

## **MEDICION DE ENRIQUECIMIENTO CON DETECTORES DE CdTe y CdZnTe**

***Resultados comparativos utilizando los códigos WinSPEC y NaIGEM***

### ***OBJETIVO :***

*El objetivo de este trabajo es estudiar la aplicación de detectores de CdZnTe de gran volumen sensible en la medición de la concentración de U235 por NDA, utilizando la técnica del medidor de enriquecimiento y el código de cálculo NaIGEM.*

### ***1. INTRODUCCION***

Los detectores de centelleo de NaI y semiconductores de Ge han sido y son actualmente los principales detectores utilizados en espectrometría gamma, en tanto que los detectores de CdTe (CT) y CdZnTe (CZT), con una performance intermedia entre ambos (tablas A y B), están superando la etapa de desarrollo y su uso en espectrometría gamma está en plena expansión. Estos detectores han sido usados en salvaguardias nucleares internacionales por más de 10 años como complemento de los clásicos NaI y Ge, dado que por su tamaño reducido permiten el acceso y verificación por NDA "in situ" de ítems altamente irradiados (tabla C).

La generación actual de equipos comerciales que utilizan detectores de centelleo presentan algunas deficiencias muy importantes (resolución moderada, escala no lineal de energía, sensibilidad a la temperatura y a la tasa de conteo, etc.) que hacen muy difícil y aun imposible que puedan satisfacer todos los requerimientos de los usuarios. Los detectores de CdZnTe en cambio, no presentan estos problemas, la curva de calibración de energía es lineal, la dependencia de la temperatura muy pequeña (>0,01% drift/°C) y la resolución de energía muy superior en un amplio rango. Estos detectores pueden trabajar sin estabilización mostrando una performance constante durante largos períodos de tiempo.

El uso de detectores semiconductores de CdZnTe de gran volumen en sistemas portátiles de medición, resulta muy ventajoso y, a pesar de que su sensibilidad es muy inferior a la del NaI y aun a la del GeHP, es suficiente para muchas aplicaciones.

La resolución, aún para los detectores de mayor tamaño (\*), es cuatro veces superior a la del NaI, por lo tanto, aun con una estadística de conteo inferior, se pueden obtener buenos resultados con tiempos de medición similares, utilizando códigos de cálculo de ajuste por cuadrados mínimos en el análisis de espectros.

Los métodos utilizados para el análisis de espectros con detectores de NaI y Ge son muy diferentes. Los métodos de análisis de espectros de NaI van desde la simple técnica de ventanas de integración (Calc., Winspec, etc) a una más sofisticada técnica de ajuste por cuadrados mínimos de una réplica de los componentes que contribuyen en la ROI del espectro analizado (130-290 KeV) (NaIGEM). Por otra parte los métodos de análisis para detectores de Ge han evolucionado mucho más y generalmente incluyen la búsqueda y caracterización de picos (Maestro, MGAU).

El código NaIGEM fue desarrollado para determinar la concentración de U235 a partir de espectros de muestras de U obtenidos con detectores de NaI. El método está basado en la conocida técnica del "medidor de enriquecimiento" con muestras de espesor infinito,

pero en lugar de utilizar ventanas de integración, ajusta perfiles de respuesta computados a los datos observados en la región de 186 KeV.

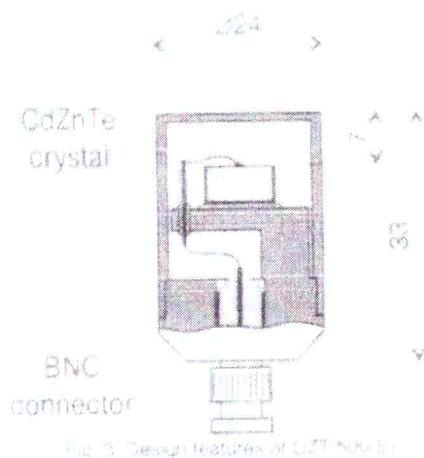
En este trabajo se muestran los resultados del análisis de espectros de muestras de patrones de U3O8 CBNM de diferentes enriquecimientos, obtenidos con dos detectores de diferente resolución y eficiencia, utilizando los códigos de cálculo WinSPEC y NaIGEM. Se utilizó un detector de CdTe de 450 mm<sup>3</sup> (eV-260-02c) y otro de CdZnTe de 500 mm<sup>3</sup> (CZT/500s).

## **2. CARACTERÍSTICAS DE LOS DETECTORES UTILIZADOS**

### **2.1 Características de diseño del detector eV-260-02c**

(ver informe ABACC-BA9)

### **2.2 Características de diseño del detector CZT/500s**



Detector de radiación gamma de cadmio/zinc teluro (CdZnTe) quasi-hemisférico, constituido por un material semiconductor de elevado ancho de banda (1,52 eV, 25°C), elevada densidad (6,06 g/cm<sup>3</sup>) y número atómico (49), que hace que sea el detector más sensitivo de pequeño tamaño operado a temperatura ambiente.

Características técnicas:

Volumen sensitivo .....	500 mm <sup>3</sup>
Resolución (FWHM) (662 KeV, 22°C) ....	17,25 KeV
Resolución (FWHM) (122 KeV, 22 °C) ....	3,5 KeV
Relación pico/Compton (662 KeV, 22 °C) ....	4,95
Relación pico/valle .....	43,63
Voltage Bias .....	+600 V
Diámetro .....	23 mm
Longitud (sin conector) .....	33 mm
Distancia entre el tope y la superficie sensitiva del detector.....	7 mm

(\*) Existen detectores comerciales de CdZnTe de 1687 mm<sup>3</sup> (CZT 1500).

### **3. RESULTADOS EXPERIMENTALES**

#### **3.1 Comparación de espectros de patrones de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> de diferentes enriquecimientos obtenidos con detector de CdTe y ZnCdTe.**

En la **figura 1** se muestran dos espectros comparativos del patrón de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-CBNM-446, obtenidos con detectores de CdTe y CdZnTe. En la misma figura se muestra una tabla comparativa de la relación fotopico/compton, fotopico/valle, FWHM y eficiencia de detección de ambos detectores.

En las **figuras 2 y 3** se muestran los espectros de patrones de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> CBNM de diferentes enriquecimientos, obtenidos con detector de CdTe y detector de CdZnTe respectivamente y una ganancia de 0.92 KeV/canal.

En las **figuras 4 y 5** se muestran los espectros de patrones de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> CBNM de diferentes enriquecimientos vs nº canal y vs energía respectivamente, obtenidos con el detector de CdZnTe y una ganancia de 0.62 KeV/canal

En la **figura 6** se muestran las curvas de calibración de ambos detectores, para una ganancia de 0,92 KeV/canal (Epic, Fotopico 186 KeV = canal 200).

#### **3.2 Análisis estadístico de datos obtenidos con detector de ZnCdTe y un patrón de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> CBNM-0,72% U235**

##### ***3.2.1 Utilizando la técnica de las 3 ventanas de integración (WinSPEC)***

En la **figura 7** se muestra la curva de calibración (área neta fotopico vs enriquecimiento) del detector de CdZnTe, para una ganancia de 0,62 KeV/canal (Epic Fotopico 186 KeV = canal 300).

En las **figuras 8, 9, 10, 11, 12** se muestran los gráficos estadísticos para diferentes tiempos de medición y fondo continuo.

##### ***3.2.2 Utilizando la técnica de ajuste por cuadrados mínimos (NaIGEM)***

En las **figuras 13, 14, 15, 16, 17** se muestran los gráficos estadísticos para diferentes tiempos de medición y fondo continuo.

En la **tabla 1** se muestran los datos de mediciones repetitivas del patrón de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> CBNM natural, de 100 s c/u y se comparan los valores comprendidos entre  $1\sigma$  y  $3\sigma$  con los valores estadísticos teóricos correspondientes a una distribución gaussiana

En la **tabla 2** se muestran los valores medios y la desviación standard de cada una de las series de 100 mediciones, utilizando los códigos de cálculo de enriquecimiento, WinSPEC y NaIGEM.

#### **3.3 Mediciones de enriquecimiento con el detector CZT/500s a través de diferentes espesores de Fe y diferentes distancias muestra colimador.**

En las **tablas 3 y 3'** se muestran los resultados de las mediciones de un patrón de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> CBNM 4.4623 % U235, a través de diferentes espesores de Fe (0-1,25-5-9-12 mm) y diferentes distancias colimador/muestra (0-1,25-5-9-12 mm) respectivamente. En el cálculo de la atenuación se utilizó el valor medio del coeficiente de atenuación hallado

experimentalmente con el mismo sistema de medición G1 ( $1,56 \text{ cm}^{-1}$ ) y el valor correspondiente de densidad aparente del Fe ( $8,97 \text{ g/cm}^3$ ).

### ***3.3.1 Para diferentes espesores de Fe***

En la **figura 18** se grafica el **bias** de los valores de enriquecimiento obtenidos con los códigos WinSPEC y NaIGEM, en función del espesor de Fe

### ***3.3.2 Variando la distancia muestra/colimador. Sin absorbedor de Fe***

En la **figura 19** se grafica el **bias** de los valores de enriquecimiento obtenidos con los códigos WinSPEC y NaIGEM en función de la distancia muestra/colimador, sin absorbedor.

### **3.4 Mediciones repetitivas de enriquecimiento con el detector CZT/500s a través de diferentes espesores de Fe.**

En la **tabla 4** se muestran los resultados de mediciones repetitivas del patrón de U3O8 CBNM 0.7119 % U235 a través de diferentes espesores de Fe (0-1,25-5-9-12 mm) y

En la **figura 20** se grafican los **valores de enriquecimiento** obtenidos con los códigos WinSPEC y NaIGEM en función del espesor de Fe. En el cálculo de la atenuación se utilizó el valor medio del coeficiente de atenuación hallado experimentalmente con el mismo sistema de medición ( $1,56 \text{ cm}^{-1}$ ) y el valor de densidad aparente del Fe ( $8,97 \text{ g/cm}^3$ ).

En la **figura 21** se grafica el **bias** de los valores de enriquecimiento obtenidos con los códigos WinSPEC y NaIGEM en función del espesor de Fe

En la **tabla 5** se muestra una serie de mediciones repetitivas de 300 y 600s cada una, del patrón de U3O8 CBNM-072 utilizando como absorbedor una chapa de tambor de UO<sub>2</sub> de 0,95 mm de espesor.

## **4. DISCUSION DE LOS RESULTADOS**

El detector de TeCdZn (CZT/500s) muestra una performance muy superior a la del detector de CdTe (TeCd/eV-260-02c) (figura1), mejor relación fotopico/compton, fotopico/valle y eficiencia de detección, aunque su resolución es algo inferior. La pendiente de la curva de calibración para el detector de ZnCdTe es 3 veces mayor que para el detector de CdTe, (figura 6), esto significa que la eficiencia de detección es 3 veces mayor, como se puede ver en la tabla siguiente :

DETECTOR	CT		CZT		T. MEDIC	U-235
	CPS	$\sigma$	CPS	$\sigma$		
Sin colimador	35.1	0.4	137	0.5	1800	4.4623
Geometria G1	34.5	0.4	116	0.5	1800	4.4623

Para determinar el valor de enriquecimiento con el código WinSPEC se utilizó la ecuación de calibración dada en la figura 7. Los 5 patrones de calibración CBNM se midieron durante 1800s y el área neta del fotopico de 186 KeV, en la ROI 247-316, se graficó en función del enriquecimiento declarado. La ecuación de calibración se muestra en la tabla 2.

Para la determinación del valor de enriquecimiento con el código NaIGEM , se utilizó el espectro del patrón de U3O8 CBNM-071-053 medido durante 7200s (07119-7200.spe). Los valores de calibración de energía y el factor de calibración se muestran en la tabla 2

En la tablas siguientes se resumen los resultados de mediciones repetitivas del mismo patrón de U3O8 natural con tiempos de medición de 100-300 y 600s, con fondo natural (1) y fondo aumentado con una fuente de Co60 (2), utilizando ambos códigos de cálculo de enriquecimiento.

#### Código WinSPEC

Espectro	Grafico	Nro medic	Fondo	Tiempo medic	% U235 ± σ	σ	2 σ	Bias max	Bias
		n		seg		%	%	%	%
000000-000099	CZT-100s.org [plot1]	100	1	100	0.717±0.048	6.7	13	12	0.72
000200-000299	CZT-300s.org [plot2]	100	1	300	0.715±0.027	3.8	7.6	7	0.44
000101-000199	CZT-600s.org [plot2]	100	1	600	0.710±0.021	3.0	6	5	-0.27
000300-000399	CZT-100s-Co60.org [plot1]	100	2	100	0.728±0.08	11.0	22	20	2.26
000400-000499	CZT-600s-Co60.org [plot2]	100	2	600	0.720±0.031	4.3	8.4	10	1.14

#### Código NaIGEM

Espectro	Grafico	Nro medic	Fondo	Tiempo medic	% U235 ± σ	σ	2 σ	Bias max	Bias
		n		seg		%	%	%	%
000000-000099	CZT-100s.org [plot2]	100	1	100	0.720±0.03	4.2	9	10	1.14
	NaI(0.76-3.14)	50	1	100	0.714±0.03	3.5	7.0	7.0	-0.14
000200-000299	CZT-300s.org [plot1]	100	1	300	0.710±0.016	2.3	4.6	5	-0.27
	NaI(0.76-3.14)	50	1	300	0.705±0.016	2.3	4.6	5	-0.27
000300-000399	CZT-100s-Co60.org [plot2]	100	2	100	0.681±0.035	5.1	10.2	-10	4.34
	NaI(0.76-3.14)	50	2	100	0.671±0.035	5.1	10.2	-10	4.34
000400-000499	CZT-600s-Co60.org [plot1]	100	2	300	0.676±0.016	2.2	4.4	-7	5.04
	NaI(0.76-3.14)	50	2	300	0.669±0.016	2.2	4.4	-7	5.04

La desviación standard relativa es mas baja cuando se utiliza el código NaIGEM en tanto que en este caso el bias es mayor, especialmente con fondo elevado. Con tiempos de medición de 300s se cumple con los valores de los componentes de incertezas del ITV 2000 para PMCN ( $u_r = 5\%$  y  $u_s = 5\%$ ).

En la misma tabla se muestran los resultados de las mediciones con un detector de NaI de  $2 \times 1"$  aplicando el código NaIGEM para el cálculo de enriquecimiento.

En las tablas siguientes se resumen los resultados de mediciones repetitivas del patrón de U3O8 CBNM-0712, con tiempos de medición de 300 y 600s, utilizando un absorbedor de Fe de 0.95 mm (chapa de tambor de UO2).

#### Código WinSPEC

File name	Patron	Nro medic	Aten.	Fondo	FWHM	t.medic	E	σE	2σE	Bias max.	Bias
	% U-235			(Σ-A)/A	Canales	s	% U-235	%	%	%	%
300000001/9	0,712	7	1	1,6	11,0	300	0,699 ± 0,027	3,9	7,8	5,5	-1,8
300000010/14	0,712	5	1	3,4	11,2	300	0,735 ± 0,040	5,4	10,8	10,8	3,2
600000000/4	0,712	5	1	1,6	11,2	600	0,707 ± 0,021	3,0	6,0	4,9	-0,7
9-100000/4	0,712	5	1	3,8	11,5	300	0,703 ± 0,071	10,1	20,2	-18,2	-1,3
9-1000005/9	0,712	5	1,0944	4,1	10,9	300	0,692 ± 0,036	5,5	11,0	-9,4	-2,9
9-1000010/14	0,712	5	1,0944	3,9	11,4	600	0,717 ± 0,026	3,6	7,2	-5,2	0,7
9-1000015-19	0,712	5	1,0944	1,6	11,4	300	0,691 ± 0,032	4,7	9,4	-9,0	-3,0

#### Código NaIGEM

File name	Patron	Nro medic	Aten.	Fondo	FWHM	t.medic	E	σE	2σE	Bias max.	Bias
	% U-235			(Σ-A)/A	Canales	s	% U-235	%	%	%	%
300000001/9	0,712	7	1	1,62	11,0	300	0,705 ± 0,014	2,0	4	-5,2	-0,9
300000010/14	0,712	5	1	3,35	11,2	300	0,694 ± 0,018	2,5	5	-5,8	-2,6
600000000/4	0,712	5	1	1,59	11,2	600	0,715 ± 0,005	0,7	1,4	1,5	0,4
9-100000/4	0,712	5	1	3,78	11,5	300	0,655 ± 0,026	3,9	7,8	-13,9	-8,0
9-1000005/9	0,712	5	1,0944	4,09	10,9	300	0,657 ± 0,023	3,5	7,0	-12,9	7,8
9-1000010/14	0,712	5	1,0944	3,93	11,4	600	0,662 ± 0,012	1,8	3,6	-9,7	-7,0
9-1000015-19	0,712	5	1,0944	1,65	11,4	300	0,712 ± 0,012	1,6	3,2	-2,5	0,0

Las cuatro series de mediciones con fondo elevado ( $F = 3,4-4,1$ ), proveniente de una fuente de Co60, muestran un bias de 7-8%, superando el valor del componente de incertezza del ITV 2000 para PMCN ( $u_c = 5\%$ ). Este mismo efecto fue observado cuando se aplicó el código NaIGEM con detector de NaI (tabla D). Aplicando el código WinSPEC el bias es marcadamente inferior.

En cuanto a la desviación standard, los valores hallados se mantienen dentro del valor del componente de incertezza del ITV 2000 para PMCN ( $u_c = 5\%$ ). Aplicando el código NaIGEM se reduce la desviación standard de la medición de enriquecimiento, respecto al código WinSPEC, aproximadamente 1,5 veces, con fondo natural y dos veces con fondo proveniente de una fuente de Co60 de 1 mCi. (ver tabla 2)

Los resultados de mediciones a través de diferentes espesores de Fe, mostrados en las tablas 3 y 4 y graficados en las figuras 18, 20 y 21, muestran un aumento del bias (-) con el espesor de Fe.

La disminución del valor hallado de enriquecimiento con el aumento de espesor de Fe indica que no se cumple en todos los casos con la condición de espesor infinito con los patrones de referencia CBNM, tal como se puede observar en la figura 22.

Para mostrar este efecto se midieron los mismos patrones de U3O8 a diferentes distancias (d) del área de entrada del colimador (0-1,25-5-9 y 12 mm), sin absorbedor. Los resultados se muestran en la tabla 3 y en forma gráfica en la figura 19. Se puede apreciar que cuando la distancia d es mayor de 2 mm ya no se cumple con la condición de espesor infinito.

## 5. CONCLUSIONES

Con la geometría del sistema utilizado en este trabajo, mostrada en la figura 22, se cumple la condición de espesor infinito en todas direcciones, tal como es requerida en un medidor de enriquecimiento, cuando el diámetro del recipiente que contiene la muestra es  $\geq 80$  mm (tal el caso de los patrones de referencia CBNM). Dicha condición se cumple también cuando la muestra está separada de la superficie de entrada del colimador  $< 2$  mm. Esto significa que el sistema puede ser utilizado en la medición de tambores de UO<sub>2</sub>, cuando ha sido calibrado con un patrón de referencia CBNM para hallar el factor de calibración.

Cuando la muestra está separada de la superficie de entrada del colimador entre 2 y 10 mm, el diámetro del recipiente que contiene la muestra no debe ser inferior a 170 mm para que cumpla con la condición de espesor infinito (figura 23). Esto significa que el sistema puede ser aplicado en las mediciones de cilindros de UF<sub>6</sub> 5A a 48Y cuyo diámetro y espesor de pared se muestran en la tabla E.

Los resultados de mediciones repetitivas de un patrón de U natural con el sistema CZT/500s-MMCA166 y tiempos de medición de 100-300 y 600s, utilizando el código NaIGEM en el cálculo de enriquecimiento, muestran una desviación standard y un bias similar al obtenido con el sistema NaI 2x1"-MMCA166 utilizado rutinariamente en las inspecciones de ABACC. Tanto el error estadístico como el error sistemático aumentan sin embargo cuando se mide en presencia de un fondo gamma elevado proveniente de una fuente de Co-60.

Será necesario corroborar la excelente performance del detector CZT/500s en presencia de un fondo gamma elevado proveniente del Pa-234m, tal el caso de los depósitos de tambores de UO<sub>2</sub>.

### **6. AGRADECIMIENTOS**

Nuestro agradecimiento a la Subgerencia de Salvaguardias Nucleares de la Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina por haber facilitado el detector de CdZnTe utilizado en el presente trabajo.

**TABLA A****Comparación de las propiedades de los diferentes tipos de detectores mas usados en salvaguardias**

Propiedades	Ancho de banda (eV) 25°C	Energia por par e/h (eV)	Movilidad de e ( $\mu$ e/te)	Movilidad de h ( $\mu$ h $\cdot$ h)	Colección de cargas (ns)	Número atómico	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen maximo (cm <sup>3</sup> )	Resolución (FWHM) (keV)
Influencia	Fuga de corriente Resolución	Resolución	Resolución	Resolución Cola baja energía	alta velocidad operación	Fotop/compt	eficiencia	Eficiencia	Separación picos
Ge	0.67	2.96 (90°K)	Alta	Alta	100	32	5.35	100	0.4-2
CdTe	1.5	4.43	Media	Baja	100	50	6.2	0.1	0.2-20
CdZnTe	1.57	4.64	Media	Baja	100	49.1	5.78	3.4	0.2-20
Nal	-	-	baja	-	230	-	3.67	>100	15-50

Lo que hace especial a los detectores de CdZnTe es su ancho de banda y la energía suficientemente pequeña necesaria para crear un par electrón/agujero (e/h). La banda ancha permite su uso a temperatura ambiente y la energía por par e/h ofrece una mejor resolución comparado con otros detectores gamma que operan a temperatura ambiente, como el Nal. El elevado n° atómico lleva a una alta eficiencia intrínseca del fotóptico y una relación fotóptico/compton favorable, aun cuando el volumen del detector sea pequeño.

Los problemas asociados con este detector están relacionados con la diferente movilidad y tiempo de vida de los electrones y agujeros. Estos últimos al ser atrapados más rápidamente no contribuyen a la formación del pulso y empeoran la resolución al aumentar la cola de baja energía. La geometría hemisférica del CZT/500 compensa esta menor eficiencia de colección de agujeros, modificando el campo eléctrico interno y dando como resultado una mucho mejor relación fotóptico/compton comparada con un detector planar como el eV-260-02c.

**TABLA B****Datos comparativos del CdTe y CdZnTe**

Técnica de crecimiento	THM	HP Bridgman
Dopante	cloro	-
Resistividad	$3 \cdot 10^8 \Omega\text{cm}$	$3 \cdot 10^{10} \Omega\text{cm}$
Movilidad de electrones ( $\mu$ e)	$1150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Movilidad de agujeros ( $\mu$ h)	$110 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Vida media electron ( $\tau_e$ )	$2.0 \mu\text{s}$	$1.0 \mu\text{s}$
Vida media agujero ( $\tau_h$ )	$2.0 \mu\text{s}$	$1.0 \mu\text{s}$
$\mu_e \tau_e$	$2.3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$	$1.0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$
$\mu_h \tau_h$	$2.2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$	$5.0 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$
Disponibilidad (*)	Critica	Buena

(\*) El uso de CdZnTe como material para detectores de radiación aumento del 3% en 1993 al 58% en 1999 en tanto que el CdTe se redujo de 42% al 1% en el mismo periodo.

**TABLA C****TIPOS DE DETECTORES Y METODOS DE VERIFICACION  
USADOS RUTINARIAMENTE EN SALVAGUARDIAS**

SDP310Z20s	Verificación combustible gastado con corto tiempo de enfriamiento en el núcleo accesible de reactores de investigación
SDP310Z60s	Verificación in situ de combustible agotado WWER-440
CZT/500s	Verificación in situ de combustible agotado PWR y BWR
SDP310Z60	Verificación de bundles Candu con largo tiempo de enfriamiento almacenados bajo agua.
SDP310Z20s	Verificación de bundles Candu con corto tiempo de enfriamiento almacenados bajo agua
SDP310Z20/60	Verificación de bundles Candu agotados en almacenamiento en seco
CZT/500-CZT/500s	Verificación de atributo de muestras de U o Pu no irradiadas in situ
SDP310Z60	Verificación de combustible WWER440/1000 no irradiado.
SDP310Z60	Verificación no atendida de ítems irradiados, en celdas caliente
CZT/500s	Verificación de combustibles LWR-MOX no irradiados, almacenados bajo agua
SDP310Z20s	Test de atributo de combustibles agotados aislados e ítems no combustibles.

**TABLA D****Código NaIGEM**

Espectro	Grafico	Nro medic.	Fondo	Tiempo medic	% U235 + σ	σ	2σ	Bias max	Bias
		n		seg		%	%	%	%
000000-0000094	CZT 100s org [plot2]	100	1	300	0.720±0.013	1.2	3.0	-10	-0.1
	Nal02 / 26-3-N	50							
000200-000299	CZT 300s org [plot1]	100	1	300	0.710±0.016	2.3	4.6	5	-0.27
	Nal02 / 26-3-N	50	1	300	0.715±0.009	1.2	2.4	3	+0.4
000300-000387	CZT 100s Co60 org [plot2]	100	2	300	0.687±0.010	1.2	2.4	-10	-0.37
	Nal02 / 65	50	2	300	0.681±0.012	1.2	2.4	-14	-0.3
000400-000499	CZT 600sCo60 org [plot1]	100	2	300	0.676±0.016	2.2	4.4	-7	-5.04
	Nal02 / 65-3-N	50	2	300	0.666±0.012	1.8	3.6	-9	-6.4

**TABLA E**

CILINDRO UF6	DIAMETRO CILINDRO	ESPESOR DE PARED
	cm	mm
5A	12,7	6,4
8A	20,32	4,8
12B	30,48	6,35
30B	76,2	12,6
48Y	122	15,9

**FIGURA 1**

MMCA-166/e280-02c/CZT/500s

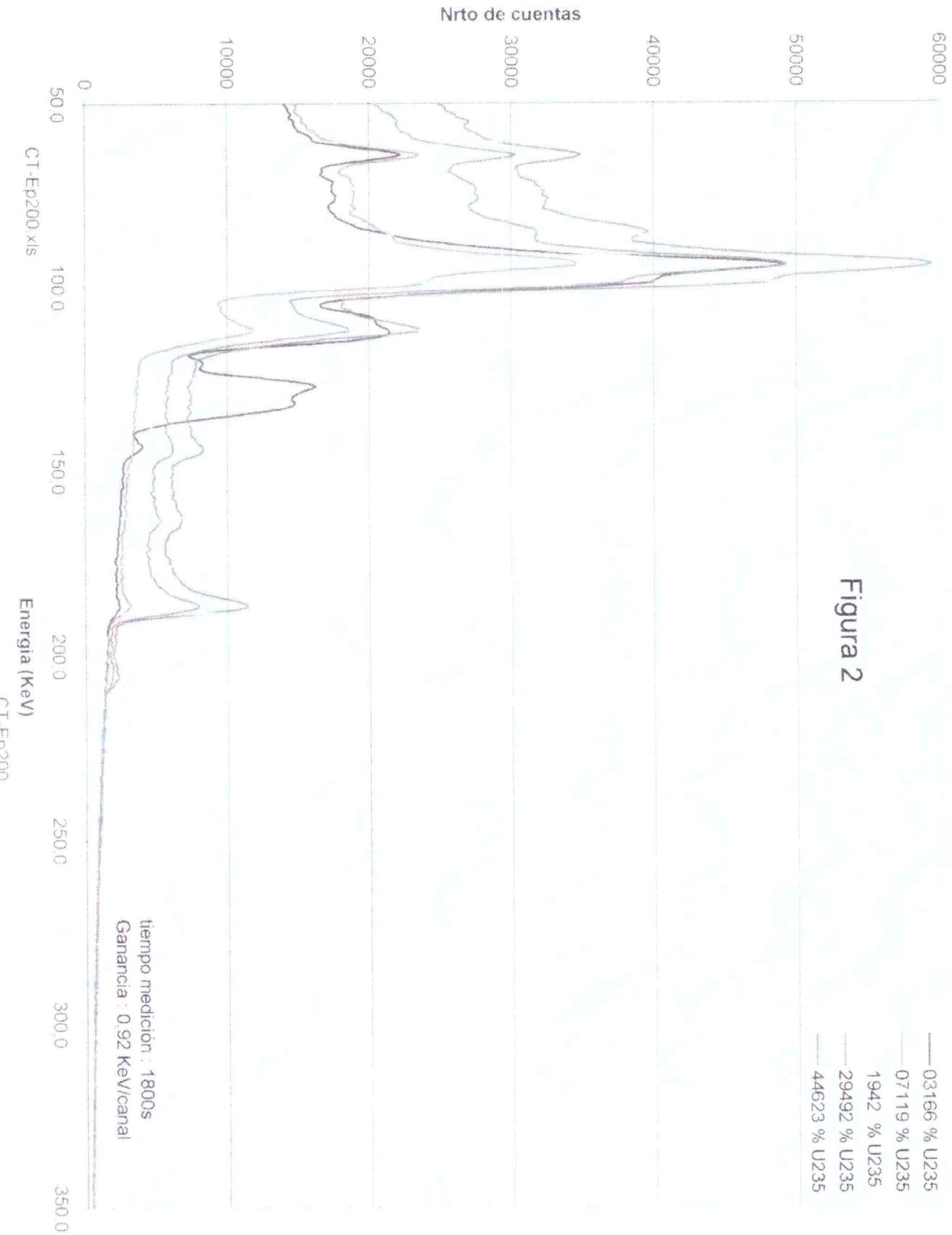


	e280-02c	CZT/500s
Fotóptico/Compton	2.0%	5,38
Fotóptico/valle	5.53	11.32
FWHM (canales)	6.47	7.86
FWHM (186KeV)%	3.2	3.9
Ef. detect(cps)%[12.3]	7.5	26

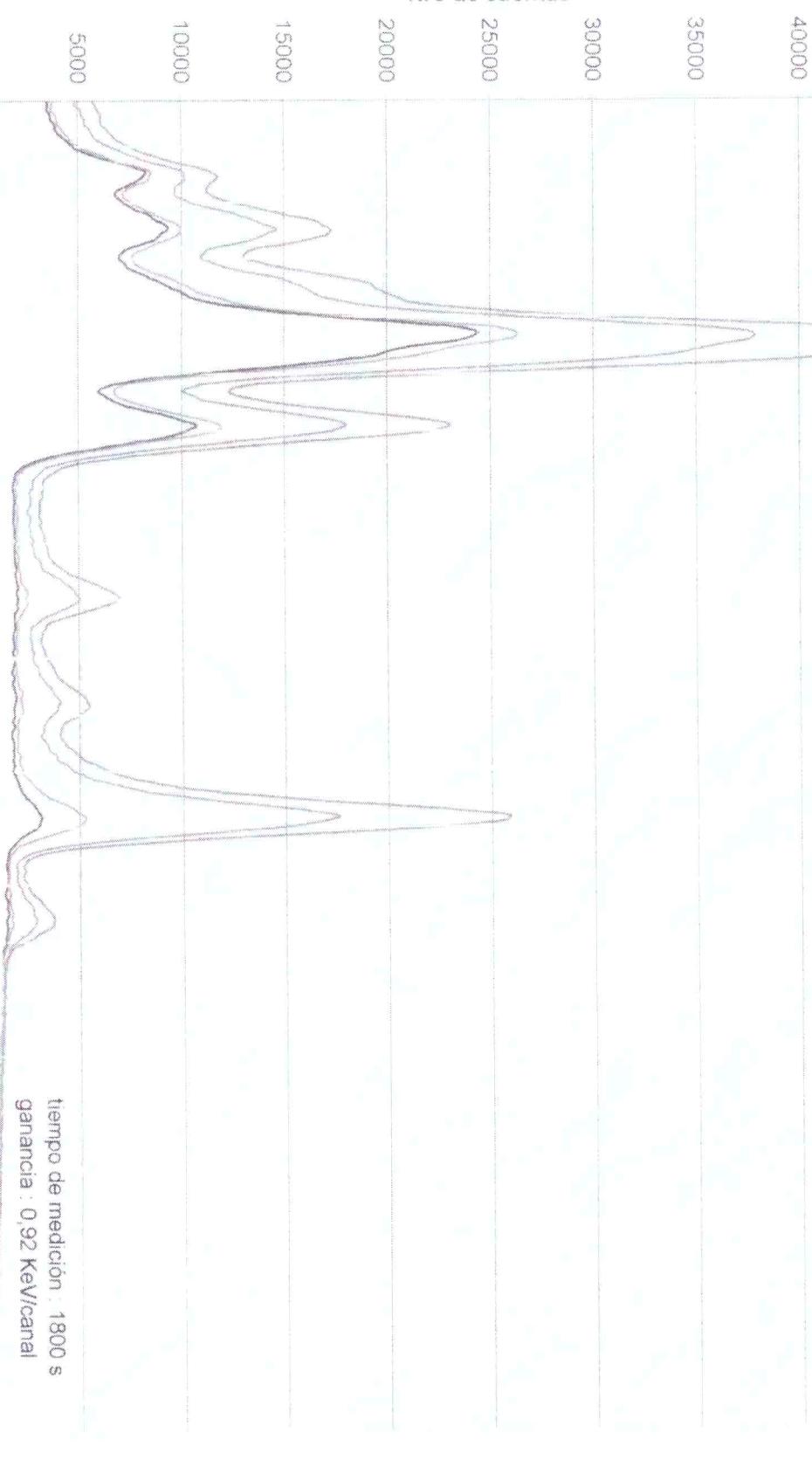
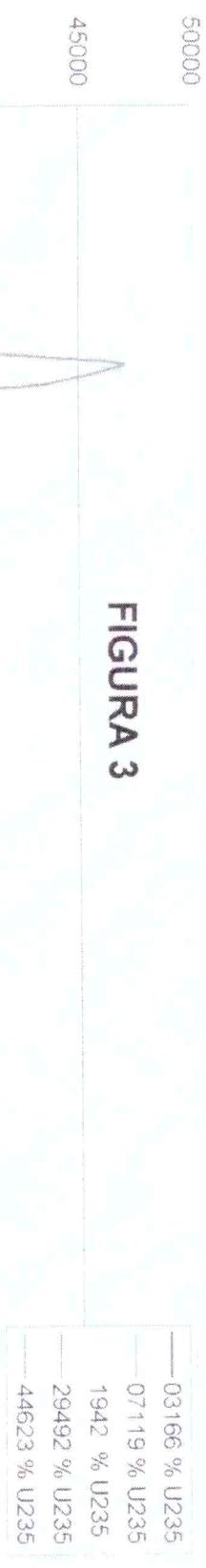
Muestra : U3O8 CBNM-446  
Tiempo de medición :  
1800s

Detector CdTe eV-280-02c ; 2mm espesor , 450 mm<sup>3</sup>

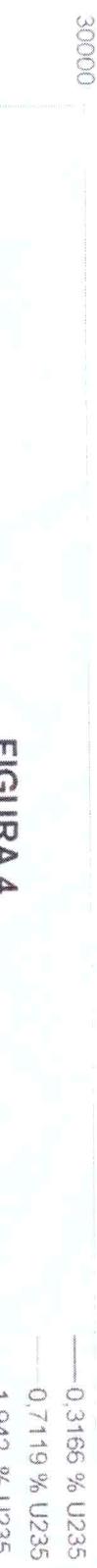
Figura 2



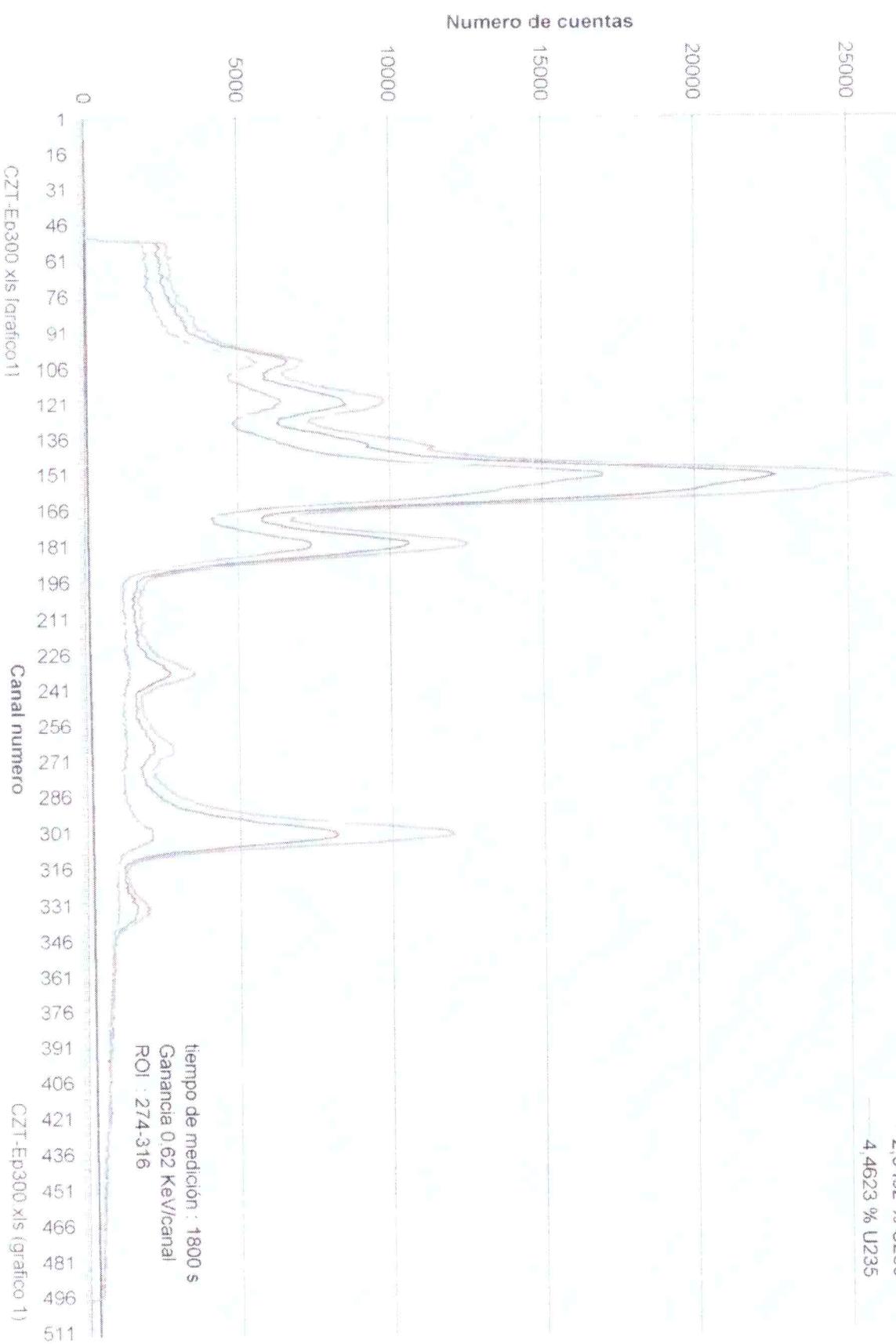
**FIGURA 3**



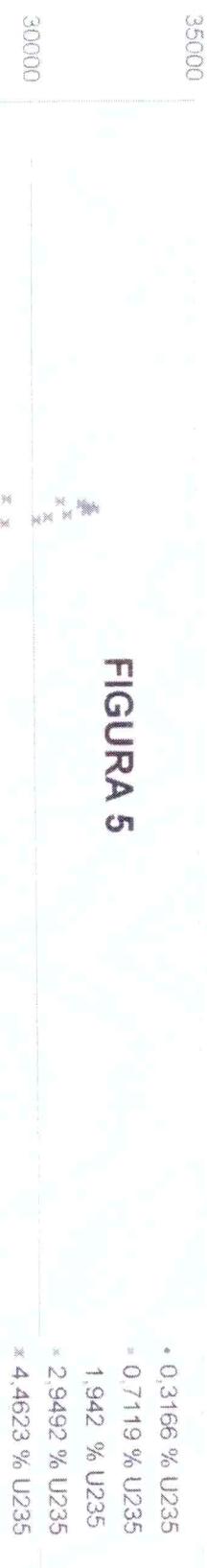
Detector TeZnCd CZT/500s 10x10x5 mm



**FIGURA 4**



Detector TeZnCd CZT/500s 10x10x5 mm



**FIGURA 5**

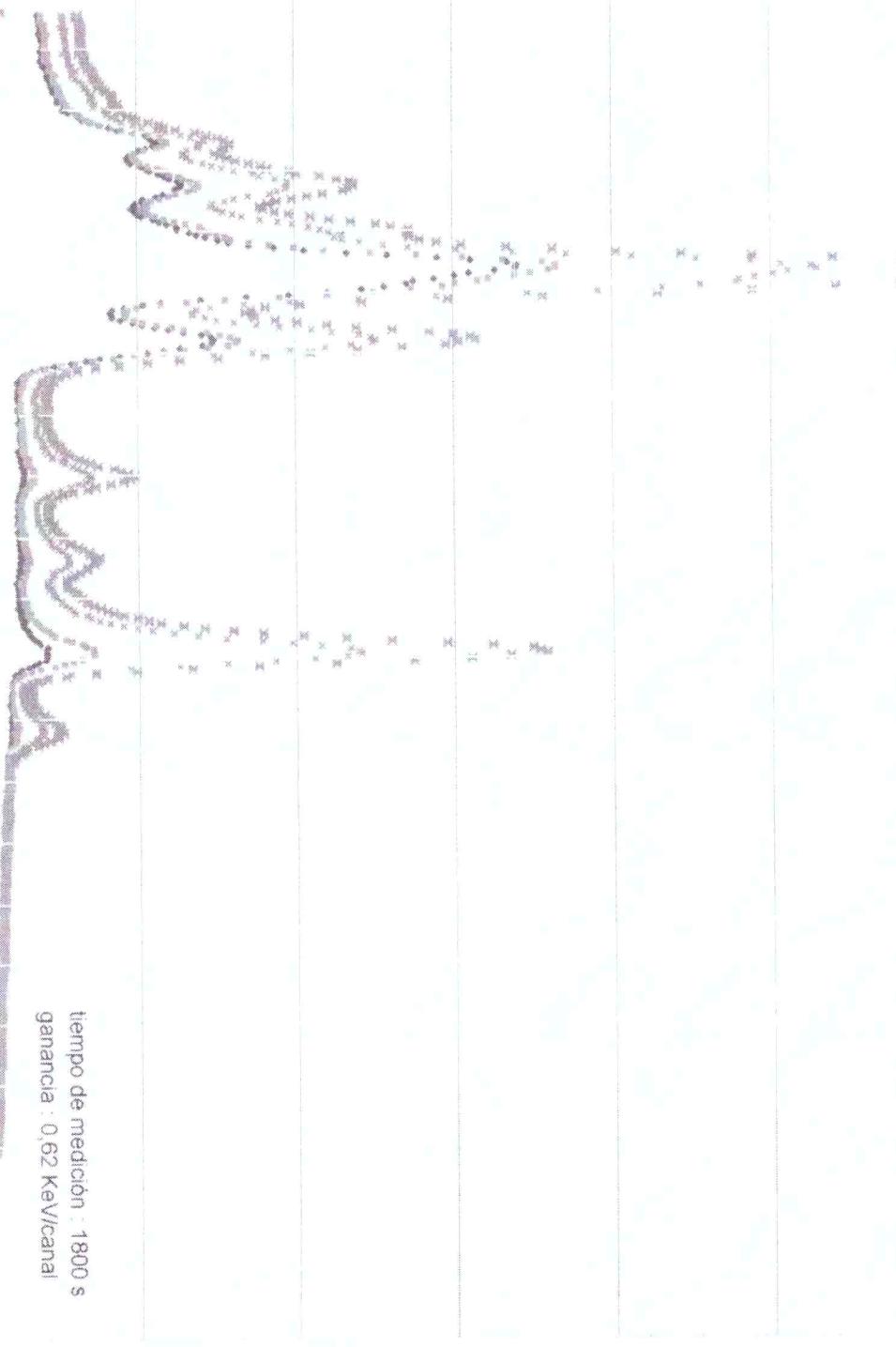
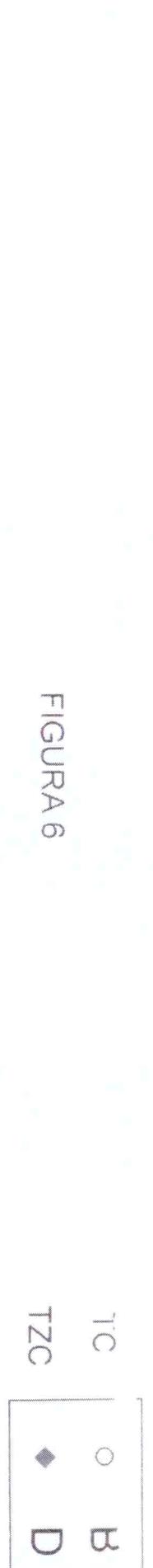


FIGURA 6



Area neta fotopico 186 KeV

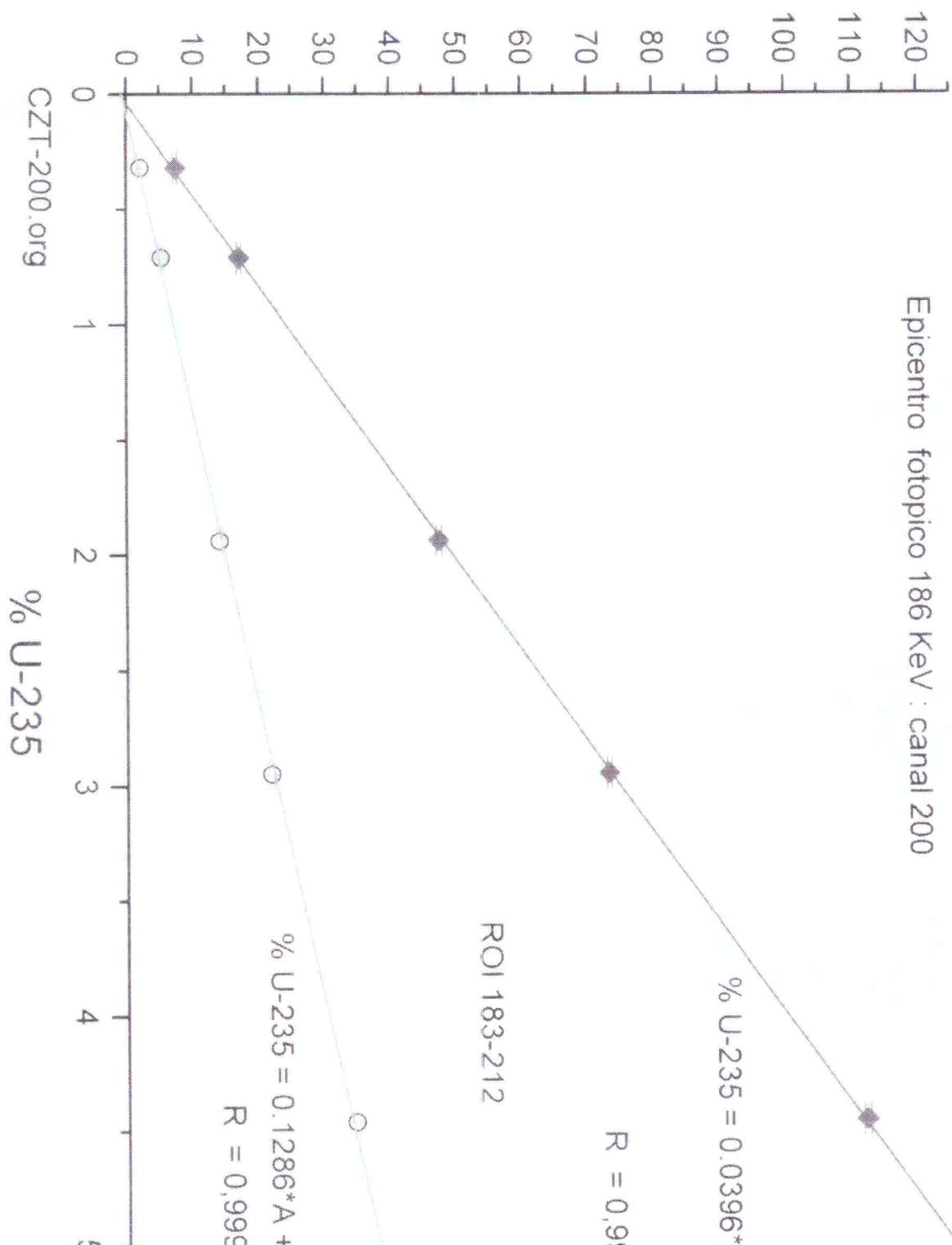


FIGURA 7

MMCA-166/CZT500c

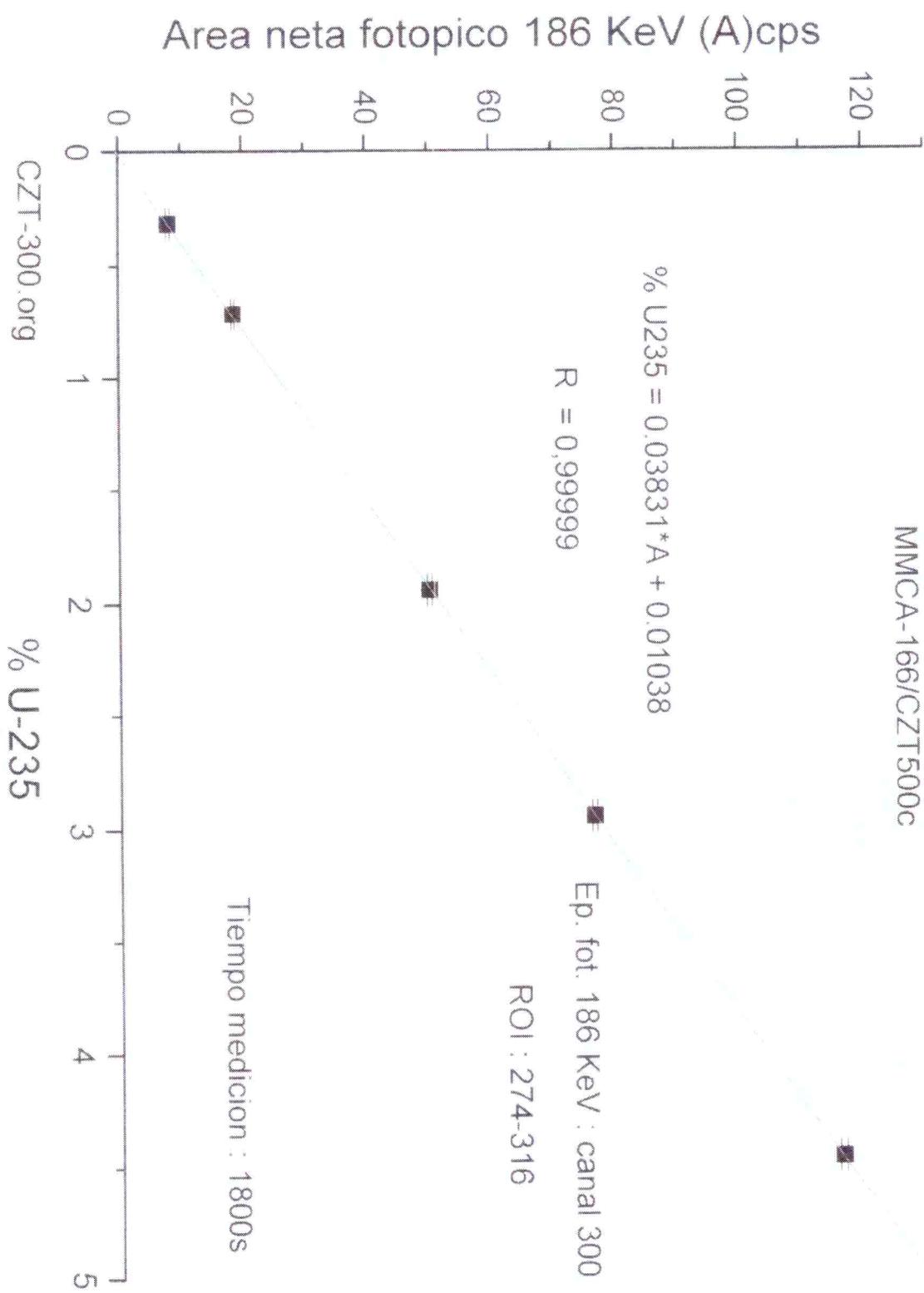


FIGURA 13

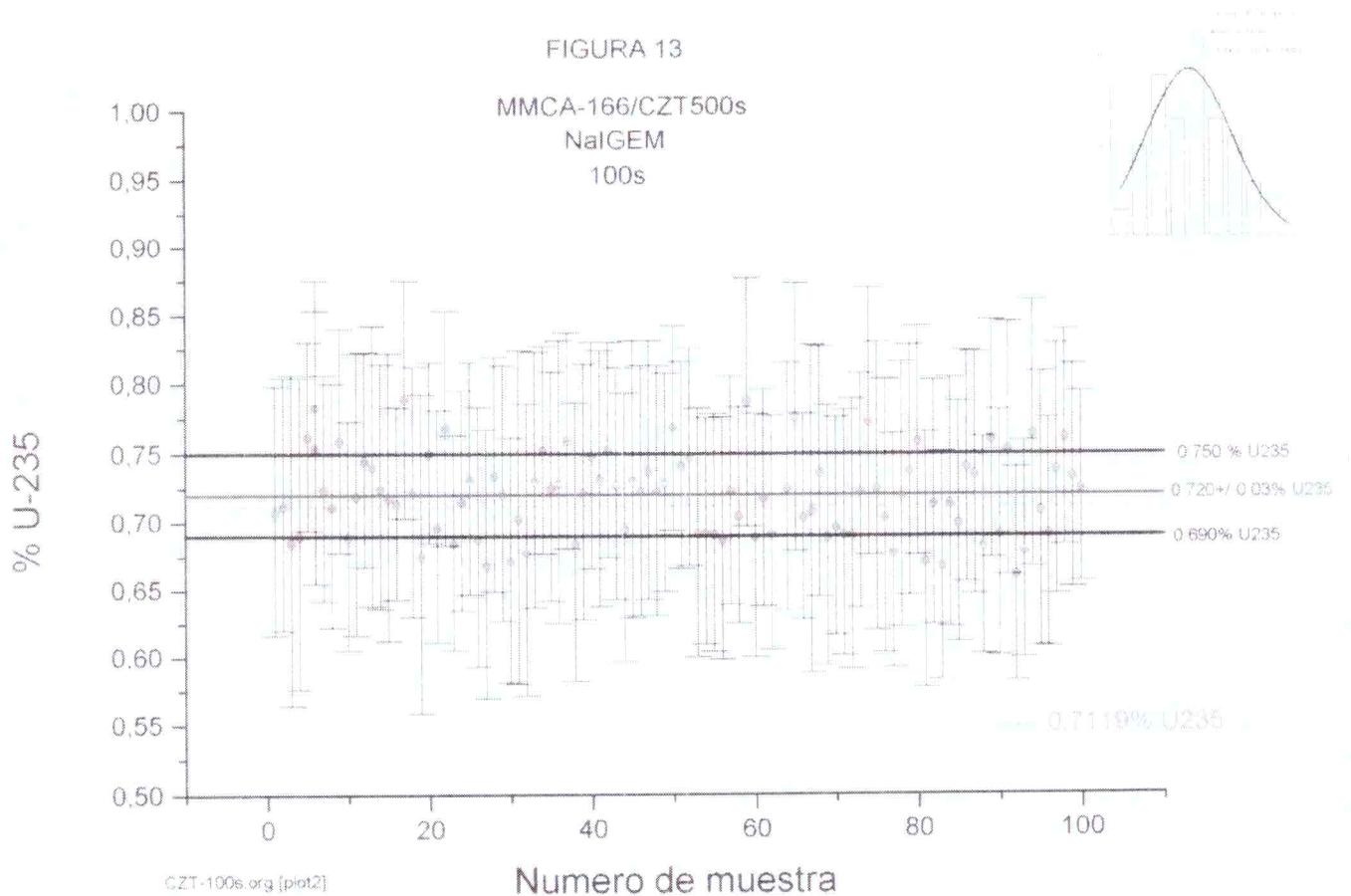
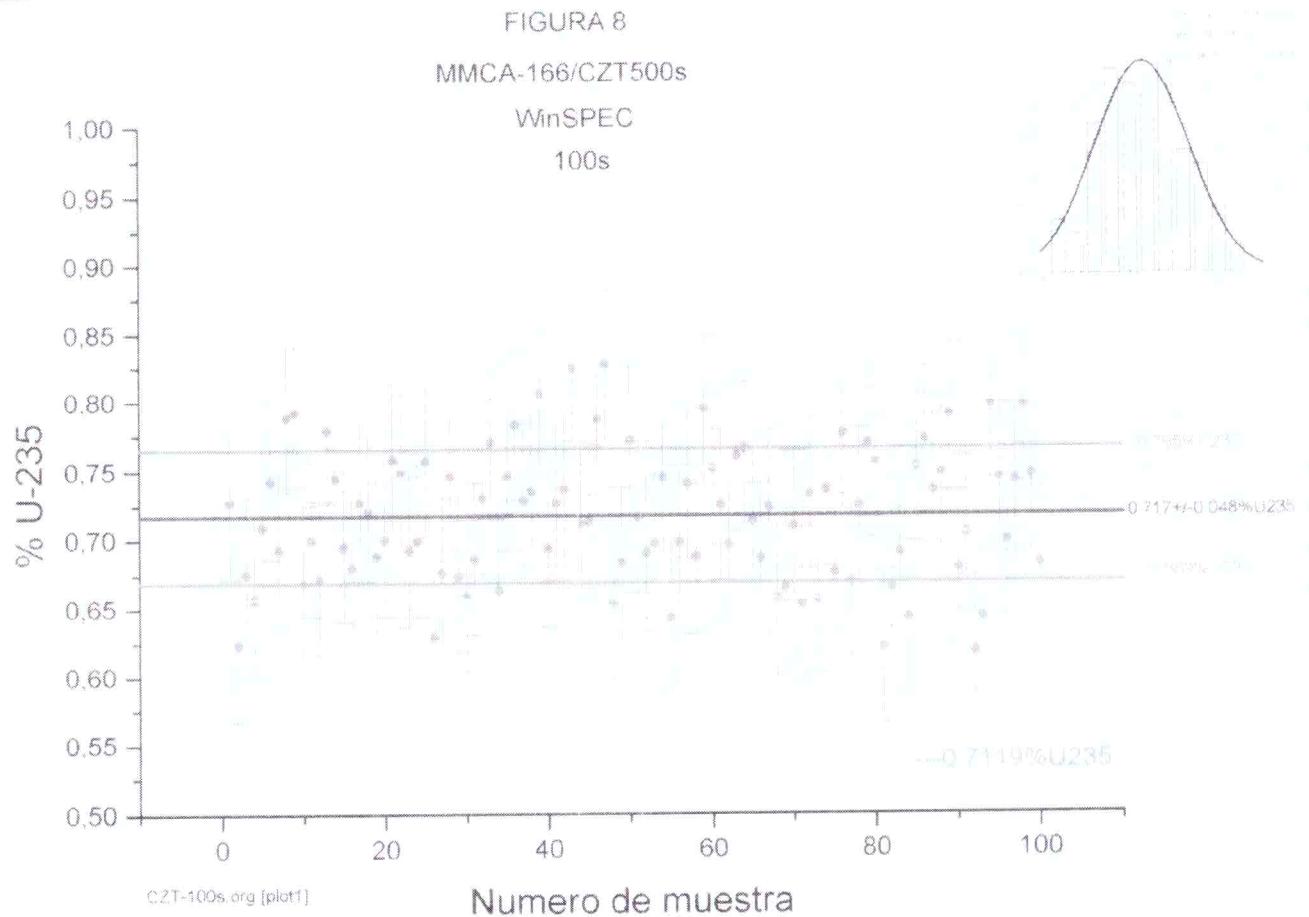


FIGURA 8



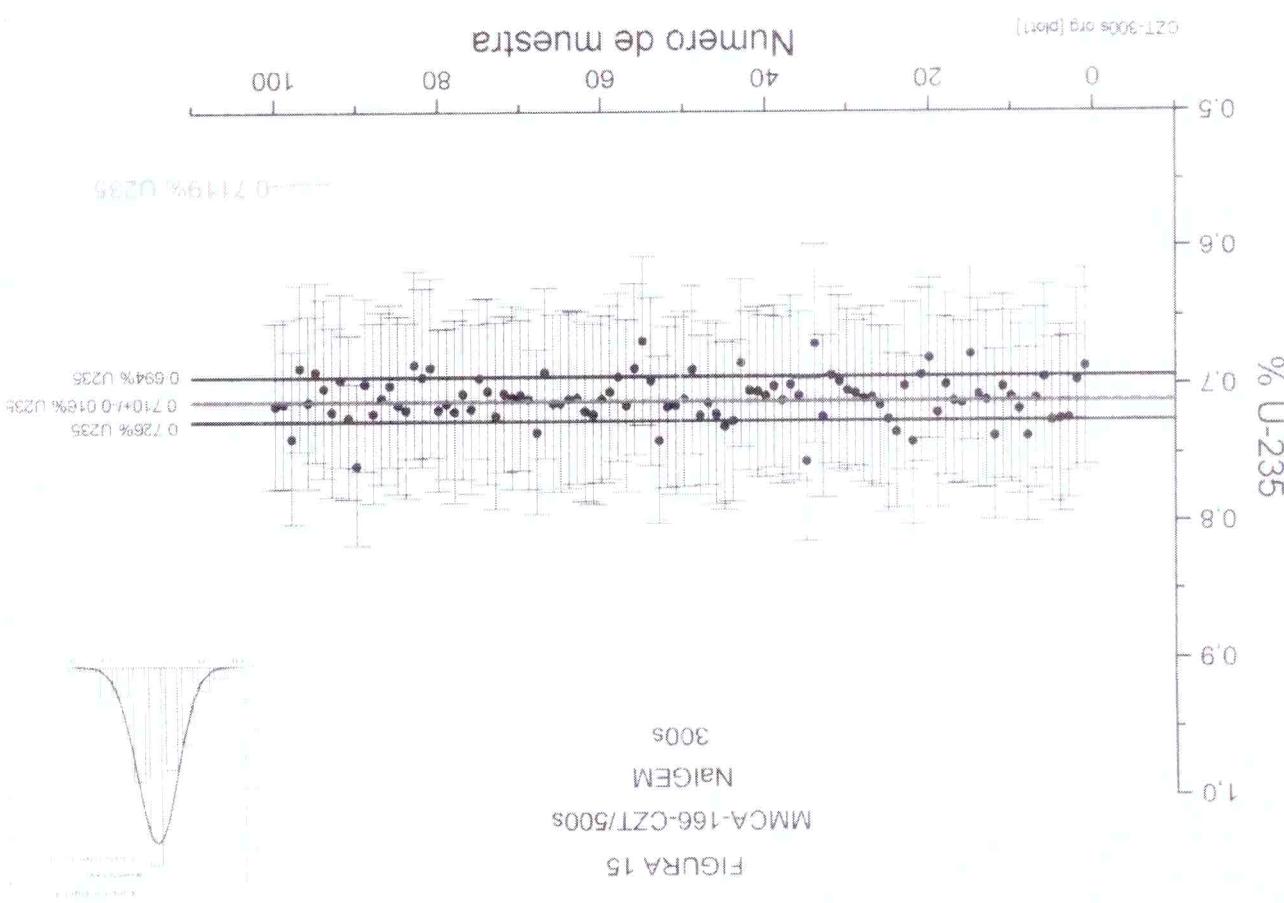
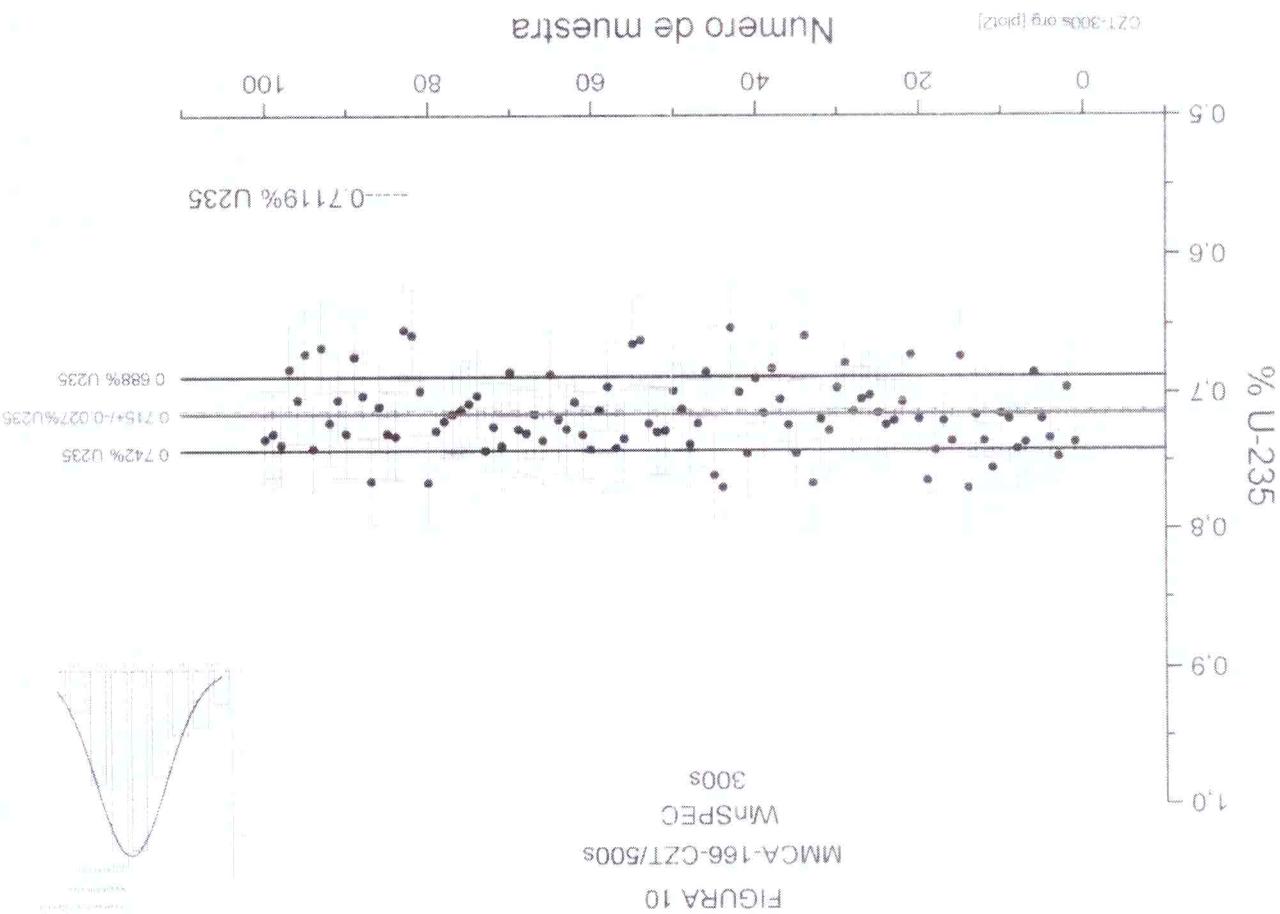


FIGURA 16  
MMCA-166-CZT/500s  
NaIGEM  
600s

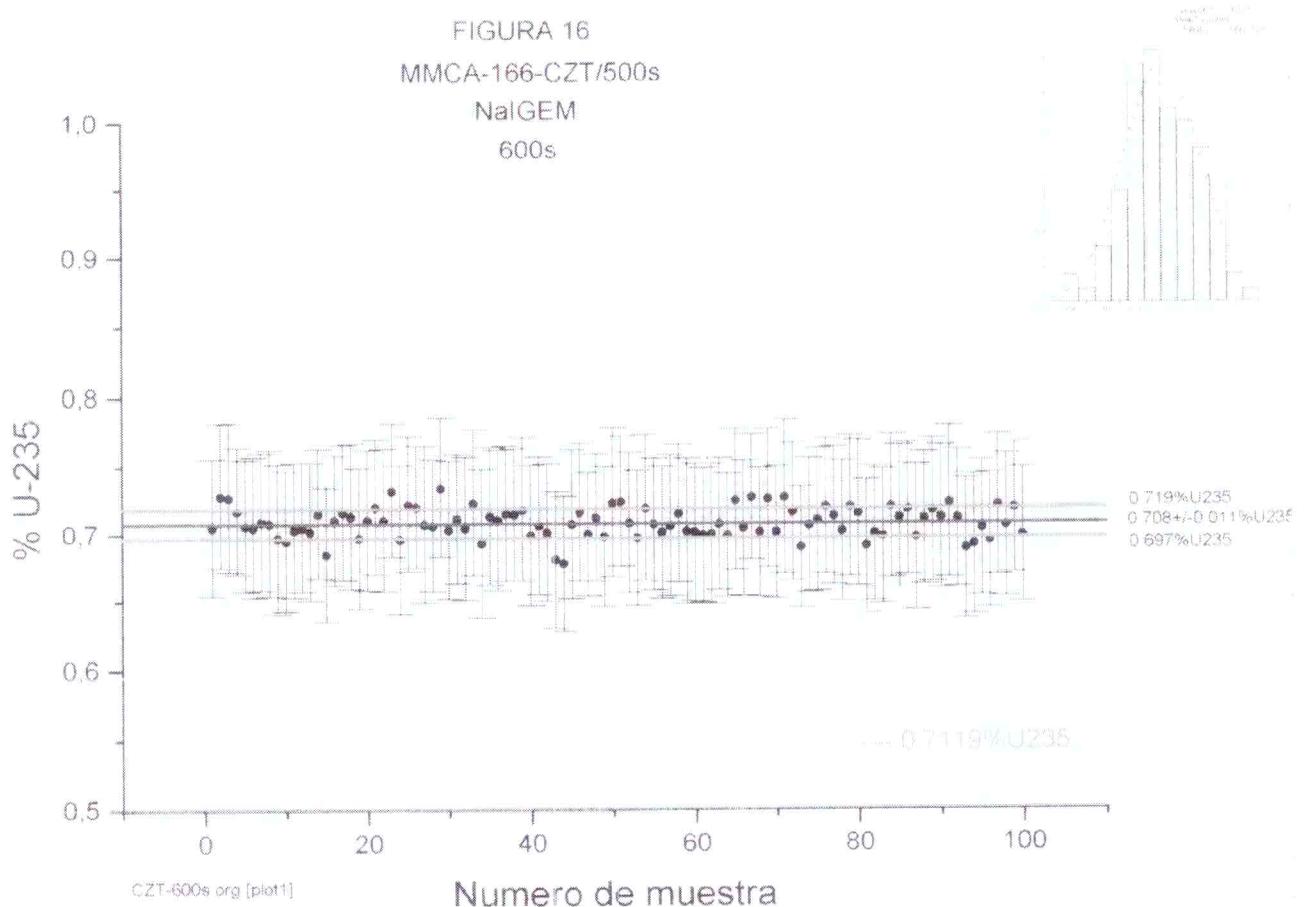


FIGURA 11  
MMCA-166-CZT/500s  
WinSPEC  
600s

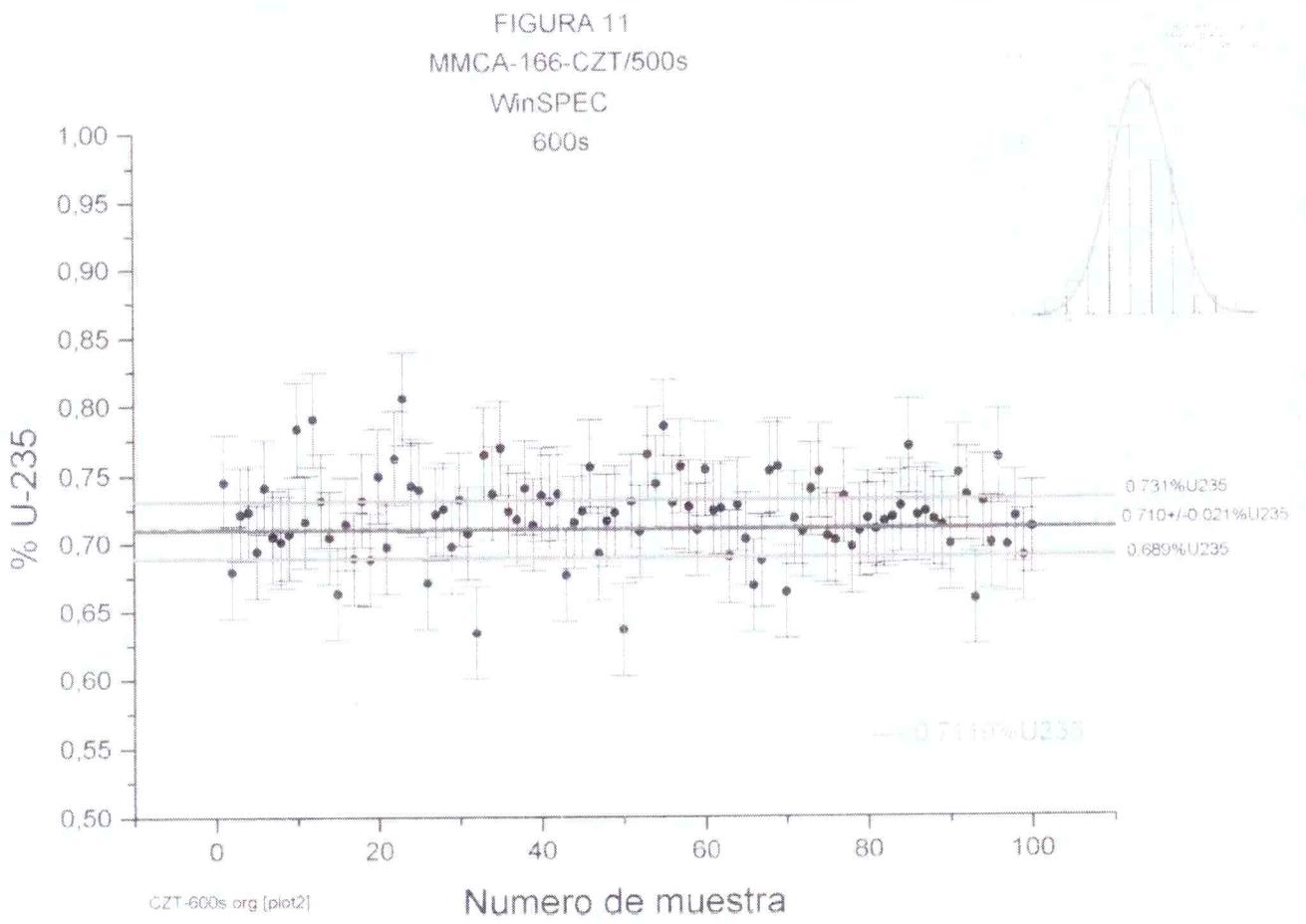


FIGURA 9  
 MMCA-166-CZT/500s  
 WinSPEC  
 100s  
 Fondo Co60

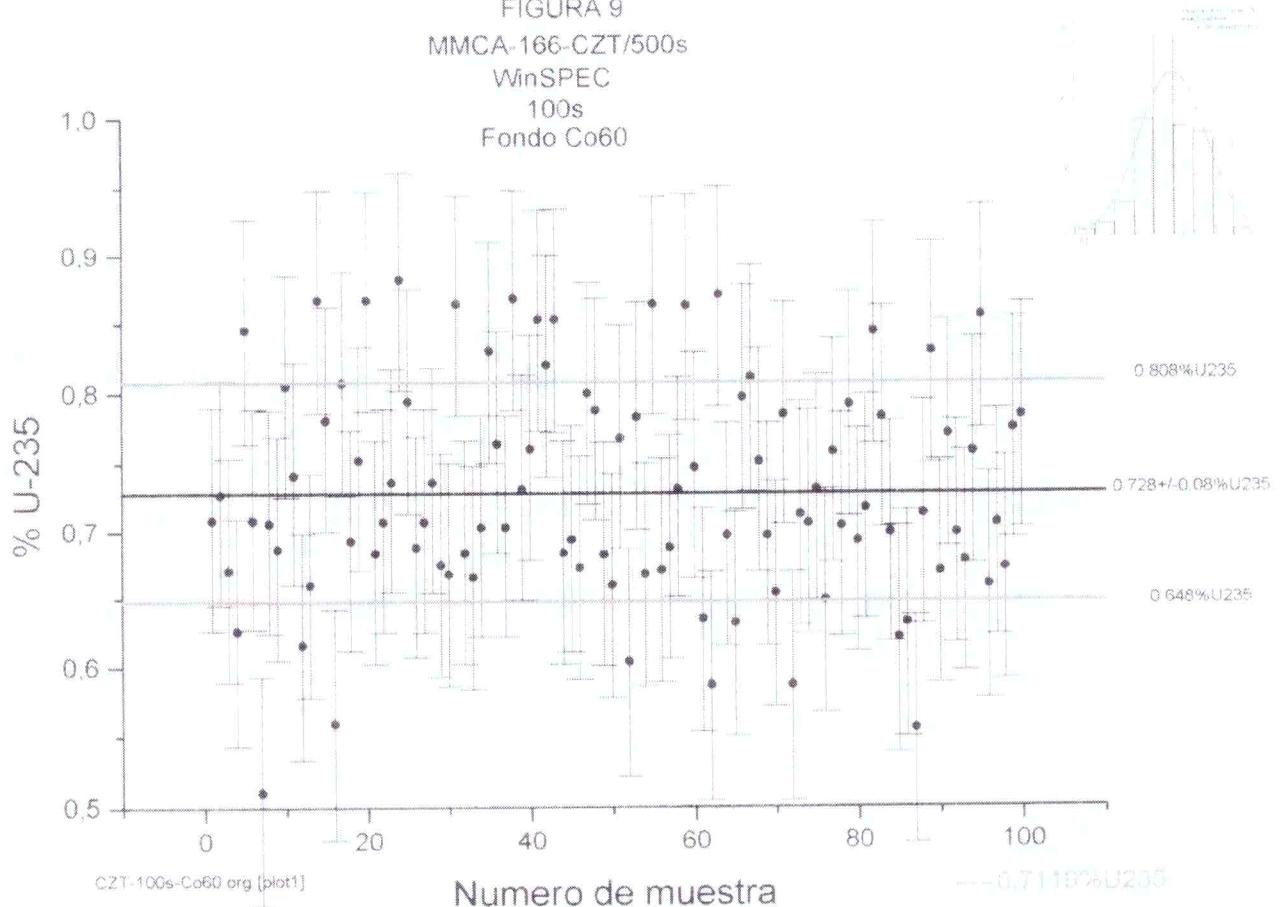


FIGURA 14  
 MMCA-166-CZT/500s  
 NaIGEM  
 100s  
 Fondo Co60  
 $\cdots 0.7119\% \text{U235}$

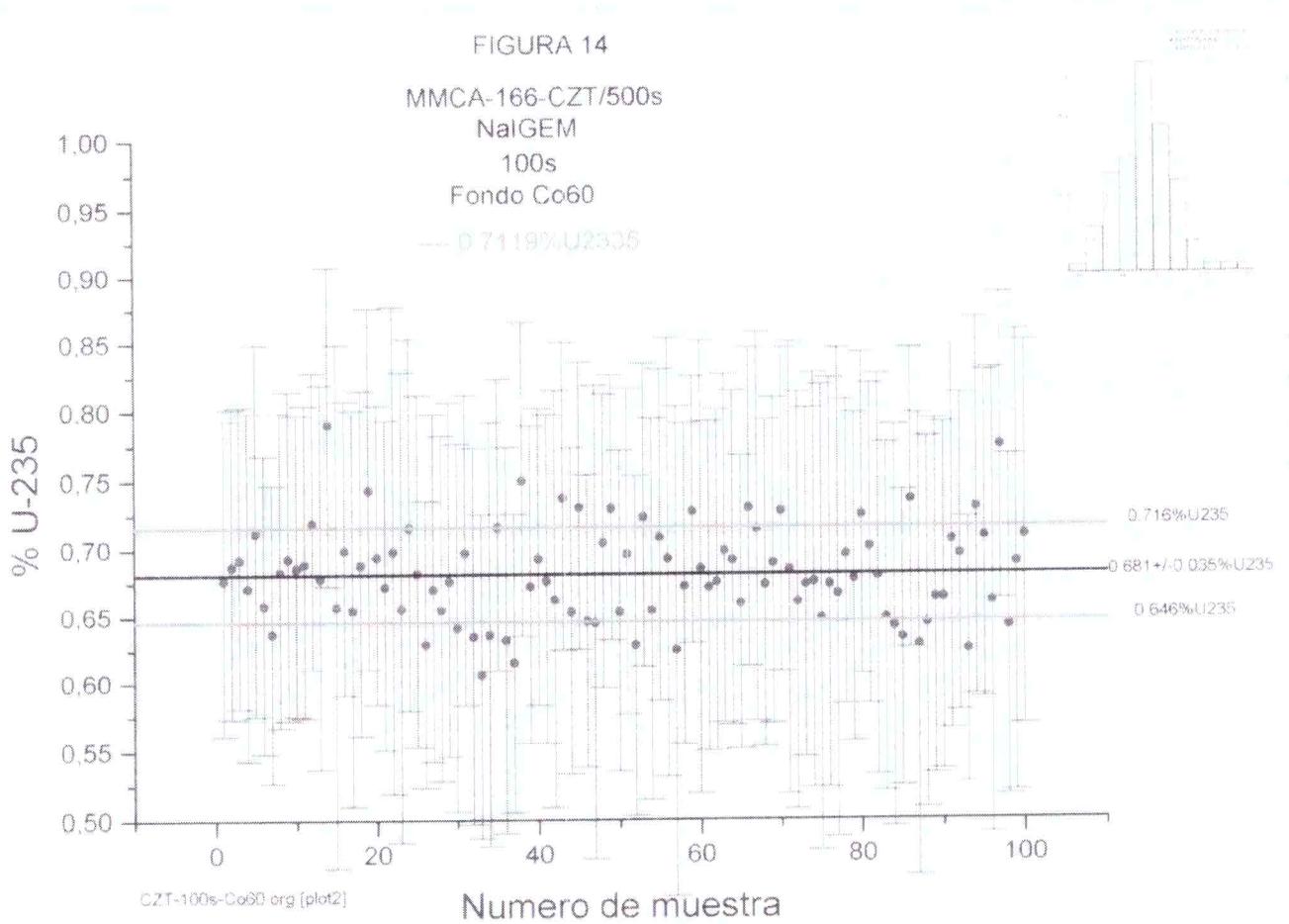


FIGURA 17  
MMCA-166-CZT/500s

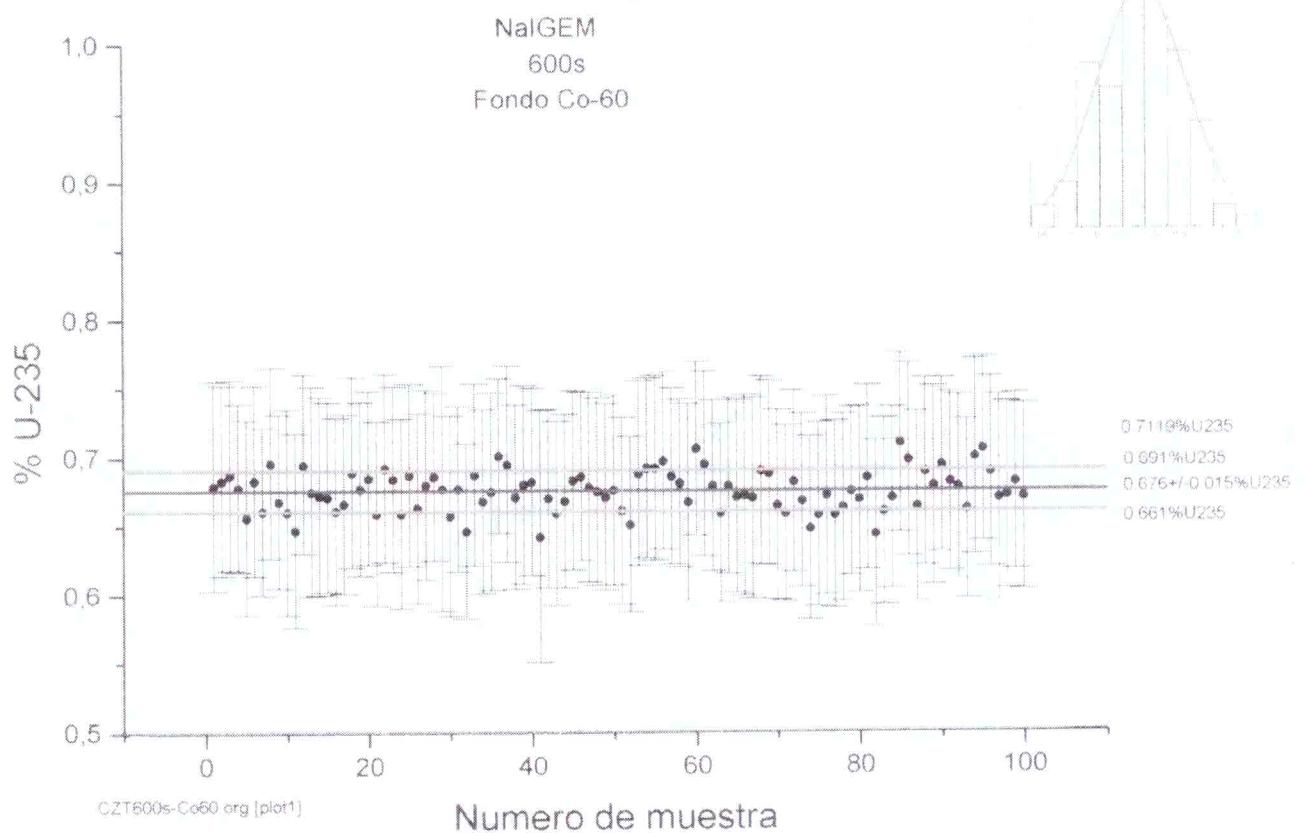
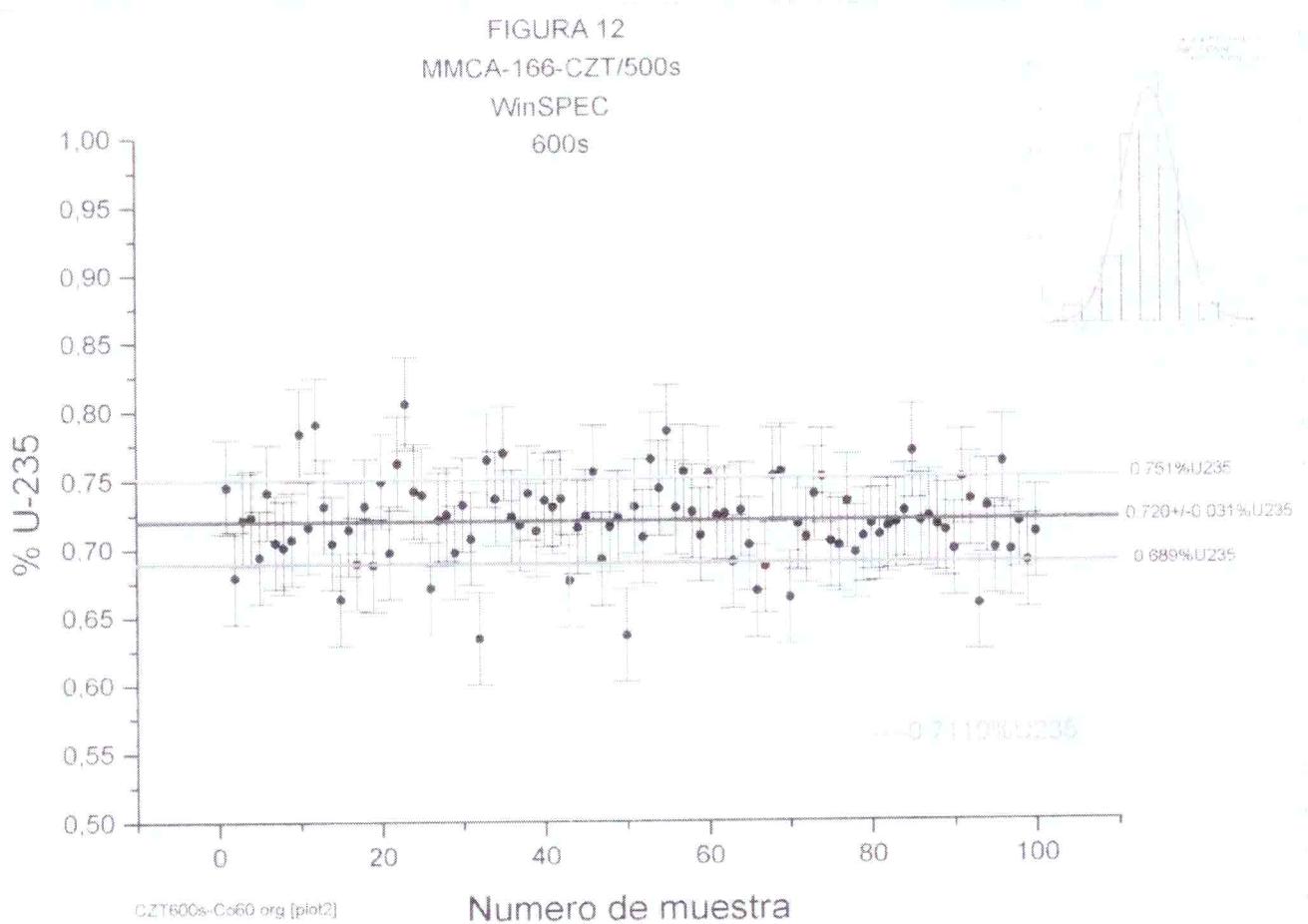
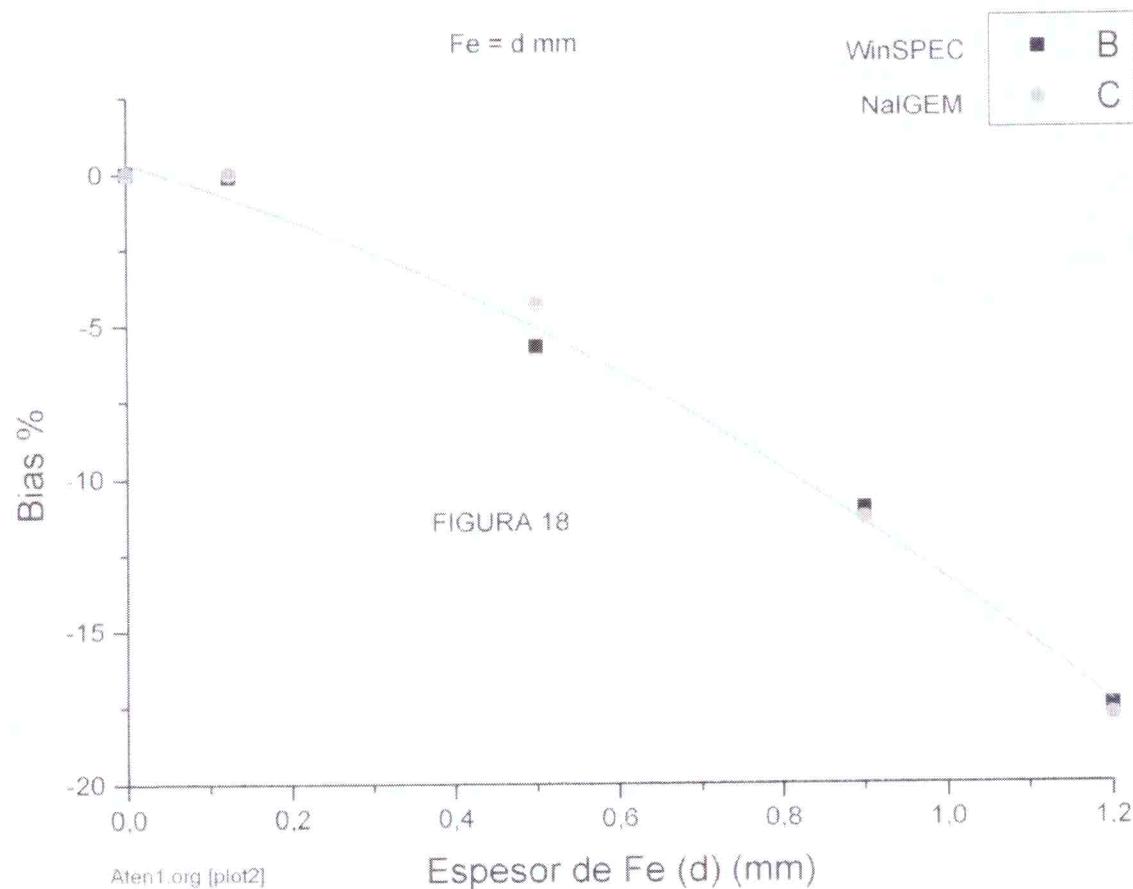
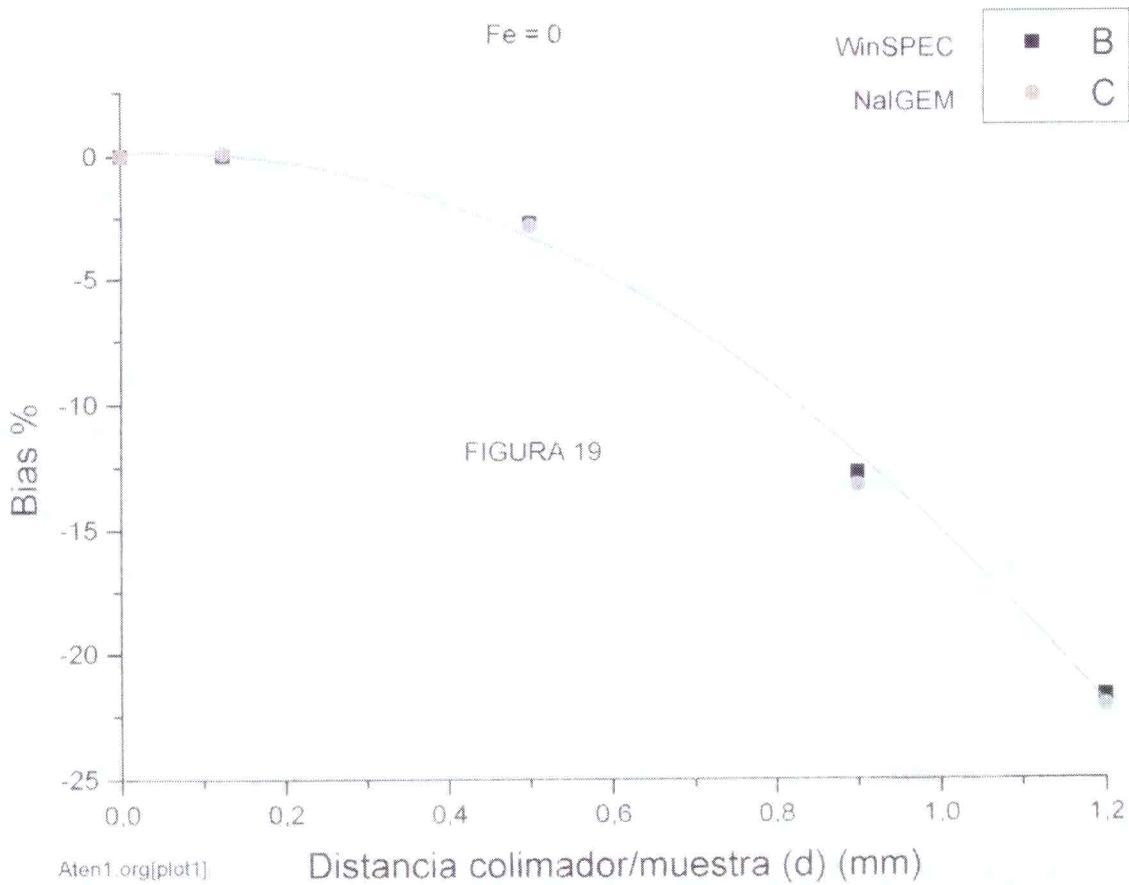
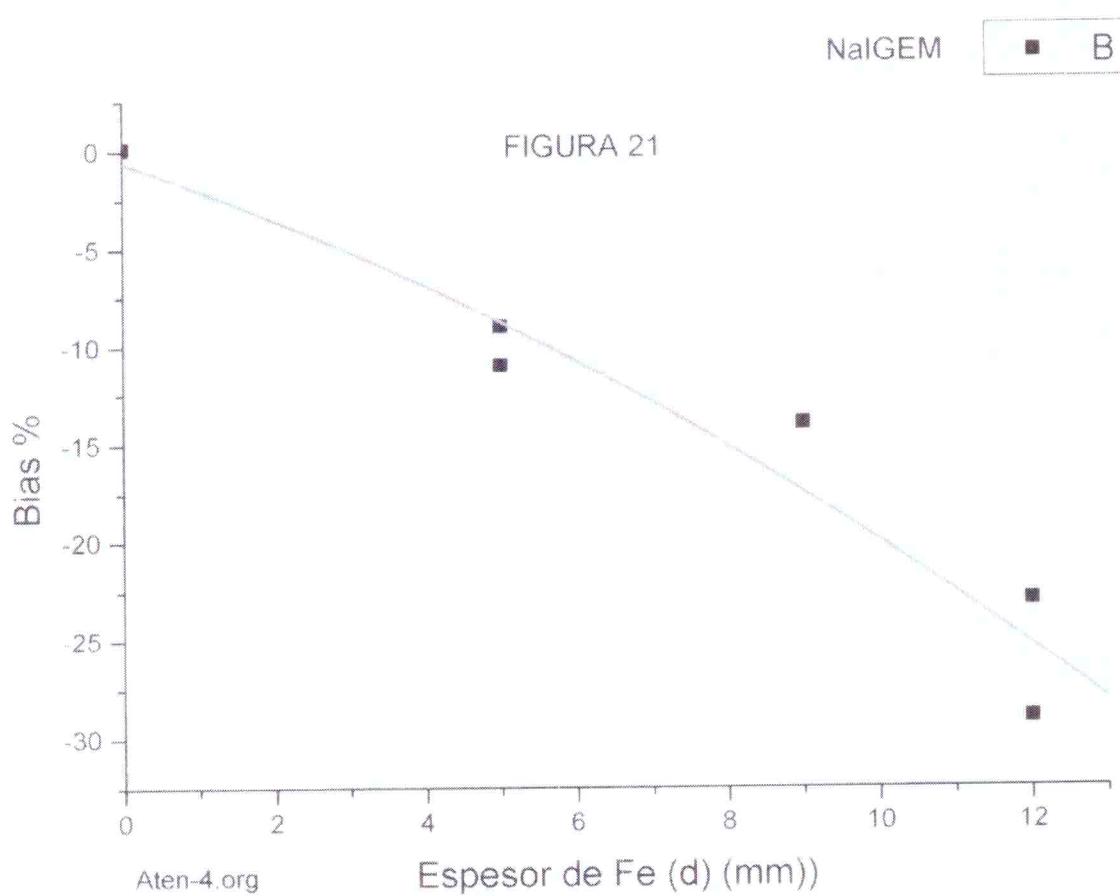
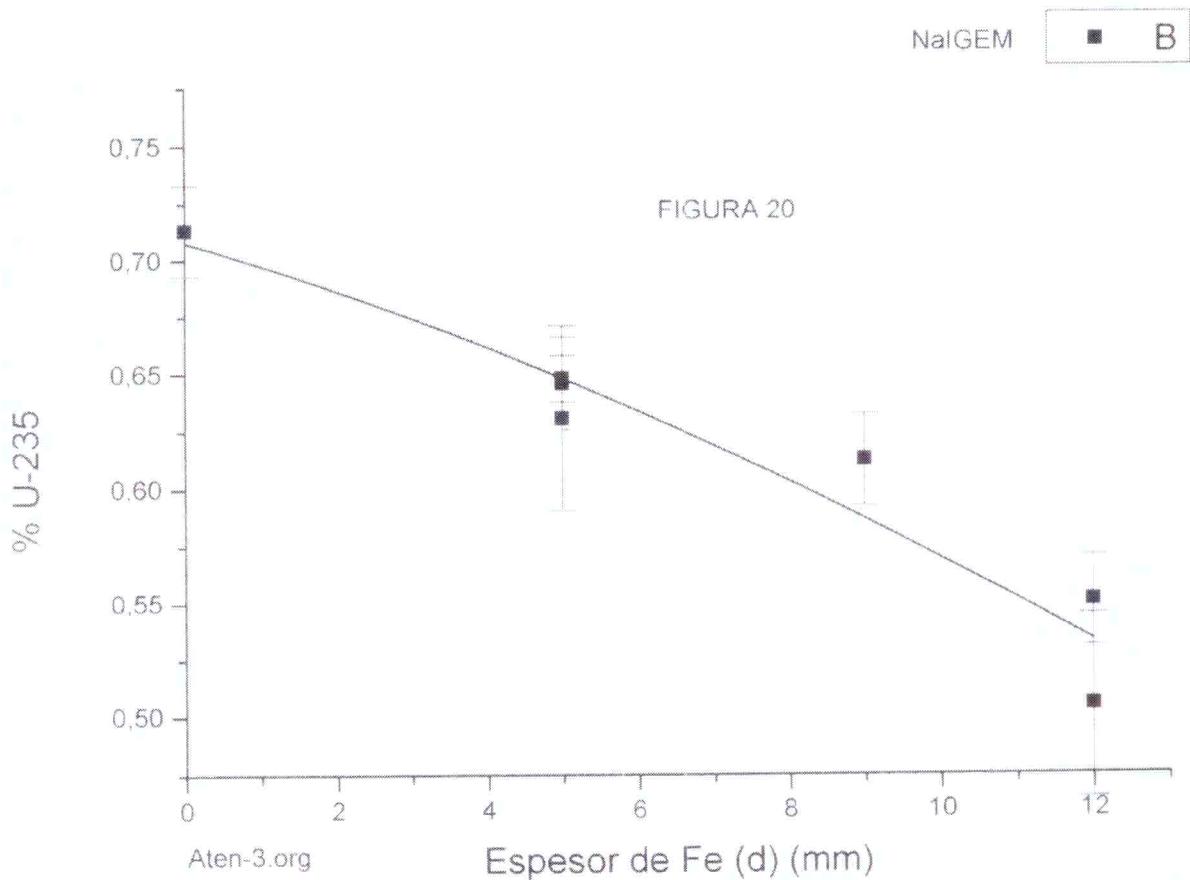


FIGURA 12  
MMCA-166-CZT/500s







<b>1σ</b>	<b>2σ</b>	<b>0,67σ</b>	<b>3σ</b>	<b>1σ</b>	<b>2σ</b>	<b>0,67σ</b>	<b>3σ</b>
32%	5%	50%	0,30%	32%	5%	50%	0,30%
36%	3%	50%	0%	36%	3%	50%	0%
0,707	0,707	0,707	0,707	0,741	0,741	0,741	0,741
0,712	0,712	0,712	0,712	0,747	0,747	0,747	0,747
0,685	0,685	0,685	0,685	0,691	0,691	0,691	0,691
0,69	0,69	0,69	0,69	0,692	0,692	0,692	0,692
0,762	0,762	0,762	0,762	0,691	0,691	0,691	0,691
0,754	0,754	0,754	0,754	0,687	0,687	0,687	0,687
0,724	0,724	0,724	0,724	0,722	0,722	0,722	0,722
0,711	0,711	0,711	0,711	0,704	0,704	0,704	0,704
0,759	0,759	0,759	0,759	0,787	0,787	0,787	0,787
0,689	0,689	0,689	0,689	0,689	0,689	0,689	0,689
0,719	0,719	0,719	0,719	0,717	0,717	0,717	0,717
0,745	0,745	0,745	0,745	0,691	0,691	0,691	0,691
0,74	0,74	0,74	0,74	0,783	0,783	0,783	0,783
0,725	0,725	0,725	0,725	0,725	0,725	0,725	0,725
0,717	0,717	0,717	0,717	0,776	0,776	0,776	0,776
0,713	0,713	0,713	0,713	0,703	0,703	0,703	0,703
0,789	0,789	0,789	0,789	0,708	0,708	0,708	0,708
0,721	0,721	0,721	0,721	0,736	0,736	0,736	0,736
0,675	0,675	0,675	0,675	0,689	0,689	0,689	0,689
0,75	0,75	0,75	0,75	0,696	0,696	0,696	0,696
0,696	0,696	0,696	0,696	0,691	0,691	0,691	0,691
0,768	0,768	0,768	0,768	0,69	0,69	0,69	0,69
0,684	0,684	0,684	0,684	0,722	0,722	0,722	0,722
0,715	0,715	0,715	0,715	0,773	0,773	0,773	0,773
0,731	0,731	0,731	0,731	0,725	0,725	0,725	0,725
0,688	0,688	0,688	0,688	0,703	0,703	0,703	0,703
0,668	0,668	0,668	0,668	0,678	0,678	0,678	0,678
0,734	0,734	0,734	0,734	0,719	0,719	0,719	0,719
0,72	0,72	0,72	0,72	0,737	0,737	0,737	0,737
0,671	0,671	0,671	0,671	0,759	0,759	0,759	0,759
0,702	0,702	0,702	0,702	0,671	0,671	0,671	0,671
0,678	0,678	0,678	0,678	0,713	0,713	0,713	0,713
0,73	0,73	0,73	0,73	0,667	0,667	0,667	0,667
0,752	0,752	0,752	0,752	0,713	0,713	0,713	0,713
0,725	0,725	0,725	0,725	0,699	0,699	0,699	0,699
0,728	0,728	0,728	0,728	0,74	0,74	0,74	0,74
0,759	0,759	0,759	0,759	0,735	0,735	0,735	0,735
0,684	0,684	0,684	0,684	0,682	0,682	0,682	0,682
0,721	0,721	0,721	0,721	0,76	0,76	0,76	0,76
0,748	0,748	0,748	0,748	0,691	0,691	0,691	0,691
0,731	0,731	0,731	0,731	0,753	0,753	0,753	0,753
0,752	0,752	0,752	0,752	0,661	0,661	0,661	0,661
0,727	0,727	0,727	0,727	0,679	0,679	0,679	0,679
0,695	0,695	0,695	0,695	0,764	0,764	0,764	0,764
0,73	0,73	0,73	0,73	0,708	0,708	0,708	0,708
0,722	0,722	0,722	0,722	0,691	0,691	0,691	0,691
0,737	0,737	0,737	0,737	0,738	0,738	0,738	0,738
0,722	0,722	0,722	0,722	0,761	0,761	0,761	0,761
0,728	0,728	0,728	0,728	0,733	0,733	0,733	0,733
0,768	0,768	0,768	0,768	0,725	0,725	0,725	0,725

T Lmpo medicion : 100s

reportCZT-1.xls[estad]

**TABLA 1**

TABLA 2

## MMCA-166-CZT/500s

File name	Nro medic	FONDO $(\Sigma A)/A$	t medidc.	ROI	FWHM	$\Sigma$	A	$\sigma A$	A	WinSPEC			NaIGEM							
										Canales	nro cuentas	cps	cps	% U.235	$\sigma E_i$	$\sigma E_m$	$\sigma E_r$	Bias		
000-099	100	1,6	100	300,0	11,3	4749	1849	142	18,5	1,4	0,717	0,048	0,005	6,7	0,67	0,720	0,030	0,003	4,2	1,1
200-299	100	1,6	300	300,0	11,3	14187	5537	246	18,5	0,8	0,715	0,027	0,003	3,8	0,5	0,710	0,016	0,002	2,3	-0,3
100-199	100	1,6	600	300,1	11,5	28402	10988	349	18,3	0,6	0,710	0,021	0,002	2,9	-0,3	0,708	0,011	0,001	1,6	-0,5
300-399	100	3,6	100	299,9	11,3	8650	1877	212	18,8	2,1	0,7275	0,080	0,008	11	2,2	0,681	0,035	0,004	5,1	-4,4
400-499	100	3,7	600	300,0	11,8	51888	11148	519,97	18,6	0,9	0,720	0,031	0,003	4,2	1,2	0,676	0,015	0,002	2,2	-5,1

ROI 274-316 Ep. Fot : canal 300 Aten. : 1

Patron : 0\_7119-7200.spe

 $E_m$  = Valor medio $\sigma E_i$  : Desviacion standard $\sigma E_r$  : Desviacion standard relativa $\sigma E_m$  : desviacion standard de la media

WinSPEC

NaIGEM

NaIGEM

Zero : -12 KeV

Gain : 0.65371 KeV/canal

FWHM (660 KeV) : 0.822 KeV

Factor : 2.163.10^-4 +/- 3.5%

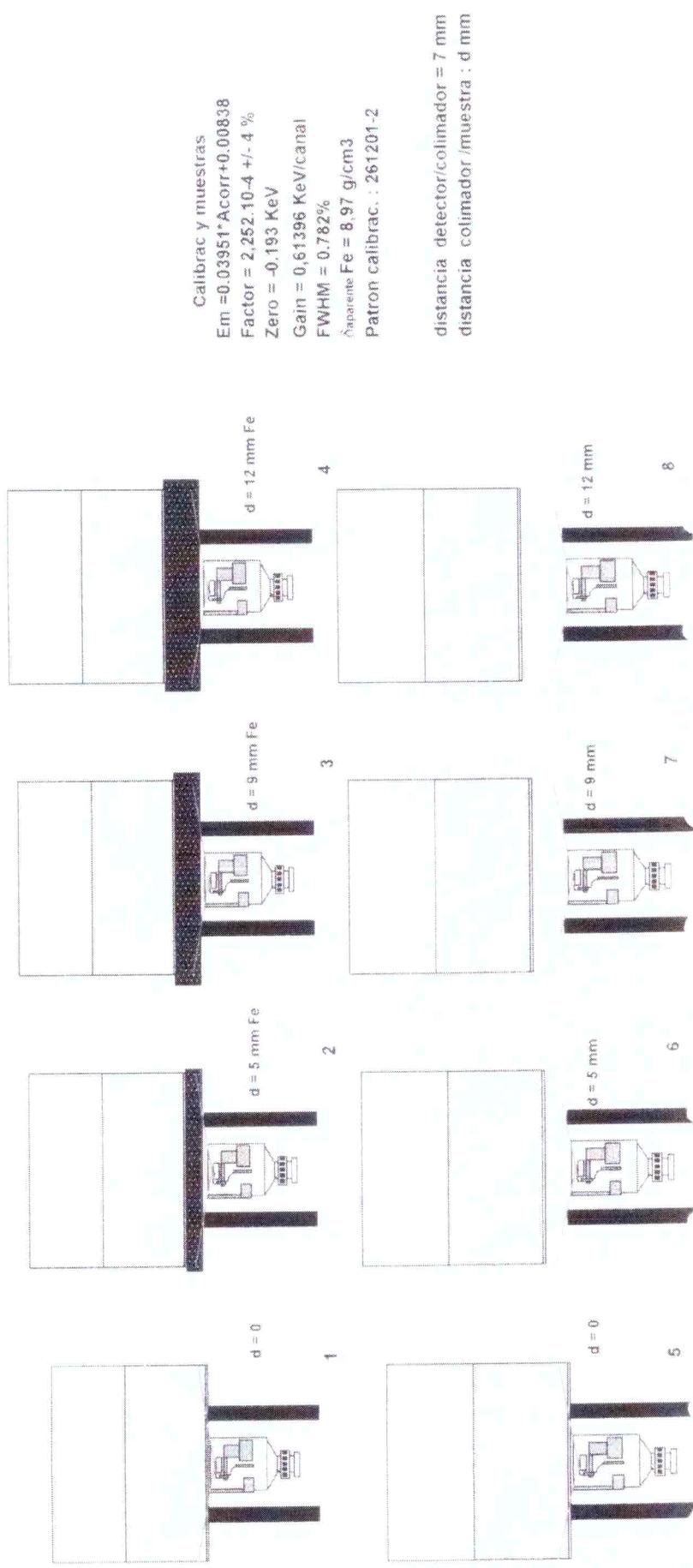
 $b = 0,03831$  ;  $\sigma b = 0,0001$  $a = 0,00838$  ;  $\sigma a = 0,00679$

TABLA 3

File name	Fe	d	$\mu$	Aten.	FONDO	ROI	Centroid	FWHM	$\Sigma$	A	$\alpha_A$	t.medic.	A	$\alpha_A$	Acorr	$\alpha_{Acorr}$	Em	$\sigma_{Ei}$	$\sigma_{l/r}$	Bias
	cm	cm	cm <sup>-1</sup>		cm <sup>-1</sup>	Canal	Canal	Canal		S	cps	cps	S	cps	cps	cps	% U-235	%	%	
281201_2 spe	0,125	0,125	1,57	1,215	0,6	274-317	306,0	12,5	282209	156730	843	1800	92,63	0,47	112,57	0,57	4,456	0,02605	0,6	-0,1
281201_4 spe	0,5	0,5	1,62	2,181	0,6	274-317	300,1	12,6	152189	87684	706	1800	48,71	0,39	105,27	0,86	4,207	0,036	0,9	-5,7
281201_6 spe	0,9	0,9	1,54	4,071	0,6	274-317	299,7	13,2	87428	44353	564	1800	24,64	0,31	100,32	1,28	3,972	0,052	1,3	-11,0
281201_8 spe	1,2	1,2	1,52	6,501	0,6	274-317	299,7	13,1	57917	25748	480	1800	14,30	0,27	93,00	1,73	3,683	0,069	1,9	-17,5

TABLA 3'

File name	Fe	d	$\mu$	Aten.	FONDO	ROI	Centroid	FWHM	$\Sigma$	A	$\alpha_A$	t.medic.	A	$\alpha_A$	Acorr	$\alpha_{Acorr}$	Em	$\sigma_{Ei}$	$\sigma_{l/r}$	Bias
	cm	cm	cm <sup>-1</sup>		cm <sup>-1</sup>	Canal	Canal	Canal		S	cps	cps	S	cps	cps	cps	% U-235	%	%	
281201_1 spe	0	0	0	0	0,46	274-317	300,1	12,7	296120	202374	892	1800	112,7	0,50	112,7	0,496	4,461	0,0	0,5	0,0
281201_3 spe	0	0,125	0	0,45	274-317	300,0	12,7	293648	202818	883	1800	112,7	0,4906	112,7	0,49	4,462	0,023	0,5	0,0	0,29
281201_5 spe	0	0,5	0	0,44	274-317	300,0	12,4	283897	197521	884	1800	109,7	0,48	106,7	0,48	4,344	0,023	0,5	-2,7	0,130
281201_7 spe	0	0,9	0	0,43	274-317	300,1	12,3	253930	177008	816	1800	98,3	0,4533	98,3	0,45	3,894	0,022	0,6	-12,7	3,684
281201_9 spe	0	1,2	0	0,44	274-317	300,1	12,6	228016	158727	774	1800	88,2	0,43	88,2	0,43	3,492	0,020	0,6	-21,7	3,488



NaIGEM										
File name	Figura	Nro	Espesor Fe	FONDO	ROI	t Medic.	FWHM	E_m	$\sigma E_l$	$\sigma E_r$
		medic.	mm		canal	s	canales	% U-235	%	Bias %
12C000418-454	4	37	12	221	274-316	1800	11,8	0,505	0,044	8,7
5C0000-282-374	3	93	5	7,4	274-316	1800	12,0	0,613	0,016	2,6
12000375-417	4	43	12	4,8	274-316	1800	12,5	0,551	0,020	3,7
5C182-5C281	2	100	5	2,6	274-316	1800	12,4	0,648	0,012	1,8
5001-5047	1	47	0	1,6	274-316	300	11,6	0,713	0,018	2,5
50048-50147	2	100	5	2,6	274-316	500	12,3	0,646	0,020	3,1
5C148-5C181	2	34	5	6,0	274-316	300	11,8	0,631	0,041	6,5
										-11

Factor :  $2,252 \cdot 10^{-4} +/- 4\%$ 

Gain : 0,61396 KeV/canal

Zero : - 0,193 KeV

FWHM : 0,782

H colim. : 7 mm

Patron calibrac. : 261201-2

Centroide : 274-316

 $\delta$ aparente Fe = 8,97 g/cm<sup>3</sup>

distancia detector/ colimador = 7 mm

distancia colimador /muestra : d mm

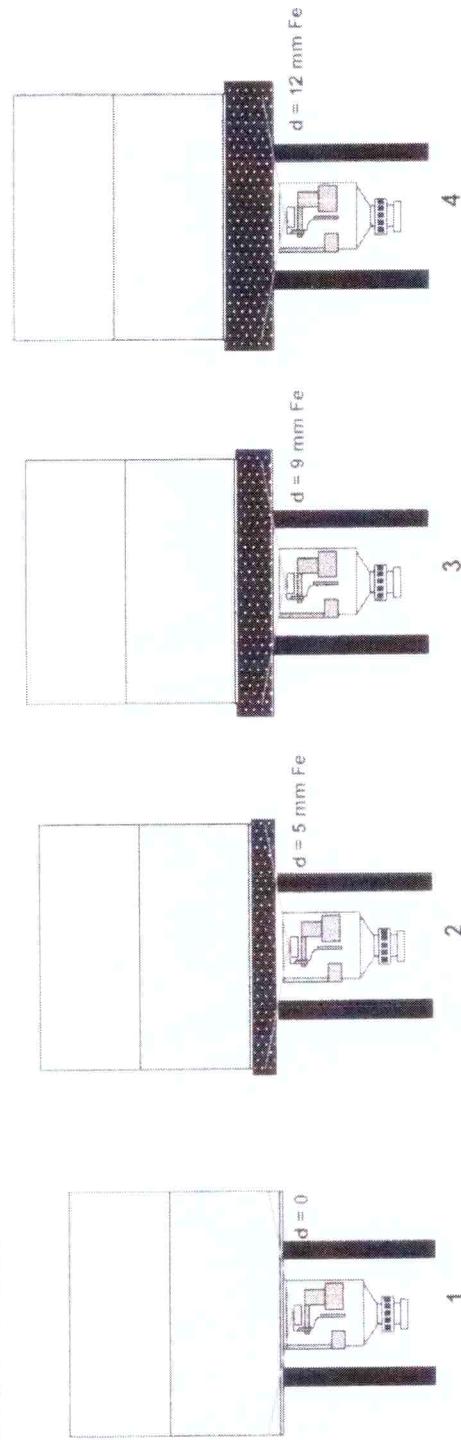


TABLA 4

TABLA 5

File name	Patrón	ratio medic	Aten.	Fondo	ROI	Centroid	FWHM	$\Sigma$	A	$\sigma A$	t.medic.	Acorr	$\sigma A_{corr}$	E	$\sigma E$	Bias	$\sigma E$	$\sigma E$	Bias				
	% U:235					Canal	Canales	nro cuentas	s	cps	cps		% U:235	%	%	%	%	%	%				
30000000/19	0,712	7	1	1,62	274	316	300	11,0	14097	5394	246	300	18,0	0,7	0,699	0,03	3,9	-1,8	0,705	0,01	2,0	-0,9	
30000000/10/14	0,712	5	1	3,35	274	316	300	11,2	25209	5673	360	300	18,9	1,0	0,735	0,04	5,4	3,2	0,694	0,02	2,5	-2,6	
60000000/14	0,712	5	1	1,59	274	316	300	11,2	28274	10907	348	600	18,2	0,6	0,707	0,02	3,0	-0,7	0,715	0,01	0,7	0,4	
9-100000/4	0,712	5	1	3,78	274	316	300	11,5	25682	5423	366	300	18,1	1,9	0,703	0,07	10,1	-1,3	0,655	0,03	3,9	-8,0	
9-100000/5/9	0,712	5	1	1,0944	4,09	274	316	300	10,9	24759	4875	362	300	17,8	1,0	0,692	0,04	5,5	-2,9	0,657	0,02	3,5	-7,8
9-100000/10/14	0,712	5	1	1,0944	3,93	274	316	300	11,4	49787	10108	513	600	18,4	0,7	0,717	0,03	3,6	0,7	0,662	0,01	1,8	-7,0
9-100000/15-19	0,712	5	1	1,0944	1,65	274	316	300	11,4	12880	4868	236	300	17,8	0,8	0,691	0,03	4,7	-3,0	0,712	0,01	1,6	0,0

Aten =  $\exp(0.95^*0.095) = 1.0944$  ;  $\mu = 0.95 \text{ cm}^{-1}$  ;  $l = 0.095 \text{ cm}$

## Calibrac y muestras

$E_m = 0.03951^*A_{corr} + 0.00838$

Factor =  $2.206.10^{-4} + l / 6,6\%$

Zero = -0,193 KeV

Gain = 0,61516 KeV/canal

FWHM = 0,588%

Δaparente Fe = 7,7 g/cm<sup>3</sup>

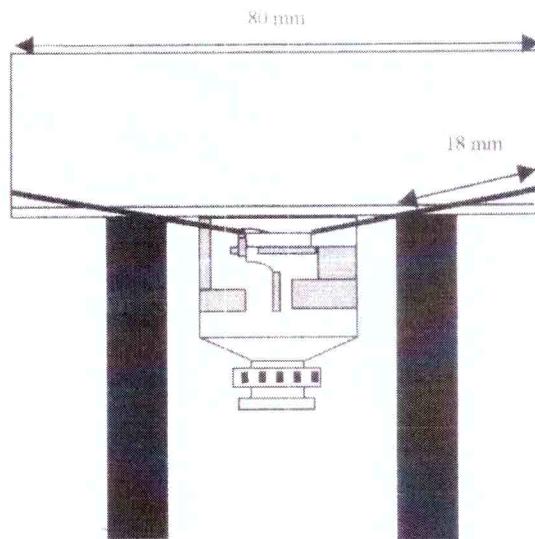
Patrón calibrac. : CZT-07119-Ep300.spe

distancia detector/collimador = 7 mm

$E_m = 0,03831^*A_{corr} + 0,01$

Fondo : fuente Co60

**FIGURA 22**



**FIGURA 23**

