



Caracterización metrológica de un contador de pozo de NaI(Tl) para la estimación de la actividad, previo a mediciones de dosimetría in vitro de ^{131}I para pacientes de medicina nuclear en Nicaragua, período 2022-2023

Fernando José López González

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua

UNAN-Managua.

<https://orcid.org/0000-0002-3777-4240>

flopez@unan.edu.ni

Yasser Alberto Meynard Valverde

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua

UNAN-Managua.

<https://orcid.org/0000-0002-1243-9905>

ymeynard@unan.edu.ni

Teresa Isabel Cuadra Díaz

Salud Integral, S.A.

<https://orcid.org/0009-0005-3943-9066>

terecuadra@hotmail.com

Elioth Hurtado Escobar

Salud Integral, S.A.

<https://orcid.org/0009-0009-7531-7516>

ehurtado@hospitalsaludintegral.com.ni

Enviado el 22 de marzo, 2024 / Aceptado el 12 de diciembre, 2024

<https://doi.org/10.5377/rtu.v14i39.20052>

Palabras clave: Medicina nuclear, dosimetría in vitro, caracterización.

RESUMEN

Esta investigación¹ surgió como una necesidad de garantizar a la población nicaragüense la calidad de la salud según el Plan de lucha contra la pobreza y el desarrollo humano del 2022-2026. Este trabajo fue orientado hacia la dosimetría de pacientes de medicina nuclear a nivel nacional tratados con ¹³¹I (yodo). El objetivo fue caracterizar un contador de pozo de NaI(Tl) para medir la actividad en sangre del paciente para estimar las dosis en médula ósea u otros órganos. Se utilizó como patrón una muestra de yodo que fue medida en un contador de GeHp para lograr trazabilidad a patrones internacionales. El estudio fue de carácter transversal y se enfocó en encontrar la correlación entre el estímulo de entrada (radiación gamma) y la respuesta de salida del detector, medida en tasa de conteo kCPS (CPS, Counts per Second). Adicionalmente, se estudió la respuesta a la geometría de la muestra, su energía y la concentración. La sensibilidad obtenida fue 0.3667 kCPS/kBq del valor del patrón medido en kBq. Este resultado implica que, utilizando el método de ensayo de esta investigación, por cada muestra de yodo a la que se realiza un conteo (kCPS), al dividir por la sensibilidad, se obtiene el valor de la actividad en kBq y le corresponde una incertidumbre (combinada) estimada menor al 10% del valor medido de la actividad, partiendo del hecho que, para la calibración, la incertidumbre del patrón es 5%, lo cual es metrológicamente aceptable para la trazabilidad. En resumen, los hallazgos indican que el detector utilizado posee la exactitud necesaria para su uso en la determinación de actividades para cálculos de dosis en médula ósea u órganos de interés a través de software de acceso libre.

Metrological characterization of a NaI(Tl) well counter for activity estimation, prior to ¹³¹I In Vitro Dosimetry measurements for Nuclear Medicine patients in Nicaragua, year timeframe from 2022 to 2023.

Keywords: Nuclear Medicine, In Vitro Dosimetry, Characterization

ABSTRACT

This research arose as a need to guarantee the quality of health to the Nicaraguan population according to the Plan to combat poverty and human development for 2022-2026. This research was focused on the dosimetry of nuclear medicine patients nationwide treated with ¹³¹I. The objective was to metrologically characterize a NaI(Tl) well counter to measure

1. Caracterización metrológica de un contador de pozo de NaI(Tl) para la estimación de la actividad, previo a mediciones de Dosimetría in Vitro de ¹³¹I para pacientes de Medicina Nuclear en Nicaragua, período 2022-2023. Aplicación de fondos concursables del CNU. Área/Línea de investigación de la convocatoria CNU: 4) Salud / Prevención de enfermedades. Líneas de investigación institucionales: 2) Salud Pública, 2.1) Promoción de la salud y prevención de enfermedades. Proyecto Financiado por fondos concursables CNU, inicio en 2024-01-08 y finalizó en 2024-10-31.

the activity in the patient's blood to estimate doses in bone marrow or other organs. An iodine sample that was measured in a HPGe counter was used as a standard to achieve traceability to international standards. The study was cross-sectional in nature and focused on finding the correlation between the input stimulus (gamma radiation) and the output response of the well counter, measured in count rate kCPS (CPS, Counts per Second). Additionally, the response to the geometry of the sample, its energy and concentration was studied. The sensitivity obtained was 36.67% of the standard value measured in kBq. This result implies that, using the test method of this research, for each iodine sample subjected to counting (kCPS), when divided by the sensitivity, the activity value in kBq is obtained, with an estimated (combined) uncertainty of less than 10% of the measured activity value. This is based on the fact that for calibration, the uncertainty of the standard is 5%, which is metrologically acceptable for traceability. In summary, the findings indicate that the well counter used in this research has the necessary accuracy for its use in determining activities for dose calculations in bone marrow or other organs of interest through free access software.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge en respuesta a la necesidad actual de conocer las dosis en médula ósea que recibe el paciente tras un tratamiento de Iodo radiactivo para un determinado tratamiento específico y por lo tanto es crucial para la toma de decisiones en cuanto a nuevos procedimientos. En cuanto a la determinación de la dosis, ya hay experiencia a nivel mundial y también en la región centroamericana (Mora-Ramírez, 2010). Adicionalmente a esta situación se presentan distintos tipos de pacientes y por lo tanto se producen variantes en cuanto a enfermedades concomitantes que limitan el proceso de repetición de la dosis debido a estados metastásicos del paciente. En este sentido es importante saber que órganos podrían ser irradiados que puedan tener un proceso de este tipo y por tanto evaluar la dosis es muy importante y es necesario de algoritmos o programas de acceso libre para efectuar cálculos (Chavin, 2020). El problema de evaluar la dosis a un tejido u órgano es complejo y por tal razón es importante tomar en cuenta aspectos relacionados con tipo de paciente es decir si es pediátrico o adulto y también en términos de otros padecimientos que pueda tener el paciente dado que esto puede cambiar la biocinética del paciente y por ende el cálculo de dosis también cambiará, incluso el volumen de sangre en determinado tejido es muy diferente a otro (ICRP, 2007).

MATERIAL Y MÉTODO

De acuerdo al método de investigación el presente estudio es experimental y según el nivel inicial de profundidad del conocimiento es descriptivo. De acuerdo a la clasificación de Hernández & Mendoza (2018), el tipo de estudio es correlacional. De acuerdo, al tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la información, el estudio es prospectivo, por el período y

secuencia del estudio es transversal y según el análisis y alcance de los resultados el estudio es analítico de causa-efecto y predictivo.

Por tratarse de una investigación de un área aplicada de la física pura, el procedimiento es experimental en su fase de medición y este procedimiento se describe brevemente como sigue:

1. Estimación de la actividad de la fuente de referencia (^{131}I) en un contador de GeHp
2. Determinación de la eficiencia del detector en relación a la fuente de referencia
3. Análisis de la respuesta del detector en función del volumen de la muestra
4. Análisis de la linealidad, repetibilidad y reproducibilidad del detector para un volumen de muestra de 2mL

Para la caracterización del contador de pozo de NaI(Tl), se pretende determinar la Linealidad, Repetibilidad y Reproducibilidad del mismo. A continuación, se realiza la Calibración utilizando la fuente de referencia de ^{133}Ba , se estudiará el fondo (Blanco), la respuesta a la geometría y la Respuesta energética del detector en función del ^{133}Ba y el ^{131}I . Los datos y resultados obtenidos de estas pruebas se anotarán en la “Ficha de recolección de datos de la caracterización del contador de pozo de NaI(Tl)”. En esta parte como no fue posible obtener una fuente de Ba-133 patrón se sustituyó por una muestra de I -131 medida en un detector HPGe (Detector de Germanio Hiperpuro) para obtener trazabilidad a un equipo calibrado.

Luego, se procedió a medir muestras de agua destilada en tubos de ensayos de 5ml con contenido de ^{131}I utilizando el contador de pozo de NaI(Tl). Con el Factor de Calibración se obtiene el valor de la Actividad [Bq] desconocida y se confirma la confiabilidad del Factor de Calibración a través de la cercanía de los resultados y la estimación de la incertidumbre de los resultados obtenidos.

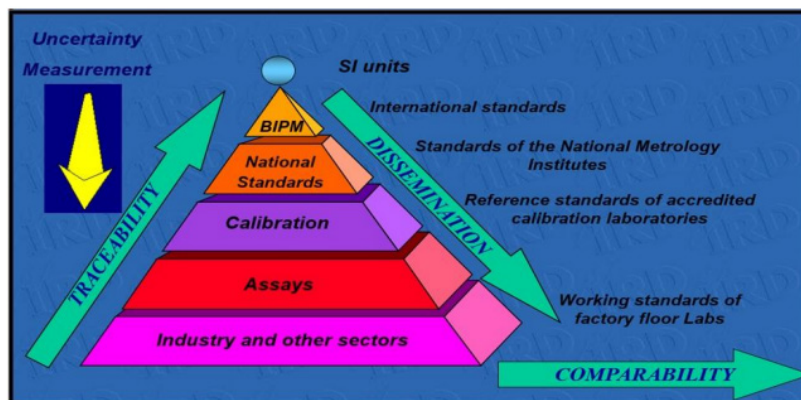
La confiabilidad y validez de instrumentos se hará a través del análisis de la información solicitada, el cumplimiento de las normas relativas y un análisis exhaustivo de las variables relacionadas con las fichas de recolección de datos o protocolos respectivos, para obtener la mayor confiabilidad se deberá tomar en cuenta cada uno de los parámetros para evitar la invalidación de los resultados por la no completitud de la información. Se debe evitar el rechazo de un instrumento y solo en casos fortuitos estos podrán ser anulados para no validar los resultados.

En la metrología a nivel mundial se conoce que la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM por sus siglas en francés) es quien vela por el desarrollo de patrones y de las intercomparaciones entre laboratorios nacionales con el fin de garantizar la trazabilidad. Desde hace más de un siglo Nicaragua ha usado el sistema métrico decimal y a partir de 1996 el Sistema Internacional de Unidades (SI), esto tras la aprobación de la ley 222 sobre metrología (Asamblea

Nacional de Nicaragua, 1991). Se menciona esto porque la trazabilidad va en dirección de lo que el BIPM establece, sin embargo, hay diferentes caminos para llegar y uno de ellos son otros organismos que poseen el mismo nivel jerárquico con BIPM.

Figura 1

Trazabilidad Metrológica: Jerarquía del sistema metrológico



Nota: Según la Figura 1, se puede observar en la cúspide de la pirámide al BIPM el de mayor exactitud y luego hacia abajo otros laboratorios como los nacionales, los de calibración, ensayo etc. Se observa que a medida que se da la disseminación de la unidad se aumenta en incertidumbre, es decir, decrece la exactitud. Tomado de da Cruz (2020).

Bajo la filosofía anterior el primer objetivo fue lograr la trazabilidad a un valor conocido. Primeramente, se consideró el uso de una fuente de ^{133}Ba de producción extranjera, pero no fue posible por temas de carácter logístico. Por esa razón, para lograr la trazabilidad, se utilizó una muestra de ^{131}I medida con un contador de GeHp ubicado en el Centro de Investigación para los Recursos Acuáticos (CIRA).

Se consideró colocar una cantidad de alrededor de 0.3MBq en un tubo de ensayo con cierre de rosca para evitar la fuga del material volátil. Para preparar esta cantidad el técnico diluyó una muestra de ^{131}I en 20 ml de agua destilada y luego se extrajo con jeringa 2 ml en el tubo de ensayo marcado hasta completar por goteo 2ml de volumen. Este tubo fue trasladado en un contenedor cerrado al centro donde se hallaba el detector de GeHp para su medición.

Método de conteo y determinación de la actividad de referencia con equipo GeHp

Calibración del contador GeHp

El contador fue previamente calibrado por el fabricante a través de un software que utiliza el método numérico de monte Carlos para la calibración. Este detector que usa el contador fue caracterizado en fábrica previo a su llegada al país.

Corrección por ajuste geométrico

A continuación, se efectuaron los ajustes de parámetros geométricos con el tubo de ensayo a probar es decir fueron medidas las dimensiones del mismo.

Corrección por fondo (o blanco)

Se midió días anteriores por al menos tres días sin ninguna muestra para obtener el fondo natural de radiación y así discriminar el valor real de la muestra de interés.

Método de conteo

Se realizó un conteo por unos 400 segundo y se efectuó una segunda medición de control para ver los niveles de incertidumbre y de repetibilidad. El software del equipo da el mensurando y su incertidumbre de forma automática. No hay intervención del técnico en los resultados que arroja el equipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediciones para la determinación del Factor de Calibración (Eficiencia del detector)

Para la determinación del Factor de Calibración, se utilizaron viales conteniendo únicamente agua destilada para obtener el valor de fondo natural, para volúmenes de 1ml, 2ml, 3ml, 4ml y 4.5ml. Luego, se utilizaron otros viales (de 1, 2 y 3ml), con una mezcla de agua destilada como solvente y ¹³¹I en forma líquida para obtener el Factor de Calibración FC.

Según la ecuación para la determinación del Factor de Calibración (ecuación 1)

$$FC = \frac{N_n[kCPS]}{A[kBq]} \quad \text{Ec.1}$$

Donde $\dot{N}_n[kCPS]$ es la tasa de conteo.

Los resultados obtenidos para este parámetro se muestran en la Tabla 1. Adicionalmente, se muestran los valores de incertidumbre (U_{exp}) (ver ecuación 4)

$$u_c(FC) = \sqrt{\frac{1}{A_{ref}^2} u^2(\dot{N}_{nref}) + \frac{N_{nref}^2}{A_{ref}^4} u^2(A_{ref})} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde $u_c(FC)$ es la incertidumbre del factor de calibración, $u(\dot{N}_{nref})$ es la incertidumbre de la tasa de conteo de la fuente de referencia. El valor de Actividad de la fuente de referencia fue determinado con un contador de GeHp calibrado en el 2023 lo cual permite obtener trazabilidad.

Tabla 1

Valor de la eficiencia obtenido y parámetros asociados

Parámetro o magnitud	Valor	U_{exp}	k
Volumen de la muestra (V) [ml]	2.0	± 0.2	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
Fondo natural Total [CPS]	5.454	± 0.042	$\frac{1}{\sqrt{10}}$
Actividad (A) de la fuente de referencia (^{131}I) [kBq] al 2023-07-07	143.0	± 3.0	1
Tasa de conteo neto ($\dot{N}_{\text{neto}}$) [kCPS]	52.44	± 0.02	1
Eficiencia (FC) [kCPS/kBq]	0.3667	± 0.0151	2

Nota: Esta tabla muestra el valor de Eficiencia obtenido (0.3667kCPS/kBq) es el factor que permite convertir la respuesta del detector, tasa de conteo $\dot{N}$ dada en [kCPS], en Actividad (A) medida en [kBq].

Cabe mencionar que el detector no tenía valor para el ^{131}I en la librería del software, sólo para algunos isótopos y el más común (^{137}Cs). El anexo A muestra el espectro del radiofármaco ^{131}I detectado.

Características metrológicas del detector

Al concluir las mediciones de la caracterización metrológicas del detector de NaI(Tl) utilizando las muestras con agua destilada, se logró determinar los siguientes parámetros metrológicos del equipo (Tabla 2).

Tabla 2

Resumen de características metrológicas del detector

Característica metrológica	Resultado obtenido	Resultado esperado
Alcance de medición [kBq]	Entre 9.923 y 143.0	No aplica
Linealidad	$R^2 = 1$	$R^2 \approx 1$
Repetibilidad	$CV < 1\%$	CV (según fabricante) $\leq 5\%$
Reproducibilidad	$CV < 1\%$	CV (según fabricante) $\leq 5\%$
Respuesta energética [keV]	Entre 364.8 y 367.6	364
Respuesta geométrica	Entre 0.959 y 1.192	1.000 (ideal)

Nota: En la tabla 2 se observa que los resultados obtenidos están por debajo de los esperados. Esto implica que equipo presenta estas características dentro del rango y valores aceptables. En el caso de la dependencia energética con el detector, se observa que, según la librería del software, la energía para una emisión de 80% es de 364keV (energía de interés) por aportar en los pacientes la mayor cantidad de dosis debido a la energía de los fotones.

No obstante, de las lecturas y los espectros del detector de pozo, se observa la desviación desde 364.8keV hasta 367.6keV de la energía (anexo B). Esto significa que hay un desplazamiento por lo cual, en caso de haber mezclas de diferentes radioisótopos, se podría superponer un espectro con otro, pero, si los isótopos a medir son solo ^{131}I ó ^{137}Cs , están lo suficientemente separados como para identificarlos, es decir el técnico debe tener entrenamiento distinguiendo espectros de diferentes isótopos.

En cuanto a la dependencia geométrica, se observa que está alrededor de 1.000 para 2 y 3 ml, no así para 1ml (anexo C). De aquí, se infiere que la determinación de la misma actividad para las tres muestras debe ser obtenida por método gravimétrico y no solo volumétrico.

Finalmente, en lo relacionado a la linealidad, repetibilidad y reproducibilidad del detector, el equipo muestra un comportamiento lineal dado que el coeficiente de correlación de modelo lineal (R^2) es igual 1 por lo cual el ajuste es lineal. Asimismo, los coeficientes de variación (CV) para la repetibilidad y reproducibilidad son menores a 1%, valores que son menores al 5% recomendados por el fabricante, lo cual indica que cumple con los requisitos de operación del fabricante (anexo D).

Limitaciones de la investigación

Inicialmente, se propuso calibrar el detector con una fuente de ^{133}Ba para asegurar la trazabilidad a lo largo de 20 años de vida útil de la fuente. Sin embargo, no se pudo completar el proceso de compra de dicha fuente debido a que el proveedor no cumplió con los requisitos de oferta exigidos por el área correspondiente.

Además, a como se mencionó en la sección anterior, para la evaluación de la respuesta geométrica del detector, la preparación de la muestra para 1ml la Actividad fue mayor que para 2 y 3ml debido a que el método volumétrico de extracción de la mezcla no es sensible a cambios de la Actividad por inexactitud en la medida de masa.

Finalmente, no se pudo realizar una Inter comparación a como inicialmente estaba planteado en los objetivos de la investigación, puesto que el equipo con el que se obtuvo la trazabilidad no puede ser usado para dicho fin a la vez y por lo tanto debe ser utilizado otro diferente y a nivel nacional solo existe uno de este tipo de equipo en el país.

Resultados obtenidos de otras investigaciones

En los estudios revisados, los autores Santacruz, et al. (2017) y Ramírez, et al. (2010) reportan los valores de dosis en médula ósea directamente y no se detalla la calibración del equipo sino los resultados finales. Previo a realizar cálculos de dosis, se consideró importante la caracterización metrológica del equipo de medición y, por lo tanto, en esta etapa de una

investigación transversal, los resultados no son comparables directamente, pero coinciden en que se esperan medir actividades en los rangos que se han medido en esta investigación.

Tabla 3

Valores reportados en médula ósea por dos autores diferentes

Autores	Resultado
Candy Santacruz, Daniel Ocariz, Carlos Laterza (2017)	0,64 cGy/mCi
Erick Mora Ramírez, Patricia Mora Rodríguez, M. Salas Ramírez (2010)	0.582 Gy para una actividad administrada de 172.3 mCi

Es importante hacer notar que ellos han medido la actividad y determinado las dosis en médula ósea directamente. En este trabajo el nivel primario es establecer la calibración del instrumento y las características metrológicas para su futuro uso con muestras en sangre

Aplicación e implicación de los resultados obtenidos

Los resultados de la investigación demuestran que el método empleado es útil para establecer un procedimiento dentro de un sistema de gestión para desarrollar el ensayo de dosimetría de pacientes de medicina nuclear a nivel nacional.

Se demostró la robustez del detector de NaI(Tl) puesto que el equipo con el que cuenta el laboratorio y fue utilizado en esta investigación ha tenido 12 años de uso continuo y sus características metrológicas se conservan a un nivel aceptable.

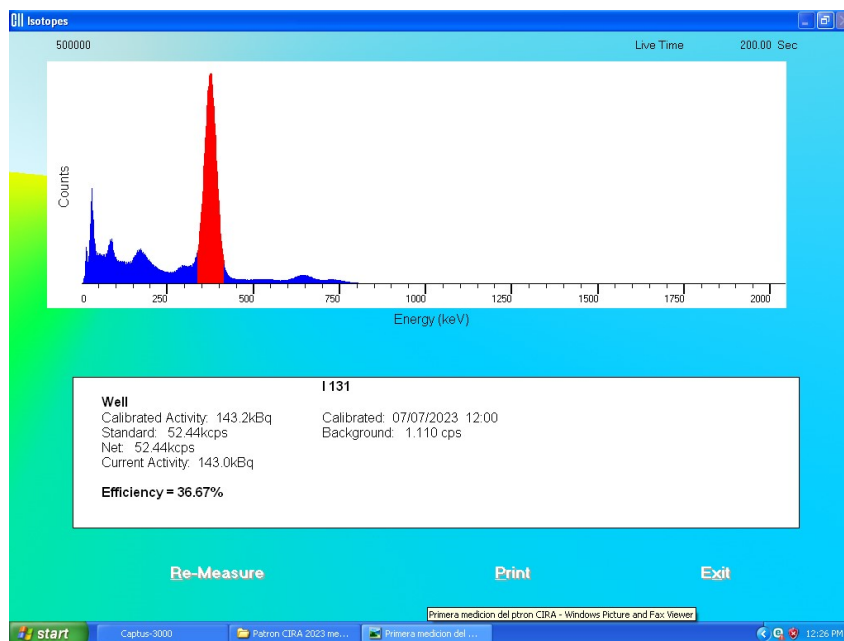
CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones extraídas de las evidencias:

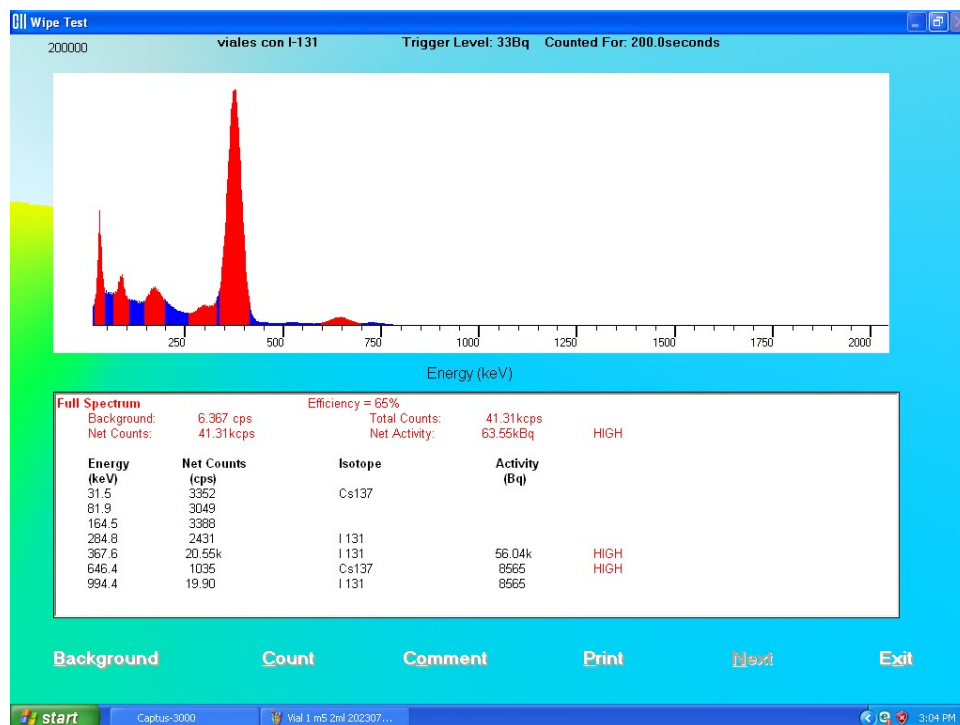
1. Se calibró el detector de pozo con una fuente de ^{131}I y se logró trazabilidad a través de un detector de GeHp.
2. Las características metrológicas del equipo tales como su reproducibilidad, repetibilidad, respuesta energética y geométrica fueron determinadas con resultados satisfactorios.
3. Se demostró la aptitud del detector para ser usado en determinaciones de actividad para muestras en agua destilada las cuales se podrían extrapolar a sangre.
4. Se desarrolló y validó una metodología de la caracterización metrológica del contador de pozo de NaI(Tl) como fundamento para la Dosimetría in Vitro de ^{131}I para pacientes de Medicina Nuclear en Nicaragua.

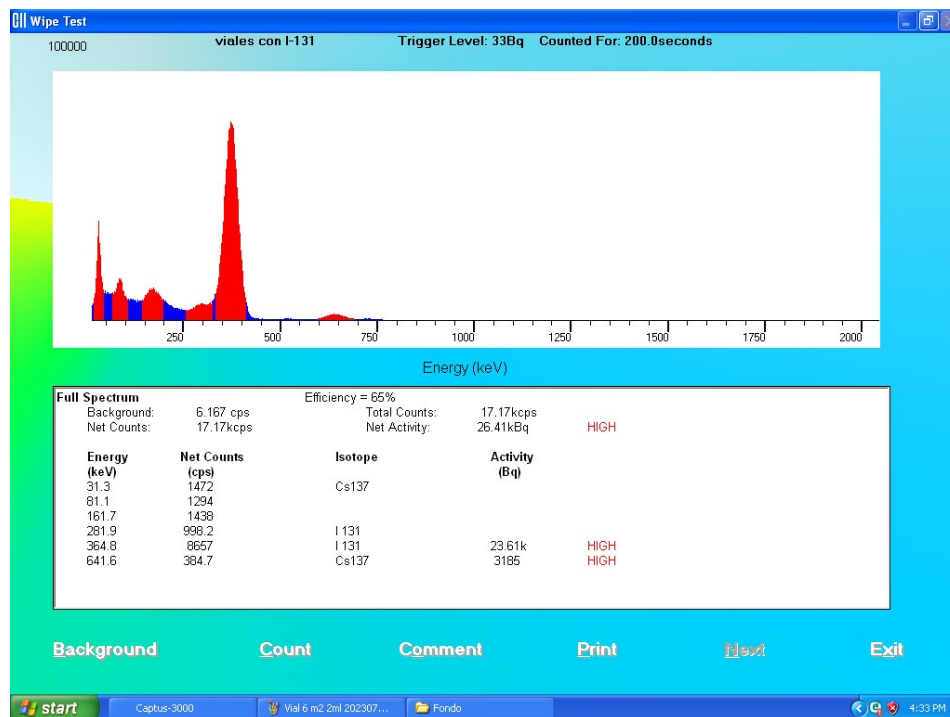
ANEXO A

Captura de pantalla de la Eficiencia obtenida por el equipo

**ANEXO B**

Espectros de menor y mayor energía detectados

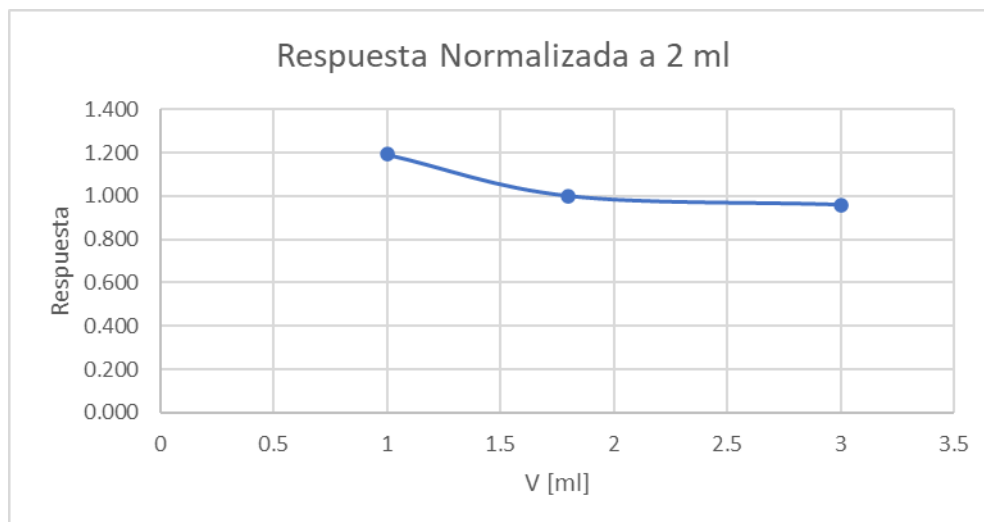




ANEXO C

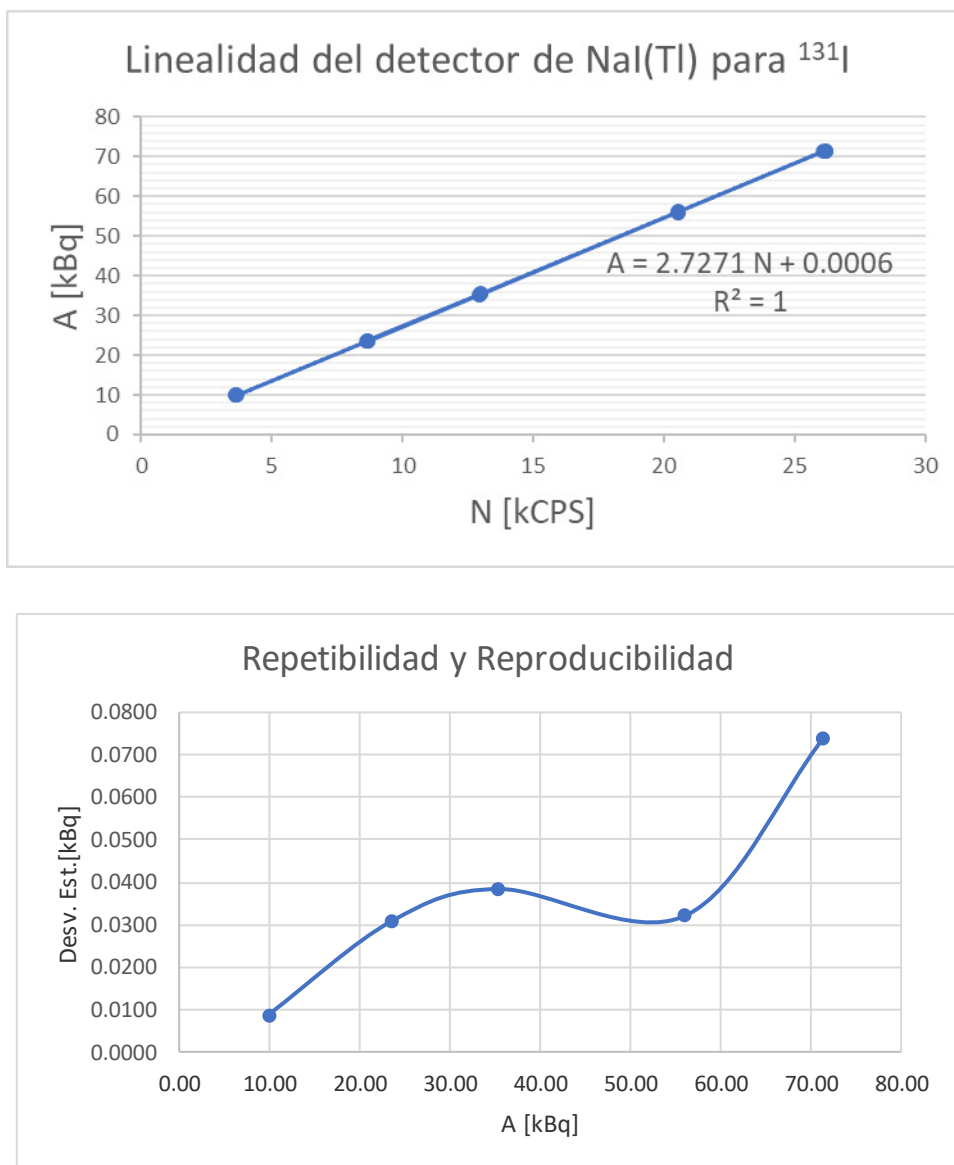
Respuesta geométrica del detector

n	V (ml)	N (kC)	A (kBq)	Concentración (kBq/ml)	R
1	1	6087.59	83.16	83.2	1.192
2	1.8	5106.11	69.76	38.8	1.000
3	3	4897.27	66.90	22.3	0.959



ANEXO D

Linealidad, repetibilidad y reproducibilidad del equipo



REFERENCIAS

- Asamblea Nacional de Nicaragua. (20 de noviembre del 2014) Ley 225, Ley sobre Metrología. [http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/\(\\$All\)/01FF321DC7019C1C06257DA200724263?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/($All)/01FF321DC7019C1C06257DA200724263?OpenDocument)
- Bureau International de Poids et Mesures (BIPM). (1997). Monographie BIPM-4: Activity Measurements with Ionization Chambers. Pavillon de Breteuil.
- Chavin. (2020). Open Dose: Open-Access Resource for Nuclear Medicine. Nuclear Medicine, 1514.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación. Ciudad de México, México: McGraw Hill Education.
- ICRP. (2007). Radiation Dose to Patients from Radiofarmaceuticals. Germany: Elsevier.
- ISO / BIPM. (septiembre de 2008). BIPM.org. Obtenido de bipm.org: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6
- Mora-Ramírez, E. (2010). Estimacion de Dosis Absorbida en Pacientes que Reciben Tratamiento Terapeuticos con I-131 por Cancer de Tiroides. Researchgate, 1-7.
- Santacruz, C. (2017). Dosis absorbida de iodo-131 en médula ósea, en. Paraguay: Instituto Coda Thompson.