

COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA

**CURSO LATINOAMERICANO DE CAPACITACION
PARA LA PROSPECCION Y EXPLORACION
DE YACIMIENTOS URANIFEROS**



C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1978

CNEA-AC- 7/78

ORIGEN Y EVOLUCION DE LA INDUSTRIA

DEL URANIO EN EL MUNDO

PEDRO N. STIPANICIC

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

BUENOS AIRES
OCTUBRE 1978

ORIGEN Y EVOLUCION DE LA INDUSTRIA
DEL URANIO EN EL MUNDO

Por Pedro N. Stipanovic⁽¹⁾

1. INTRODUCCION

Si bien este análisis menciona a la industria del uranio en el mundo, en realidad solo se refiere a la de los países del bloque no socialista-comunista, de los cuales se dispone de una abundante información sobre el tema.

No existen dudas que Rusia posee importantes yacimientos uraníferos y una adecuada tecnología para el aprovechamiento de sus minas, pero los datos al respecto solo se relacionan con los minerales de uranio identificados en ese país y con las distintas asociaciones paragenéticas que en él se encontraron, pero sin indicar ninguna procedencia ni volúmenes de las reservas y de la producción.

Asimismo, es seguro que China cuenta con yacimientos de uranio, cuya explotación resulta evidente, dada su disponibilidad de artefactos nucleares, pero también en este caso se carece de toda información sobre tal industria.

Varios países europeos del área socialista, como Checoslovaquia, Hungría, Polonia, Rumania y Yugoslavia también poseen depósitos uraníferos. De algunos de ellos se dispone de información reciente, casi siempre referida a la geología de los mismos, pero conteniendo escasos datos como para evaluar el desarrollo de la respectiva industria, salvo el caso de los yacimientos yugoslavos, de los cuales se conocen sus características principales y los métodos aplicados para el beneficio de sus minerales.

Las limitaciones citadas obligan a confinar el presente análisis, salvo algunas excepciones, a la esfera de los países del bloque no socialista y en especial a la de aquellos que mas contribuyeron al desarrollo de la industria del uranio.

En tal sentido, en un grupo muy destacado se encuentran los EUA, el Reino Unido, Sudáfrica, Canadá, Francia y Australia. Algunos de ellos disponen de importantes reservas uraníferas pero o-

(1) Atomic Energy Organization of Iran y Academia Nacional de Ciencias de la República Argentina.

otros han debido actuar en el exterior, por no poseerlas o por contar con montos insuficientes para atender sus requerimientos domésticos. En todos estos países se desarrolló una avanzada tecnología exploratoria, minera y fabril para cubrir el campo completo de la industria del uranio. En la misma línea también debieron embarcarse Alemania Occidental, Japón e Italia, los que contando con reservas uraníferas de muy escaso monto estaban obligados a buscar fuentes externas de aprovisionamiento para sostener sus programas nucleares.

Desde muy temprana hora, pero contando con recursos económicos mas reducidos, Argentina, España, India, Portugal y Suecia

fueron desarrollando una modesta pero bien integrada industria de materias primas nucleares, lo mismo que tiempo después hicieron o lo están haciendo Brasil, Dinamarca, México y Turquía.

En la evolución de la industria del uranio en el mundo se pueden reconocer los siguientes períodos principales:

- i) El comienzo de la era energética nuclear (1938-1942).
- ii) El período bélico y la primera etapa de expansión (1942-1957).
- iii) El período de estabilización y de gran producción (1958-1965).
- iv) El período de retracción y de transición (1965-1973)
- v) El mercado maduro y la segunda etapa de expansión. Presente y futuro de la industria del uranio.

El mercado del uranio en el mundo estuvo prácticamente controlado por los EUA hasta 1973, por haber sido el consumidor de mas del 85 % de la producción mundial y también el principal productor de concentrados, la mayor parte de los cuales los destinaba a fines militares.

El reciente estudio técnico-económico-legal de Joskow (1977) es muy representativo para el ejemplo americano, en el cual varias de las etapas recién citadas encuentran bastante paralelismo, pero la influencia de nuevos factores mundiales, desarrollados en el lustro anterior, sugieren enfocar el problema con una óptica independiente.

Terminado el ciclo del uso casi masivo de la producción uranífera para fines militares, tomó cuerpo, en principio en forma muy tímida pero luego de manera vigorosa, el aprovechamiento de esta nueva fuente de energía para usos pacíficos, y en especial para la producción de electricidad, ya que el otro gran campo posible de aplicación de la misma, el de su uso en grandes voladuras de terrenos y en explotaciones mineras y petroleras, aun no pasó de la etapa experimental.

En este nuevo ciclo pacífico o comercial, los EUA continuarán siendo el principal consumidor de uranio en el mundo, pero en una proporción mucho mas reducida que en los tiempos anteriores, pues numerosos países del bloque no socialista tienen en desarrollo importantes planes nucleoelectricos desde ahora hasta fines del siglo, los que en conjunto superan al programa nuclear norteamericano y demandarán para su sostén grandes cantidades de uranio.

De esos países, varios son y otros pueden llegar a ser autosuficientes en cuanto a aprovisionamiento de uranio se refiere y del resto, una parte dependerá indefectiblemente del suministro externo y la otra se podrá transformar en fuerte exportadora de concentrados.

2. EL COMIENZO DE LA ERA ENERGETICA NUCLEAR

El elemento uranio fue individualizado por Klaproth en 1789 partiendo de la pechblenda del depósito George Wagsfort, del macizo de Erzgebirge (Alemania Oriental). Si bien este mineral era conocido en el mismo y en el cercano de Joachimsthal (Checoslovaquia) desde hacia tiempo, su composición química recién fué definida en 1841 por Peligot, quien obtuvo por primera vez el metal en polvo y bautizó al elemento como uranio.

El fenómeno de la desintegración radiactiva natural de sus nucleidos inestables lo descubrió Becquerel el 1896 y en 1898, Pierre y Marie Curie, partiendo del mineral de Joachimsthal individualizaron al radio y al polonio.

Conocidas al poco tiempo las aplicaciones industriales y terapéuticas del radio y de sus sales, se inició la recuperación del mismo a partir de los minerales de uranio.

Si bien entre 1906 y 1931 Australia acusó una pequeña producción, los mayores volúmenes de radio se obtuvieron en las dos pri-

meras décadas del siglo usando las menas de Joachimsthal. La explotación de éste depósito comenzó a principios de 1600 para recuperar plata; a mediados de 1700 produjo cobalto y nickel y a partir de 1853 esencialmente uranio. Entre 1854 y 1911 entregó 500 toneladas de pechblenda con una ley cercana al 50% U de las cuales se obtuvieron 9 gr Ra entre 1909 y 1915 y 13 gr Ra entre 1915 y 1921.

Joachimsthal mantuvo el monopolio mundial del Ra hasta que fue desplazada por Shinkolobwe (Alto Katanga, ex Congo Belga, hoy Zaire) y por la derivada de las ricas menas de carnotita del Plateau del Colorado.

Los yacimientos de pechblenda de Shinkolobwe se descubrieron en 1915, comenzaron a producir en 1919 y a plena capacidad en 1921, cuando pasaron a controlar el mercado mundial del Ra, el que detentaron hasta 1936, fijando para tal elemento un precio de US\$ 75.000 por gramo. Entre 1921 y 1936 se extrajeron de Shinkolobwe 100.000 t de menas de alta ley, pero la explotación se paralizó en 1936, por la entrada en el mercado de la producción proveniente de los yacimientos de Port Radium, en Canadá.

Estos últimos se encontraron en 1933 y fueron puestos al poco tiempo en producción para recuperar el Ra, cuyo precio se hizo bajar a US\$ 20.000 por gramo, lo cual permitió que la Canadian Radium and Uranium Co. pasara en 1936 a controlar el mercado mundial.

Port Radium se mantuvo en actividad hasta 1940, cuando la mina debió cerrar por la guerra y por el excedente de Ra en el mundo. En 1936, produjo mineral de uranio del cual se extrajeron 15 gr Ra y en 1938, 71 gr Ra.

Durante toda la época señalada, el beneficio de los minerales (pechblenda y uraninita) se hacía por métodos simples y en pequeñas instalaciones, usando reducidas cantidades de menas ricas o de preconcentrados gravitacionales, los cuales se lixivaban con fuertes soluciones sulfúricas, de las cuales el uranio se separaba por precipitación química fraccionada. Los precipitados, conteniendo alto tenor de uranio pero también muchas impurezas, eran redissueltos y de las nuevas soluciones el uranio era recuperado en forma selectiva con éter sulfúrico.

En la segunda y tercera décadas de este siglo, pequeñas pero ricas partidas de carnotita fueron extraídas del Plateau del Colorado (USA) para la elaboración de pigmentos colorantes y la recupe-

ración del Ra.

Pero a fines de 1938, Otto Hann y Frite Strassmann, del Kaiser Wilhelm Institute für Physik de Berlin, descubrieron el fenómeno de la fisión nuclear, por la cual un átomo de un elemento pesado puede dar origen a dos mas livianos. Este hecho fué confirmado de inmediato por Joliot en Francia, por Frisch y Meitner en Dinamarca y por Fermi en los EUA, quienes además pusieron en evidencia la enorme cantidad de energía que se libera en forma instantánea cuando se produce tal fisión.

A partir de principios de 1939, en varios países occidentales envueltos en la II Guerra Mundial, se empezaron intensos trabajos de investigación tendientes a aprovechar para usos pacíficos la energía liberada por la fisión del uranio en reacciones en cadena (EUA, Reino Unido y Alemania).

Al poco tiempo, los EUA tomaron gran delantera en el tema y en los comienzos de 1942 decidieron fabricar bombas atómicas (Proyecto Manhattan), requiriendo para ello el aprovisionamiento inmediato de significativas cantidades de uranio.

Las postrimerías de 1938 señalan, entonces, el comienzo de una nueva era nuclear en el mundo, que tendió a aprovechar la energía liberada por la fisión de ciertos átomos, ya que hasta ese momento, todas las investigaciones afines tenían un neto carácter académico, orientado al mejor conocimiento de la estructura de la materia.

En diciembre de 1942 comenzó a operar en Chicago el primer reactor nuclear capaz de producir material fisiónable y el 16 de julio, 6 y 9 de agosto de 1945, los EUA hicieron explotar las primeras bombas atómicas en New Mexico, Hiroshima y Nagasaki, respectivamente.

El año 1945 adquiere así una especial transcendencia histórica, al evidenciarse la posibilidad del uso en gran escala de una nueva y poderosa fuente de energía, desconocida hasta ese momento, la cual si bien en principio tuvo una neta aplicación bélica, al poco tiempo demostró que su uso pacífico podía contribuir a solucionar el importante problema energético que afectaba a la humanidad.

3. EL PERIODO BELICO Y LA PRIMERA ETAPA DE EXPANSION

Puesto en desarrollo el Proyecto Manhattan, se requirieron de inmediato elevadas cantidades de uranio en un plazo perentorio. Los

EUA debieron recurrir a los únicos yacimientos disponibles, y así en el mismo año se reabrió Port Radium para producir menas frescas de menor ley que las antes explotadas y para aprovechar las abundantes colas de la planta de concentración gravitacional.

Shinkolobwe, paralizada desde 1936, reinició la producción en 1944, concentrando en principio por vía física los minerales de baja ley, para pasar luego a la elaboración directa de concentrados de uranio por vía química. De este yacimiento se extrajeron en total 25.600 t U.

Un pequeño abastecimiento paralelo provino de las menas uraníferas del Plateau del Colorado.

En principio, gran parte de los materiales recibidos por los EUA eran "óxidos negros" y el Bureau of Standard de ese país se encargó de su concentración y purificación final, produciendo en 1942 cerca de 15 toneladas por mes de UO_2 .

Si bien en los primeros momentos de esta etapa se recurrió a los métodos antes conocidos para el beneficio de las menas y para la purificación final de los concentrados, el Bureau of Standard desarrolló nuevos procesos para tales fines, los que aplicados por la Mallinckrodt Chemical Works de San Luis (EUA) le permitieron elaborar a partir de fines de 1942 hasta 1 tonelada por día de óxido de uranio de alta pureza⁽¹⁾.

Como consecuencia de estos avances, el precio del uranio, que antes oscilaba en los US\$ 2.000 por kilo, se colocó por debajo de US\$ 100/kg.

A los efectos militares, si bien el abastecimiento uranífero de los EUA fue suficiente para detonar las tres primeras bombas atómicas y para contar con otras en stock, ya a partir de 1944 se había comenzado con la búsqueda sistemática de yacimientos nuevos en ese país y en Canadá y Australia, a los efectos de disponer de abundantes materias primas para integrar una buena reserva de armas nucleares.

(1) En el presente análisis, las referencias se harán sobre unidades del sistema métrico y sobre el contenido en U, siguiéndose en ello a la tendencia mundial reciente (IAEA, OECD, etc). Las anteriores menciones a "toneladas cortas", "libras", contenido en U_3O_8 , etc han sido consecuentemente convertidas, salvo en los casos en que tal ajuste no era necesario, por tratarse de valores aproximados o indicativos, pero no estrictamente exactos.

CUADRO 1. PRECIOS MEDIOS PAGADOS POR kg/U EN EUA

AÑOS	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1950	23,95	32,84	Año índice		
1951	26,03	32,81			
1952	29,09	34,97			
1953	31,98	37,64			
1954	31,85	37,02			
1955	32,53	36,92			
1956	30,24	32,37			
1957	27,38	27,77			
1958	24,88	24,88			
1959	24,05	23,43			
1960	22,75	21,87			
1961	22,02	20,85			
1962	20,80				
1963	20,80				
1964	20,80				
1965	20,80				
1966	20,80				
1967	20,80				
1968	16,90				
1969	16,12				
1970	16,12				
1971	15,47				
1972	15,47				
6/73	16,90	9,28			
12/73	18,20	9,67			
6/74	27,30	13,65			
12/74	39,00	18,41			
5/75	54,60	25,04			
8/75	67,60	30,86			
12/75	91,00	41,18			
4/76	104,00	47,32			
12/76	106,60	46,28			
12/77	111,80	48,62			

- (1) Precios nominales US\$/kg U
 (2) Precios reales, reajustados según las variaciones del índice del PNB, para 1958 = 100.
 (3) Precios reales equivalentes, reajustados en -10% por reducción del tenor en U de las menas ("depletion").
 (4) Idem, en -20%.
 (5) Idem, en -30%.
 (Datos: s/ Joskow y Nuexco, con valores estimados para 1976-77)

Producida en 1949 la primera explosión atómica soviética, los EUA decidieron asegurar su abastecimiento de uranio para toda la década siguiente y a tales fines fomentó un vastísimo programa de exploración y de desarrollo de la industria respectiva, tanto en su propio territorio como en otros, a la vez que para interesar a la industria privada fijó precios muy convenientes para la recepción de concentrados de uranio (Cuadro 1). El Reino Unido y Francia siguieron asimismo una política muy similar.

La necesidad de disponer de grandes cantidades de uranio en el mas corto tiempo posible obligó a desarrollar en dichos países nuevas tecnologías e instrumental efectivo para su búsqueda, posibilitando una eficaz y rápida exploración. Paralelamente se hizo necesario encontrar nuevos procesos para la concentración de minerales, pues de inmediato se evidenció que depósitos tan ricos como los de Joachimsthal, Shinkolobwe y Port Radium eran excepciones y que la mayoría de las nuevas fuentes de aprovisionamiento en gran escala poseían comúnmente concentraciones en uranio mucho mas bajas.

Para la búsqueda de yacimientos se diseñaron equipos de detección radimétrica cada vez mas sensibles, capaces de ser usados en automotores y en aviones, permitiendo así una rápida, barata y amplia cobertura areal. Gran parte de los nuevos descubrimientos se hicieron por prospección aérea, la cual demostró ser uno de los métodos mas efectivos al respecto.

Para las áreas cubiertas, en las cuales la prospección radimétrica no era eficaz, se desarrolló la emanometría (de centelleo o con cámaras de ionización), la cual también dió buenos resultados.

Un gran esfuerzo se cumplió en muchos países en el campo de la prospección geoquímica, pero con resultados aleatorios, pues dicha metodología solo pudo definir amplias áreas anómalas, pero siempre llegó con retardo con respecto a otros sistemas, en la localización directa de yacimientos explotables.

Las técnicas de perfilaje de pozos se perfeccionaron, obteniéndose registros calibrados cuantitativamente, con lo cual se facilitó y abarató la evaluación de yacimientos con minerales en equilibrio radimétrico -químico, sin necesidad de recurrir a las costosas perforaciones testigadas y solo usando las de percusión.

La industria del uranio fué una de las primeras en aplicar los métodos estadísticos para la cubicación de yacimientos, los que perfeccionan a los clásicos conceptos un tanto indefinidos de mineral "medido", "indicado" e "inferido".

En el campo del beneficio de los minerales, el impacto de la industria del uranio fué aun mayor, pues debió buscar solución a problemas tan graves como los siguientes:

- i) Grandes volúmenes de menas de baja ley (entre 1 y 3 kg U/t) debían ser procesadas para obtener pequeñas cantidades de uranio, en oposición a las anteriores, muy ricas.
- ii) Grandes cantidades de reactivos industriales serían requeridas para lixiviar el uranio de las menas de baja ley, de usarse los métodos anteriores de soluciones concentradas.
- iii) El uranio debía ser recuperado de las soluciones lixiviantes, donde se encontraba en bajísimas concentraciones (1 gr U/l) pero en presencia de grandes cantidades de impurezas.

El estudio de la extracción del uranio a partir de menas pobres por medio de soluciones sulfúricas diluídas, comenzó en 1944 en el Massachusetts Institute of Technology, usándose minerales de Shinkolobwe (Katanga) y este distrito fué el primer productor industrial de concentrados de uranio que aplicó la lixiviación sulfúrica débil a temperatura ambiente.

Investigaciones similares se encararon para la lixiviación alcalina de las menas con ganga carbonática, las que no aceptaban un procesamiento económico por vía ácida.

En igual sentido, se estudió la posibilidad de recuperar las grandes cantidades de uranio de las colas de tratamiento del mineral aurífero de Sud Africa, en las cuales se encontraba con un contenido de 100 a 200 gr U/t.

Varios grupos americanos, sudafricanos, ingleses y canadienses atacaron el problema, con el apoyo económico de los EUA y del Reino Unido, los que aportaron U\$S 150.000.000 para tales fines, equivalentes a mas de U\$S 400.000.000 de hoy ⁽¹⁾. La primera planta pilo-

(1) A los efectos de una comparación mas representativa, en el presente análisis los costos y valores pasados se actualizaron a la fecha, teniendo en cuenta los valores promedio de la inflación, devaluación de algunas monedas, variaciones de los índices de PBN, etc.

to comenzó a brindar concentrados en 1945, otra mayor fue instalada en 1949 y en 1952 empezó a producir una planta industrial.

También en tiempos tempranos de esta etapa, los canadienses desarrollaron un metodo para la lixiviación sulfúrica debil de las abundantes colas de la planta de concentración gravitacional de Port Radium.

Para solucionar el problema de la recuperacion del uranio a partir de las soluciones de lixiviación, varios grupos tecnológicos americanos, trabajando para la USAEC bajo contrato, iniciaron el estudio respectivo haciendo uso de resinas de intercambio iónico.

Varias resinas orgánicas y algunos métodos operativos relativamente prácticos fueron desarrollados y aplicados de inmediato en muchas plantas de los EUA y del Canadá. Pero poco tiempo después se demostró que el uso de solventes aminados era mas efectivo que las resinas frente a soluciones lixiviantes claras, y el nuevo método, de mas facil operación, se incorporó en nuevas plantas y aun en algunas de las ya existentes.

En forma sincrónica, hubo un gran adelanto en la etapa de refinación de concentrados, abandonándose la purificación por eter sulfúrico y reemplazándola por la de TBP (tri-butylphosphate), el que permitía una facil obtención de productos con altísima pureza.

En las etapas siguientes de la industria del uranio se produjeron notables adelantos, tanto en la fluoración de dicho elemento como en la reducción de sus óxidos, a la vez que el perfeccionamiento de los sistemas de fluidización permitieron controlar mejor las características físicas de los productos finales, las que resultan condicionantes para la entrada de los mismos en los procesos de sinterización, producción de hexafluoruro, etc.

En el campo de la exploración, los programas que se cumplían en Australia, Canadá y los EUA condujeron al hallazgo de importantes depósitos de uranio.

Las actividades australianas comenzaron en 1944 y fueron sostenidas en principio por el gobierno local y por el Reino Unido. En 1949 se descubrió el primer yacimiento de interés - Rum Jungle-, al que siguieron otros del South Alligator Valley y el de Mary Kat-

hleen. La producción de concentrados comenzó en 1954 y desde ese año hasta 1964 totalizó @ 6.200 t U.

Numerosas manifestaciones de pechblenda se encontraron en Canadá entre 1947 y 1949 en el area de Beaverlodge, definiendo un importante distrito uranífero. Dos de sus minas (Ace y Fay) empezaron a producir concentrados en 1953 y ya en 1957 el distrito se transformó en el mayor productor de uranio del mundo. En 1953 se localizó el área de Blind River, en Ontario, cuyo gran potencial permitió que, aunado al anterior, Canadá encabezara en 1956 la lista de productores mundiales.

En los EUA, la exploración uranífera sistemática, iniciada por el gobierno en 1944, se intensificó en 1948, dándose entrada a los particulares. En 1956, la USAEC y el USGS tenían mas de 600 geólogos afectados a dicho programa, al cual se destinaron US\$ 46.000.000 (= @ 125.000.000 actuales) para exploración y US\$ 12.000.000 (= @ US\$ 30.000.000 actuales) para investigaciones hidrometalúrgicas.

La magnitud de los programas de perforaciones de exploración se indican en el Cuadro 2.

Como resultado de dichas actividades, en 1949 se localizó el distrito de Marysvale (Utah), en 1951 el área de Black Hill (South Dakota), en 1952 el de Big Indian Wash (Utah), etc pero los mayores descubrimientos se cumplieron entre 1954 y 1955, cuando se localizaron los importantes depósitos de Grants y de Ambrosia Lake (New Mexico) y los de Wyoming, los cuales permitieron que a partir de 1960 los EUA pasaran a ocupar el primer puesto entre los productores mundiales de uranio.

Para tener una idea de la magnitud que adquirió la industria del uranio en este período y a principios de siguiente (1955-65), algunos datos son muy ilustrativos:

- i) Entre 1955 y 1963, Canadá vendió uranio a los EUA por valor de US\$ 1.580.000.000 de aquella época, cifra que actualizada al presente representaría mas de US\$ 4.000.000.000.
- ii) Los EUA llegaron a poseer una capacidad de producción fabril de 15.250 t U/año, procesando minerales con leyes superiores a 0.20 % U, habiendo costado dichas plantas US\$ 150.000.000 (= @ US\$ 400.000.000 actuales).

CUADRO 2. PERFORACIONES DE EXPLORACION EN EUA

Años	metros perforados	prof. prom.	Años	metros perforados	prof. prom.
1950	200.000		1963	1.000.000	35
1951	500.000		1964	800.000	54
1952	670.000		1965	730.000	62
1953	1.400.000		1966	1.330.000	104
1954	1.530.000		1967	3.330.000	142
1955	2.030.000		1968	8.000.000	141
1956	3.000.000		1969	10.000.000	143
1957	3.170.000		1970	8.000.000	136
1958	2.330.000	49	1971	5.200.000	134
1959	1.930.000	49	1972	5.130.000	146
1960	1.870.000	64	1973	5.670.000	160
1961	1.530.000	53	1974	10.330.000	193
1962	1.270.000	77	1975	11.330.000	161

(Datos: s/ ERDA, cifras redondeadas)

CUADRO 3. COMPRAS DE CONCENTRADOS DE URANIO EN EUA

AÑOS	DE PRODUCCION LOCAL				PROCED. EXTERNA	TOTALES
	No. de plantas	Por USAEC	Por privados	Sub totales		
1950		275	-	275	?	?
1951		543	-	543	?	?
1952		700	-	700	2.405	3.105
1953		823	-	823	1.624	2.447
1954		1.220	-	1.220	2.754	3.974
1955		1.806	-	1.806	3.230	5.036
1956		3.552	-	3.552	5.304	8.856
1957	16	6.379	-	6.379	7.293	13.672
1958	23	9.102	-	9.102	13.710	22.812
1959	24	12.775	-	12.775	15.440	28.215
1960	25	13.935	-	13.935	15.313	29.248
1961	26	14.999	-	14.999	12.325	27.324
1962	24	14.657	-	14.657	9.928	24.525
1963	21	13.389	-	13.389	7.482	20.871
1964	20	10.716	-	10.716	4.497	15.213
1965	16	12.104	-	12.104	2.253	14.357
1966	17	8.649	-	8.649	1.742	10.391
1967	16	7.567	765	8.332	-	8.332
1968	13	6.055	4.080	10.135	-	10.135
1969	15	3.409	3.570	6.979	-	6.978
1970	15	1.101	7.905	9.006	-	9.006
1971	17	-	10.795	10.795	-	10.795
1972	20	-	9.860	9.860	-	9.860
1973	18	-	10.285	10.285	-	10.285
1974	14	-	10.115	10.115	-	10.115
1975	15	-	10.625	10.625	-	10.625

(Datos: s/ERDA)

- iii) Los canadienses dispusieron de una capacidad productiva fabril de 12.700 t U/año pero sus plantas eran mucho mas grandes y costosas que las americanas, dado el tipo de mineral a tratar y la ley de este, que oscilaba alrededor de 0.09 % U, estimándose que el costo actualizado de las mismas superarían los US\$ 600.000.000.
- iv) En Sudáfrica debió invertirse US\$ 150.000.000 (equivalentes a @ US\$ 400.000.000 de hoy) solo para instalar una capacidad productiva de 4.250 t U/año, pues debían tratarse materiales conteniendo entre 100 y 200 gr U/t.
- v) Australia tuvo una capacidad anual de 850 t U/año y Francia de 1.700.
- vi) En solo 10 años (1954-64) se desarrolló una industria extractiva, la cual entre 1956 y 1959 ocupó entre el 4º y el 5º puesto del valor de la producción mundial minera no ferrífera, desplazando a metales de larga tradición, como el cinc y el plomo y aun aproximándose mucho al oro. En el momento tope, la producción total de uranio en el mundo superó las 34.000 t U, cuyo valor era de US\$ 700.000.000 (hoy @ US\$ 2.000.000.000).

Como durante el periodo bajo análisis, mas del 85 % de la producción mundial era recibida por los EUA, sus estadísticas de recepción de concentrados (Cuadro 3), son muy ilustrativas para señalar la importancia que adquirió esta industria.

También a partir de 1950 otras naciones iniciaron trabajos tendientes a implementar una industria integrada del uranio, alcanzando diversos resultados. A partir de 1955, Francia, Argentina, India y España pudieron hacerlo, lo mismo que Suecia y Portugal, descubriendo en sus propios territorios yacimientos uraníferos de variado volumen y desarrollando una tecnología adecuada para el aprovechamiento de sus menas y aun, en algunos casos, para la refinación final de los concentrados.

En otros países con gran desarrollo industrial, como Alemania Occidental, Japón, el Reino Unido e Italia, no se encontraron depósitos de mucho valor, pero se desarrolló la gama completa de metodología para implementar una industria del uranio, la cual se pasó a aplicar en el exterior, especialmente en lo que a exploración y producción minera y fabril se refiere. En una línea paralela, Francia

CUADRO 4 . EVOLUCION DE LOS RECURSOS URANIFEROS MUNDIALES +
SUPERIORES A 5.000 t U

PAISES	AÑO	1959	1967		1970		1973		1977			
	CATEG.	RRA	RRA	RAE	RRA	RAE	RRA	RAE	RRA		RAE	
	U\$/ kg U	80 ¹	80 ²	80 ²	80 ²	80 ²	80 ²	80 ²	80	80- 130	80	80- 130
Algeria		0	0	0	0	0	0	0	28	0	50	0
Angola		0	0	0	0	0	0	0	13 ³	s.d	s.d	s.d
Argentina		2	16	24	16	24	17	24	18	24	s.d	s.d
Australia		9	10	3	24	9	101	108	289	7	44	55
Brasil		1	s.d	s.d	1	1	1	3	18	s.d	8	s.d
Canadá		300	254	354	278	308	307	409	167 ⁴	15 ⁵	392 ⁴	264 ⁵
Chile		0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
Colombia		0	0	0	0	0	0	0	40 ⁶	s.d ⁷	s.d	s.d ⁷
Dinam.(Groen.)		0	4	s.d	4	s.d	6	10	6	6	0	9
España		2	11	0	16	s.d	16	10	7	s.d	s.d	s.d
EUA		184	387 ⁸	424 ⁸	370 ⁸	691 ⁸	400	839	523	120	950 ⁸	215
Francia		30	37	23	37	31	37	44	37	15	24	20
Gabón		s.d	3	3	10	10	20	10	20	0	5	5
I.C.Africano		0	0	0	8	8	8	8	8	s.d	8	s.d
India		0	2	1	2	1	26	24	30	0	24	0
Japón		1	3	s.d	6	s.d	6	s.d	8	0	0	0
México		1	s.d	s.d	2	s.d	2	s.d	2	0	55 ⁹	s.d
Niger		0	19	10	30	39	50	30	160	0	53	0
Pakistán		0	0	0	0	0	s.d	s.d	10 ¹⁰	0	10 ¹⁰	0
Portugal		5	7	26	7	30	7	30	7 ¹¹	2	1	0
Reino Unido		s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	0	0	0	7
R.F.Alemana		0	s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	2	0	3	0
Somalía		0	0	0	0	0	0	0	6 ¹²	0	4 ¹²	0
Sud Africa		255	206	39	204	33	264	34	306	42	34	38
Suecia		s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	s.d	1	300	3	0
Yugoeslavia		0	0	s.d	s.d	s.d	6	10	5	2	5	16
Zambia		0	0	0	0	0	s.d	s.d	10 ¹³	0	10 ¹³	0
TOTALES ¹⁴		790	960	910	1020	1190	1270	1590	1720	530	1690	630

+ Excluyendo los países del bloque
socialista-comunista.

En 1000 t U
(cifras redondeadas)

OBSERVACIONES PARA EL CUADRO 4

- RRA

RAE

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

: Recursos razonablemente asegurados

: Recursos adicionales estimados

: Antes indicados como <US\$ 10/lb U_3O_8

: Id, <US\$ 15/lb U_3O_8

: Antes incluídas en Portugal

: Para costos hasta US\$ 104/kg U

: Id, US\$ 104-156

: Colocados en esta categoría con dudas

: Existen 250.000 t U adicionales, incluídas en menas con @ 200 gr U/t

: Incluye recursos uraníferos a recuperarse como subproductos hasta el año 2000.

: Según Pansze

: Según Stipanivic

: Se descontaron los recursos de Angola

: Según Stipanivic

: Según Stipanivic

: Cifras redondeadas

Fuentes de información: varias, pero especialmente IAEA y OECD

actuaba intensamente con actividades exploratorias y mineras en varios países africanos.

En menor escala, diversos programas exploratorios también se cumplieron en Brasil, México, Pakistán, Turquía, etc, con variado éxito.

Las cifras de reservas uraníferas alcanzadas hasta 1959 se indican en el Cuadro 4. Ellas, lo mismo que las de 1967 no son exactamente las brindadas en dichos años, sino las que ahora se consideran como mas reales y objetivas para esas épocas, favoreciéndose así una mas aproximada comparación ⁽¹⁾.

4. EL PERIODO DE ESTABILIZACION Y DE GRAN PRODUCCION

Como antes se indicó, en la práctica el mercado uranífero mundial estaba en gran parte condicionado a los requerimientos de los EUA, y por ello, cualquier cambio en la política respectiva por parte de este país, afectaba seriamente a la industria en todo el globo.

Habiendo completado ese país su stock de uranio para fines militares, en 1959 anunció que no renovarían sus contratos de compra de concentrados con Bélgica (Congo), Canadá y Sudáfrica, los que vencían en 1962, 1962 y 1965, respectivamente, ofreciendo en algu-

(1) Los principales cambios introducidos con respecto a los valores dados a conocer con anterioridad a 1966 son los siguientes:

- i) Las cantidades se expresan en toneladas métricas de U y no en toneladas cortas de U_3O_8 ($1 \text{ t U} = 1,3 \text{ t corta } U_3O_8$).
- ii) Solo se indican los recursos que se habían estimado para la categoría de costos inferiores a US\$ 15/lb U_3O_8 ($< \text{US\$ } 40/\text{kg U}$), pues los de la escala siguiente, entre US\$ 15 y 30/lb U_3O_8 ($= \text{US\$ } 40-80/\text{kg U}$) tenían, salvo algunas excepciones, muy poca seguridad.
- iii) No se incluyen los importantes recursos citados para Suecia (@ 300.000 t U) en la categoría de US\$ 10-15/lb U_3O_8 pues en ese tiempo ya se tenía la certeza que los mismos solo podían recuperarse a costos superiores a US\$ 30/lb U_3O_8 , hecho que luego se confirmó.
- iv) Debido al continuo incremento de los costos de los concentrados a partir de 1973, la vieja categoría de $< \text{US\$ } 15/\text{lb } U_3O_8$ es reemplazada por la actual de $< \text{US\$ } 30/\text{lb } U_3O_8$ ($= \text{US\$ } 80/\text{kg U}$) y la anterior de US\$ 15-30/lb U_3O_8 por la presente de US\$ 30-50/lb U_3O_8 ($= \text{US\$ } 80-130/\text{kg U}$), siguiendo con ello a la Nuclear Energy Agency de la Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) y a la International Atomic Energy Agency (IAEA), aunque debe destacarse que la primera escala está ya desactualizada, pues los presentes precios superan los US\$ 43/lb U_3O_8 ($= \text{US\$ } 111,60/\text{kg U}$).

nos casos extender el término de los mismos, reduciendo el monto de las partidas parciales a recibir (stretch-out).

Como consecuencia, cesó el período de expansión en muchos países productores de concentrados, pues desde ese momento no se comprometió la apertura de nuevas minas ni la instalación de otras plantas y los establecimientos existentes pudieron seguir operando durante algunos años, usando la capacidad disponible, pero en distintas escalas.

En los EUA, los topes de producción se registraron entre 1959 y 1962, período durante el cual se pagó entre US\$ 24,05/kg U en 1959 y US\$ 20,80/kg U en 1964, el que siguió estabilizado hasta 1967.

La industria del Canadá, Sudáfrica y Australia siguió produciendo a excelente ritmo hasta 1962, pero luego comenzó a declinar en forma sensible como resultado de la suspensión de los contratos con los EUA.

Pero en 1962, la USAEC adoptó otra medida restrictiva, la cual se reflejó en los años siguientes aun en la marcha de su propia industria local. La recepción de concentrados al precio de US\$ 20,80/kg U se limitó al monto de 385 tU/año por productor y las cantidades por arriba de dicha cifra se recibían a precios mas bajos. De cualquier manera, la producción norteamericana se mantuvo en buenos niveles hasta 1965.

Francia continuó con sus actividades de exploración en varios países africanos y la pequeña producción de uranio a partir de pegmatitas iniciada en 1946 se intensificó con la operación de los depósitos de uranotorianita de Port Dauphin, de los cuales se extrajeron mas de 1000 t U entre 1953 y 1966.

5. EL PERIODO DE RETRACCION Y DE TRANSICION

La retracción insinuada en los últimos años del período anterior se agudizó en muchos países a partir de 1964.

La producción americana bajó en forma sensible (alrededor del 35 % término medio) y las compras de concentrados por parte de la USAEC pasaron de 12.104 t U en 1965 a 7.567 t en 1967 y solo a 1.101 t en 1970, para suspenderse definitivamente en 1971.

Sin embargo, el mercado local americano pudo mantenerse activo por la compra de uranio por parte de empresas privadas, y si bien el mismo estuvo casi siempre por arriba de las 10.000 t U/

año, las plantas operaban solo compensando sus gastos, pues los precios nominales de los concentrados bajaron en 1971-72 a US\$ 17,47/kg U, valor que equivalía a @ US\$ 9/kg U del año 1958.

Por dichos motivos, muchos establecimientos debieron cerrar y de las 26 plantas existentes en 1961 en los EUA, solo quedaron 13 en 1968.

El efecto de la retracción fué aun mayor en los otros grandes productores mundiales. Canadá debió operar a 1/10 de la producción de 1956 y la mayoría de sus complejos minero-fabriles se cerraron.

El Reino Unido, para evitar la recesión total sudafricana, firmó contratos a largo plazo y a iniciarse en 1965, pero la producción de Sudáfrica bajó a 1/4.

El Congo Belga dejó de actuar en 1961 y Australia clausuró sus minas y plantas en 1964.

El único incremento en esta etapa correspondió a Francia, la cual con sus yacimientos metropolitanos y de ultramar pasó de 850 t U en 1958 a 1700 t U en 1967, debido en gran parte a la demanda militar. Pequeñas producciones se siguieron registrando en Portugal, España y Argentina, sea para consumo interno o para exportar.

Alrededor de 1967 se hicieron pronósticos muy optimistas sobre la rápida aplicación pacífica de la energía nuclear, lo cual incentivó en forma transitoria la industria respectiva y así se concretaron compromisos para la instalación de nuevas plantas de beneficio de minerales en los EUA, las primeras de las cuales deberían entrar en producción en 1970 y las otras en 1973. El ritmo de perforaciones de exploración que en 1965 había bajado a 700.000 metros, subió a 3.300.000 en 1967, a 8.000.000 en 1968 y a 10.000.000 en 1969.

Sin embargo, el hecho de que en 1970 el incremento del uso comercial de la energía atómica fué mas lento que lo pronosticado y que se produjeron retardos en la construcción de algunas plantas, nuevamente retrajo el mercado americano. Como consecuencia, la bonanza de 1967-68 perdió terreno y el ritmo de perforaciones bajó a 8.000.000 m en 1970, a 5.200.000 en 1971 y a 5.130.000 en 1972.

Las ventas internas americanas llegaron a 66.400 t U entre 1970-73, pero de ellas, 33.500 t U se exportaron en 1972, cifra muy significativa si se tiene en cuenta que el stock total de los

EUA para esa época (gobierno y particulares), apenas superaba las 50.000 t U. Los resultados de esa política hicieron crisis a partir de 1973, como luego se expondrá.

Pero esta vez, el proceso norteamericano no encontró eco en el resto del mundo, y muchos países, teniendo mas confianza y una mejor visión sobre el futuro de la industria nuclear, siguieron desarrollando importantes programas uraníferos, marcándose el comienzo de la total independencia con respecto a los EUA.

Así, entre 1965 y 1970 se intensificó la exploración de Rössing Mine en el Africa Sudoccidental, a pesar de las incertidumbres que ofrecía tal empresa, ya que el futuro político de ese territorio (Namibia) resultaba incierto y por otra parte, la baja ley del yacimiento, inferior a 400 gr U/t, ofrecía riesgos para operar a precios moderados. Sin embargo, una vez certificada la presencia de mas de 50.000 t U, las menas se ensayaron en una planta piloto construída ad hoc y luego se resolvió la instalación de la mayor planta del mundo, programada para alcanzar una producción de 4.250 t U en 1977 y de 8.500 en 1978. Si bien se produjeron demoras en este cronograma, Rössing Mine se transformó en la mayor unidad productiva mundial de concentrados de uranio y en el primer establecimiento capaz de procesar exitosamente menas de baja ley por métodos convencionales.

También a partir de 1972 se empezaron a explorar en Sudáfrica nuevos ambientes geológicos (sedimentos del Karroo), se re-muestrearon por completo las grandes colas de procesamiento de minerales auríferos y se intensificaron las investigaciones hidrometalúrgicas para beneficiar materiales de baja ley. Al mismo tiempo, varias compañías empezaron a ampliar sus capacidades de producción a partir de las colas auríferas a la vez que Palabora, fuera de sus productos principales (cobre, vermiculita, manganeso, etc) empezó a recuperar uranio como subproducto, a razon de 100 t U/año, partiendo de menas con 40 gr U/t.

Francia revaluó sus reservas metropolitanas y de ultramar tomando valores de cut-off mineros mas bajos y compatibles con los nuevos precios esperados para el uranio y continuó con la exploración sistemática en varios países africanos. Como resultado de esa acción, los recursos en Niger llegaron a @ 80.000 t U a la vez que en 1971 comenzó la producción en Arlit a razón de 430 t U/año, la cual se incrementó de inmediato a 750 t U/año. En Gabón se

certificaron 30.000 t U y la exploración en el Imperio Centro-afri-
cano pusieron en evidencia mas de 8.000 t U.

Una política expansiva similar siguieron Alemania Occidental, Japón e Italia, países que luego de certificar lo reducido de sus recursos internos, buscaron fuentes externas de abastecimiento uranífero para sostener a sus programas nucleo-eléctricos.

Así, Italia, por medio de Agip-Nuclear, comenzó a actuar en Somalia, Zambia, EUA y Australia en etapas exploratorias y en la producción de Arlit, en Niger, a la vez que Alemania Occidental, por medio de varias empresas, se comprometió en mas de 40 proyectos exploratorios en Australia, Austria, Canadá, Suiza, Togo, Ghana, EUA, etc y participó en la producción de Arlit (Niger) y de Rabbit Lake (Canadá).

Japón siguió explorando en su propio territorio y amplió las reservas de su clásico yacimiento de Ningyo-Toge, cuyas menas se procesaron en una pequeña pero sofisticada planta, la cual permitió desde 1972 obtener directamente F_4U por el proceso PNC y reducción electrolítica, a razón de 30 t U/año. Sin embargo, el mayor interés nipón se concentró en el extranjero y las compañías japonesas empezaron a actuar activamente en Australia, Canadá, Niger y EUA.

En Canadá se revaluaron los recursos existentes usando cut-off minero mas bajo y las reservas se incrementaron en forma sensible (ver Cuadro 4), a la vez que se prestó especial atención a la búsqueda de yacimientos uraníferos "no clásicos", de baja ley. En 1966, este país negoció contratos para entregar 56.000 t U a partir de 1980 y ya antes de 1973 habia liberado @ 7.300 t U.

Hay otros dos aspectos dignos de destacar en la política uranífera de Canadá durante este período. Una de ellas fué tomada por el gobierno, el cual, para evitar un colapso semejante al que debió sufrir la industria en el período anterior de recesión, estableció la formación de un "stock-pile" entre 1964 y 1974, acopiando 10.000 t U. La otra medida la adoptaron los productores privados, los cuales con clara visión del futuro y a pesar de contar con una amplia capacidad libre en sus plantas, comprometieron nuevas expansiones a la vez que otros consorcios canadiense-alemanes iniciaron la instalación de nuevos establecimientos para producir 1750 t U a partir de 1975 en Walleston Lake.

En Suecia, luego de ensayos en planta piloto, se decidió instalar una facilidad industrial (Randstad) para producir hasta 1000 tU/año, procesando las lutitas bituminosas con @ 250 gr U/t, pero la misma no respondió a los esquemas de rendimiento técnicos y económicos esperados, por lo cual debió suspender sus actividades al poco tiempo.

Además de los casos citados, los trabajos en otros países fueron dando exitosos resultados aun a pesar del mercado deprimido que siguió hasta 1973, y yacimientos de gran interés fueron descubiertos a la vez que se comprometieron nuevas instalaciones productivas.

Los impactos mas llamativos se registraron en Australia, donde antes de finalizar 1973 se habían certificado @ de 200.000 t U en los distritos de Beverly, Alligator Valley, Koongarra y Ranger One, a la vez que se descubrió un nuevo tipo de depósito uranífero "no clásico", contenido en caliches recientes ("calcretes"), de los cuales el de Yeelirrie demostró tiempo despues incluir @ 40.000 tU.

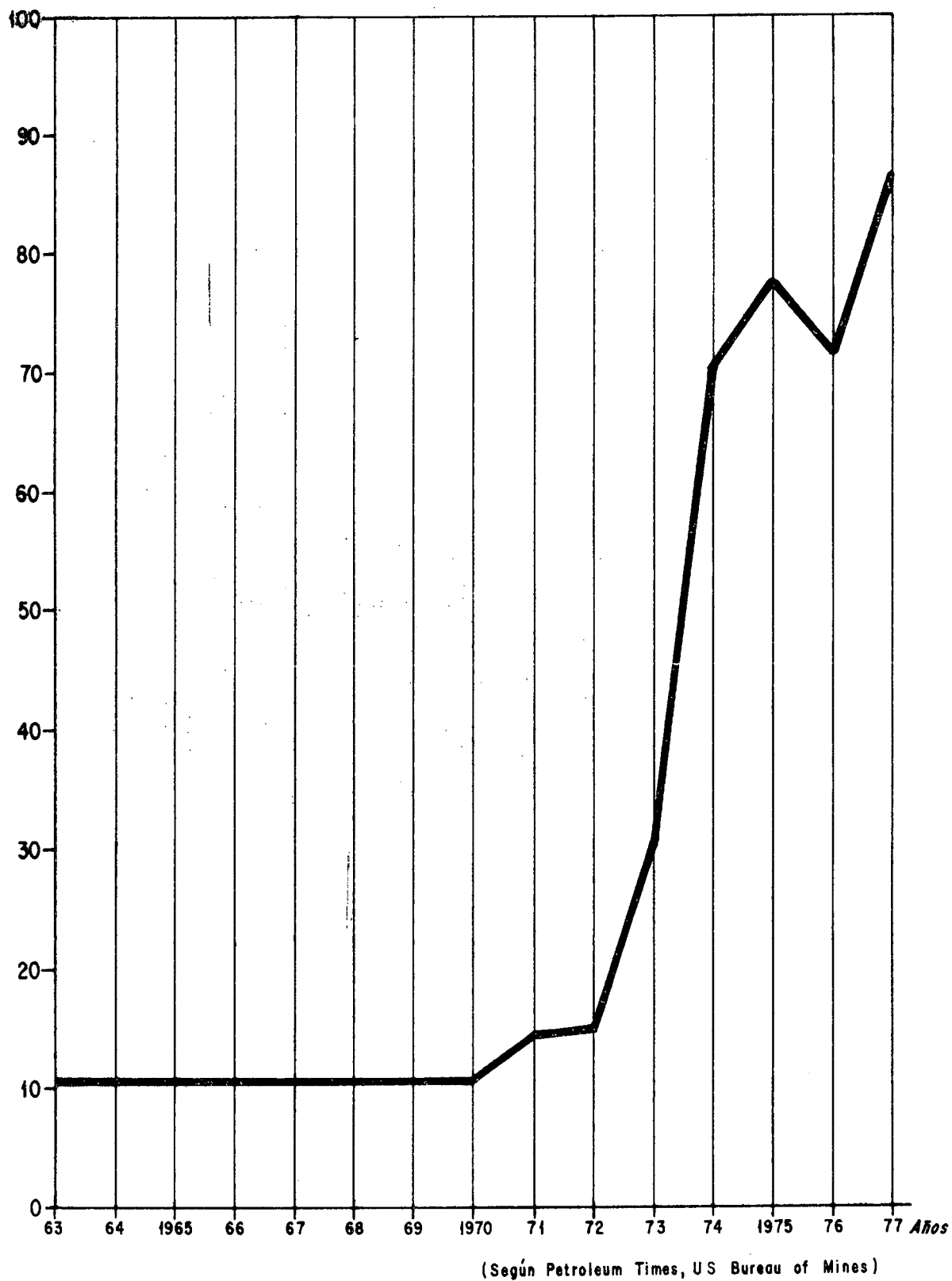
Dinamarca cumplió grandes esfuerzos exploratorios en el SW de Groenlandia, donde certificó la presencia de @ 250.000 t U en yacimientos del tipo "porfírico", con leyes comprendidas entre 100 y 800 gr U/t, los que se estimó podrán entrar en producción económica a costos del orden de US\$ 80/kg U.

En la India se desarrollaron nuevos recursos uraníferos, los cuales llegaron a @ 50.000 t U (entre RRA y RAE), además de 8.000 t U contenidas en las monacitas de las playas oceánicas. La producción del deposito de Jaduguda se mantuvo en 1000 t/día de mena, a la vez que se empezó con el estudio para la recuperación del uranio a partir de las colas de procesamiento de las menas cupríferas de Roam Rakha y Surda.

En la Argentina, además de los sistemas standard de lixiviación se aplicó con intensidad el metodo de "heap leaching", comenzándose con la instalación de una planta para la refinación de concentrados y la producción de UO_2 con pureza nuclear.

La experiencia de Urgairiça en Portugal, sobre lixiviación en pilas e "in situ", permitieron re-evaluar las reservas existentes tomando cut-off mas bajos y la capacidad de producción de concentrados se colocó en 113 t U/año. Otras actividades portuguesas se cum-

Fig. 1 - EVOLUCION DE LOS PRECIOS MEDIOS DEL PETROLEO EN EL MUNDO (U\$/m³)



plieron a partir de 1971 en Mozambique y Angola, donde el depósito de Calinda demostró poseer 13.000 t U.

En Brasil, para 1970 se asignó un presupuesto 5 veces mayor que el de 1969 para actividades exploratorias, con un incremento futuro del 40% por año y todos los proyectos mayores se transfirieron a la actividad privada.

En México se revaluaron las reservas existentes y se instaló una pequeña planta piloto que empezó a producir a razón de 30 t U/año.

En España se activó la exploración entre 1970 y 1973 y la producción se mantuvo en @ 50 t U/año y hasta tanto se decidiera la instalación de una planta mayor en Ciudad Rodrigo, se procedió a importar concentrados.

Numerosos proyectos de exploración uranífera se iniciaron en este periodo en varios países, soportados por sus propios gobiernos, o recibiendo la ayuda de Naciones Unidas y la Agencia Internacional de Energía Atómica, o bien por convenios bilaterales, como en Austria, Bolivia, Corea, Egipto, Ghana, Grecia, Iran, Mauritania, Pakistán, Somalia, Suiza, Turquía, Yugoslavia, Zambia, etc.

Como resumen, puede decirse que el periodo de retracción iniciado en 1965 mostró un fuerte cambio favorable a partir de 1970 fuera de los EUA, permitiendo que muchos países alcanzaran una plena capacidad para desarrollar, per se, una industria del uranio, a veces completamente integrada, desde la prospección hasta la producción de materiales con pureza nuclear.

6. EL MERCADO MADURO Y LA SEGUNDA ETAPA DE EXPANSION. PRESENTE Y FUTURO DE LA INDUSTRIA DEL URANIO

Al terminar 1973, se hizo evidente que los programas nucleoelectricos acusarían una fuerte expansión inmediata, a la cual en mucho contribuyó el incremento de los precios del petróleo impuesto por los productores del Medio Oriente, los que se indican en la Fig. 1, los cuales tuvieron una tremenda incidencia en aquellos países altamente industrializados o en etapa de rápido desarrollo y que debían importar hidrocarburos fósiles, como casi todos los de Europa, además de Australia, Sudáfrica, Japón, Brasil, etc.

Como consecuencia, la única solución a corto plazo era recurrir a la producción nucleoelectrica y a tal salida se plegaron muchísi-

Segun IAEA

CUADRO 6. REQUERIMIENTOS URANIFEROS MUNDIALES
(1000 t U)

AÑO	SIN RECICLADO				CON RECICLADO +			
	TENDENCIA DE CRECIMIENTO				TENDENCIA DE CRECIMIENTO			
	ACELERADA		ACTUAL		ACELERADA		ACTUAL	
	anual	acumul	anual	acumul	anual	acumul	anual	acumul
1977	23	23	23	23	23	23	23	23
1978	29	52	29	52	29	52	29	52
1979	35	87	35	87	35	87	35	87
1980	43	130	41	128	43	130	41	128
1981	51	181	47	175	51	181	47	175
1982	60	241	53	228	60	241	53	228
1983	69	310	59	287	67	308	57	285
1984	79	389	65	352	74	382	61	346
1985	88	477	71	423	82	464	65	411
1986	98	575	78	501	90	554	69	480
1987	111	686	84	585	98	652	73	553
1988	125	811	90	675	106	758	77	630
1989	140	951	96	771	115	873	81	711
1990	156	1.107	102	873	126	999	85	796
1991	171	1.278	108	981	137	1.136	89	885
1992	188	1.466	114	1.095	149	1.285	93	978
1993	206	1.672	121	1.216	160	1.445	96	1.074
1994	221	1.893	127	1.343	171	1.616	100	1.174
1995	234	2.127	134	1.477	181	1.797	104	1.278
1996	247	2.374	142	1.619	193	1.990	108	1.386
1997	267	2.641	150	1.769	205	2.195	112	1.498
1998	295	2.936	160	1.929	218	2.413	116	1.614
1999	317	3.253	169	2.098	230	2.643	120	1.734
2000	338	3.591	178	2.276	242	2.885	125	1.859

+ Comenzando en 1985

Datos: IAEA

mos países (Cuadro 5), pero la misma demandaría también grandes cantidades de uranio (Cuadro 6).

En la nueva conjuntura, era evidente que los EUA seguirían siendo el principal consumidor de uranio del mundo, sea para atender las necesidades de sus propias centrales como para asegurar el abastecimiento a aquellas que construirían sus dos principales firmas para exportarlas (Westinghouse y General Electric). Pero el resto del mundo no socialista iba integrando un programa nuclear muy ambicioso hasta fines del siglo, el que a la fecha se estima que es del mismo orden que el de los EUA.

Pero de inmediato surgieron dificultades de importancia, especialmente dentro del ámbito de ese país.

- i) Al iniciarse 1973, se produce un dramático incremento en el número de reactores comerciales que empezaban a operar, especialmente en los EUA, donde en solo 3 años se pusieron en funcionamiento 26.000 MWe, en comparación con los 10.000 MWe que lo hicieron entre 1968 y 1972.
- ii) Las previsiones norteamericanas no habían tomado debidamente en cuenta dicho factor en cuanto a abastecimiento de uranio se refiere, y por ello, a partir de mediados de 1973 se empezaron a colocar urgentes pedidos de uranio, para aprovisionamiento a partir de 1978-80, pero la indecisión del período anterior hizo que los EUA no contaran con la capacidad suficiente como para atenderlos en tiempo.
- iii) Las especulaciones de la mas importante firma productora de centrales nucleares (Westinghouse) para abastecerse de uranio se hicieron sobre la base de precios que no superaban los US\$ 40/kg U, cifra de que inmediato fué superada y obligó a dicha empresa a anunciar el incumplimiento de sus contratos y a denunciar ante la justicia de los EUA la existencia de un aparente "cartel" en el mercado uranífero mundial.
- iv) Las reservas norteamericanas para producir concentrados a costos por debajo de US\$ 40/kg U no eran suficientes y en el resto del mundo el panorama era similar (salvo el caso de Australia, con depósitos de alta ley), debido a los índices de inflación, aumento de los combustibles, costos de exploración, etc.
- v) Por otra parte, exceptuando los EUA y Canadá, los otros posibles grandes productores de uranio en el mundo no ofrecían

total seguridad de abastecimiento, por distintas razones:

- a) Australia, con grandes reservas uraníferas de alta ley, tenía su industria prácticamente parada y constreñida en su desarrollo por la legislación ad hoc impuesta por el Partido Laborista gobernante en esa época.
- b) Sudáfrica solo podía comprometer, con mucha seguridad, su producción a partir de las colas de procesamiento de las menas auríferas, pero aquella muy importante de Rössing Mine podía ofrecer dificultades, después de la independencia a concederse a Namibia.
- c) La posible producción en gran escala a partir de las lutitas bituminosas de Suecia seguía ofreciendo dudas técnicas, de plazos y en especial de costos.
- vi) De los países africanos con excelentes posibilidades uraníferas, varios comenzaron a presentar dificultades políticas internas o externas, como Zaire, Somalia, Zambia, etc y solo quedaban como mas estables los que habían estado bajo el área de influencia de Francia (Niger, Gabón, etc), donde de inmediato se volcaron compañías del Japón, Francia, Italia, Alemania Occidental, EUA, Canadá, etc.
- vii) Finalmente, otra medida que contribuyó a complicar el panorama se produjo en 1973, cuando los EUA, intentando interesar a la actividad privada para participar en la etapa de enriquecimiento de uranio, anunció que la contratación de tales servicios en las plantas estatales deberían formularse por períodos de 10 años y con antelación de 8 años al primer servicio. Si bien dicha medida no fué aprobada por el parlamento americano, la repercusión negativa del anuncio fué muy grande en todo el mercado nuclear.

Como consecuencia de todos los hechos señalados, el problema del abastecimiento de uranio a bajos precios se hizo crítico en los EUA, sobre todo para Westinghouse.

Sin embargo, el resto de los países y empresas de los mismos, embarcados o vinculados con programas nucleares de envergadura, siguieron normalmente con ellos, sobre todo teniendo en cuenta que la incidencia del precio del combustible atómico en la generación eléctrica es inferior al 5 % del costo de la misma.

El periodo que se inició en 1973, que llega a nuestros días y que tendrá proyección futura, requiere del análisis de distintos aspectos.

6.1. LOS PRECIOS DEL URANIO

A partir de 1973 se registra un vertiginoso aumento nominal en los precios del uranio, como se ilustra en el Cuadro 1, ya que de la cifra de US\$ 16,70/kg U a mediados de ese año, se pasó a US\$ 27,30 en junio de 1974, a US\$ 39 a fines de 1974, a US\$ 91 al terminar 1975, a US\$ 106,60 en diciembre de 1976, etc.

En una primera impresión, dicho escalamiento de precios parecería no justificado, pero datos objetivos señalan lo contrario, como se verá a continuación.

6.1.1. Costos de exploración uranífera

Los datos mas concretos al respecto se deben a los EUA y ellos se tomarán como referencia, completados a veces con los de otros países. En líneas generales, los gastos de exploración para el período 1966-74 se estimaron en los EUA en @ US\$ 5 por kg de U producido en yellow cake, pero en 1976, los mismos llegaron a US\$ 15,50. Los principales rubros que incidieron en tal incremento fueron:

A. Perforaciones

El avance de la exploración en distritos conocidos y en otros promisorios exigió ir aumentando las profundidades de los pozos, algunos de los cuales se llevaron a mas de 800 m en los EUA. En el Cuadro 2 se indican los valores promedio por año para el período 1958-75 en dicho país, los cuales no solo señalan un aumento del 300 % sino además la respectiva declinación de las reservas probadas por metro perforado.

Al mismo tiempo, los costos de perforación percutante, siendo muy baratos en los EUA por el volumen de los contratos y las favorables características de los terrenos a atravesar, se duplicaron en solo 4 años:

1973	US\$	4,90	por metro
1974	"	6,90	" "
1975	"	9,50	" "
1976	"	10,20	" "

De cualquier manera, estas cifras no tienen ninguna proyección en el exterior, donde los costos de perforación exploratoria son mucho mas elevados, debido a :

- a) los volúmenes sensiblemente menores de los contratos con respecto a los EUA.
- b) en la generalidad de los casos, los terrenos a atravesarse son mucho mas compactos que los de los EUA y muchas veces ofrecen dificultades tecnicas, factores que rebajan los rendimientos de avance entre 1/3 y 1/10.
- c) en varias oportunidades, los minerales de uranio no se encuentran en equilibrio, lo cual obliga a recurrir a mas costosas perforaciones testigadas, lo mismo que cuando se necesitan muestras para análisis por la presencia de otros metales recuperables.
- d) los costos de movilización de equipos, maquinarias y de personal se incrementan considerablemente, lo mismo que los de apoyo logístico.

Perforaciones en Niger y Gabón, para programas de envergadura, cuestan alrededor de US\$ 50/m , lo mismo que en Pakistán. Sondeos testigados en Zambia no bajan de los US\$ 100/m lo mismo que en la Argentina y contratos pequeños en Irán se hicieron por arriba de US\$ 120/m.

B. Costos de exploración aeroradimétrica

Servicios completos de exploración aerea espectrométrica se pueden obtener en EUA, Canadá, Sudáfrica y Argentina en el orden de US\$ 20-30 por kilómetro de línea volada, debido a la existencia de facilidades operativas, apoyo logístico bueno y cercano, existencia de personal especializado, etc. Un servicio similar cumplido en Brasil en 1974-75 costó @ US\$ 40/km de línea volada (equivalentes a mas de US\$ 60/km a la fecha) y en Irán las cifras superarán los US\$ 80/km, a pesar de la magnitud del programa (500.000 km² a cubrir).

C. Costos varios

La incidencia del incremento de los costos de combustibles en las etapas de exploración también es sensible y puede llegar a @ 5-10 %.

El incremento del costo de la mano de obra especializada varía en los distintos paises y para los 10 últimos años osciló entre el 30 y el 70 %.

6.1.2. Costos de producción

Varios items incrementaron los costos de producción minera y fabril.

A. Disminución del contenido en U de las menas

Con la sola excepción de Australia, donde los nuevos y grandes yacimientos que aún no entraron en producción acusan leyes elevadas (superiores, en promedio general al 0,25 % U), en el resto del mundo el contenido en U de las menas aprovechables va decreciendo tanto en los depósitos activos como en los que entrarán en producción, lo cual obviamente incide en forma directa en los precios de los concentrados finales, pues obliga a mayores costos en:

- a) la producción minera, por unidad de U a extraer.
- b) Id, en el transporte del mineral.
- c) Id, en la producción fabril.

En el Cuadro 7 se indican los tenores medios de las menas procesadas en los EUA entre 1951 y 1975. En dicho lapso, ellas bajaron del 0,26 % U a 0,14 % U y se estima que las reservas actuales están en el orden de 0,1 % U. La incidencia respectiva en los costos de producción de concentrados a valores reales (no nominales), puede superar el 200 %.

Los yacimientos canadienses mantienen aproximadamente su ley media, del orden de 0,09 % U, pero otros países, como Sudáfrica, están recuperando el U de menas con menos de 350 gr U/t en Rössing Mine y de las colas auríferas que solo lo contienen entre 100 y 200 gr U/t, aunque en este último caso ya están amortizados los costos de producción minera y de preparación del material.

B. Costos de explotación minera y fabril

También en este rubro los incrementos de costos han sido muy significativos y en líneas generales, los mismos aumentaron en los EUA en un 300 % entre 1950 y 1976 a valores reales, debido a la incidencia de los siguientes rubros principales:

- a) Electricidad y combustibles aumentaron @ del 300 % entre 1973 y 1977.
- b) Los costos laborales, para el mismo periodo subieron en un 50 %.
- c) Los productos químicos, en @ 300 %.
- d) Costos de instalaciones mineras y fabriles: @ 300 %.

CUADRO 7. Variación del contenido en U de las menas producidas en EUA

AÑOS	% U	AÑOS	% U
1951	0,264	1963	0,21
1952	0,27	1964	0,21
1953	0,264	1965	0,204
1954	0,27	1966	0,20
1955	0,255	1967	0,17
1956	0,24	1968	0,166
1957	0,24	1969	0,18
1958	0,23	1970	0,17
1959	0,22	1971	0,17
1960	0,204	1972	0,18
1961	0,204	1973	0,18
1962	0,204	1974	0,15
		1975	0,145
Tenor medio de las reservas en 1977: 0,10 % U			

Datos: s/Mineral Yearbook y ERDA

No hay datos concretos como para evaluar los incrementos de costos de producción en otros países, pero los mismos parecen ser menores en Sudáfrica, Canadá, Australia y Francia.

6.1.3. Precios nominales y reales

No hay estadísticas mundiales completas al respecto, por lo cual deberán usarse las de los EUA, las que son muy significativas y se reproducen en el Cuadro 1, debido a Joskow. Las brindadas por la Chamber of Mines of South Africa son perfectas y aplicables a dicho país, pero solo consideran valores nominales de producción minera unitaria.

En el cuadro citado se tomaron en cuenta las variaciones de los índices del Producto Bruto Nacional, adoptando como índice básico el de 1958 = 100 y luego se consideró el decaimiento de la ley de las menas explotadas a través del tiempo, usándose valores de -10 %, -20 % y -30 % para el período 1973-77, los cuales son muy conservadores, ya que la "depletion" para el mismo es cercana al 80 % (Cuadro 7).

Los precios nominales señalaron un valor medio de US\$ 29/kg U para el primer período de expansión entre 1950-57, de US\$ 21,85 para la etapa de estabilización de la industria entre 1958-67, de @ US\$ 16 para la de retracción y luego comenzaron a elevarse rápidamente hasta llegar a US\$ 111,80/kg U en 1977 y US\$ 112,84 a mediados de 1978 (Fig. 2).

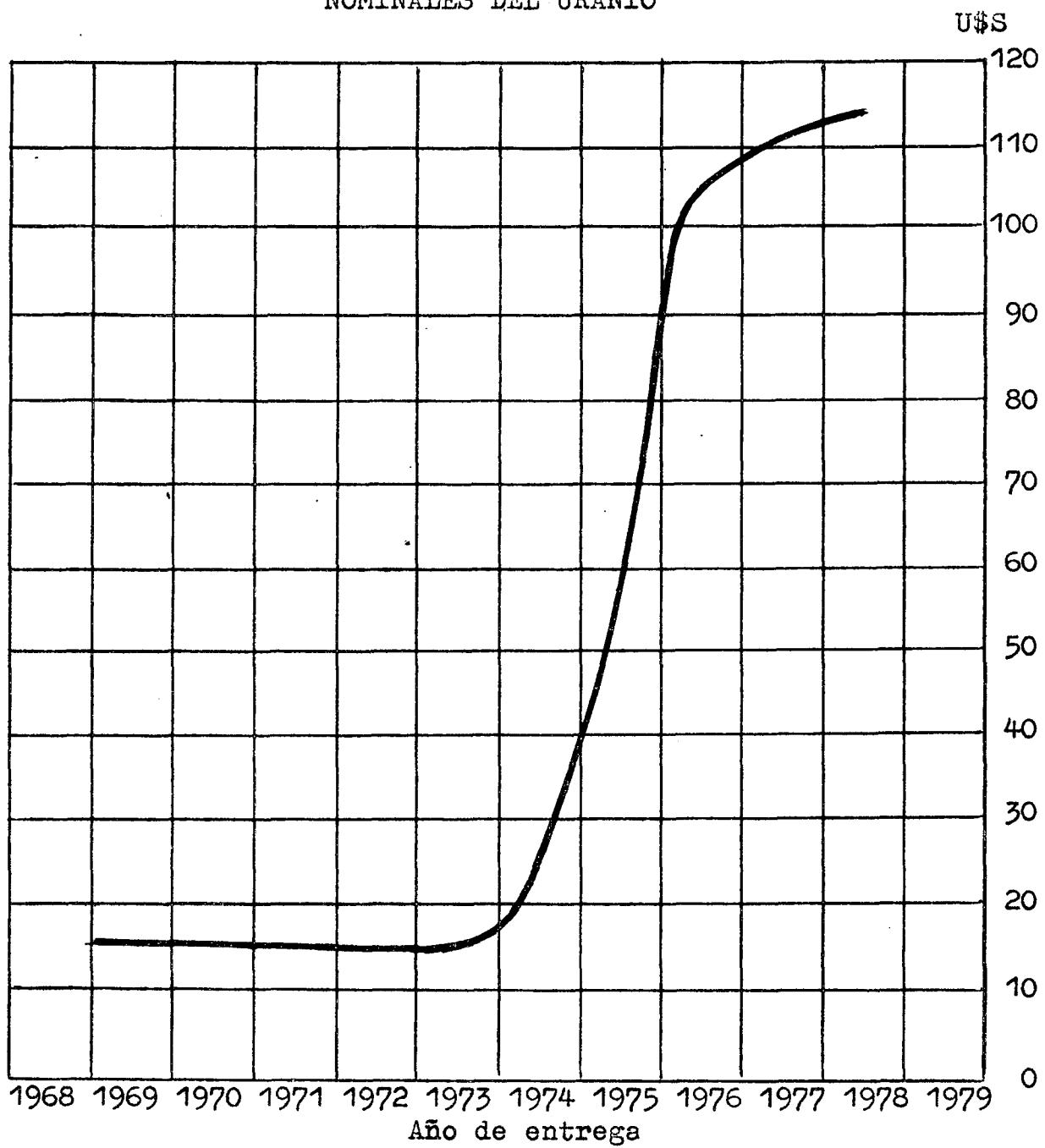
Sin embargo, si dichos valores se compensan de acuerdo con los índices del PBN de los EUA, ellos señalan @ US\$ 34/kg U para el período 1950-57 y también US\$ 34/kg U para la segunda etapa expansionista de 1974-77, de manera que no existió ningún escalamiento injustificado.

Mas aún, si los precios nominales se corrigen también en un -30% por "depletion", resulta que solo en el período 1976-77 se alcanzaron valores reales de @ US\$ 34/kg U.

Las predicciones sobre los futuros precios que regirán en el mercado son subjetivas y responden a las distintas tendencias de opiniones.

Por un lado, debe estimarse que el abrupto aumento registrado entre fines de 1973 y mediados de 1976 (Cuadro 1, Figura 2)

FIG. 2. EVOLUCION MEDIA DE LOS PRECIOS
NOMINALES DEL URANIO



fué una consecuencia lógica como para sacar el mercado de la depresión y colocarlo en niveles razonables de precios. En dicho lapso, el incremento fué de US\$ 34/kg por año, pero luego el mismo se atenuó a @ US\$ 4,40/kg por año, entre julio de 1976 y julio de 1978.

Una tendencia de pronósticos estima que los futuros precios solo se elevarán siguiendo el ritmo normal de inflación de los grandes países productores, y por lo tanto un valor de @ US\$ 4,50/kg U por año podría ser representativo.

Otra tendencia, en cambio, considera que los costos de exploración y de producción minera y fabril crecerán mas rápidamente que los índices de inflación pues se hará necesario recurrir a materias primas mas caras (de mas baja ley), por lo cual el futuro incremento anual de precios sería superior a los US\$ 4,50/kg U antes indicados.

Una tercera tendencia especula que la entrada masiva de la producción australiana podría hacer bajar los precios, o por lo menos estabilizarlos por varios años. Sin embargo, dicha situación recién podría cristalizarse a partir de 1983, si es que en Australia se liberara de inmediato la política uranífera restrictiva que hoy rige.

De cualquier manera, hasta esa fecha, debe esperarse un aumento continuo y moderado en los precios, que para 1983 deberán llegar a un nivel mínimo de @ US\$ 135/kg U.

6.2. LAS ACTIVIDADES EXPLORATIVAS Y LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS URANIFEROS

A partir de 1973 y al iniciarse el segundo período expansionista, numerosos programas exploratorios toman cuerpo en muchos países y algunos de ellos adquieren nivel nacional.

Así, en 1974 el gobierno de los EUA comenzo el "National Uranium Resource Evaluation Program" (NURE), a los efectos de establecer una fehaciente estimación de los recursos uraníferos en todo su territorio y también para proveer a la industria privada los datos y la tecnología necesarios para su desarrollo y aprovechamiento, habiéndose dado a conocer parte de los resultados preliminares en junio de 1976.

Pero al mismo tiempo, un centenar de compañías intensificaron sus actividades exploratorias, invirtiendo US\$ 170.000.000 en 1976, US\$ 240.000.000 en 1977 y se estima que gastarán US\$ 250.000.000

en 1978, a la vez que el ritmo de perforaciones se incrementó en forma sensible:

1975	7.800.000 m
1976	10.400.000 "
1977	15.000.000 "
1978	14.600.000 " (programadas)

Como consecuencia de estas actividades y de la revaluación de los recursos existentes en función del cut-off minero mas bajo, las disponibilidades uraníferas netas de los EUA (RRA y RAE, descontando los volúmenes explotados) subieron en @ 250.000 t U para la categoría de < US\$ 80/kg U.

Un plan similar lo está desarrollando Canadá, donde el gobierno (nacional y provinciales) soporta el "Uranium Reconnaissance Program" para brindar a la industria privada los datos necesarios para la selección de áreas favorables, pero al mismo tiempo cerca de 200 compañías ya están actuando en exploración uranífera, invirtiendo a razón de US\$ 40-50.000.000 por año para tales fines.

Los nuevos hallazgos y la revaluación de los depósitos existentes permitieron el incremento de los recursos como se indica en el Cuadro 4.

Sudáfrica, por su parte, también aplicó la misma política y el gobierno soportó la prospección aérea general de 1.000.000 km² sobre sedimentos del Karroo, brindando los datos a la actividad privada, en la cual, además de empresas locales, están participando otras de EUA, Francia, etc.

Otro importantísimo programa exploratorio a nivel nacional se cumplió en Argelia, donde 2.380.000 km² fueron cubiertos con prospección aérea magnetométrica y espectrométrica antes de 1974, detectándose numerosas anomalías tanto en terrenos cristalinos precámbricos como en otros sedimentarios. Las investigaciones de campo, concentradas sobre las primeras, pusieron en evidencia @ 80.000 t U (RRA y RAE), siendo las posibilidades uraníferas de este país óptimas.

En Irán, durante 1975-76 se reconocieron las principales provincias geológicas y se seleccionaron las áreas para ser exploradas por prospección aérea espectrométrica. En una primera etapa, iniciada en 1977, se cubrirán @ 600.000 km² y en la segunda, que comenzará en 1978, otros 500.000 km², a la vez que las activida-

des de campo se están realizando sobre dos nuevas áreas anómalas y en el distrito ya conocido de Anarak. El presupuesto inicial para estos trabajos es de US\$ 300.000.000 para 10 años, pero el mismo podrá incrementarse si se obtienen buenos resultados en las etapas previas.

De los recursos antes mencionados para Portugal, deben ahora descontarse los de Angola.

En otros países citados para el período anterior se siguieron los planes exploratorios, a veces intensificados, pero no se registraron novedades de consideración.

Al mismo tiempo, la búsqueda de depósitos uraníferos comenzó en otras naciones o bien se reiniciaron en países que la habían suspendido años atrás (Alemania Occidental, Austria, Filipinas, Finlandia, Indonesia, Jordania, Liberia, Madagascar, Marruecos, Perú, Reino Unido, Sudan, Tailandia, Uruguay, etc).

En el Cuadro 4 se indican los recursos uraníferos determinados hasta @ 1977, los cuales alcanzan a @ 1.700.000 t U en la categoría de "Razonablemente Asegurados" para costos inferiores a US\$ 80/kg U. Una cifra semejante se alcanza para los "Recursos Adicionales Estimados" en el mismo costo, pero la seguridad es menor. Los "Recursos Razonablemente Asegurados" para costos comprendidos entre US\$ 80-130/kg U son de @ 500.000 t U y ellos ofrecen una relativa certeza.

Al mismo tiempo, buenos esfuerzos se han cumplido en los últimos años para recuperar el uranio de fuentes no convencionales o bien aplicando métodos de extracción no clásicos y que permitan extraerlo de materiales marginales o de muy baja ley.

Al respecto, tres sistemas de lixiviación no convencionales ya se están usando en escala industrial y con excelente éxito:

- i) Lixiviación "in situ" (o "solution mining").
- ii) Lixiviación en pilas ("heap leaching").
- iii) Lixiviación bacteriana

La lixiviación "in situ" comenzó a ser usada para recuperar el uranio remanente en pilares, bloques, etc de viejas minas, pero recientemente también se la aplicó a depósitos vírgenes, ya que ofrece la gran ventaja de evitar todo el costo de explotación minera y además supera los problemas de contaminación ambiental.

En Francia, durante varios años se recuperó uranio a razón de 200 t U/año con la lixiviación "in situ" de bloques que no se extrajeron de varias minas por su baja ley, y lo mismo se hizo en Canadá y en los EUA. Pero ya en 1977 el método se aplicó en 5 depósitos vírgenes del SW de Texas (EUA), donde se recuperan 1.000 tU/año pero esta capacidad será incrementada a 1.500 t U a partir de 1979.

La lixiviación estática sobre pilas de minerales es conocida desde hace tiempo y en Portugal se la usó desde la década del 40 para recuperar el uranio y el cobre de Urgairiça. Sin embargo, en los últimos años la aplicación de éste método se incrementó considerablemente en EUA, Francia y Argentina, tanto para tratar minerales marginales como normales, y ahora se enfoca hacerlo para recuperar el uranio de las enormes colas de procesamiento de menas auríferas de Sudáfrica (100-180 gr U/t) y cupríferas de EUA, Chile, México, etc donde el mismo aparece con leyes de @ 50 ppm U.

La lixiviación bacteriana demostró ser muy efectiva sobre ciertas menas piritosas, donde las bacterias oxidantes posibilitan el pasaje del ion ferroso a férrico y éste del uranio tetravalente al hexavalente, forma bajo la cual éste es fácilmente soluble. Por otra parte, la acción bacteriana permite la oxidación del azufre de las piritas y la producción natural de H_2SO_4 , que contribuye a la lixiviación del uranio.

La acción bacteriana se aplica tanto para ayudar la lixiviación "in situ" como al "heap leaching". En Standrock (Elliot Lake, Canadá) se viene recuperando uranio desde hace varios años, a razón de 7 t U/mes, con lixiviación "in situ" sobre viejos pilares, frentes mineros, etc haciéndose uso de bacterias oxidantes, lo mismo que en depósitos de New Mexico, Portugal y Sudáfrica.

Sin embargo, la lixiviación bacteriana encontró su medio óptimo sobre pilas de materiales molidos de baja ley y su aplicación ya es común en Portugal, EUA, Canadá, Sudáfrica, etc.

Varias menas o materiales no clásicos, conteniendo uranio en bajas proporciones pero en grandes volúmenes, han sido seriamente estudiadas, tendiendo a la recuperación de dicho metal (rocas ígneas, fosforitas marinas, cobre porfírico, lutitas bituminosas, lignitos, aguas y barros oceánicos o marinos, etc).

El exitoso resultado de Rössing Mine, en Sudáfrica, donde la alaskita solo contiene @ 350 gr U/t abrió grandes posibilidades pa-

ra aprovechar económicamente menas semejantes, como las de Groenlandia, dados los actuales precios favorables del uranio. Se estima que depósitos similares podrán ser útiles en la próxima década.

En segundo lugar de aprovechamiento inmediato se encuentran las rocas fosfáticas marinas que incluyen uranio a razón de @ 50 ppm U, salvo las de Florida (EUA), que acusan leyes mas altas. El ácido fosfórico obtenido puede contener entre 300 y 400 gr U/t y una planta de Florida está recuperando el uranio desde hace años y otras 3 se instalarán próximamente. Proyectos similares se encuentran en desarrollo en Canadá, Marruecos y España, a la vez que se estima que en Israel el método se aplica desde hace años.

En las décadas siguientes, una producción marginal de uranio se recibirá de estas fuentes fosfáticas, pero sus volúmenes siempre estarán limitados a la capacidad de producción de ácido fosfórico.

En tercer lugar se encuentran algunas menas cupríferas (o sus colas de procesamiento) de grandes depósitos, que pueden contener entre 50 y 100 ppm U. Su aprovechamiento se encara en varios países (EUA, México, Chile, etc).

Como subproducto, el uranio es recuperado desde hace años en pequeñas proporciones (@ 500 kg U/año) durante el procesamiento de las monacitas de las playas oceánicas de Brasil y en escala interesante (mas de 100 t U/año) a partir de las menas cupríferas de Palabora (Sudáfrica).

Hay otras fuentes uraníferas de enorme volumen, donde el metal se encuentra en bajas concentraciones, las cuales por el momento no parecen aprovechables, a pesar de las continuas investigaciones que se vienen cumpliendo desde hace años, y en especial en la última década: lignitos, lutitas bituminosas, aguas y barros marinos.

Lignitos uraníferos son abundantes en varias partes del mundo y en especial en los EUA y en España donde contienen grandes volúmenes de uranio, pero hasta la fecha su extracción económica a los precios vigentes no se ha alcanzado.

Significativos montos de uranio se encuentran contenidos, con baja ley, en lutitas bituminosas de los EUA, Suecia, Argentina, etc, pero la experiencia sueca con la planta de Randstad demuestra que su recuperación comercial se hará posible cuando los precios superen los US\$ 120/kg U o bien se obtengan otros subproductos para

compensar la economía del proceso.

Enormes cantidades de uranio incluyen las aguas y los barros de los fondos marinos y oceánicos. En las primeras, el tenor medio es de 2 ppb U y en los segundos, normalmente, es 10 veces mas alto (2 ppm U), pero en algunos bajos retringidos, como en el Mar Negro y Mar Báltico, puede llegar a 25 ppm y excepcionalmente a 50 ppm.

Importantes esfuerzos se cumplieron y se estan realizando en Alemania Occidental, Reino Unido, Italia y Japón para estudiar la posibilidad de recuperar el uranio de estas fuentes marinas, pero aún los pronósticos mas optimistas señalan que el mismo podra obtenerse a costos del orden de US\$ 260/kg U y los más realistas (ERDA), alrededor de US\$ 770/kg U.

6.3. LOS REQUERIMIENTOS DE URANIO

6.3.1. Factores de estimación

La estimación sobre los requerimientos de uranio necesarios para satisfacer la operación de las centrales nucleares existentes y de las que se instalarán hasta fines de siglo ofrece serias dificultades pues ella depende de varios factores condicionantes, algunos de los cuales no están bien definidos, como los que se expondrán a continuación.

6.3.1.1. El crecimiento futuro de la energía nuclear.

Una tendencia de opinión estima que el mismo seguirá con un ritmo similar al de estos momentos ("tendencia actual"), pero otra línea sostiene que el futuro crecimiento de la energía nuclear será mas acelerado ("tendencia acelerada") debido a la incidencia de los siguientes factores:

- a) Los precios del petróleo seguirán subiendo y por eso muchos países que no lo poseen deberán recurrir al sustituto de la energía nuclear para la producción de electricidad.
- b) Hay muchos países de Sudamérica, Africa y Asia que están aplicando planes de rápido desarrollo industrial, económico y social, los cuales demandarán la disponibilidad abundante de energía.
- c) Otras fuentes no convencionales de energía, como la solar, la geotérmica y la eólica solo podrán participar en pequeña escala, en lo que resta del siglo, a solucionar el problema del

abastecimiento energético, a la vez que la mareomotriz es un proyecto que tal vez pueda aplicarse mucho mas tarde.

6.3.1.2. Economía de uranio por el reciclado del plutonio

Una gran economía en el consumo de uranio se obtendría con el reciclado del plutonio (reprocesamiento de elementos combustibles), el que ahora se estima podrá comenzar en 1985 a un ritmo masivo.

Sin embargo, pronósticos anteriores al respecto no se fueron cumpliendo y las fechas previstas se postergaron sucesivamente.

La tecnología para el reprocesamiento está en manos y bajo control casi total de las grandes potencias nucleares (EUA, Francia, Alemania Occidental, etc) y su liberación a otros países ha sido a veces fuertemente entorpecida por razones políticas (v.g. las interferencias de los EUA a los convenios sobre el tema entre Brasil y Alemania Occidental, Pakistán y Francia, etc).

Es por ello que la fecha citada, del año 1985, para comenzar con el uso masivo del reprocesamiento resulta muy aleatoria, aunque hay un convencimiento general que el reciclado del plutonio lo cumplirán varios países, en una u otra forma, pero con cierto atraso y posiblemente después de 1990.

6.3.1.3. Economía de uranio por la entrada de los reactores regenerativos rápidos

Una tremenda economía en el consumo de uranio se producirá con la entrada masiva en el mercado nuclear de los reactores rápidos ("fast breeder reactors"), ahora pronosticada para alrededor de 1998.

Si bien en este caso las previsiones anteriores también fueron acusando sucesivas dilaciones, ahora se estima que una fecha cercana al año 2000 puede ser muy factible de cumplirse al respecto.

6.3.2. Los requerimientos estimados de uranio y su disponibilidad en término.

Los tres factores antes mencionados hacen que las estimaciones sobre las necesidades uraníferas futuras ofrezcan tremendas diferencias, como resultan de las Figs. 3 y 4, según las tendencias o las posibilidades que se hayan adoptado.

Así, para el año 2030, las mismas pueden variar desde una cifra máxima de @ 30.000.000 t U hasta otra mínima de @ 7.000.000 t U.

FIG. 3. REQUERIMIENTOS ACUMULADOS MUNDIALES DE URANIO
(1977-2000)

(10^6 t U)

Datos: IAEA

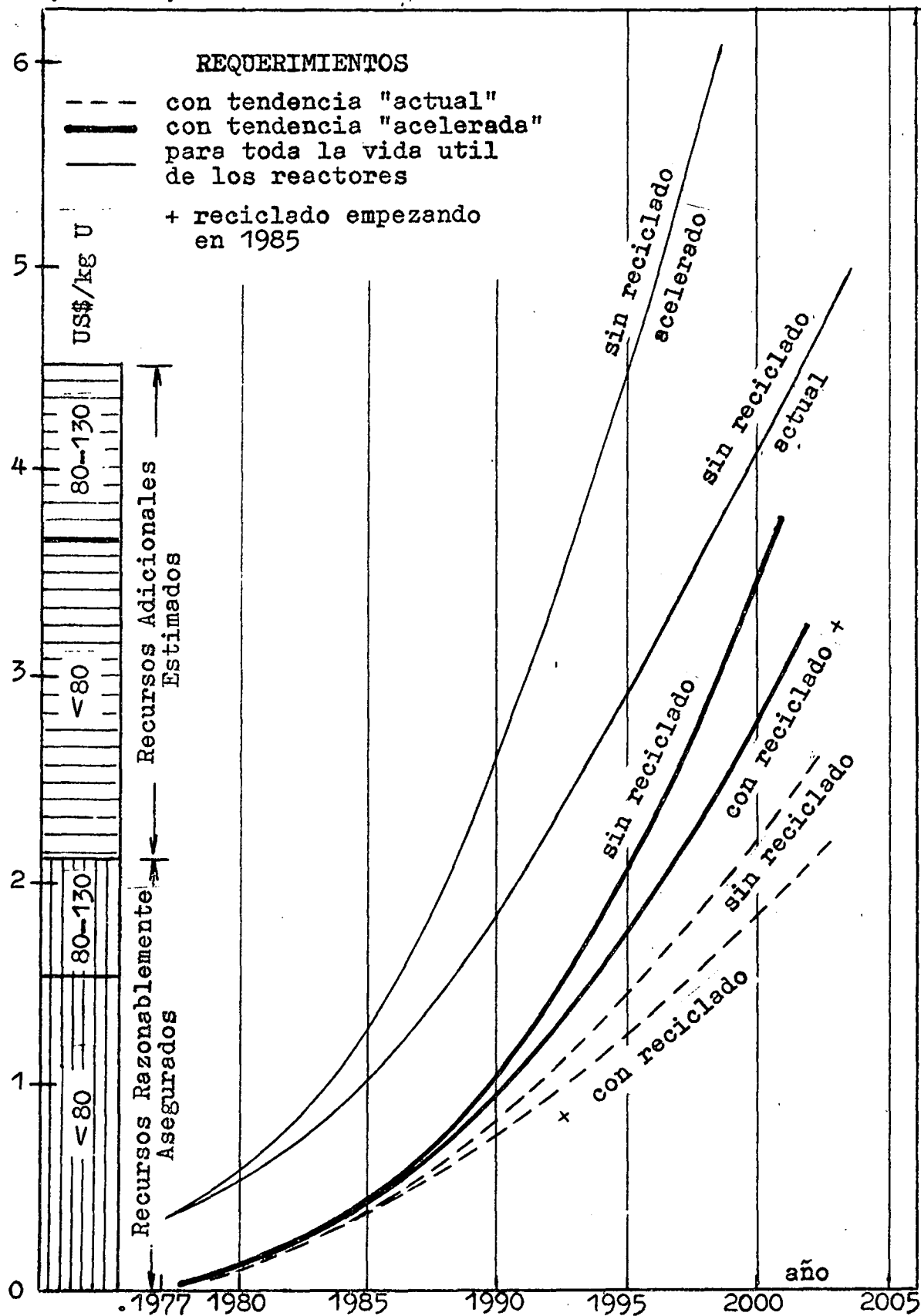
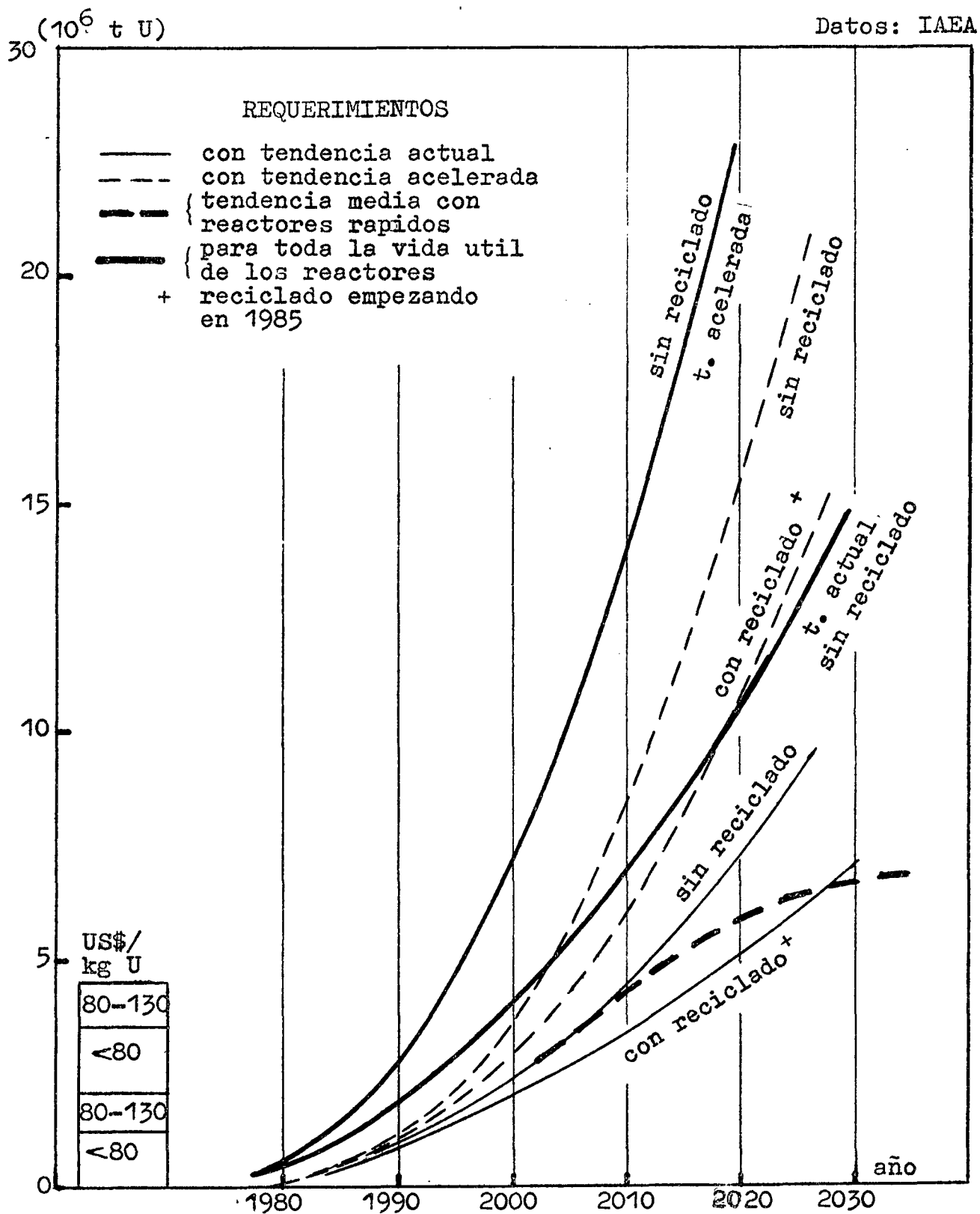


FIG. 4. REQUERIMIENTOS ACUMULADOS MUNDIALES DE URANIO
(2000-2025)

La discusión detallada del tema llevaría a muchas especulaciones, a veces subjetivas, y por ello se estima conveniente encuadrar al mismo en terminos lo mas realistas posibles, teniendo en cuenta algunas premisas que necesariamente deben cumplirse y otras que pueden contemplarse, como las siguientes:

- i) Es imprescindible asegurar el abastecimiento de uranio para la vida util (30 años) de todos los reactores convencionales que ya estan funcionando y de los que entrarán en producción hasta el año 2000 (fecha posible de aparición masiva de los reactores rápidos).
- ii) El reciclado del plutonio lo cumplirán los principales países nucleares, pero debe esperarse que otros también podrán hacerlo, en forma mas o menos general, a posteriori de 1990, de manera que las máximas estimaciones de requerimiento de uranio (sin ningún reciclado) perderán validez y las cifras estarán muy por debajo de las 30.000.000 t U.
- iii) En cambio, de acuerdo a lo expuesto en 6.3.1.1., hay grandes posibilidades de que la "tendencia actual" de crecimiento de la energía nuclear sea superada en lo que falta del siglo.
Este factor, aunado al de la demora en el reprocesamiento, harán que la cifra teórica mínima de requerimientos hasta el año 2030, estimada en @ 7.000.000 t U, sea superada con cierta amplitud y que un monto del orden de 10.000.000 t U parece ser muy realista.
- iv) Pero a los efectos del abastecimiento de combustibles para las centrales nucleares, debe considerarse la antelación con la cual tienen que estar disponibles y perfectamente certificadas las materias primas necesarias.

Ese lapso debe comprender todas las etapas previas al momento en que una partida de uranio entre en un reactor, ya preparada como elemento combustible, y ellas son: a) la fabricación de estos últimos; b) la instalación de plantas de concentración de minerales con los correspondientes estudios hidrometalúrgicos previos y c) la perfecta cubicación de los yacimientos involucrados a partir de sus hallazgos.

En el país mas avanzado en tecnología nuclear (EUA), dicho

plazo se estima en 8 años, por lo cual un valor de @ 10 años parece ser razonable para su aplicación media en todo el mundo.

6.3.3. El gran desafío de la industria del uranio en el futuro.

6.3.3.1. Balance entre la disponibilidad uranífera actual y los futuros requerimientos.

La disponibilidad actual y más segura de uranio para precios menores a US\$ 80/kg U es del orden de 1.700.000 t , pero la misma incluye algunos recursos de recuperación no rápida sino lenta y progresiva (U como subproductos), y por ello una cifra de @ 1.500.000 t U es mas adecuada para la consideración del tema.

La misma sólo alcanzará para atender los requerimientos totales por vida útil de 30 años, de los reactores que estarán en operación hasta 1986 o 1988, según la tendencia de crecimiento "acelerada" o "actual", respectivamente, y sin reprocesamiento masivo, tal como debe esperarse para esas fechas (Fig. 3).

Pero para el mencionado período, numerosas centrales estarán entrando en operación y otras lo harán en los años siguientes, según se desprende del Cuadro 5, y por ello se hace evidente que ya para esta etapa habrá que recurrir a otras categorías de recursos uraníferos.

De los de disponibilidad inmediata, solo se cuentan con aquellos "Recursos Razonablemente Asegurados" para precios entre US\$ 80-130/kg U, los que están en el orden de las 500.000 t U, cifra que sólo permitiría extender los plazos hasta 1988 o 1992, respectivamente (Fig. 3), pero el panorama de deficit futuro se seguirá repitiendo, por lo cual habrá que considerar también a todos los "Recursos Adicionales Estimados" hasta costos de US\$ 130/kg U, cuyo monto del orden de @ 2.300.000 t U no esté bien definido y debe ser fehacientemente confirmado con exploración complementaria.

De cualquier manera, y por lo dicho en 6.3.2., los requerimientos acumulados de uranio podrán ser del orden de @ 10.000.000 t U y como todos los recursos actuales solo llegarían a 4.500.000 t U, hay un déficit a compensar del orden de 5.500.000 t U y las correspondientes reservas minerales deben ser perfectamente definidas en forma progresiva entre el presente (@ 1980) y el año 2015, pues debe darse tiempo para la instalación de las grandes plantas de con-

centración que tendrán que empezar a producir a partir de 2020.

6.3.3.2. Las capacidades de producción de concentrados.

En el Cuadro 8 se indican las capacidades instaladas en 1977 para la producción de concentrados y las que se espera disponer progresivamente hasta 1990.

La experiencia demuestra, sin embargo, que estimaciones similares anteriores fueron siempre optimistas y que las cifras entonces previstas raras veces se alcanzaron en término, por incidencia de diversos factores (atrasos en la construcción de plantas, dificultades técnicas, etc).

Por ello, la disponibilidad de capacidades que se indican para el futuro deben considerarse como máximas y reducciones entre un 10 y un 20 % pueden ser muy factibles.

En la Fig. 5 se ilustran los requerimientos mundiales de uranio por año y las capacidades de producción que se espera disponer para distintas etapas.

Estas últimas, de no producirse atrasos en las instalaciones, serán suficientes para atender las demandas hasta 1985 según cualquiera de las variantes ("acelerada" o "actual"), pero sólo podrán sostener los requerimientos anuales hasta 1988 o 1990 (con y sin reciclado, respectivamente) si es que la tendencia acelerada se cumple, llegando hasta 1993 o 1998 (respectivamente) si lo hace la actual.

Por ello, a partir de 1990 deberán construirse nuevas instalaciones, para disponerse de una capacidad del orden de 200.000 t U/año para el 2000, de @ 300.000 t U/año para el 2010 y de @ 400.000 t U/año para el 2020.

6.3.3.3. El gran desafío: la implementación de la industria del uranio en el futuro.

Frente a los datos señalados, la industria del uranio se verá enfrentada a un tremendo desafío tecnológico, industrial y económico como para poder disponer en tiempo de los recursos uraníferos necesarios fehacientemente probados y de las facilidades para producir concentrados al ritmo requerido, hasta el año 2030.

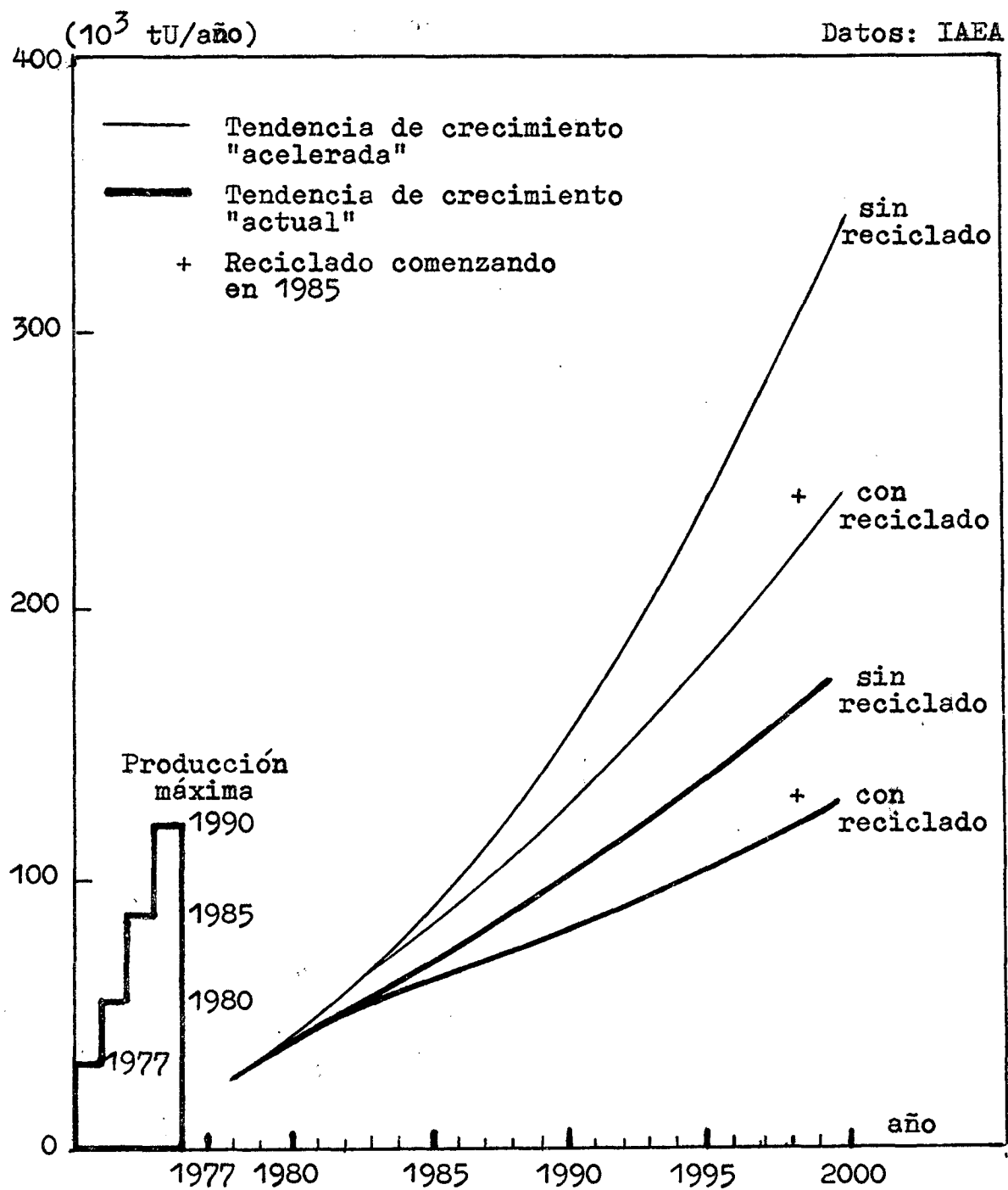
A los efectos ilustrativos, en forma breve se indicarán los ór-

CUADRO 8. CAPACIDAD DE PRODUCCION ESTIMADA
(toneladas U/año)

Datos: IAEA

P A I S E S	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1990
Argentina.....	130	280	360	360	310	310	390	600	600	600
Australia.....	400	500	500	500	1.800	4.600	8.300	10.600	11.800	20.000
Brasil.....	-	-	385	385	385	385	385	385	385	385
Canadá.....	6.100	6.450	6.950	10.200	11.150	12.500	11.250	12.500	12.500	11.250
España.....	191	191	339	678	678	678	678	678	1.270	1.270
EUA.....	14.700	19.300	20.300	22.600	26.300	31.200	32.300	34.300	36.000	47.000
Filipinas.....	-	-	38	38	76	76	76	38	-	-
Francia.....	2.200	2.850	2.850	2.850	3.350	3.600	3.600	3.600	3.700	4.000
Gabón.....	800	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Imp.Centr.Afric...	-	-	-	-	-	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
India.....	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Italia.....	-	-	-	120	120	120	120	120	120	120
Japón.....	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
México.....	-	20	90	170	550	550	550	550	550	550
Niger.....	1.600	2.400	3.850	4.100	4.300	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
Portugal.....	85	85	90	95	100	270	270	270	270	270
Rep.Fed.Alemana...	100	100	100	100	150	150	200	200	200	200
Sud Africa.....	6.700	8.800	9.700	11.700	11.700	12.900	12.800	12.600	12.500	12.000
Turquía.....	-	-	-	100	100	100	100	100	100	100
Yugoeslavia.....	-	-	-	-	120	120	120	180	180	440
TOTAL (redondeado)	33.000	42.000	47.000	53.000	61.000	77.000	82.000	88.000	92.000	110.000

FIG.5. REQUERIMIENTOS MUNDIALES DE URANIO POR AÑO
(1977-2000)



denes de magnitud que tendrán que adquirir ciertas actividades y los montos aproximados de inversiones a realizar.

A. Exploración y evaluación final de yacimientos

Hasta el año 2015 deberán cumplirse los siguientes trabajos:

- a) certificar fehacientemente el monto de @ 2.300.000 t U de los "Recursos Adicionales Estimados", para pasarlos a "Reservas Mineras".
- b) desarrollar, a partir de nuevos depósitos, @ de 5.500.000 t U adicionales.

Como se indicó en 6.1.1., la incidencia de los costos de exploración fue en 1976, en los EUA, de US\$ 15,50 por cada kg de uranio producido. Para el futuro, se adoptará un incremento en dichos costos a razón del 5 % anual (= US\$ 0,80/año), aun inferior al ritmo normal de inflación de los países industrializados.

Por ende, los costos medios de exploración para el período 1980-2015 estarán en el orden mínimo de US\$ 30 por kg de U certificado en mina (= US\$ 30.000/t U). Los costos unitarios de los trabajos complementarios para pasar las 2.300.000 t U de RAE a RRA se estiman en un 50 % de los anteriores, es decir a razón de US\$ 15/kg de uranio probado en mina (= US\$ 15.000/ t U).

i) Certificación final de los RAE estimados en 1977

2.300.000 tU x US\$ 15.000/tU = US\$ 34.500.000.000

ii) Certificación de nuevos recursos uraníferos

5.500.000 tU x US\$ 30.000/tU = US\$ 165.000.000.000

iii) Totales

- Para el período 1980-2015	= @ US\$ 200.000.000.000
- Promedio anual	= @ US\$ 5.700.000.000

B. Instalaciones mineras y fabriles

Los costos de instalaciones mineras y en especial las fabriles son muy variables, de acuerdo con el metodo de explotación a aplicar (subterráneo o en cantera), con las características de las menas a procesar y con el volumen de la producción.

La relación entre ambos costos tambien es variable y oscila normalmente entre 60/40 % y 40/60 %, por lo cual se adoptará un

valor medio de 50 y 50 % para instalaciones mineras y fabriles.

A principios de la década del 70, los costos medios de instalación de plantas oscilaban entre los US\$ 5.000 y 6.500 por tonelada/día de mena a procesar, para unidades con capacidad de producción superior a 1000 tU/año, usando minerales de calidad standard. Dichos valores subían a US\$ 6.500-8.000 para establecimientos menores o que debían procesar menas menos favorables.

Para el futuro, buena parte de la producción tendrá que atenderse con plantas de gran volumen, de manera que una cifra del orden de US\$ 6.000 t mena/día resulta aceptable, para valores de 1970. Otros US\$ 6.000 t mena/día deben adicionarse para instalaciones mineras, dando un total de US\$ 12.000 t mena/día, a valores de 1970.

El incremento de los costos de instalación también se estimarán sobre la base muy conservadora del 5 % anual, como antes se hizo.

Por ello, los futuros costos de instalaciones mineras y fabriles pueden estimarse, como mínimo, en un valor promedio de US\$ 30.000 t/día para todo el periodo 1980-2020, durante el cual habrá que incrementar la capacidad de producción en @ 350.000 t U/año.

Para simplificar las estimaciones, se aceptará que el tenor medio de las menas a utilizar entre 1980 y 2030 esté levemente por arriba de 0,1 % U, a los efectos de permitir la recuperación de 1 kg U por tonelada de mineral a procesar (= 1 t U en 1.000 t mena).

Las 350.000 t U/año de incremento de capacidad final de producción corresponden a 350.000.000 t mena/año, es decir un promedio aproximado de 1.000.000 t mena/día, por lo cual la ampliación de la capacidad de producción demandará las siguientes inversiones:

i) Totales para el período 1980-2020

1.000.000 t/d x US\$ 30.000 t/d = @ 30.000.000.000 US\$

ii) Promedio anual generalizado

US\$ 30.000.000.000 / 40 años = @ US\$ 750.000.000/año

Como resumen, resulta que la implementación completa de la industria del uranio durante el período 1980-2020 requerirá las siguientes inversiones aproximadas, al valor del dolar actual:

Totales, para el lapso 1980-2020 = @ US\$ 230.000 x 10⁶
Anuales, promedio general = @ US\$ 6.500 x 10⁶

El valor de la producción anual de uranio en el mundo podrá colocarse en los siguientes valores aproximados medios:

Para año	10 ³ tU	Valores US\$ 10 ⁶	
		Nominales ¹	Reajustados ²
1980	@ 43	@ 5.375	@ 5.375
1990	" 100	" 12.500	" 18.750
2000	" 200	" 25.000	" 50.000
2010	" 300	" 37.500	" 93.750
2020	" 400	" 50.000	" 150.000

1 : Para valor índice 1980 = US\$ 125/kg U (=US\$ 125.000/t U)

2 : Incrementos de precios @ 5 % anual.

La magnitud de estas cifras hace ver que la industria del uranio pasará, sin duda alguna, a ocupar uno de los primeros puestos entre todas las actividades extractivas mineras del mundo, ubicándose solo por debajo de la petrolífera y de la ferrífera, pero desplazando a todas las demás metalíferas.

BIBLIOGRAFIA PRINCIPAL (1)

- ANDRADE RAMOS, J.R. Y FRAENKEL, M.O., 1974. Principais ocorrências de urânio no Brasil.- Com. Nac. Energ. Nuclear, Bol. 12 Rio de Janeiro.
- ANDRADE RAMOS, J.R. y MACIEL, A.C., 1974. Prospeção de Urânio no Brasil, 1970-74.- Ibidem, Bol. 4.
- BAILEY, R.W. & CHILDERS, M.D., 1977. Applied mineral exploration with special reference to uranium.- Westview Press, Boulder, Colo. USA.
- C.E.A., 1964. L'industrie minière de l'uranium.- Com. Energ. Atom. France, Lyon.
- CLEGG, J.W. & FOLEY, D.D., 1958. Uranium ore processing.- Addison-Wesley Publ. Co. Reading, Mass. USA.
- CNEA, 1960. Scientific Sessions on Uranium Resources and Possibilities.- Com. Nac. Energ. Atómica Argentina, Buenos Aires.
- CORDERO, G., JODRA, L.G., OTERO, J.L. y JOSA, J.M., 1977. Recuperación del uranio del ácido fosfórico.- Energía Nuclear, 21 (109). Madrid, España.
- DE WOLF SMYTH, H., 1946. La energía atómica al servicio de la guerra.- Espasa Calpe, Buenos Aires.
- DREM, 1959. Les matières premières nucléaires.- Dir. Rech. et Exploit. Minier., Com. Energ. Atomiq. France, No. 201. Paris.
- EL DORADO MINING AND REFINING LIMITED, 1964. Uranium in Canada.- Ottawa.
- ERDA, 1976. National Uranium Resource Evaluation (NURE). Preliminary Report.- US Energ. Res. & Devel. Admin., Grand Junction, USA.
- GERWIN, R., 1964. L'Energie Nucléaire en Allemagne.- Econ. Verlag Gmbh., Dusseldorf und Vienne
- GOLDSCHMIDT, B., 1962. L'aventure atomique.- Fayard Edit., Paris.
- GRIFFITH, J.W., 1967. The uranium industry, its history, technology and prospects.- Miner. Resourc. Divis., Dept. of Energy, Mines, etc. Ottawa.
- + G.S.C., 1975. Uranium exploration '75.- Geol. Surv. Canada, Paper 75-26. Ottawa.
- HAASE, W., 1968. Uranverrate und Uranbedarf.- Taschenbuch fur Atomfragen.
- + IAEA, 1967. Processing of Low-Grade Uranium Ores.- IAEA, STI/PUB/146. Vienna.
- + IAEA, 1969. Nuclear Techniques and Mineral Resources.- IAEA, STI/PUB/198. Vienna.

(1) Se omiten todas las citas de los trabajos individuales incluidos en los simposios que se indican con +, los cuales comprenden numerosas contribuciones.

- + IAEA, 1970. Uranium Exploration Geology.- IAEA, STI/PUB/277. Vienna.
- + IAEA, 1971. The Recovery of Uranium.- IAEA, STI/PUB/262. Vienna.
- + IAEA, 1971. Nuclear Techniques for Mineral Exploration and Exploitation.- IAEA, STI/PUB/279. Vienna.
- + IAEA, 1973. Uranium exploration methods.- IAEA, STI/PUB/334. Vienna.
- + IAEA, 1974. Recommended Instrumentation for Uranium and Thorium.- IAEA, STI/DOC/10/158. Vienna.
- + IAEA, 1976. Nuclear Techniques in Geochemistry and Geophysics.- IAEA, STI/PUB/425. Vienna.
- + IAEA, 1976. Exploration for Uranium Ore Deposits.- IAEA, STI/PUB/434. Vienna.
- + IAEA, 1976. Uranium Ore Processing.- IAEA, STI/PUB/453. Vienna.
- + IAEA, 1977. Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas.- IAEA, STI/PUB/450. Vienna.
- JOSKOW, P.L., 1977. Commercial impossibility, the uranium market and the Westinghouse case.- Journ. Legal Studies., USA.
- MERRITT, R.C., 1971. The extractive metallurgy of uranium.- Colorado School of Mines -USAEC
- NININGER, R.D., 1954. Minerals for Atomic Energy.- Van Nostrans Co., Princeton, New Jersey.
- OECD, 1967, 1970, 1973. 1976, 1977. Uranium. Resources, Production and Demand.- OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- OECD, 1977. Nuclear Fuel Cycle Requirements and Supply Considerations through the long term.- Paris.
- PANSZE, A.J., 1977. The Uranium Deposits of the Sierra Blanca, Chihuahua, México.- Private report.
- PINKEY, E.T., LAURIE, W. and van ZYL, P.N.C., 1977. Chemical processing of uranium ores.- Anglo Amer. Corp. of South Africa Ltd., Johannesburg.
- PREMOLI, C., 1977. Metallogeny of radioactive raw materials of Madagascar.- IAEA Advisory Group on Uranium Deposits in Africa.
- RYAN, G.R., 1977. Uranium in Australia.- Geology, Mining and Extractive Processing of Uranium Symposium. Inst. of Min. & Metallurgy, London.
- STIPANICIC, P.N., 1975. Mission to South Africa. Some aspects on uranium exploration and production.- Int. Tech. Report No. 8. Explor. Div., Atom. Ener. Org. of Iran, Tehran.
- STIPANICIC, P.N., 1975. Report on the Namukulimba (Siavonga) uranium district, Republic of Zambia.- Ibidem No. 11.
- STIPANICIC, P.N., 1977. A joint venture programme to develop the uranium district of Baghal Chur (Dera Ghazi Khan) and to explore the Siwalik Formation.- Ibidem, No. 20.

- + U.N., 1956. Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy.- Vol. 1, 6 y 8.
- + U.N., 1958. Ibidem, Vol. 1, 2 y 3.
- + U.N., 1964. Ibidem,
USAEC-ERDA, 1966, 1967 (annual reports), etc. Major activities in the Atomic Energy Programs.- Washington.
- + USGS-USAEC, 1956. Contributions to the Geology of Uranium and Thorium by the United States Geological Survey and Atomic Energy Commission for the United Nations International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Switzerland, 1955.- Geol. Survey Prof. Paper 300, Washington.