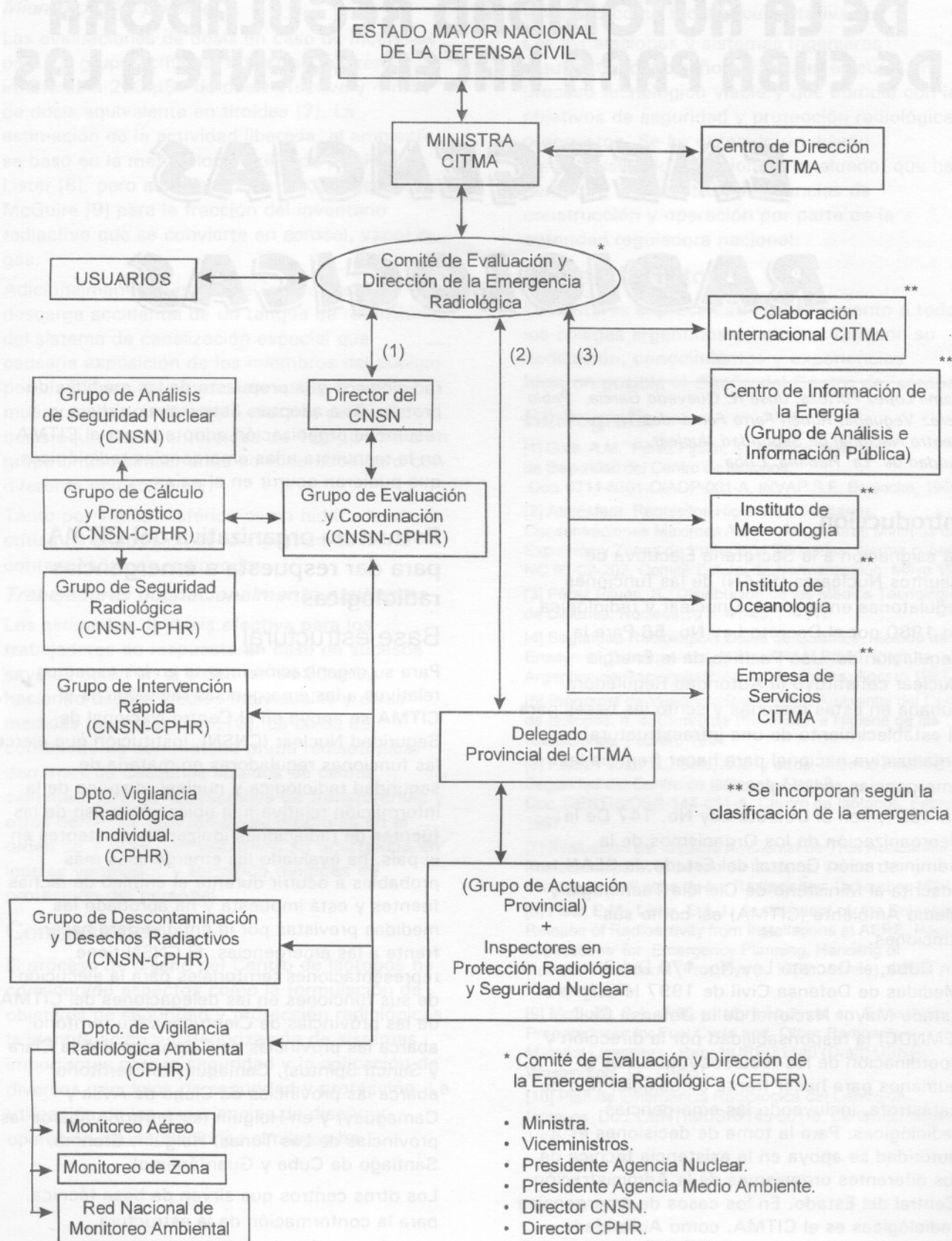
Estructura organizativa del CITMA para dar respuesta a emergencias radiológicas

Base estructural

Para su organización interna en los aspectos relativos a las emergencias radiológicas el CITMA se apoya en el Centro Nacional de Seguridad Nuclear (CNSN), institución que ejerce las funciones reguladoras en materia de seguridad radiológica y nuclear, dispone de la información relativa a la ubicación y uso de las fuentes de radiaciones ionizantes existentes en el país, ha evaluado las emergencias más probables a ocurrir durante el empleo de dichas fuentes y está impuesta y ha aprobado las medidas previstas por la entidad para hacer frente a las emergencias. El CNSN tiene representaciones territoriales para la ejecución de sus funciones en las delegaciones del CITMA de las provincias de Cienfuegos (su territorio abarca las provincias de Cienfuegos, Villa Clara y Sancti Spíritus), Camagüey (su territorio abarca las provincias de Ciego de Avila y Camagüey) y en Holguín (su territorio abarca las provincias de Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo).

Los otros centros que sirven de base técnica para la conformación de la estructura organizativa de respuesta a emergencias radiológicas son el Centro de Protección e

Estructura organizativa del CITMA para hacer frente a emergencias radiológicas



Higiene de las Radiaciones (CPHR) y las unidades administrativas de las delegaciones del CITMA de las provincias de Cienfuegos, Camagüey y Holguín que agrupan a especialistas vinculados al empleo de las técnicas nucleares. En correspondencia con la magnitud de las emergencias, la estructura prevé la inclusión de otras instituciones del CITMA.

El CPHR es un centro de servicio científico-técnico de protección radiológica que cuenta con un laboratorio para la determinación de la concentración de radionúclidos en muestras ambientales, un laboratorio secundario de calibración dosimétrica, un laboratorio de dosimetría ocupacional para la determinación de las dosis de radiación externa, un laboratorio con un contador de cuerpo entero para la determinación de las dosis por contaminación interna con radionúclidos y una instalación para el acondicionamiento y almacenamiento temporal de desechos radiactivos.

Los unidades administrativas mencionadas anteriormente en los diferentes territorios asesoran a las entidades en la aplicación de técnicas nucleares y cuentan con laboratorios para la determinación de las concentraciones de elementos radiactivos en muestras ambientales.

La estructura del CITMA de respuesta a las emergencias radiológicas está integrada por personal con capacitación y entrenamiento en materia de protección radiológica perteneciente a los centros mencionados anteriormente.

Estructura de la autoridad reguladora

La estructura a nivel central descansa en un Grupo de Evaluación y Coordinación integrado por personal directivo y técnico con capacidad y autoridad para evaluar la emergencia y orientar las acciones a emprender tanto a los grupos operativos intervinientes, usuarios y al EMNDC a través del Comité de Evaluación y Dirección de la Emergencia Radiológica (CEDER).

En correspondencia con la estructura del CNSN, están constituidos grupos operativos en las regiones

del país donde este centro tiene representaciones territoriales para ejercer sus funciones.

Las funciones fundamentales de la organización, tanto a nivel central como territorial, en dependencia de la región del país donde ocurra la emergencia radiológica son las siguientes:

- a) dar a conocer al EMNDC, órganos, organismos e instituciones del Estado, el pronóstico de las consecuencias radiológicas (daño o riesgo asociado) para la población y la economía;
- b) proponer al EMNDC las medidas más oportunas e inmediatas que deben ser adoptadas para minimizar las consecuencias que se deriven del suceso radiológico;
- c) orientar la actuación coordinada de las diferentes instituciones del CITMA, órganos, organismos e instituciones del Estado involucradas en la emergencia en la toma de medidas, de manera que se consiga el máximo de protección;
- d) la notificación internacional de acuerdo con los convenios contraídos por el país en los casos que proceda;
- e) evaluar las dosis del personal involucrado en la emergencia radiológica y aquel que presumiblemente haya sido afectado por la misma;
- f) la vigilancia radiológica ambiental;
- g) proponer la necesidad de asistencia médica; entre otras funciones.

El Comité de Evaluación y Dirección de la Emergencia Radiológica está integrado por:

- ✧ **Ministra**
- ✧ **Viceministros**
- ✧ **Presidente de la Agencia Nuclear**
- ✧ **Presidente de la Agencia de Medio Ambiente**
- ✧ **Director del Centro Nacional de Seguridad Nuclear**
- ✧ **Director del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones**
- ✧ **Representante del Estado Mayor de la Defensa Civil**
- ✧ **Dirección UNO**

Variantes de respuesta a sucesos radiológicos y nucleares

El nivel de respuesta del CITMA ante la ocurrencia de cualquier suceso que pudiera conllevar a una situación real o potencial de emergencia radiológica estará determinado por dos criterios básicos: por su ubicación geográfica y por su magnitud.

De acuerdo con el primer criterio se determinan tres zonas fundamentales: la primera zona abarca el territorio nacional de la República de Cuba, incluyendo sus aguas territoriales, la segunda zona abarca el territorio fuera de los límites nacionales, donde un suceso radiológico puede tener un impacto considerable sobre el país y una tercera zona que incluye el territorio restante fuera de los límites de la segunda zona.

La magnitud de los sucesos se definirá por la Escala Internacional de Sucesos Nucleares (INES) [1] para los casos de sucesos en instalaciones nucleares y la Escala de Sucesos Radiológicos (ESR) [2] elaborada en Cuba y puesta en vigor en 1991, para instalaciones radiactivas y prácticas con materiales radiactivos.

Para definir los sucesos radiológicos se han considerado además dos grupos: sucesos que ocurren en tierra con potencialidad (mayor o menor) de impacto sobre el territorio nacional y sucesos ocurridos en aguas alrededor del país.

En correspondencia con lo anterior se han elaborado por zonas, diversas variantes de respuesta a adoptar, teniendo en cuenta para ello el tipo de suceso (radiológico o nuclear), la magnitud (definido para cada nivel de las escalas INES y ESR), el aviso y, los niveles de activación (grupos desplegados, movilizados y localizables) de los diferentes grupos operativos.

La puesta en práctica de los niveles de activación estará en dependencia en primera instancia de la evaluación preliminar del suceso por parte del especialista de guardia, a partir del cual se desarrollarán e implementarán una serie de procedimientos por todo el personal vinculado a la emergencia los cuales están definidos en el Plan de Emergencia del CITMA acorde a los que se indican en el Vol. No. 87 Colección Seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) [3] y Vol. No. 91 Colección Seguridad del OIEA [4]. Actualmente parte de estos procedimientos se encuentran en elaboración y otros en revisión para su aprobación. Estos procedimientos de forma genérica incluyen las actividades siguientes:

comunicaciones; disposiciones acerca de la información pública en caso de emergencias radiológicas; monitoreo radiológico; notificación a organismos internacionales; instrumentación y evaluación rápida de las dosis al público en caso de accidentes; entrada y salida de áreas delimitadas en la emergencia; actuación del especialista de guardia; actuación del CITMA en casos de emergencias radiológicas en instalaciones radiactivas y transporte de materiales radiactivos; descontaminación de áreas entre otros.

Intervención en situaciones de emergencias radiológicas

Las decisiones relativas a la aplicación de las medidas de protección deberán basarse según se señala en el Vol. No. 72 Colección Seguridad del OIEA [5], en un equilibrio entre el detrimento que ocasionan y la reducción prevista de la exposición, y por tanto disminución del riesgo radiológico que logran. En esto también influyen las posibilidades prácticas de aplicación de las medidas

Toda medida de protección entraña riesgo, dificultades y costos, según se describen en el Vol. No. 55 de la Colección Seguridad del OIEA [6], y varía en naturaleza y grado según la medida de protección de que se trate.

Factores locales y específicos de los sucesos radiológicos influirán en las decisiones sobre los niveles más apropiados para poner en práctica medidas de protección. En [5] se formulan orientaciones sobre estos aspectos, los cuales se resumen en el Cuadro II del Vol. No. 81 de la Colección Seguridad del OIEA [7] y se expresan como una gama de dosis correspondientes a cada medida de protección.

Por razones de protección radiológica, según se indica en [7], debería ser posible definir, para cada medida de protección, un nivel inferior de dosis por debajo del cual no se justificaría la implementación de dicha medida y un nivel superior de dosis para la cual deberá haberse procedido, casi con certeza, a la aplicación de la medida. Los valores adoptados en Cuba para estos niveles corresponden a 50 y 300 mSv (nivel A) y 500 y 2500 mSv (Nivel B) para la radiación externa y la irradiación de la tiroides respectivamente. Están establecidos valores de otras magnitudes directamente proporcionales a las dosis que puede recibir la población que sirven de criterio orientativo para la toma de

decisiones. Estas magnitudes y medidas de protección a que puede recurrirse para reducir dosis de radiación en caso de emergencias en instalaciones nucleares están en correspondencia con los indicados en el Cuadro III de [7]. Cabe señalar que para aquellos valores de dosis que se encuentren entre los niveles A y B se tomarán medidas de protección en correspondencia con la situación concreta de la evolución de la emergencia y las condiciones locales imperantes.

De acuerdo con los nuevos conceptos plasmados en nuevas Normas Básicas Internacionales de Seguridad del OIEA [8] acerca de la intervención en situaciones de emergencias, se postula que éstos deberán estar basados en niveles de intervención y niveles de actuación los cuales se expresan en función de la dosis que se espera evitar gracias a una acción protectora y la concentración de radionúclidos en alimentos, productos agrícolas y el agua. Estos niveles deberán ser optimizados para la toma de medidas de manera que no rebasen ciertos niveles de dosis para los cuales una intervención estará justificada.

En nuestro país, en correspondencia con estos nuevos conceptos desarrollados en [8 y 9], y a la luz de la revisión de las regulaciones nacionales vigentes se está realizando la rectificación, el establecimiento y/o adopción de niveles de intervención optimizados por ejemplo para la permanencia en edificios, la evacuación temporal, reasentamiento permanente, realojamiento temporal y profilaxis con yodo en función de dosis evitable y dosis absorbida comprometida evitable a la tiroides así como los aspectos de protección radiológica para los trabajadores participantes en una intervención en situaciones de emergencia radiológica.

Conclusiones

Nuestra experiencia demuestra que es conveniente que en un país como Cuba, de recursos económicos limitados, las estructuras gubernamentales adoptadas para hacer frente a las emergencias radiológicas sean coordinadas por la Autoridad Reguladora que es la entidad capaz de asistir técnicamente en la evaluación de los aspectos radiológicos y orientar metodológicamente la propuesta de las acciones de protección más eficaces y efectivas que deberán adoptarse por la organización responsable a nivel nacional por la gestión de emergencia.

En nuestro país existe una infraestructura capaz de dar respuesta a las situaciones de emergencias radiológicas que puedan surgir en las instalaciones radiactivas que actualmente se encuentran en operación y accidentes nucleares con implicaciones para el territorio nacional. El CNSN en su carácter de centro que ejecuta la actividad reguladora constituye el eje central de esta organización.

Es necesario asimilar e implementar los enfoques actuales en los que se basa la intervención en las situaciones de exposición de emergencias con el objetivo de adecuar y optimizar los niveles de intervención y de actuación.

Bibliografía

- [1] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Escala Internacional de Sucesos Nucleares, OIEA, Viena (1990).
- [2] II CONGRESO REGIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR Y RADIOLÓGICA, Respuesta a las situaciones de emergencias radiológicas en Cuba, Zacatecas, México (1993).
- [3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Planificación y Preparación de Respuesta debidas a Accidentes de Transporte en los que Intervengan Materiales Radiactivos, Colección Seguridad No. 87, OIEA, Viena (1989).
- [4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Emergency Planning and Preparedness for Accidents Involving Radioactive Materials Used in Medicine, Industry, Research and Teaching, Safety Series No. 91, IAEA, Viena (1989).
- [5] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Principios para el Establecimiento de Niveles de Intervención para la Protección del Público en Caso de Accidentes Radiológicos en una Instalación Nuclear, Colección Seguridad No.72, OIEA, Viena (1987).
- [6] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Planificación de las Medidas de Emergencia en el Exterior del Emplazamiento en el Caso de Accidente Radiológico en una Instalación Nuclear, Colección Seguridad No.55, OIEA, Viena (1982).
- [7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Niveles de Intervención Derivados para su Aplicación al Control de las Dosis de Radiación al Público en Caso de Accidente Nuclear o de Emergencia Radiológica, Principios, Procedimientos y Datos, Colección Seguridad No.81, OIEA, Viena (1988).
- [8] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección Contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación, Colección Seguridad No.115, OIEA, Viena (1997).
- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Generic Intervention Levels for Protecting the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency, Interim Report for Comment, IAEA-TECDOC-698, Vienna (1993).

decisiones. Estas magnitudes y medidas de protección a que puede recurrirse para reducir dosis de radiación en caso de emergencias en instalaciones nucleares están en correspondencia con los indicados en el Cuadro III de [7]. Cabe señalar que para aquellos valores de dosis que se encuentren entre los niveles A y B se tomarán medidas de protección en correspondencia con la situación concreta de la evolución de la emergencia y las condiciones locales imperantes.

De acuerdo con los nuevos conceptos plasmados en nuevas Normas Básicas Internacionales de Seguridad del OIEA [8] acerca de la intervención en situaciones de emergencias, se postula que éstos deberán estar basados en niveles de intervención y niveles de actuación los cuales se expresan en función de la dosis que se espera evitar gracias a una acción protectora y la concentración de radionúclidos en alimentos, productos agrícolas y el agua. Estos niveles deberán ser optimizados para la toma de medidas de manera que no rebasen ciertos niveles de dosis para los cuales una intervención estará justificada.

En nuestro país, en correspondencia con estos nuevos conceptos desarrollados en [8 y 9], y a la luz de la revisión de las regulaciones nacionales vigentes se está realizando la rectificación, el establecimiento y/o adopción de niveles de intervención optimizados por ejemplo para la permanencia en edificios, la evacuación temporal, reasentamiento permanente, realojamiento temporal y profilaxis con yodo en función de dosis evitable y dosis absorbida comprometida evitable a la tiroides así como los aspectos de protección radiológica para los trabajadores participantes en una intervención en situaciones de emergencia radiológica.

Conclusiones

Nuestra experiencia demuestra que es conveniente que en un país como Cuba, de recursos económicos limitados, las estructuras gubernamentales adoptadas para hacer frente a las emergencias radiológicas sean coordinadas por la Autoridad Reguladora que es la entidad capaz de asistir técnicamente en la evaluación de los aspectos radiológicos y orientar metodológicamente la propuesta de las acciones de protección más eficaces y efectivas que deberán adoptarse por la organización responsable a nivel nacional por la gestión de emergencia.

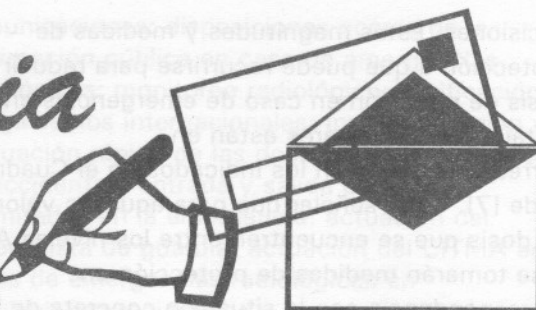
En nuestro país existe una infraestructura capaz de dar respuesta a las situaciones de emergencias radiológicas que puedan surgir en las instalaciones radiactivas que actualmente se encuentran en operación y accidentes nucleares con implicaciones para el territorio nacional. El CNSN en su carácter de centro que ejecuta la actividad reguladora constituye el eje central de esta organización.

Es necesario asimilar e implementar los enfoques actuales en los que se basa la intervención en las situaciones de exposición de emergencias con el objetivo de adecuar y optimizar los niveles de intervención y de actuación.

Bibliografía

- [1] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Escala Internacional de Sucesos Nucleares, OIEA, Viena (1990).
- [2] II CONGRESO REGIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR Y RADIOLÓGICA, Respuesta a las situaciones de emergencias radiológicas en Cuba, Zacatecas, México (1993).
- [3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Planificación y Preparación de Respuesta debidas a Accidentes de Transporte en los que Intervengan Materiales Radiactivos, Colección Seguridad No. 87, OIEA, Viena (1989).
- [4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Emergency Planning and Preparedness for Accidents Involving Radioactive Materials Used in Medicine, Industry, Research and Teaching, Safety Series No. 91, IAEA, Viena (1989).
- [5] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Principios para el Establecimiento de Niveles de Intervención para la Protección del Público en Caso de Accidentes Radiológicos en una Instalación Nuclear, Colección Seguridad No.72, OIEA, Viena (1987).
- [6] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Planificación de las Medidas de Emergencia en el Exterior del Emplazamiento en el Caso de Accidente Radiológico en una Instalación Nuclear, Colección Seguridad No.55, OIEA, Viena (1982).
- [7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Niveles de Intervención Derivados para su Aplicación al Control de las Dosis de Radiación al Público en Caso de Accidente Nuclear o de Emergencia Radiológica, Principios, Procedimientos y Datos, Colección Seguridad No.81, OIEA, Viena (1988).
- [8] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección Contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación, Colección Seguridad No.115, OIEA, Viena (1997).
- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Generic Intervention Levels for Protecting the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency, Interim Report for Comment, IAEA-TECDOC-698, Vienna (1993).

Correspondencia con los lectores



Ernesto de la Garza Amaro, médico residente en la Isla de la Juventud, nos solicitó información sobre la imagenología médica aplicada a las neurociencias. Satisfacemos su interés con la publicación del artículo "Tomografía por emisión de fotones en la neurología" de especialistas del Laboratorio de NeuroSPECT del Centro Internacional de Restauración Neurológica.

TOMOGRAFIA POR EMISION DE FOTONES EN LA NEUROLOGIA

Carlos Alfredo Sánchez Catasús, Rafael Rodríguez Rojas, Angel Aguila Ruiz
Laboratorio de NeuroSPECT, Centro Internacional de Restauración Neurológica, Ciudad de La Habana, Cuba

INTRODUCCION

La imagenología médica ha avanzado considerablemente en los últimos quince años, y con particular relevancia en el campo de las neuroimágenes, en gran parte por el desarrollo de nuevos instrumentos para obtener imágenes, la introducción de las técnicas tomográficas y la especial atención que se le viene prestando a las enfermedades neurológicas en buena parte del mundo.

Las técnicas de neuroimágenes a partir de radioisótopos o tomografías de emisión, de positrones PET (del inglés, *Positron Emission Tomography*) o de fotón único SPECT (del inglés, *Single Photon Emission Computed Tomography*), consisten en la obtención, por medio de detectores especializados de radiaciones nucleares (cámaras gamma rotatorias o cámaras positrónicas), de la distribución tridimensional de un radiofármaco (radioisótopo + fármaco) previamente administrado al paciente y que se distribuye en el cerebro de acuerdo con algún proceso bioquímico o fisiológico. La reconstrucción tomográfica permite obtener una imagen de la estructura interna de un objeto tridimensional a partir del conjunto de sus proyecciones bidimensionales. Su origen se remonta a 1917 con el trabajo publicado por el

matemático austriaco J. Radon [1]. Sin embargo, no es hasta la segunda mitad de este siglo que varios investigadores emplean con éxito, en diversas aplicaciones, el método desarrollado por Radon: Bracewell en la radioastronomía [2]; De Rosier y Klug en la microscopía electrónica [3]; Cormack en la radiología [4]; y Kulh y Edwards en la medicina nuclear [5].

De manera general, la tomografía consiste en estimar los valores de una función $f(x, y, z)$ definida en el espacio real IR^3 a partir del conjunto de sus proyecciones bidimensionales definidas en IR^2 (apéndices 1 y 2) [6]. La función f representa en cada caso particular la distribución espacial de alguna propiedad física del objeto en estudio. En la neurología nuclear, f representa la distribución de un radiofármaco en el cerebro.

En la SPECT se emplean radioisótopos emisores de radiación gamma mientras que en la PET emisores de positrones. En ambas son radioisótopos cuyas radiaciones no constituyen un peligro para la salud humana, excepto en mujeres embarazadas, con dosis de radiación comparable, y en algunos casos menor, con los rayos X, los cuales son ampliamente utilizados en la medicina moderna.

La PET ha sido considerada como superior a la SPECT por la mayor diversidad de moléculas orgánicas que se pueden marcar con los emisores positrónicos más utilizados (C^{11} , F^{18} y O^{15}), y por tanto mayor variedad de procesos evaluables, y por la mayor exactitud con respecto a la SPECT. De hecho la PET ha comenzado a trazar un puente entre la clínica neurológica y los

últimos avances de la neurobiología [7,8]. No obstante, los altos costes de la PET han motivado en los últimos años el desarrollo de la SPECT en tres direcciones: 1) la instrumentación, de lo cual son un ejemplo los sistemas de múltiples cabezas y la colimación por circuitos de coincidencia que le han abierto el uso de emisores positrónicos [9]; 2) los problemas asociados a la cuantificación [10]; y 3) el empleo de radiofármacos con afinidad por neuroreceptores marcados con emisores gamma, I^{123} primero [11] y más recientemente marcados con Tc-99m [12]. Todos estos avances han reducido considerablemente la distancia que separa ambas técnicas, con la ventaja para la SPECT por su mucho menor coste.

La SPECT fue creada en 1963 por Kuhl y Edwards [5] y su lento avance inicial se debió a limitaciones en el campo de la instrumentación (detectores y computadoras) y de la radiofarmacia. Sin embargo, a partir de la segunda mitad de la década de los setenta ha tenido lugar un rápido crecimiento de dos áreas, íntimamente vinculadas en el desarrollo histórico de la medicina nuclear.

El presente artículo tiene como objetivo difundir en qué consiste la SPECT, las aplicaciones clínicas más importantes en la neurología, la instrumentación y los radiofármacos más utilizados, sus ventajas y limitaciones, así como su lugar y significación en el contexto mundial de la imagenología cerebral contemporánea. Además, se mencionan algunos de los resultados obtenidos al aplicar esta técnica en el Centro Internacional de Restauración Neurológica (CIREN).

INSTRUMENTACION

Los sistemas SPECT disponibles son de dos tipos [13]: los sistemas estáticos, los cuales suponen que la distribución del radiofármaco no varía temporalmente, y los sistemas dinámicos, en los cuales se pueden estudiar también cambios rápidos de la distribución.

Los sistemas dinámicos son los menos difundidos y en general se emplean para los estudios del flujo sanguíneo cerebral regional (FSCr) a partir del aclaramiento cerebral del Xe^{133} o del Xe^{127} .

Tienen la ventaja de que se puede medir el FSCr en unidades absolutas (mL/min), aunque las imágenes obtenidas son de menor calidad y sólo se pueden lograr de uno a tres cortes en cada estudio. Entre los sistemas de este tipo se encuentran los ASPECT (anular SPECT), consistentes en un arreglo anular de varios detectores.

Los sistemas estáticos son los más difundidos y en los últimos años han evolucionado

considerablemente, hasta el punto de llegar a alcanzar una resolución espacial por debajo de los 5 mm, comparable a los sistemas PET más modernos. Estos logros se deben, como ya se mencionó antes, al empleo de múltiples cabezas detectoras, diseño de nuevos colimadores y al uso de la colimación electrónica. Algunos líderes de opinión han vaticinado que en un futuro los sistemas PET y SPECT se fundirán en un sólo sistema con el nombre genérico de tomografía de emisión computarizada (ECT) [9]. No obstante, aún se emplean los sistemas SPECT de un solo cabezal de menor resolución espacial. Esto se debe principalmente a que ya estaban en explotación para otras aplicaciones clínicas cuando surgió el boom de la neurología nuclear y a la no disponibilidad inmediata de recursos para asimilar las nuevas tecnologías. Estos sistemas racionalmente utilizados y con un estricto control de la calidad pueden aún rendir valiosos frutos.

Otras de las cuestiones importantes relacionadas con la instrumentación son las computadoras y los métodos para el procesamiento de las imágenes. En este campo ha habido una creciente incorporación de máquinas cada vez más veloces y con mayor memoria, junto a una serie de nuevas prestaciones que hacen más eficiente su trabajo (nuevos periféricos, conexión a redes, etc.). Todos estos avances han permitido la investigación e implementación de nuevos métodos de procesamiento, particularmente en las áreas de reconstrucción tomográfica y de cuantificación [10] (correcciones de atenuación y dispersión de la radiación).

RADIOFARMACOS

El área de radiofarmacia ha crecido siempre más rápidamente y de forma continua. Los radiofármacos que más se utilizan en la SPECT son de dos clases, los que se distribuyen de manera proporcional al FSCr y aquellos que se distribuyen de acuerdo con la densidad de un neuroreceptor.

Entre los radiofármacos que se distribuyen de manera proporcional al FSCr se encuentran [14]:

xenón 133 (Xe^{133})

xenón 127 (Xe^{127})

Tl^{201} -diethyldithiocarbamate (Tl^{201} -DDC)

I^{123} -hidroxil-metil-yodo-benzil-propano-diamina (I^{123} -HIPDM)

I^{123} -ioanfetamina (I^{123} -IMP)

Tc^{99m} -etil-cisteinato-dímero (Tc^{99m} -ECD) y

Tc^{99m} -hexametil-proline-amina-oxima

(Tc^{99m} -HMPAO). De todos ellos, los más utilizados son los marcados con Tc^{99m} (HMPAO y ECD) por la

calidad de la imagen, su menor coste y mayor disponibilidad.

En particular, el Tc^{99m} -HMPAO es el radiofármaco que más se ha utilizado y se cuenta con una mayor experiencia clínica (Fig. 1). Es liposoluble, neutro eléctricamente y tiene bajo peso molecular, de aquí su capacidad para cruzar la barrera hemato-encefálica. De manera general, al llegar al tejido cerebral el HMPAO reacciona con el glutatión, el cual lo hidroliza quedando retenido en el tejido de manera proporcional al FSCr durante 4 horas aproximadamente, representando el FSCr correspondiente al momento de la inyección. Su principal desventaja es su baja estabilidad (sólo es útil durante los 30 min después del marcaje), por esta razón ha crecido el interés en el Tc^{99m} -ECD, el cual tiene mayor estabilidad *in vitro*.

Los radiofármacos que se distribuyen de acuerdo con la densidad de un neurorreceptor son más recientes en la historia de la SPECT cerebral y han revolucionado el uso de esta técnica en la neurología y la psiquiatría. Las imágenes obtenidas a partir de estos compuestos tienen la ventaja de ofrecer información mucho más específica con relación al funcionalismo cerebral. Entre los radiofármacos más utilizados con afinidad por neurorreceptores se encuentran [10]: con afinidad por receptores dopaminérgicos, principalmente D_2 , I^{123} -yodobenzamide, I^{123} -epidepride, I^{123} -yodobenzufuran, I^{123} -lisuride, I^{123} -yodospiperone y I^{123} -NCQ 298; con afinidad por receptores colinérgicos, I^{123} -yodoexetimida y I^{123} -3 quinclidiny 4-yodobenzilate; y con afinidad por receptores benzodiazepínicos el I^{123} -iomacénil. También han demostrado ser muy útiles los estudios simultáneos con dos radiofármacos diferentes, marcados también con distintos radioisótopos, uno para visualizar el FSCr y el otro para visualizar la densidad de un determinado neurorreceptor.

Los progresos en el área de la instrumentación así como los relacionados con los nuevos radiofármacos han impulsado el desarrollo de las aplicaciones clínicas.

APLICACIONES CLÍNICAS

Las aplicaciones clínicas más importantes de la SPECT cerebral han estado orientadas a la evaluación del FSCr en la enfermedad cerebrovascular en diferentes estadios, en el diagnóstico diferencial de las demencias y en el estudio de las epilepsias.

De más reciente aparición son los estudios con neuroactivación, los cuales consisten en estudiar el FSCr en reposo y durante algún tipo de activación (farmacológica, mental, motora, sensorial y durante una crisis epiléptica inducida). Estos estudios

brindan mucha más información que los simples estudios basales o en reposo, pues se puede estudiar cómo responden funcionalmente determinadas áreas cerebrales ante un estímulo dado. Estos estudios parten de la base de que existe un acople entre el FSCr y el metabolismo cerebral.

En algunos casos el resultado del estudio basal es inespecífico, sin embargo la respuesta ante un estímulo refleja un patrón de cambio del FSCr más asociado a la patología en cuestión. Por ejemplo, los trabajos publicados con estudios basales en la esquizofrenia reportan resultados contradictorios entre sí, mientras que los reportados con activación mental muestran resultados más consistentes y de mayor valor clínico en el manejo de estos pacientes [15].

Los estudios con neuroactivación están en su primera infancia y en fase de investigación/desarrollo [16]. Su implementación e interpretación es relativamente compleja. En primer lugar, la instrumentación debe estar especialmente afinada (resolución espacial, contraste y relación señal/ruido). En segundo lugar, hay que tener un conocimiento cuantitativo, en términos estadísticos, de la variabilidad de los estudios basales o en reposo y en qué condiciones se realizarán atendiendo al tipo de estímulo o paradigma activador que se empleará. En tercer lugar, es importante la selección e implementación adecuada de dicho paradigma, de manera que se logre estimular las áreas deseadas de acuerdo con la patología en estudio. Por último, el análisis de los datos y la interpretación de los resultados implica la solución de varios problemas: la fusión SPECT-SPECT, la implementación de métodos para extraer diferencias estadísticamente significativas reposo/neuroactivación y el diseño de imágenes paramétricas, entre otros.

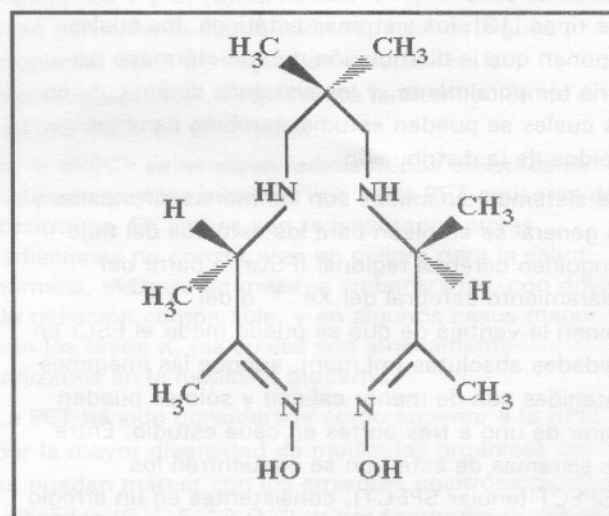


Figura 1
Estructura química del HMPAO.

Gran parte de los estudios realizados a partir de estos métodos han estado orientados a:

- 1) estudiar reserva vascular en pacientes con riesgo de tener un ataque agudo cerebrovascular a través de la activación farmacológica con vasodilatadores, principalmente empleando la acetazolamida [17];
- 2) buscar patrones de activación mental específicos en la esquizofrenia [15];
- 3) estudiar los cambios del FSCr durante una activación mental en pacientes con probable enfermedad de Alzheimer en estadios iniciales de la enfermedad;
- 4) identificar foco epileptógeno en las epilepsias parciales de origen temporal refractarias al tratamiento médico, obteniéndose en algunos estudios una sensibilidad cercana al 100% [18]; y
- 5) estudiar los cambios del FSCr en la enfermedad de Parkinson durante una tarea motora estereotipada, los cuales se han realizado en su mayoría a partir de la PET [19], entre los trabajos reportados a partir de la SPECT está el de nuestro grupo, realizado en dos pacientes parkinsonianos y que además incluyó el estudio después de la palidotomía [20].

Otras de las aplicaciones clínicas de gran interés son las relacionadas con los estudios con radiofármacos con afinidad por neuroreceptores, como ya se mencionó antes, por su especificidad desde el punto de vista metabólico y por sus implicaciones farmacológicas. Este es también un campo en período de investigación/ desarrollo y requiere tener disponible métodos de cuantificación en la SPECT. Los estudios más numerosos realizados en este tema han sido principalmente en la enfermedad de Parkinson, sobre todo en el diagnóstico diferencial de los parkinsonismos a partir de los compuestos con afinidad por los receptores dopaminérgicos [21], los cuales también se han utilizado en otros trastornos del movimiento (Corea de Huntington, etc.) y en la esquizofrenia [21]. Otros de los estudios reportados muestran muy buenos resultados en la identificación del foco epileptógeno en las epilepsias parciales mediante el empleo de radiofármacos con afinidad por los receptores benzodiazepínicos [22], que además se han empleado en algunas patologías psiquiátricas.

En nuestro laboratorio se han realizado un grupo de trabajos científicos orientados a mejorar la calidad de las imágenes y en investigaciones clínicas en la enfermedad de Parkinson a partir de la SPECT con Tc 99m -HMPAO [20, 23-28].

ESTUDIOS EN ANIMALES

Los estudios en animales tienen gran importancia en las investigaciones básicas y preclínicas, tanto para evaluar nuevos radiofármacos así como en las investigaciones neurofarmacológicas.

La mayoría de los estudios reportados han sido realizados a partir de la PET o con sistemas diseñados específicamente para estudiar animales. Estos últimos han alcanzado ya una resolución espacial de 2 mm. Los estudios se han llevado a cabo con radiofármacos marcadores del FSCr y con compuestos con afinidad por neuroreceptores, de particular interés son los realizados en monos y en ratas. También hay varios reportes empleando la SPECT en los cuales se han obtenido buenos resultados. Nuestro grupo realizó (con resultados positivos) una evaluación de los cambios del FSCr después de la infusión de factor de crecimiento de nervio (NGF) en primates no humanos envejecidos [29].

CONCLUSIONES

Las imágenes cerebrales existentes en la actualidad representan, a través de complejos procesos, alguna o varias de las propiedades del tejido cerebral, es decir:

- 1) estructura;
- 2) procesos fisiológicos o bioquímicos;
- 3) procesos bioquímicos modificados o inducidos; y
- 4) la distribución de un medicamento.

Así, por ejemplo, las imágenes obtenidas por tomografía de rayos X (TAC), representan, a través de la absorción de los rayos X, la distribución de los coeficientes de atenuación para dicha radiación, que a su vez tiene una relación directa con la distribución de densidades del tejido cerebral. La resonancia magnética (RMI), el mapeo electroencefalográfico (EEG) y las técnicas a partir de radioisótopos (PET y SPECT) son otras de las neuroimágenes que visualizan otros aspectos del cerebro humano.

El mérito o valor relativo de una imagen médica está dado por cuatro elementos:

- 1) el tipo de información que produce;
- 2) la exactitud (la cual incluye, resolución espacial, contraste y relación señal/ruido);
- 3) el daño biológico producido en el paciente; y
- 4) el costo en términos económicos.

A la luz de este concepto, ninguna de las modalidades de neuroimágenes existentes sustituye totalmente a las demás, de aquí el carácter complementario de cada una de ellas y el creciente interés por la imágenes multimodales. Sin embargo, en determinadas situaciones clínicas se convierte en crucial el tipo de información que produce una determinada modalidad de imagen. Por ejemplo, en varias de las enfermedades degenerativas del sistema nervioso central, sobre todo en los estadios incipientes, las imágenes obtenidas mediante las modalidades de tipo estructural, como la TAC o la RMI clásica, son normales o no muestran alteraciones específicas con relación a la enfermedad, mientras que las modalidades de tipo funcional y metabólico,

como la PET o la SPECT, evidencian alteraciones específicas aún cuando no hay o son muy ligeros los síntomas clínicos [30]. Esta sensibilidad particular, ante pequeñas alteraciones funcionales o metabólicas, les confiere a las técnicas radioisotópicas un valor especial como herramientas para evaluar los cambios que producen determinados procedimientos terapéuticos en el moderno ámbito de la restauración neurológica.

Es importante subrayar que los recientes avances en el campo de la RMI funcional y la RMI espectrométrica han abierto un promisorio futuro en el campo de la neuroimagenología funcional [30], entre otras razones, por su carácter estructural y funcional/metabólico, su gran exactitud y ninguno o mínimo daño biológico. Estas ventajas no implican que el resto de las modalidades estén en peligro de extinción. Pensar así sería ignorar el desarrollo que también tiene lugar en las otras técnicas. Por citar sólo un ejemplo, la RMI no puede técnicamente, y su solución no está a la vista, visualizar la distribución de un medicamento y su interacción con uno o más neuroreceptores, cuestión ya resuelta por la PET para drogas concretas [31].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Radon, J., Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Berichte Saechsische Akademie der Wissenschaften*, 69, 262-277 (1917).
- [2] Bracewell, R.N., Strip integration in radio astronomy. *Aust. J. Phys.*, 9, 198-217, (1956).
- [3] DeRosier, D.J. y Klug, A., Reconstruction of three dimensional structures from electron micrographs. *Nature* 217, 130-134 (1968).
- [4] Cormack, A.M., Reconstruction of Densities from their Projections, with Applications in Radiological Physics. *Phys. Med. Biol.*, 18, 195-207 (1973).
- [5] D.E. Kuhl y R. Q. Edwards, Image separation radioisotope scanning., *Radiology* 80, 653-661 (1963).
- [6] C. Sánchez Catasús, Reconstrucción tomográfica. Su aplicación para explorar el cerebro mediante radiosótopos y cámara gamma, *Revista Cubana de Física*, 17, no. 2 (1997).
- [7] H. Wagner, 1996 SNM Annual Meeting Medical Problem Solving, *J. Nucl. Med.*, 37, No. 8, 11N-31N (1996).
- [8] N. D. Volkow, J. S. Fowler, PET evaluation of the dopamine system of the human brain, *J. Nucl. Med.*, 37, 1242-1255 (1996).
- [9] H. Wagner, A new era of certainty, *J. Nucl. Med.*, 36, No. 8, 28N (1995).
- [10] Rosenthal et al., Quantitative SPECT Imaging, *J. Nucl. Med.*, 36, 1498-1513 (1995).
- [11] B. Maziere et al., Studying in vivo brain chemistry with SPECT: receptor and neurotransmission, en: *New trends in Nuclear Neurology and Psychiatry* (John Libbey & Company Ltd, London, Paris, Rome, pp. 85-100. (1993).
- [12] H. Wagner, 1996 SNM Annual Meeting Medical Problem Solving, *J. Nucl. Med.*, 37, No. 8, 30N (1996).
- [13] P. H. Jarritt and K. Kouris, Instrumentation for brain SPET: guidelines and quantification, en: *New trends in Nuclear Neurology and Psychiatry* (John Libbey & Company Ltd, London, Paris, Rome, pp. 39-62 (1993).
- [14] G.F. Morgan y D.C. Costa, Radiopharmaceuticals for conventional blood-brain barrier and brain perfusion studies, en: *New trends in Nuclear Neurology and Psychiatry* (John Libbey & Company Ltd, London, Paris, Rome, pp. 65-84 (1993).
- [15] A. M. Catafau y cols., Prefrontal and temporal blood flow in schizophrenia: Resting and activation HMPAO-SPECT patterns in neuroleptic-naive young acute patients. *J Nucl Med*, 35, 935-941 (1994).
- [16] M. Ingvar, L. Eriksson, T. Greitz et al., Methodological aspects of brain activation studies: cerebral blood flow determined with [¹⁵O]butanol and positron emission tomography. *J-Cereb-Blood-Flow-Metab.* 14(4): 628-38 (1994).
- [17] D. E. Cickrit, R. W. Burt et al., Acetazolamide enhanced single photon emission computed tomography (SPECT) evaluation of cerebral perfusion before and after carotid endarterectomy, *J-Vasc-Surg.* May, 15(5): 747-53 (1992).
- [18] MD Devous et al. SPECT brain imaging in epilepsy: A meta analysis. *J. Nucl Med*; 35 (Suppl 5), 31 (1994).
- [19] P. Remy et al., Movement and Task-related activations of motor cortical areas: a positron emission tomography study, *Ann Neuro*, 36, 19-26 (1994).
- [20] C. Sánchez Catasús, L. Alvarez y cols. Estudios con activación motora mediante SPECT con [^{99m}Tc]-HMPAO en dos pacientes con enfermedad de Parkinson antes y después de la palidotomía. *Revista Española de Medicina Nuclear*, 14, No. 5 (1995).
- [21] I. Masanori y cols., Editorial: SPECT imaging of dopamine receptors, *J Nucl Med*, 37, No. 10, 1591-1594 (1996).
- [22] M Cordes et al., Evaluation of focal epilepsy: A SPECT scanning comparison of [¹²³I]-iomazenil versus HMPAO. *Am J. Neuroradiol*, 13, 249-53 (1992).
- [23] C. Sánchez Catasús, N. Rodríguez Mesa, y cols., Phantom assesment of brain SPECT protocol for cerebral blood flow studies. *Physics in Medicine & Biology*, 39a, 1994.
- [24] C. Sánchez Catasús et al, A Non-Standard Image Acquisition Method To Improve Spatial Resolution In Cerebral Perfusion SPECT Studies With A Single-Head Gamma Camera, *European Journal of Nuclear Medicine*, 23, 9 (1996).
- [25] C. Sánchez Catasús, N. Rodríguez Mesa y cols. Evaluación de la perfusión cerebral mediante SPECT con [^{99m}Tc]-HM-PAO. Primeros resultados. *Revista Española de Medicina Nuclear*, Supl. I (1992).
- [26] C. Sánchez Catasús, N. Rodríguez Mesa, N y cols., Perfusión cortical mediante SPECT en pacientes con enfermedad de Parkinson con y sin demencia. *Revista Española de Medicina Nuclear*, 16, No. 1 (1995).
- [27] C. Sánchez Catasús, N. Rodríguez Mesa y cols., Regional Cerebral Blood Flow by Brain SPECT (^{99m}Tc)-HMPAO in patients with Parkinsons disease before and after fetal tissue transplantation. Report of four cases. En: *Tomograph in Nuclear Medicine, Present Status and Future Prospects*. Vienna: IAEA Press (1995).
- [28] C. Sánchez Catasús, L. Alvarez y cols., Flujo sanguíneo cerebral mediante SPECT con [^{99m}Tc]-HMPAO en pacientes con enfermedad de Parkinson, *Rev Neurol Arg.*, 21, 142-49 (1996).
- [29] Fernández, C.I., O. González, Sánchez Catasús, C. y cols. The aged Monkey Brain: Systemic and Functional Repercussion of Chronic Intraventricular Infusion (IVI) of Nerve Growth Factor-NGF. *Neurobiology of Aging*, Suppl. 17, No. 4s (1996).
- [30] G. Lucignani et al., Non - invasive brain imaging techniques (SPET, PET and MRI), en: *New trends in Nuclear Neurology and Psychiatry* (John Libbey & Company Ltd, London, Paris, Rome, pp. 133-149 (1993).
- [31] P. F. Goyer, M. S., Berridge et al. PET measurements of neuroreceptor occupancy by typical and atypical neuroleptics, *J. Nucl. Med.*, 37, 1122-1126 (1996).

Apéndice 1

MÉTODOS A PARTIR DE TRASFORMADAS

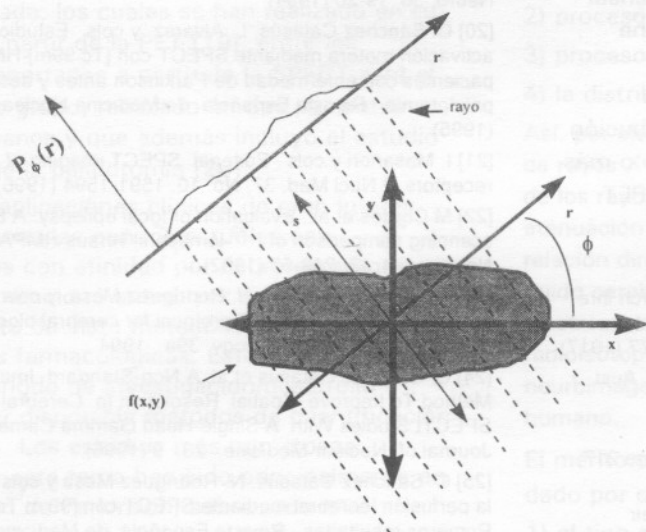
Modelo del problema tomográfico

Para mayor simplicidad, se considera la función f definida en $\mathbb{R}^2$. Los resultados son extrapolables al caso tridimensional, considerando que una distribución volumétrica es un conjunto de infinitas distribuciones planas.

Sea $f(x,y)$ una función definida en el plano cartesiano $x-y$, que representa la distribución bidimensional de un radiofármaco (esquema 1.1). Aunque f es desconocida a priori, se sabe que está espacialmente acotada.

Se define un *rayo* como cualquier línea recta que pase sobre la función f . Se define un *rayo integral* a la integral de f a lo largo de un rayo. Un conjunto de rayos integrales forman una *proyección* de f . En el esquema 1.1, se considera el caso particular en que los rayos integrales son paralelos, lo cual se define como *proyección paralela* de f . Además, se muestra un sistema cartesiano de referencia auxiliar $r-s$, rotado un ángulo ϕ con respecto al sistema $x-y$. El sistema $r-s$ determina la orientación de cada proyección paralela.

Esquema 1.1



La transformada de Radon $P_\phi(r)$, de la función $f(x,y)$ se define como:

$$P_\phi(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) ds \quad [1.1]$$

$P_\phi(r)$ es una función de r que representa matemáticamente la proyección paralela de f para un ángulo ϕ .

En el caso de la SPECT cerebral, f representa la imagen de un corte de la distribución volumétrica del radiofármaco en el cerebro y constituye la imagen a reconstruir o imagen incógnita. Una proyección paralela o transformada de Radon de f está representada por un perfil de actividad, tomado de la imagen bidimensional de la distribución del radiofármaco obtenida mediante la cámara gamma.

Teorema de la proyección-corte

Sea $F(u,v)$ la transformada de Fourier de $f(x,y)$ y $Q_\phi(v)$ la transformada de Fourier de $P_\phi(r)$. Entonces se cumple que:

$$F(u,v) = Q_\phi(v) \quad [1.2]$$

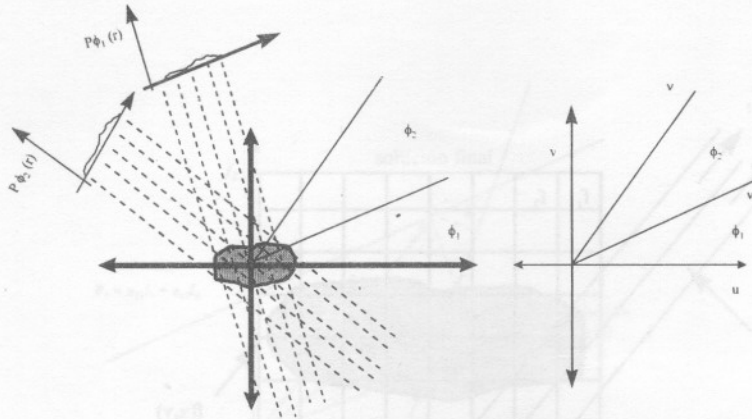
La relación [1.2] se conoce como teorema de la proyección-corte y constituye el fundamento matemático de los métodos de reconstrucción a partir de transformadas.

El significado de este teorema queda más claro si se expresa $F(u,v)$ empleando las coordenadas polares (v,ϕ) , donde $u=v\cos\phi$ y $v=v\sin\phi$, entonces [1.2] queda:

$$F(v,\phi) = Q_\phi(v) \quad [1.3]$$

La relación [1.3] indica que a partir de las transformadas de Radon de $f(x,y)$ para los ángulos $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ y tomando las transformadas de Fourier de estas proyecciones, se pueden determinar los valores de $F(u,v)$ en las direcciones radiales del plano $u-v$ como muestra el esquema 1.2.

Esquema 1.2



Método de Reconstrucción por convolución y retroproyección

Si se emplea el sistema de coordenadas polares (v,ϕ) para expresar $F(u,v)$, se tiene:

$$f(x,y) = \int_0^\pi \int_0^\infty F(v,\phi) e^{i2\pi v(x\cos\phi + y\sin\phi)} v dv d\phi = \int_0^\pi \int_0^\infty F(v,\phi+\pi) e^{i2\pi v(x\cos\phi + y\sin\phi)} v dv d\phi \quad [1.4]$$

Si se utiliza la propiedad:

$$F(-v,\phi) = F(v,\phi+\pi) \quad [1.5]$$

y que $x\cos\phi + y\sin\phi = r$

Entonces [1.4] se puede escribir como:

$$f(x,y) = \int_0^\pi \int_0^\infty F(v,\phi) e^{i2\pi v r |v|} dv d\phi \quad [1.6]$$

De acuerdo al teorema de la proyección-corte $F(v,\phi) = Q_\phi(v)$, sustituyendo se tiene:

$$f(x,y) = \int_0^\pi \left[\int_0^\infty Q_\phi(v) e^{i2\pi v r |v|} dv \right] d\phi \quad [1.6]$$

Si excluimos el término $|v|$ de [1.6], la expresión entre corchetes quedaría igual a $P_\phi(r)$, esto es, la proyección de $f(x,y)$ para un ángulo ϕ . El factor $|v|$ representa el filtro rampa en el espacio de las frecuencias. De manera que, la expresión entre corchetes es la convolución del filtro $|v|$ y la proyección de $f(x,y)$ para un ángulo ϕ en el espacio de las frecuencias, es decir, es una proyección "filtrada" de $f(x,y)$, $P_\phi(r)$. Entonces [1.6] queda:

$$f(x,y) = \int_0^\pi P_\phi(x\cos\phi + y\sin\phi) d\phi \quad [1.7]$$

$$\text{donde: } P_\phi(r) = \int_0^\infty Q_\phi(v) e^{i2\pi v r |v|} dv \quad [1.8]$$

La fórmula [1.7] constituye el método de reconstrucción por convolución y retroproyección y es uno de los más utilizados en la práctica médica. Este método expresa que para reconstruir a $f(x,y)$ se debe primero filtrar cada proyección de acuerdo a [1.8] y luego sumar estas proyecciones "filtradas" de 0 a π .

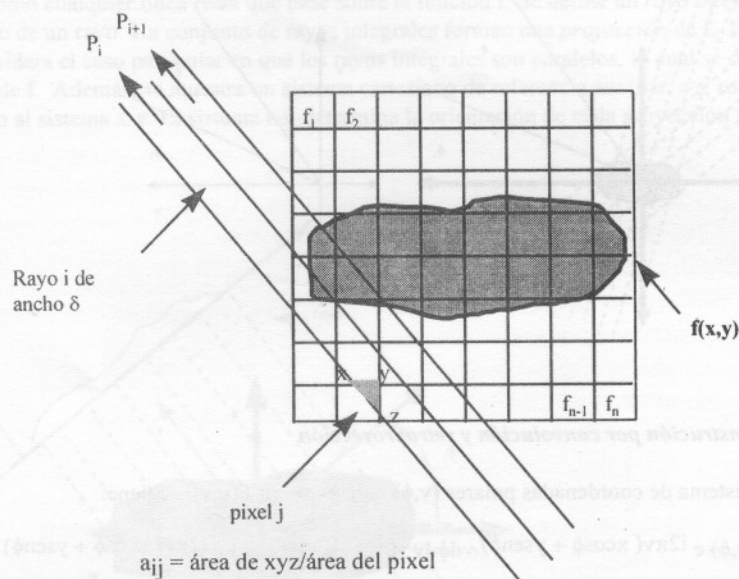
APENDICE 2

Métodos a partir de series de expansión. Métodos iterativos

Modelo del problema tomográfico

En los métodos a partir de series de expansión, el modelo del problema tomográfico es discreto desde su planteamiento inicial. El esquema 2.1 presenta una matriz o arreglo de pixels, la cual abarca toda la imagen o función f que interesa reconstruir. Los pixels aparecen numerados convencionalmente de 1 a n . El valor de la función f se asume constante en cada pixel, f_j , para $j=1, 2, \dots, n$.

Esquema 2.1



Se define un *rayo* como cualquier banda que pase sobre la función f . Cada rayo tiene un ancho δ que generalmente es igual al ancho de un pixel. Se define un *rayo suma* a la suma de la función f sobre un rayo.

Sea P_i el rayo suma sobre el rayo i . La relación entre los P_i 's y los f_j 's se puede expresar mediante la serie:

$$P_i = \sum_j a_{ij} f_j \quad \text{para } i=1, 2, \dots, m. \quad [2.1]$$

Donde el factor a_{ij} es la fracción de área del pixel j producto de la intercepción con el rayo i , y representa la contribución o peso de f_j al rayo suma P_i .

La expresión [2.1] representa un sistema de m ecuaciones con n incógnitas, cuya solución es la función f o la imagen a reconstruir.

Si m y n son pequeños es posible emplear la teoría matricial convencional para resolver [2.1]. Sin embargo, en la práctica clínica n es como mínimo 4096 (imágenes de 64×64) y m de una magnitud similar. Para estos valores de m y n , el tamaño de la matriz formada por los valores (a_{ij}) es 4096×4096 . Para este tamaño de matriz, se hace impracticable, desde el punto de vista computacional, el empleo de métodos directos de inversión de matrices.

Método de reconstrucción algebraico o de las "proyecciones"

En el método de reconstrucción algebraico (ART, del inglés, Algebraic Reconstruction Techniques) o de las "proyecciones", la función f dentro del arreglo de n pixels, puede ser representada por el vector $F(f_1, f_2, \dots, f_n)$ definido en un hiperespacio euclidiano IR^n . En este hiperespacio cada una de las m ecuaciones en [2.1], representa un hiperplano. El punto en que se interceptan todos estos hiperplanos constituye la solución del problema tomográfico.

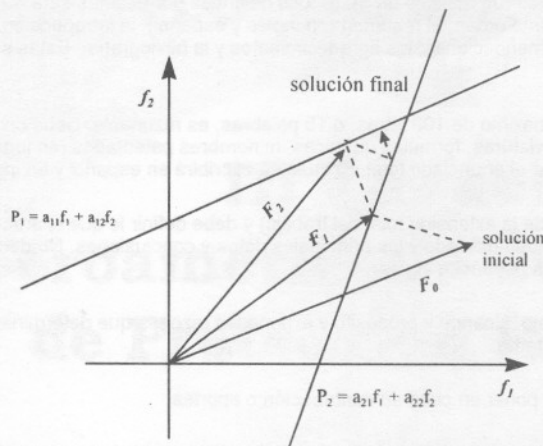
Para mayor simplicidad consideremos el caso $m=2$ y $n=2$. En este caso f_1 y f_2 satisfacen las siguientes ecuaciones:

$$P_1 = a_{11}f_1 + a_{12}f_2 \quad [2.2]$$

$$P_2 = a_{21}f_1 + a_{22}f_2$$

El método ART parte de una solución inicial representada por el vector F_0 (esquema 2.2). Esta solución inicial es proyectada sobre la recta representada por la primera de las ecuaciones en [2.2].

Esquema 2.2



La implementación matemática de esta primera proyección se realiza mediante la fórmula:

$$F_1 = F_0 - [(A_1 \cdot F_0 - P_1) / (A_1 \cdot A_1)] A_1 \quad [2.3]$$

Donde $A_1 = (a_{11}, a_{12})$, es el vector formado por los coeficientes de la primera de las ecuaciones en [2.2].

Después de obtener F_1 , se proyecta este vector sobre la segunda recta, obteniéndose F_2 como se observa en el esquema 2.2. A continuación se proyecta F_2 sobre la primera recta para obtener F_3 . Proyectando F_3 sobre la segunda recta se logra F_4 . Este proceso iterativo continúa hasta converger al vector solución F_5 . El sistema de ecuaciones representado por [2.2] tiene solución única, entonces:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} F_L = F_s \quad [2.4]$$

Generalizando [2.3] y [2.4] para cualquier m y n , tenemos que:

$$F_j = F_{j-1} - [(A_j \cdot F_{j-1} - P_j) / (A_j \cdot A_j)] A_j \quad [2.5]$$

$$\lim_{L \rightarrow \infty} F_L = F_s \quad [2.6]$$

Las fórmulas [2.5] y [2.6] constituyen el método de reconstrucción algebraico (ART) o de las "proyecciones" a partir del cual se han desarrollado otros métodos iterativos que en general buscan aumentar la velocidad de convergencia a la solución final.

Recomendaciones a los lectores

Para la publicación de artículos científicos

En la sección científica, Nucleus publica en español e inglés los resultados de trabajos originales, en forma de artículos o comunicaciones cortas, sobre energética nuclear, producción de radisótopos y técnicas nucleares aplicadas a diversas ramas de la ciencia y la economía, seguridad nuclear, protección radiológica, electrónica nuclear, física nuclear de los medios condensados, materiales nucleares, radioquímica, radiobiología, computación y automatización.

La comunicación corta contiene información sobre un trabajo particularmente importante y oportuno o los resultados parciales de una investigación. No debe exceder las 5 cuartillas incluidas tablas e ilustraciones, cuyo número máximo será dos. El total de líneas por páginas no será superior a 30, escritas con 60 golpes de máquina.

Un artículo debe presentar un estudio completo sobre un asunto de importancia e interés fundamental del tema en cuestión. No deberá exceder de 10 cuartillas incluidas tablas (un máximo de 5) e ilustraciones (un máximo de 5). El total de líneas por páginas será 30 como máximo, escritas a 60 golpes de máquina. Los artículos comprenden, en el siguiente orden, el resumen (en inglés y español), la introducción, el texto principal (materiales y métodos, resultados, discusión), las conclusiones y recomendaciones, los agradecimientos y la bibliografía. Estas secciones deben estar bien definidas, aunque no necesariamente con subtítulos.

Título: Debe ser conciso sin dejar de ser informativo. Un máximo de 100 letras, o 15 palabras, es razonable. Debe concordar con el objeto y alcance del trabajo. No debe contener, por lo general, abreviaturas, fórmulas químicas, ni nombres patentados (en lugar de genéricos). No complemente el título con un subtítulo, si no es para acortar el enunciado total. El título se escribirá en español y en inglés.

Resumen: No debe exceder de 250 palabras (o del 4,6% de la extensión total del trabajo) y debe definir lo que el artículo trata, exponer los objetivos principales y el alcance de la investigación, el método utilizado y los principales datos y conclusiones. No debe contener siglas, abreviaturas ni referencias bibliográficas. Debe aparecer en español e inglés.

Introducción: Debe explicar con términos precisos el objeto, alcance y propósito y expone las razones que determinaron la ejecución del estudio en cuestión, así como su relación con trabajos previos del tema.

Conclusiones: Deben indicar la importancia del estudio y poner en claro su contribución o aportes.

Bibliografía: Se citará con números arábigos entre corchetes al final del trabajo. Los títulos de las publicaciones periódicas se escribirán según el sistema INIS (véase IAEA-INIS-11). No deben incluirse las referencias a trabajos no publicados. Cuando una referencia de esta clase sea absolutamente esencial, podrá incluirse en el texto entre paréntesis. El autor debe verificar que los artículos "en prensa" han sido aceptados para publicar en la revista citada y dar el número, la página inicial y el año de publicación. Las referencias en el texto deben hacerse con números entre corchetes en el lugar en que se apliquen y siguiendo un orden consecutivo.

Abreviaturas, siglas y símbolos: Deben ser los aceptados internacionalmente. Las abreviaturas y siglas deben definirse la primera vez que se mencionan. Los símbolos y caracteres griegos, al igual que los subíndices y supraíndices, deben definirse claramente.

Tablas: Deben presentar en forma concisa y ordenada la información que no puede presentarse por otros medios con la misma eficacia. Empléelas exclusivamente cuando sean necesarias. Las aclaraciones y notas al pie deben ser breves. El título debe ser conciso y no estar dividido en dos o más oraciones. Los datos se organizarán de forma que sus elementos se lean de arriba abajo y no transversalmente.

Ilustraciones: Numere las ilustraciones (consecutivamente) en el orden en que se mencionan en el texto. Las fotografías deberán presentarse en forma de copa positiva y con el contraste necesario para que en el proceso de reproducción no pierdan claridad. Los términos, las abreviaturas y los símbolos utilizados en las figuras deben ser los mismos que aparecen en el texto. No utilice caracteres, ni símbolos poco frecuentes (son preferibles los círculos, cuadrados o triángulos en blanco o rellenos). Si son muy complejos deben aclararse en una leyenda concisa. Los símbolos y caracteres deben ser claros y de tamaño suficiente, de manera que al reducirlos para la publicación sean legibles.

Ecuaciones y fórmulas: Deberán escribirse con precisión, en especial los índices y exponentes. Todas las letras (en particular las del alfabeto griego) y símbolos deberán identificarse al margen la primera vez que aparezcan. Distinguir, cuando se pueda prestar a confusión, entre mayúsculas y minúsculas. Evite el uso de exponentes complicados y la repetición de expresiones elaboradas.

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

Para la publicación en Panorama Nuclear

Los artículos de la sección Panorama Nuclear deben tener como objetivo la difusión, con rigor científico y de forma asequible al gran público, temas relacionados con la energética nuclear, la aplicación de las técnicas nucleares en la industria y la economía, la seguridad nuclear, la protección radiológica, salvaguardias, energía nuclear e información pública entre otros. Los trabajos no deberán exceder las 10 cuartillas, incluidas las ilustraciones, y deben presentarse en tres ejemplares. El total de líneas por páginas será 30 como máximo, escritas a 60 golpes de máquina. Para las ilustraciones deberán seguirse las mismas indicaciones que para los artículos científicos. Si utiliza algún dato, tabla o ilustración proveniente de otra fuente, deberá dar los créditos correspondientes.

Los autores recibirán gratuitamente un ejemplar de la revista en la que aparezca publicado su artículo.