

SIMULACIÓN DE IMÁGENES EN CÁMARA GAMMA/SPECT MEDIANTE MÉTODOS CONVOLUTIVOS CON FINES DIDÁCTICOS

Strocovsky, S. G.^{1,2}, Aizcorbe, J.,^{1,2} 1, 2 y Furnari, J. C. ¹

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica - Gerencia de Área Aplicaciones de la
Tecnología Nuclear- Centro Atómico Ezeiza- Sector Capacitación Interna

² Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson

RESUMEN

La enseñanza de los principios en los que se basan los sistemas de imágenes en Medicina Nuclear constituye un objetivo fundamental en la formación de un amplio espectro de profesionales del área. Como parte de las estrategias didácticas propuestas, se diseñó e implementó una práctica experimental para comprender de manera sencilla y accesible los principios de formación de imágenes, haciendo hincapié en el papel del colimador. Se implementó para esto un dispositivo experimental, junto con un software que permite la reconstrucción de las imágenes. Conjuntamente se desarrolló otra herramienta de software, presentada en este trabajo, que realiza la simulación computacional del proceso de adquisición de imágenes en la práctica experimental y sirve de soporte, completando y reforzando los conocimientos adquiridos. Estas simulaciones se hacen a partir de un modelo que utiliza aproximaciones geométricas y la operación de convolución. Las imágenes simuladas representan el registro de las cuentas en cada ubicación en una escala de grises. Las aproximaciones del modelo permiten simplificar el problema real, para enfocar la atención del alumno en los principios de formación de las imágenes, reduciendo la influencia de errores estadísticos. Variando parámetros como el ancho de la rendija del colimador, su espesor, la intensidad y homogeneidad de las fuentes, o las distancias entre el colimador y la fuente o entre el colimador y el detector, se obtienen diferentes imágenes, lo que permite comparar los resultados y analizar la influencia de cada uno de ellos en la formación de la imagen final. También permite estudiar la resolución espacial del sistema y las variables de las cuales depende. Nuestros resultados muestran que el uso de estas herramientas permite a los alumnos comprender más profundamente los principios fundamentales de la formación de imágenes, como punto de partida en la adquisición de conocimientos en sistemas de imágenes en Medicina Nuclear

1. INTRODUCCIÓN

La comprensión de los principios físicos en los que se basa la formación de imágenes en sistemas Cámara Gamma / SPECT es una base imprescindible para la formación del personal que se desempeñe en centros y servicios de diagnóstico de Medicina Nuclear. La gran diversidad de profesionales que necesitan formarse en esta área (médicos, biólogos, químicos, ingenieros, técnicos), hace muchas veces complejo el dictado de estos temas en los cursos de capacitación.

La complejidad del tema hace necesario contar con herramientas sencillas que permitan a los alumnos interiorizarse en primer término con aspectos conceptuales de la formación de imágenes.

Desde el Sector Capacitación Interna del Centro Atómico Ezeiza (Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson), se propuso e implementó oportunamente una práctica experimental que permite a los alumnos comprender mejor algunos de los aspectos de los principios de formación de imágenes en Cámara Gamma / SPECT, acerca de los principios de la colimación y sus parámetros, junto con otros aspectos que influyen en la calidad de las imágenes y la

separación de imágenes de fuentes puntuales [1]. También se desarrolló una aplicación de software que permite trabajar el concepto de la adquisición de imágenes como una operación de convolución, cuya implementación y ejemplos se presenta en este trabajo. Es parte de las prácticas experimentales que se llevan adelante en el Curso de Metodología y Aplicación de Radionucleídos, en la Ingeniería Nuclear con Orientación en Aplicaciones, en la Tecnicatura Universitaria en Aplicaciones Nucleares (TUAN) que se ofrecen desde el Instituto Dan Bensinson, y en la Asignatura Radiaciones y Radioprotección de la Universidad Favaloro.

1.1 Sistema experimental de adquisición de imágenes

El sistema experimental propuesto para la práctica de principios de formación de imágenes se muestra en la Figura 1. Consiste en un bloque formador de imágenes (detector multicanal + colimador + fuentes + soporte con posiciones prefijadas) y una estación de procesamiento que recoge las señales del detector (placa de adquisición + analizador multicanal (MCA) + PC). El soporte permite ubicar las fuentes en posiciones prefijadas y establecer dos valores fijos de distancia fuente-colimador (d). Este soporte está construido con materiales de bajo Z (madera y acrílico) para minimizar la intensidad de las radiaciones secundarias (dispersión Compton y radiación de fluorescencia).

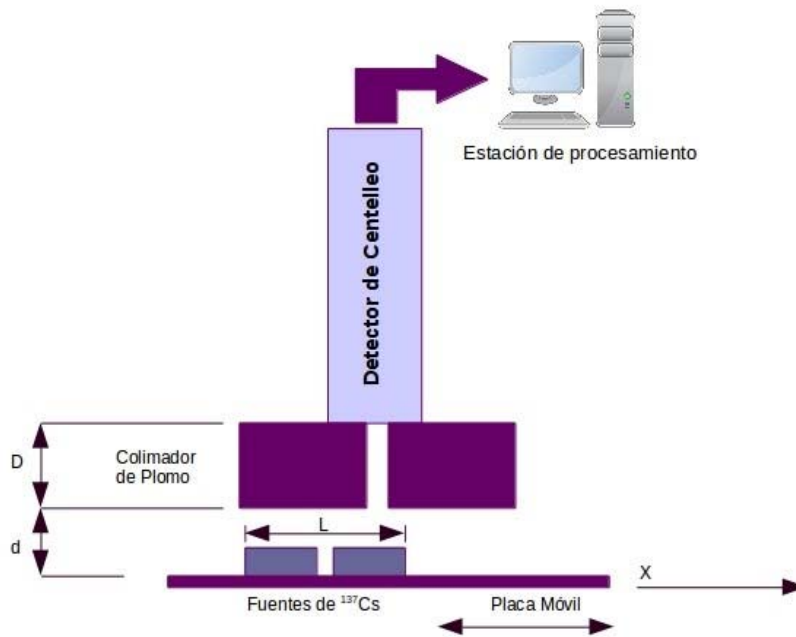


Figura 1: Esquema del puesto de trabajo para la práctica experimental. Extraído de [1]

El detector de centelleo es de cristal de INa(Tl) con cubierta hermética de aluminio. Frente al detector se ubican dos fuentes tipo gota en un soporte, ubicado en una placa móvil de acrílico que permite desplazamientos horizontales. La distancia entre las fuentes es fija. La placa móvil

está graduada y permite medir el desplazamiento horizontal del portafuentes (eje x en el esquema de la Figura 1).

El colimador consiste en dos ladrillos de plomo ubicados entre el detector y las fuentes. La separación entre ambos constituye la rendija del colimador. La distancia (d) entre las fuentes y el colimador tiene dos valores prefijados (fig. 1).

Durante el desarrollo de la práctica experimental se realizan mediciones del número de cuentas que conforman la región de interés (pico de absorción plena) al ir desplazando las fuentes y recorriendo la grilla de graduación del portafuentes. El número de cuentas que lleguen al detector depende de la posición relativa entre las fuentes y la rendija del colimador. De esta manera, el sistema constituye un scanner gamma 1D que permite obtener imágenes que muestran las variaciones de actividad en una muestra dada según una dirección predeterminada.

1.2 Formación de la imagen en el sistema experimental

Debido a la propagación en línea recta de los fotones en medios de baja interacción como el aire, pueden definirse los rayos de apertura angular máxima aceptados por la rendija del colimador (Figura 2). Se observan cuatro rayos límite que unen las posibles combinaciones de aristas: AC, BE, AE y BC. Estos rayos límites determinan sobre el eje de ubicación de las fuentes (x) las zonas 1, 2 y 3, con propiedades ópticas y geométricas bien diferenciadas y limitadas por los puntos X_1 , X_2 , X_3 , X_4 .

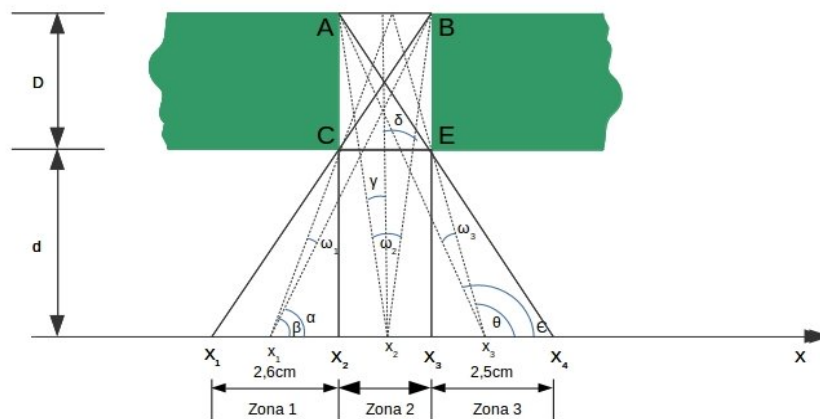


Figura 2: Imagen de una fuente puntual. Extraído de [1]

Si se ubica sobre el eje una fuente puntual gamma fuera de las zonas 1, 2 o 3 de la Figura 2, los fotones serán absorbidos por el material del colimador. Solamente atravesará la rendija cuando sea emitido desde alguna de estas zonas. Además, cada zona tiene un ángulo de apertura diferente, definido a partir de las intersecciones con las aristas del colimador.

Un detector colocado detrás del colimador registrará emisiones del intervalo $[X_1, X_4]$; es decir, la imagen registrada no es puntual si no un segmento de longitud $|X_4 - X_1|$ [1].

1.3 Adquisición de una imagen como operación de convolución

El proceso de adquisición de imágenes utilizado en la práctica experimental puede simularse computacionalmente mediante un modelo adecuado, utilizando aproximaciones geométricas y la operación de convolución. Este modelo ha sido detalladamente descrito en una publicación anterior [1].

Dicho modelo tiene en cuenta algunas aproximaciones. Por un lado, se asume que el problema es de naturaleza 2D y puede tratarse en un plano. Además, se considera solamente la propagación rectilínea de la radiación y su interacción por efecto fotoeléctrico con el material del colimador y el detector, sin tener en cuenta ningún efecto dispersivo.

Se considera una distribución arbitraria de actividad $A(x)$ que se desplaza lateralmente según el eje X , mediante la placa móvil, a intervalos idénticos a . En cada posición se registra el número de cuentas detectado. Así, la medición total consiste en el muestreo espacial 1D de la actividad, con intervalo de muestreo a .

En el caso de la simulación, la distribución de actividad se considera como una sucesión de n fuentes puntuales equidistantes y separadas entre si por la distancia de muestreo a . Por otro lado, la intensidad I_i de la fuente i -ésima, definida como el número de fotones emitidos por unidad de ángulo, será proporcional a la actividad A_i .

Debido a la emisión isotrópica de la fuente y a la presencia del colimador, solamente una fracción de esta intensidad llegará al detector. Esta fracción dependerá del ángulo ω_i subtendido por los 4 vértices A, B, C y E del colimador desde la posición x_i de la fuente i -ésima (ver figura 2).

Considerando las intensidades de todas las fuentes i , y además que debido al campo de visión finito del colimador, solamente las fuentes dentro de $[x_1, x_4]$ tendrán $\omega_i \neq 0$, puede demostrarse que el número total N_T de fotones que alcanzan el detector, durante un tiempo T , es:

$$N_T = \frac{T}{2\pi} \sum_{i=1}^m \omega_i I_i \quad (1)$$

$$[x_1, X_4]$$

Las expresiones para calcular ω_i están detalladas en [1].

Por otra parte, se definió un kernel K como una matriz de $1 \times m$ definida como la sucesión de ángulos ω_i subtendidos por el colimador desde la posición x_i de la fuente i -ésima, con $x_i \in [x_1, x_4]$, de la siguiente manera:

$$K = \frac{T}{2\pi} \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_m\} \quad (2)$$

Si se define una operación de convolución discreta 1D, entre I y el kernel K como:

$$N_T = I * K \quad (3)$$

$$[N_T]_i = \sum_{j=1}^m K_j I_{i+j-1}, 1 \leq i \leq n \quad m+1 \quad (4)$$

Puede decirse entonces que “el número de fotones N_T detectados por un detector perfecto cuando se realiza el conteo de fotones por muestreo (con intervalo a) mediante el desplazamiento rígido de la distribución de fuentes según el eje X, se puede simular; mediante la operación de convolución de la distribución de intensidad I con el kernel K” [1].

Así, puede obtenerse una imagen simulada de la distribución de la intensidad de la fuente, que es proporcional y por lo tanto representativa de la distribución de actividad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La aplicación de software, desarrollada en el entorno MATHEMATICA [2], simula el proceso de colimación y formación de imágenes mediante el modelo geométrico – convolutivo descrito en la sección anterior. Permite que el alumno pueda ensayar diversas configuraciones variando en un amplio rango el ancho de rendija y de la pared del colimador y la distancia fuente – colimador; también, construir una distribución de actividad arbitraria, teniendo la posibilidad de visualizar la imagen simulada y comprobar la resolución espacial de la configuración elegida.

Consta de cuatro módulos. En el primero, el usuario debe ingresar algunos parámetros: espesor y ancho de rendija del colimador, y distancia fuente-colimador.

Con los parámetros ingresados, en el segundo módulo se calcula el kernel K de la convolución en el intervalo $[X_1, X_4]$ (Figura 2). Para esto, se calcula el ángulo sólido subtendido por el colimador, desde una fuente puntual general ubicada en el intervalo $[X_1, X_4]$. Se grafica el kernel como el ángulo subtendido versus desplazamiento continuo de la fuente puntual.

En el tercer módulo se discretiza el kernel, considerando un determinado paso de avance (a) de la distribución de actividad, cuando se desplaza según el eje x. Se grafica el kernel discretizado, como el ángulo subtendido versus desplazamiento discreto de la fuente puntual.

En el cuarto módulo se solicita el ingreso de una distribución de actividad discreta, expresada como una lista de números enteros no negativos, donde cada número es proporcional a la intensidad de la fuente en la ubicación correspondiente en la lista. Se considera que dos posiciones consecutivas en la lista representan dos fuentes separadas por una distancia de paso a . Con los datos ingresados, se calcula la convolución de la distribución de actividad con el kernel calculado en el módulo anterior.

Finalmente, desde el programa se generan los gráficos de salida: Actividad en función del desplazamiento e imagen en escala de grises. A efectos comparativos, también se grafica el caso de colimación perfecta (colimador de espesor infinito y ancho de rendija tendiente a cero).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizó el programa desarrollado para simular la adquisición de imágenes en diversos escenarios. En primer término, se modificaron los parámetros geométricos: espesor y ancho de la rendija del colimador y distancia fuente – colimador. Se analizaron las diferencias en los kernels obtenidos y las imágenes simuladas.

Posteriormente, se simularon fuentes con variación de intensidad y ubicación de las fuentes, manteniendo constantes las condiciones geométricas.

3.1 Simulaciones variando las condiciones geométricas

En todos los casos, se simularon dos fuentes, una de 12 fuentes elementales y otra de 15, todos de intensidad 1, y separadas por 10 elementos. Cada elemento tiene una distancia de paso de 0.1.

En la figura 3 se muestran las fuentes simuladas en condiciones de colimador perfecto (espesor infinito y ancho de rendija cero).

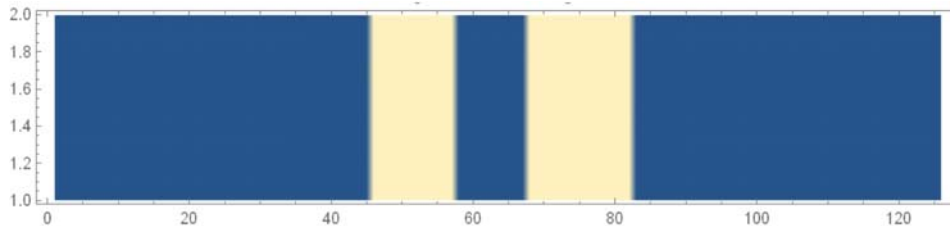
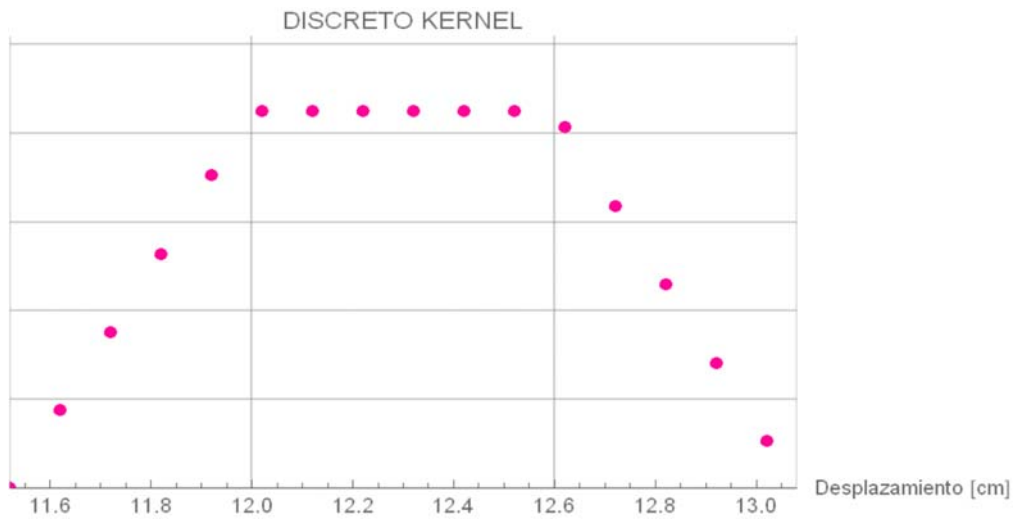
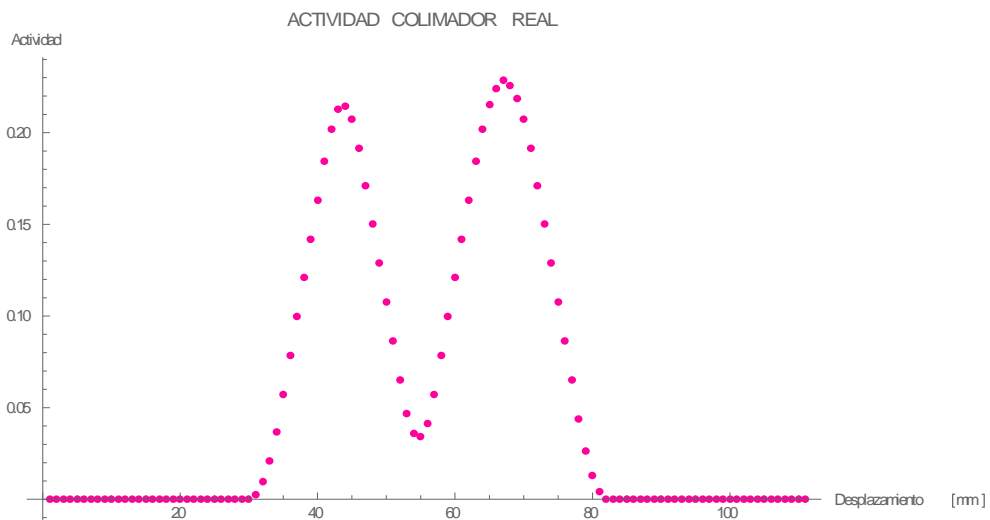


Figura 3. Fuentes simuladas con un colimador perfecto. Intensidad de cada fuente elemental: 1. Cantidad de elementos de la fuente: 12 (izquierda) y 15 (derecha). Distancia de paso entre elementos: 0.1.

Con esta fuente, se hicieron en primer lugar simulaciones considerando dos distancias colimador detector (4 cm y 8 cm) y dos anchos de rendija del colimador (0.3 y 0.6 cm). Estos valores son los implementados durante la práctica experimental. Si bien la aplicación tiene como fortaleza que permite simular condiciones que no pueden realizarse en la práctica experimental, se considera adecuado como primer acercamiento al software la réplica de las condiciones de la práctica. En todos los casos, el espesor del colimador se consideró de 5 cm.

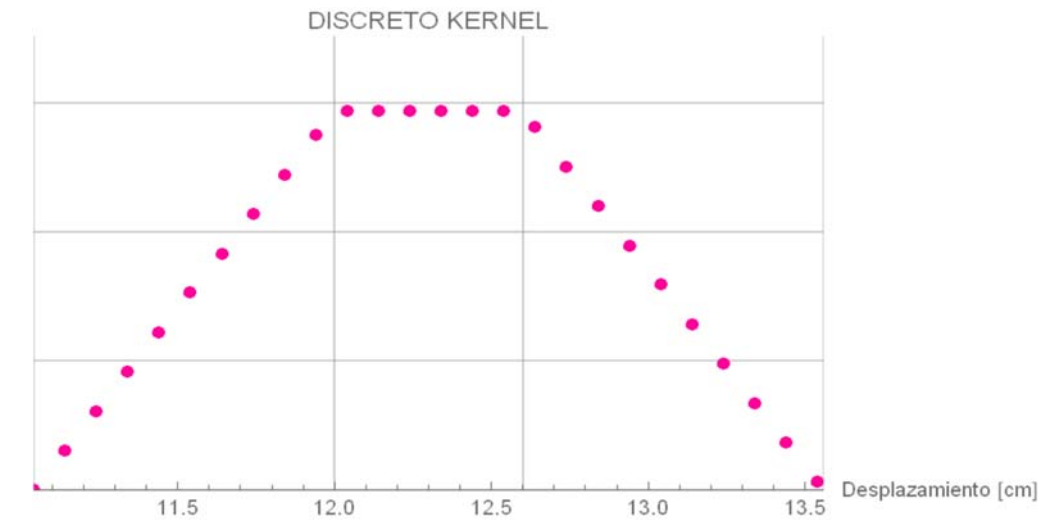


(a)

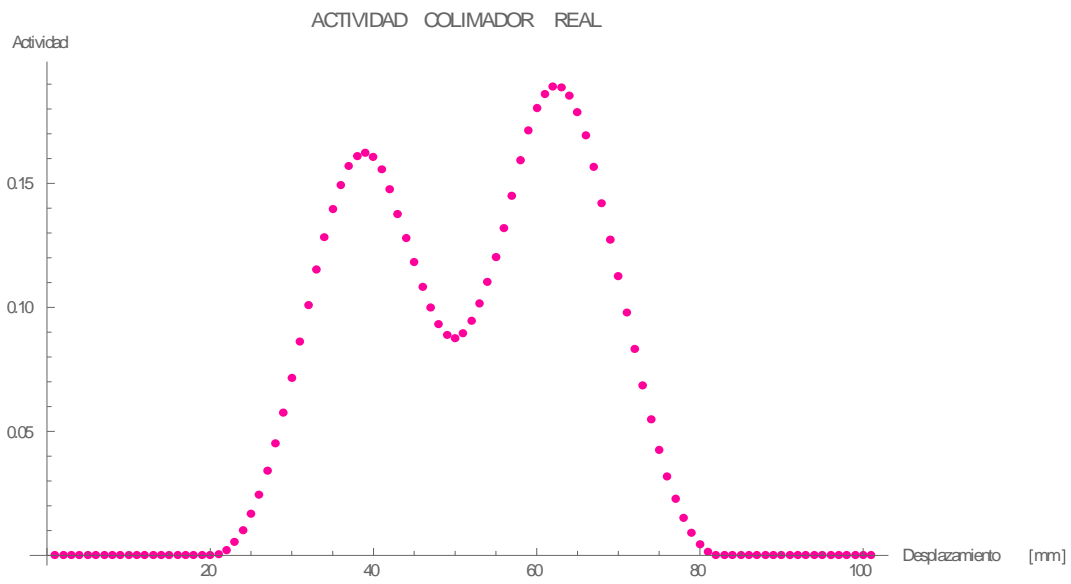


(b)

Figura 4. Resultados de la simulación de las fuentes con un colimador de 5 cm de espesor y ancho de rendija 0.6 cm. Distancia colimador-detector: 4 cm. Distancia de paso: 0.1 cm (a) kernel discreto (b) curva de actividad en función del desplazamiento

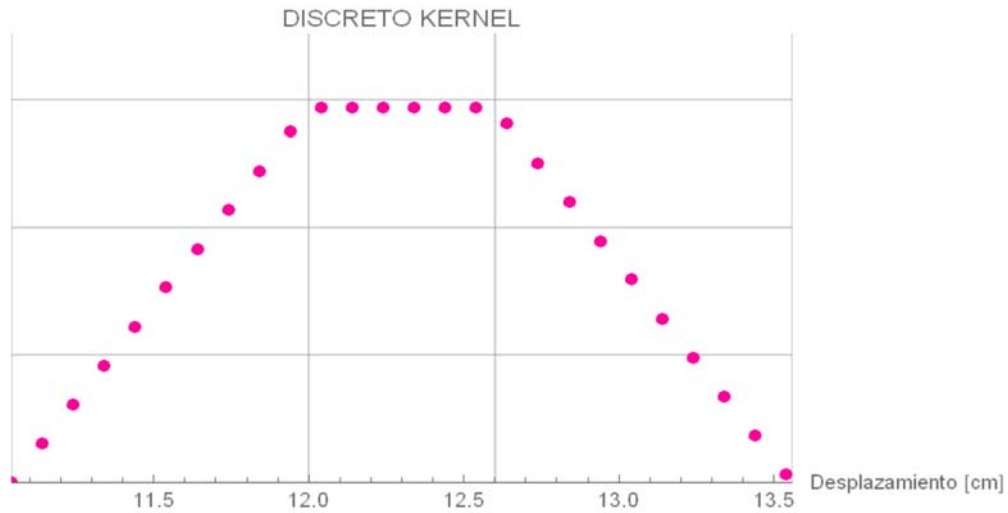


(a)

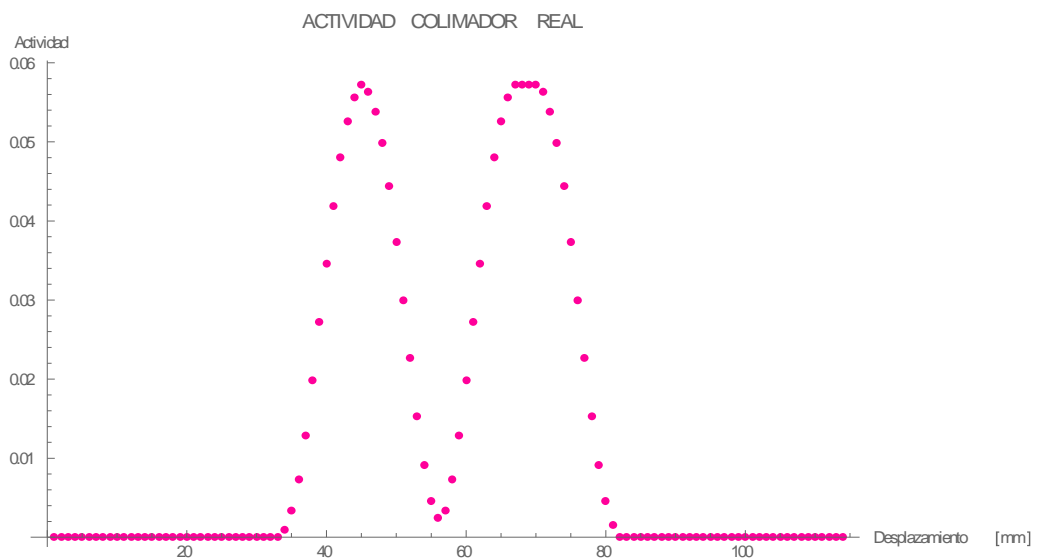


(b)

Figura 5. Resultados de la simulación de las fuentes con un colimador de 5 cm de espesor y ancho de rendija 0.6 cm. Distancia colimador-detector: 8 cm. Distancia de paso: 0.1 cm (a) kernel discreto (b) curva de actividad en función del desplazamiento



(a)



(b)

Figura 6. Resultados de la simulación de las fuentes con un colimador de 5 cm de espesor y ancho de rendija 0.3 cm. Distancia colimador-detector: 8 cm. Distancia de paso: 0.1 cm (a) kernel discreto (b) curva de actividad en función del desplazamiento

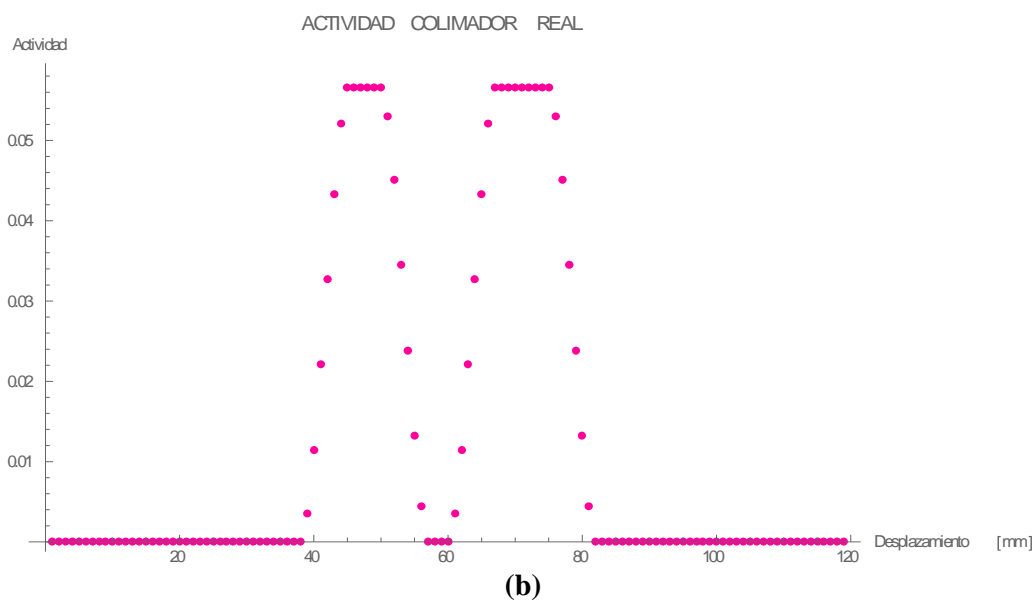
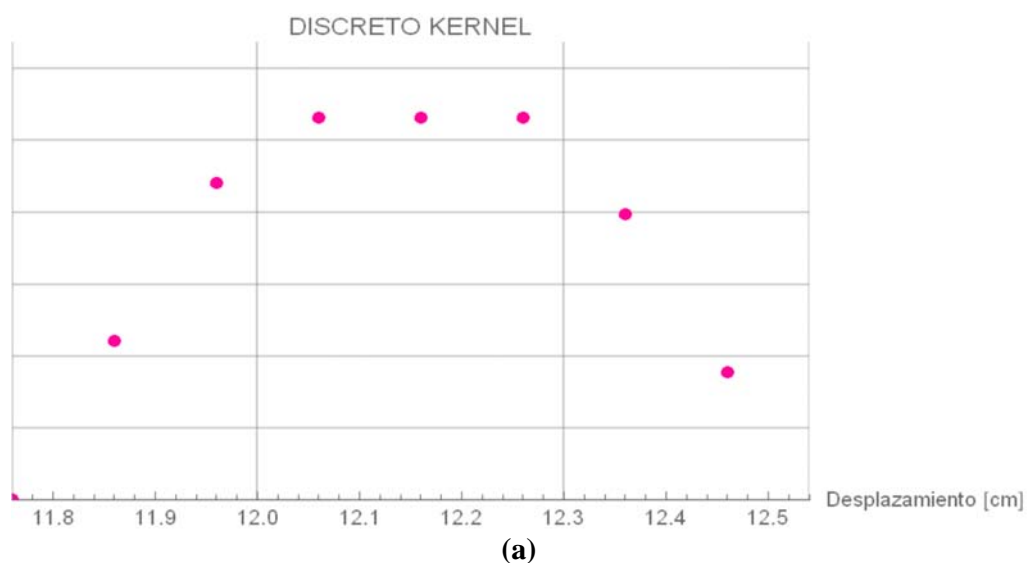


Figura 7. Resultados de la simulación de las fuentes con un colimador de 5 cm de espesor y ancho de rendija 0.3 cm. Distancia colimador-detector: 4 cm. Distancia de paso: 0.1 cm (a) kernel discreto (b) curva de actividad en función del desplazamiento

En primer término, puede decirse que los resultados permiten a los alumnos analizar la construcción del kernel, teniendo una mayor comprensión de cómo influyen en él cambios en la distancia detector - colimador y el ancho de la rendija del colimador.

Por otra parte, a partir de las simulaciones pueden analizarse las curvas de actividad en función del desplazamiento, de modo de poder discutir cómo afectan a la formación de las imágenes los parámetros modificados. Con los resultados obtenidos, los alumnos pueden comprender mejor conceptos relacionados con la formación y la calidad de las imágenes, y discutir acerca del proceso de adquisición. En un análisis posterior podrían también, siguiendo algún criterio, hacer cálculos para definir la resolución espacial de las imágenes simuladas.

También pueden analizarse los cambios en la cantidad de cuentas que contribuyen a la formación de las imágenes en cada caso, y discutir la relación entre estos valores y la resolución espacial.

Posteriormente, se hicieron simulaciones, con valores fijos de distancia detector-colimador (4 cm) y rendija del colimador (0.3 cm), variando el espesor del colimador. El valor de los parámetros que se dejan constantes se definieron en función de tener las mejores condiciones de resolución espacial [1]. La variación de este parámetro no es posible en la práctica experimental. Los resultados se muestran en las figuras 8 y 9.

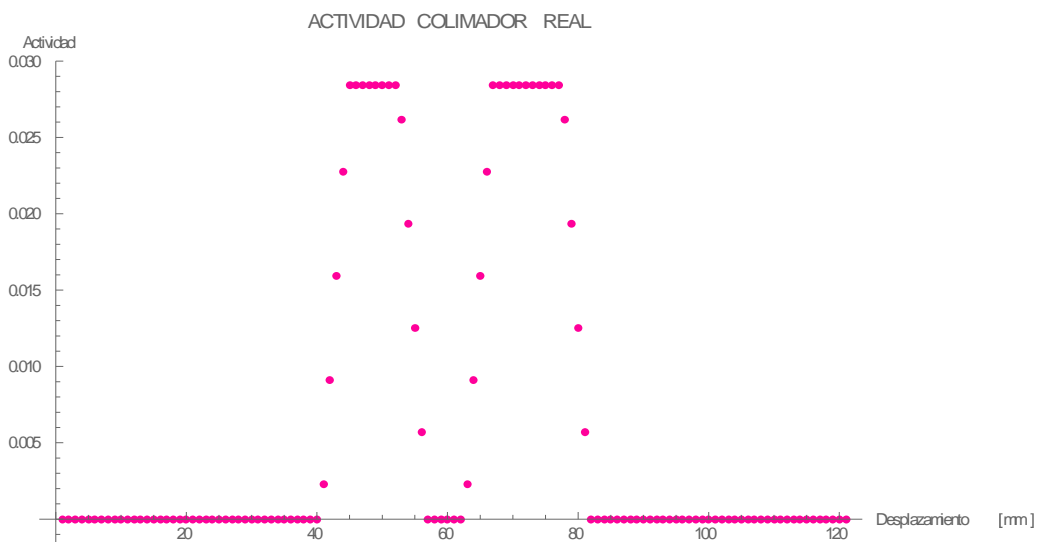


Figura 8. Resultados de la simulación de las fuentes, considerando una distancia colimador-detector de 4 cm y un ancho de rendija de 0.3 cm. Distancia de paso: 0.1 cm. Espesor del colimador: 10 cm. Curva de actividad en función del desplazamiento

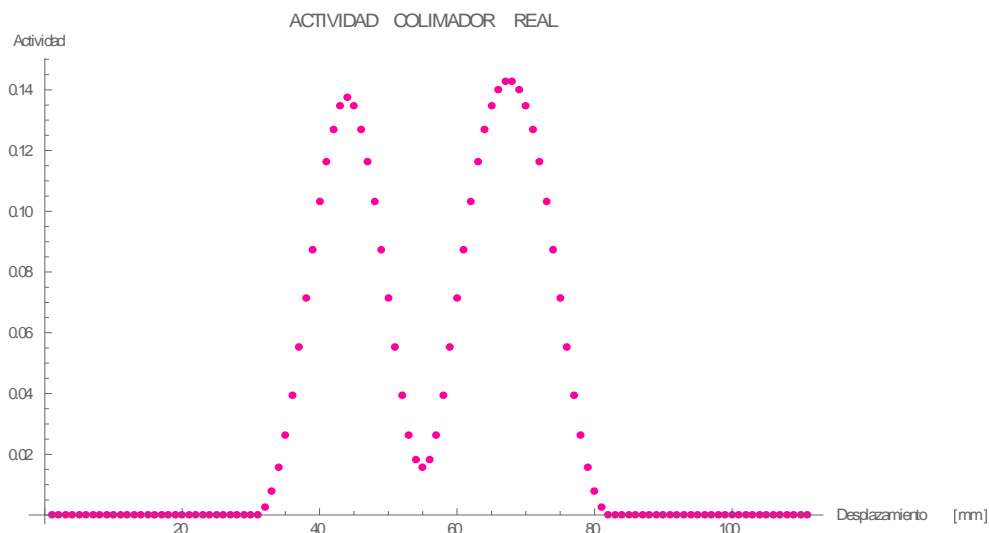


Figura 9. Resultados de la simulación de las fuentes, considerando una distancia colimador-detector de 4 cm y un ancho de rendija de 0.3 cm. Distancia de paso: 0.1 cm. Espesor del colimador: 2 cm. Curva de actividad en función del desplazamiento

Comparando los resultados que se muestran en las figuras 7, 8 y 9, los alumnos pueden analizar cómo influye el espesor del colimador en la formación de la imagen, en lo que refiere a aspectos como la resolución espacial y la eficiencia de detección. Sin embargo, se debe ser cuidadoso al hacer este análisis, dado que no se tienen en cuenta aspectos físicos, por lo cual, lo que refiere al ruido de Poisson, radiaciones secundarias, o efectos dispersivos coherentes e incoherentes en algunos de los materiales, no está siendo considerado. Se recomienda, por lo tanto, remarcar cuales son las condiciones de simulación y los límites del modelo, para que los estudiantes no lleguen a conclusiones equivocadas.

3.2 Simulaciones con distintas fuentes

Se realizaron también simulaciones manteniendo las condiciones geométricas constantes, y variando algunos parámetros de las fuentes de actividad. Vale aclarar que, en el desarrollo de la práctica experimental, se utilizan dos fuentes cuasi-puntuales de ^{137}Cs , siempre las mismas, por lo que estas simulaciones exceden las posibilidades de la práctica, comprobándose también este caso, la versatilidad de la simulación.

En primer término, se definieron dos fuentes, con 12 y 15 elementos cada una, separadas por 10 elementos de intensidad nula. La distancia de paso fue, en todos los casos, de 0.1. La intensidad de cada fuente elemental de la primera fuente se definió igual a 2, y las correspondientes a la segunda fuente se consideraron 1. Se muestran en la figura 10 las imágenes obtenidas con el colimador perfecto y con un colimador de espesor 5 cm, ancho de rendija 0.3 cm y una distancia colimador-detector de 4 cm.

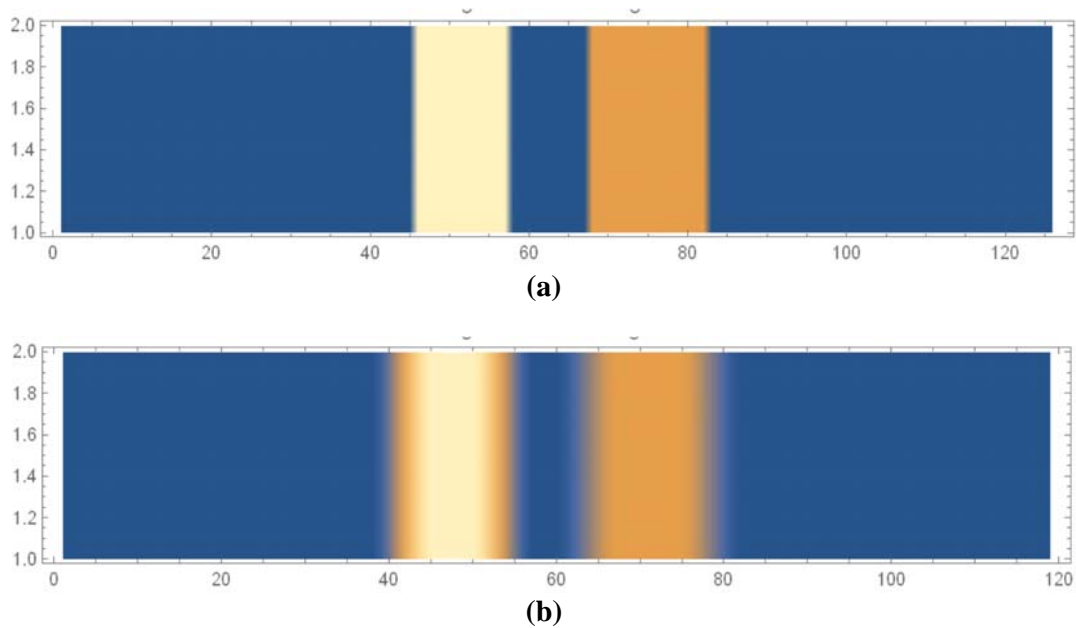


Figura 10. Resultados de la simulación de dos fuentes de intensidad diferente, separadas por una distancia de 1 cm. La intensidad de cada elemento de la fuente de la izquierda es 2, y la de cada elemento de la fuente de la derecha es 1. Distancia de paso: 0.1 cm. (a) imagen simulada con colimador perfecto (b) imagen simulada con un colimador de 5 cm de espesor y una rendija de 0.3 cm de ancho, ubicado a 4 cm del detector.

A partir de la inspección de las imágenes, puede verse como varían las imágenes simuladas de las fuentes en función de la intensidad.

Posteriormente se construyó una fuente de 12 fuentes elementales de intensidad variable elemento a elemento (con una secuencia 1,2,1,2...). Se simuló también otra fuente de 15 elementos de intensidad 1. Se mantuvo la distancia entre las fuentes y la distancia de paso. Los resultados se muestran en la figura 11.

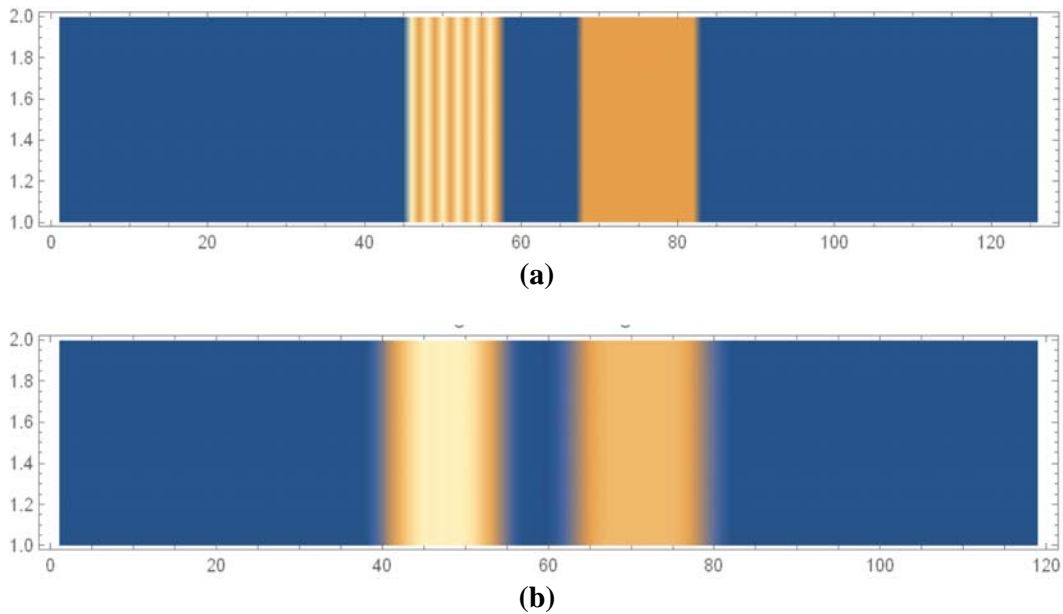


Figura 11. Resultados de la simulación de dos fuentes de intensidad diferente, separadas por una distancia de 1 cm. La intensidad de los elementos de la fuente de la izquierda varía según la secuencia 1, 2, 1, 2..., y la de cada elemento de la fuente de la derecha es 1. Distancia de paso: 0.1 cm. (a) imagen simulada con colimador perfecto (b) imagen simulada con un colimador de 5 cm de espesor y una rendija de 0.3 cm de ancho, ubicado a 4 cm del detector.

Aquí puede verse que en la imagen obtenida a partir de la simulación con el colimador real, no están resueltas las variaciones abruptas elemento a elemento de la primera fuente, y que esas variaciones aparecen suavizadas, por lo que el kernel estaría aquí funcionando como un filtro pasabajos.

También se simuló una fuente con dos escalones de variación de intensidad. La intensidad del primer escalón de cuatro elementos fue de 2, luego cuatro elementos de intensidad igual a 1.5 y finalmente cuatro elementos de intensidad igual a 1. La segunda fuente se mantuvo igual que en la simulación anterior. Los resultados se muestran en la figura 12.

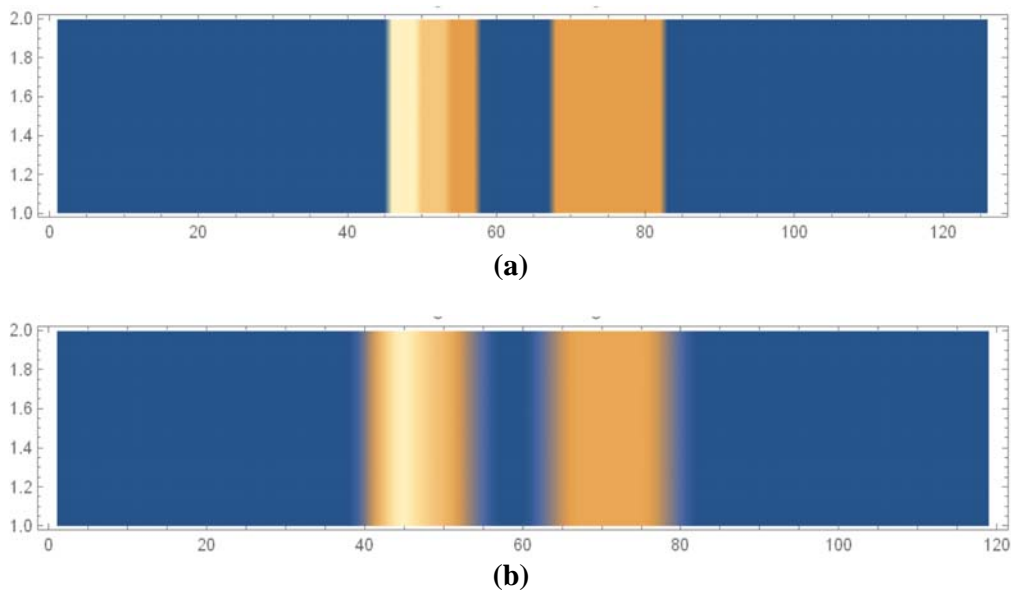
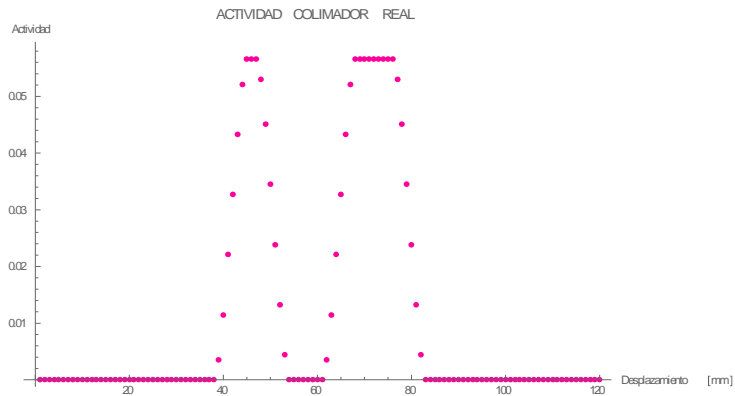


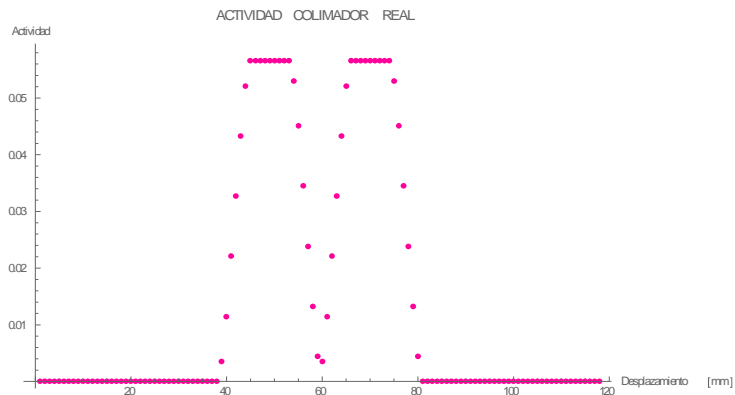
Figura 12. Resultados de la simulación de dos fuentes de intensidad diferente, separadas por una distancia de 1 cm. La intensidad de los elementos de la fuente de la izquierda presenta dos escalones: 4 elementos tienen intensidad 2, 4 elementos de intensidad 1.5 y los 4 restantes intensidad 1. La intensidad de cada elemento de la fuente de la derecha es 1. Distancia de paso: 0.1 cm. (a) imagen simulada con colimador perfecto (b) imagen simulada con un colimador de 5 cm de espesor y una rendija de 0.3 cm de ancho, ubicado a 4 cm del detector.

Puede verse en la figura 12 que, al ser más suave la transición en los cambios de intensidad de la fuente, el sistema de formación de imágenes real puede resolverlo mejor. Este tipo de maniobras permite a los alumnos poder profundizar su comprensión acerca de los principios de formación de la imagen, detección de bordes, suavizado, entre otros.

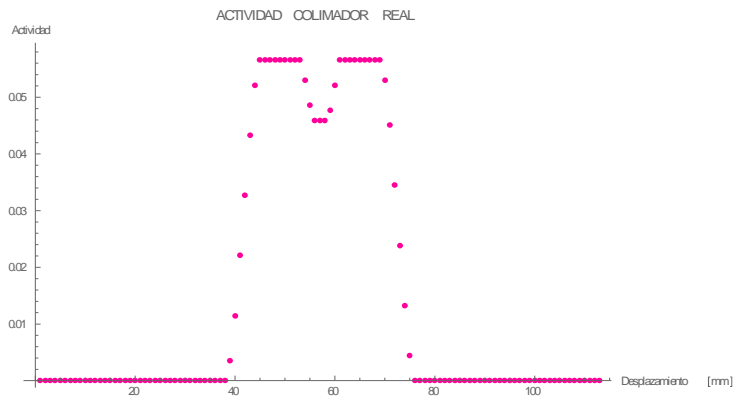
Finalmente, se hicieron algunas simulaciones variando la distancia entre las fuentes, para las mismas condiciones geométricas. La intensidad de los elementos de ambas fuentes (10 y 12 respectivamente) se consideró 1. Los resultados se muestran en el figura 13.



(a)



(b)



(c)

Figura 13. Resultados de la simulación de dos fuentes de la misma intensidad, ubicadas a diferentes distancias entre sí. Curvas de la distribución de la actividad en función del desplazamiento. La intensidad de cada uno de los elementos de ambas fuentes es igual a 1. Distancia de paso: 0.1 cm. Parámetros del colimador: 5 cm de espesor y rendija de 0.3 cm de ancho. Distancia detector-colimador: 4 cm. (a) Distancia entre fuentes: 1.5 cm; (b) distancia entre fuentes: 0.6 cm; (c) distancia entre fuentes: 0.1 cm.

Del análisis de los resultados, y repitiendo las simulaciones para distintos valores de distancia, los alumnos pueden discutir acerca del concepto de resolución espacial. Posteriormente, utilizando algún criterio, pueden definir la resolución espacial del sistema para las condiciones geométricas dadas.

4. CONCLUSIONES

El programa de simulación de imágenes propuesto en este trabajo permite al alumno probar diferentes escenarios geométricos y distintas propuestas de fuentes, con un amplio rango de variación de los parámetros, una vez familiarizado con los principios físicos y los conceptos de formación de imágenes, y tener rápidamente disponibles los resultados para su posterior análisis. También le permite familiarizarse con la operación de convolución y sus aplicaciones.

Dado que los resultados obtenidos se corresponden con los esperados en la formación de imágenes en una Cámara gama / SPECT, nuestra propuesta permite a los alumnos obtener resultados que sean útiles para fijar conceptos y profundizar posteriormente sus conocimientos en el tema.

5. REFERENCIAS

1. Strocovsky, S. G., Aizcorbe, J. y Furnari, J. C., “Principios de formación de imágenes en Cámara Gamma/SPECT: Una perspectiva didáctica”, *XLII Reunión de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear* (30 de noviembre al 04 de Diciembre de 2015).
2. Wolfram Research, <https://www.wolfram.com/mathematica/>
3. Kuhl, D. E., Edwards, R. Q., “Transverse section radionuclide scanning system”, *U.S. Patent 3,970,853*, (1976).
4. Moore, S. C., Kouris, K., and Cullum, I., “Collimator design for single photon emission tomography,” *Eur. J. Nucl. Med.*, **vol. 19**, pp. 138–150, (1992).
5. Accorsi, R. and Metzler, S.D., “Analytic determination of the resolution-equivalent effective diameter of a pinhole collimator,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, **vol. 23**, pp. 750–763, (2004).