

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES EN MICRO TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES

JOSÉ ASUNCIÓN RAMOS MÉNDEZ.

JUNIO 2010



Contenido

- 1 Tomografía por emisión de positrones.
- 2 Reconstrucción tomográfica en sistemas PET.
- 3 Metodología y simulaciones.
- 4 Resultados.

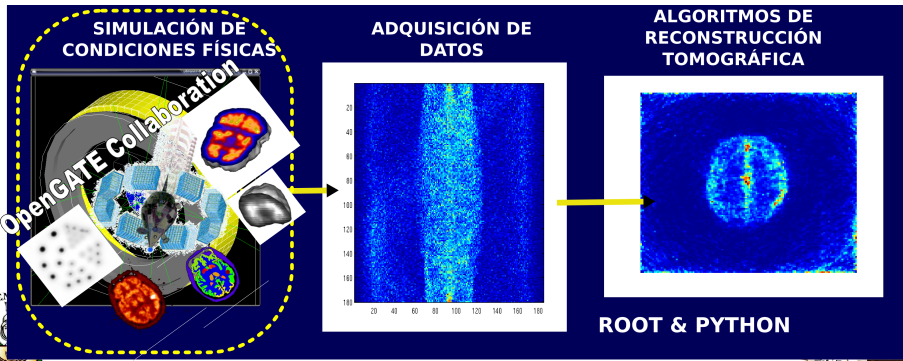


Imagen biomédica "in vivo"

Anatómico

Fisiológico

Metabólico

Molecular

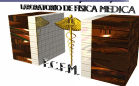
Imagen óptica

Rayos X - CT

PET/SPECT

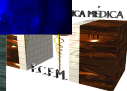
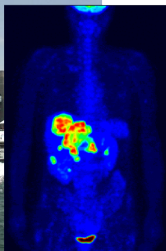
MRI

Ultrasonido



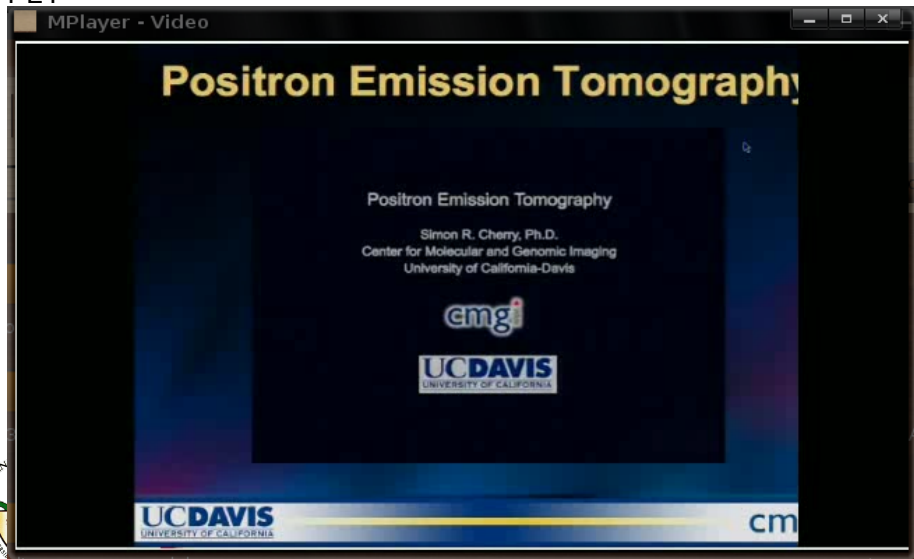
Micro-Tomografía por emisión de positrones (Motivación)

- Imagen preclínica *in vivo*
- *In vitro* → Imagen microPET *in vivo* → Diagnóstico médico *in vivo*.

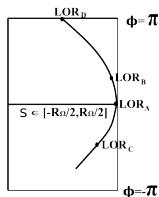
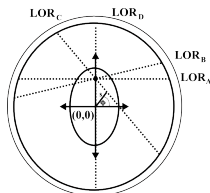
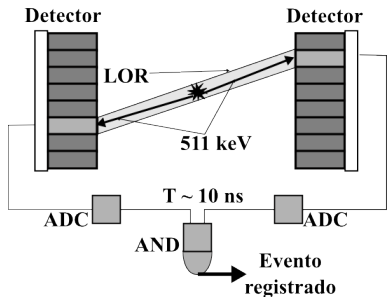


Tomografía por emisión de positrones

PET



Tomografía por emisión de positrones



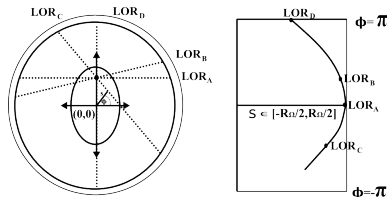
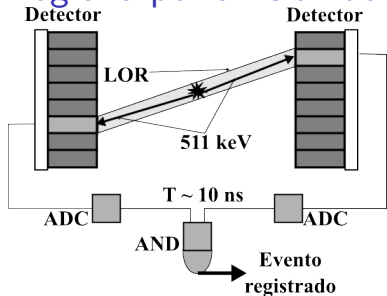
$$\phi = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) - \frac{\pi}{2}$$

$$s = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sin\left(\arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right) - \phi\right)$$

$$\rho(s, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(x, y) dx dy \quad (1)$$



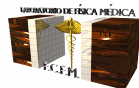
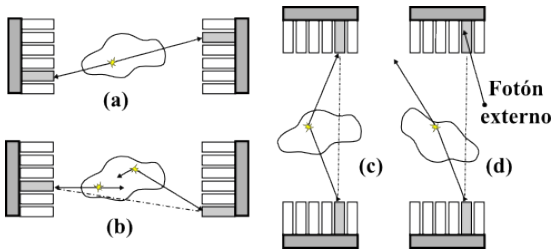
Tomografía por emisión de positrones



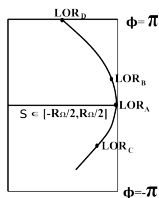
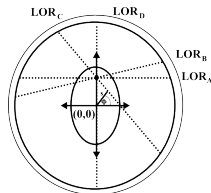
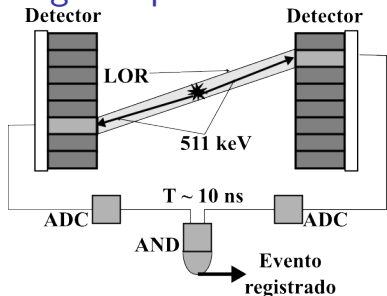
$$\phi = \arctan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) - \frac{\pi}{2}$$

$$s = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sin \left(\arctan \left(\frac{y_1}{x_1} \right) - \phi \right)$$

$$\rho(s, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(x, y) dx dy \quad (1)$$



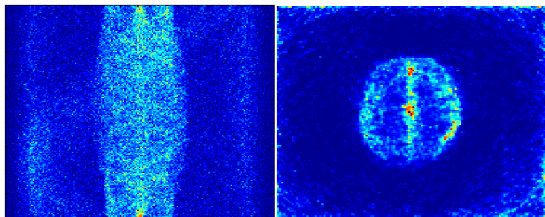
Tomografía por emisión de positrones



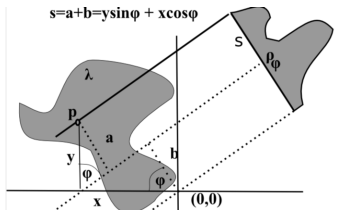
$$\phi = \arctan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) - \frac{\pi}{2}$$

$$s = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sin \left(\arctan \left(\frac{y_1}{x_1} \right) - \phi \right)$$

$$\rho(s, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(x, y) dx dy \quad (1)$$



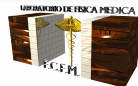
Reconstrucción tomográfica en sistemas PET



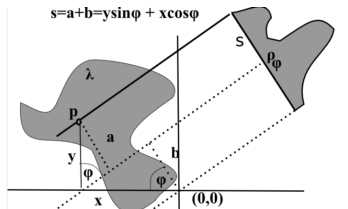
$$\rho(s, \phi) = \iint_{-\infty}^{\infty} \delta(s - x \cos \phi - y \sin \phi) \lambda(x, y) dx dy$$

Retroproyección filtrada

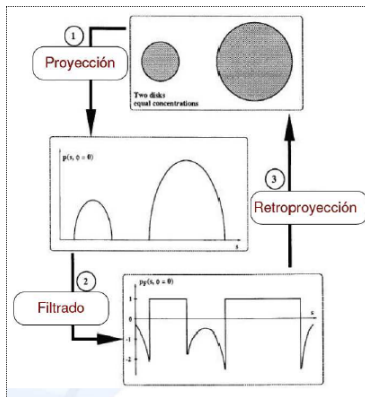
$$\lambda(x, y, z = cte) = \int_0^{\pi} \left[\int_{-R_{FOV}}^{R_{FOV}} k(s - s') \rho(s', \phi) ds' \right] d\phi \quad (2)$$



Reconstrucción tomográfica en sistemas PET



$$\rho(s, \phi) = \iint_{-\infty}^{\infty} \delta(s - x \cos \phi - y \sin \phi) \lambda(x, y) dx dy$$

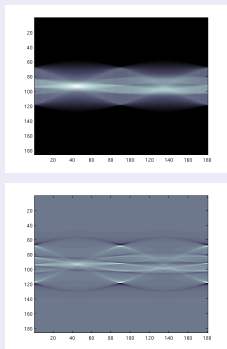


Retroproyección filtrada

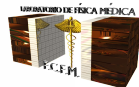
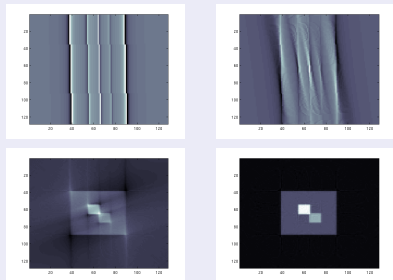
$$\lambda(x, y, z = cte) = \int_0^{\pi} \left[\int_{-R_{FOV}}^{R_{FOV}} k(s - s') \rho(s', \phi) ds' \right] d\phi \quad (2)$$

Retroproyección Filtrada

Filtrado de datos



1° , 10° , 120° y 180°



Filtros para FBP

$$\text{Rampa: } k(s) = |s|$$

$$\text{Hamming: } k(s) = |s| \times \left(0,54 + 0,46 \cos \frac{\pi s}{s_{\text{corte}}}\right)$$

$$\text{Shepp-Logan: } k(s) = \frac{2s_{\text{corte}}}{\pi} \text{sen} \frac{|s| \pi}{2s_{\text{corte}}}$$



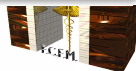
Algoritmo Iterativo: Método Estadístico

Maximum Likelihood Expectation Maximization

- Verosimilitud: $L(\rho | \lambda)$
- $\phi = E(\text{Log}L(\rho | \lambda))$
- $\lambda' = \arg \max[\phi(\lambda)] : \lambda \geq 0$
- Proceso iterativos para el cálculo del λ^a

$$\lambda_i^{(n+1)} = \lambda_i^{(n)} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{ji}} \sum_{j=1}^N \frac{\rho_j a_{ji}}{\sum_{k=1}^M a_{jk} \lambda_k^{(n)}}, \quad \forall i \quad (3)$$

^aShepp y Varty. "Maximum likelihood reconstruction in positron emission tomography", *IEEE Trans. Nucl. Med. Im.* **1**(2), 113-122

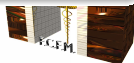


Algoritmo Iterativo: Método Estadístico

Interpretación

$$\lambda_i^{(n+1)} = \lambda_i^{(n)} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{ji}} \sum_{j=1}^N \frac{\rho_j a_{ji}}{\sum_{k=1}^M a_{jk} \lambda_k^{(n)}}$$

**Sensibilidad del escáner
en el voxel i**



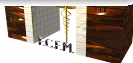
Algoritmo Iterativo: Método Estadístico

Interpretación

$$\lambda_i^{(n+1)} = \lambda_i^{(n)} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{ji}} \sum_{j=1}^N \frac{\rho_j a_{ji}}{\sum_{k=1}^M a_{jk} \lambda_k^{(n)}}$$

Sensibilidad del escáner
en el voxel i

Proyección de la última
imagen en el espacio
de medida



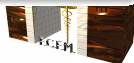
Algoritmo Iterativo: Método Estadístico

Interpretación

$$\lambda_i^{(n+1)} = \lambda_i^{(n)} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{ji}} \sum_{j=1}^N \frac{\rho_j a_{ji}}{\sum_{k=1}^M a_{jk} \lambda_k^{(n)}}$$

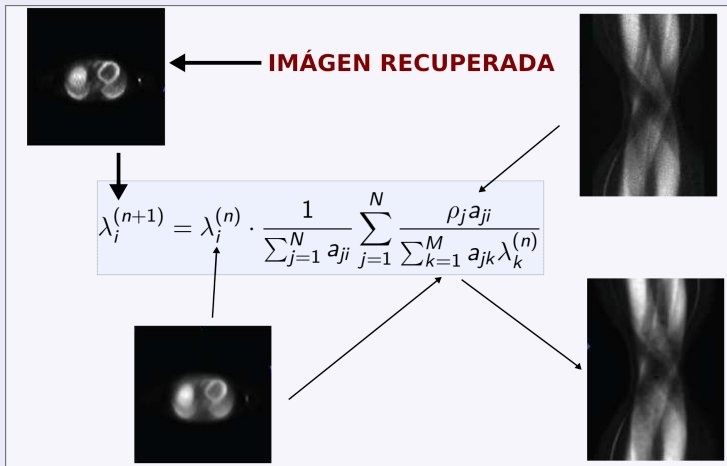
**Comparación entre lo medido
y lo que se habría medido en
caso de tener el objeto**

λ_k



Algoritmo Iterativo: Método Estadístico

Interpretación



Algoritmo Iterativo: Método Estadístico

MLEM-Median Root Prior

$$\lambda_i^{(n+1)} = \lambda_i^{(n)} \cdot c_i^{(n)} \cdot \left(1 + \beta \frac{\lambda_i^{(n)} - \text{med}(\lambda_i^{(n)}, i)}{\text{med}(\lambda_i^{(n)}, i)} \right)^{-1} \quad (4)$$

OSEM

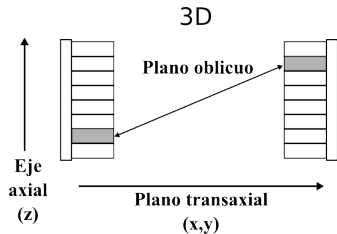
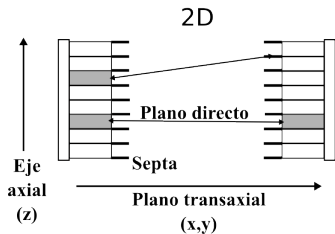
$$c_i^{(n,m)} = \frac{1}{\sum_{j \in s(m)} \sum_{j \in s(m)} \frac{\rho_j a_{ji}}{\sum_{k=1}^M a_{jk} \lambda_k^{(n,m)}}} \quad (5)$$

$$\rho = \sum_{m=1}^N s(m) \quad (6)$$

$$(7)$$

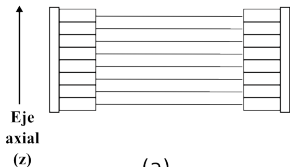


Modo de adquisición 3D-2D

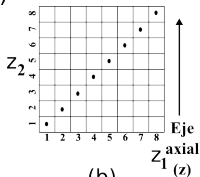


(a)

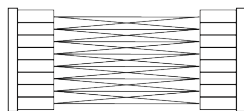
(b)



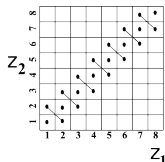
(a)



(b)



(a)



(b)

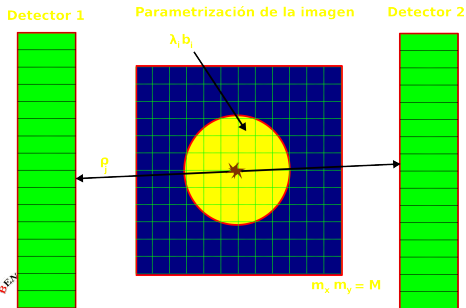
Single Slice Rebinning

$$\rho_{SSRB}(s, \phi, z_i) = \frac{1}{\theta_{max}} \int_{-\theta_{max}}^{\theta_{max}} \rho(s, \phi, z_i, \theta) d\theta \quad (8)$$

Matriz de sistema

Definición

Probabilidad de que un evento de aniquilación ocurrido en el voxel i del FOV, sea detectado por una línea de respuesta (LOR) j .



$$i'_x = i_y$$

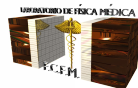
$$i'_y = i_x$$

$$i_a = \{i_x, i_y\}$$

$$i_b = \{M - i_x - 1, M - i_y - 1\}$$

$$i_c = \{i_y, M - i_x - 1\}$$

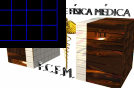
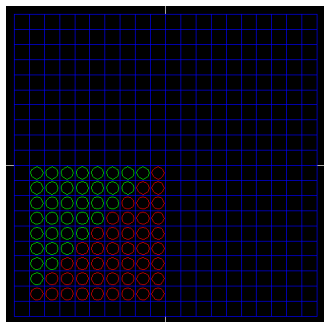
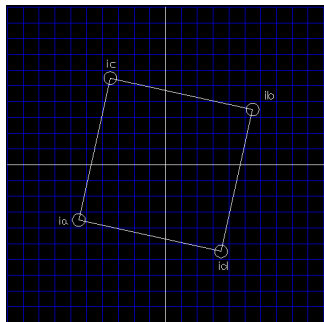
$$i_d = \{M - i_y - 1, i_x\}$$



Matriz de sistema

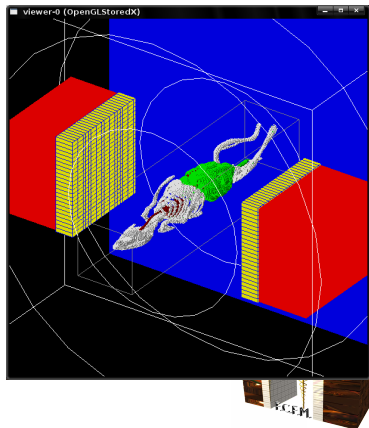
Definición

Probabilidad de que un evento de aniquilación ocurrido en el voxel i del FOV, sea detectado por una línea de respuesta (LOR) j .



Micro tomógrafo por emisión de positrones (GATE)

<i>Parámetro</i>	microPET
Diámetro (mm)	100
Número de cristales / anillo	48
Número de anillos	24
Tamaño del cristal (mm^3)	2x2x10
Material del cristal	LYSO:Ce
Ventana de energía (keV)	250-650
Tiempo muerto (μs)	3
Ventana de coincidencia (ns)	10



Descripción del sistema de reconstrucción

GATE: Geant4 Application for Tomographic Emission

- Simulación del sistema microPET 2 cámaras.
- Adquisición de la matriz de sistema (datos crudos).
- Adquisición de datos sintéticos: Fuentes puntuales, Derenzo y MOBY.

Implementación de algoritmos en PYTHON

- Single Slice Rebinning (SSRB) a senograma.
- Generación de la matriz de sistema (64x64 y 128x128).
- Retroproyección filtrada: Rampa y Hamming.
- MLEM-MRP.
- Generación de subconjuntos: Matriz de sistema y Senograma.
- OSEM-MRP.
- Análisis de datos.

Descripción del sistema de reconstrucción

GATE: Geant4 Application for Tomographic Emission

- Simulación del sistema microPET 2 cámaras.
- Adquisición de la matriz de sistema (datos crudos).
- Adquisición de datos sintéticos: Fuentes puntuales, Derenzo y MOBY.

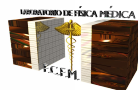
Implementación de algoritmos en PYTHON

- Single Slice Rebinning (SSRB) a senograma.
- Generación de la matriz de sistema (64x64 y 128x128).
- Retroproyección filtrada: Rampa y Hamming.
- MLEM-MRP.
- Generación de subconjuntos: Matriz de sistema y Senograma.
- OSEM-MRP.
- Análisis de datos.

Resultados

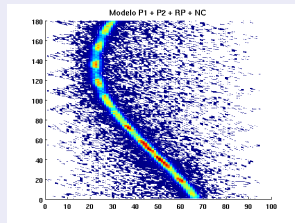
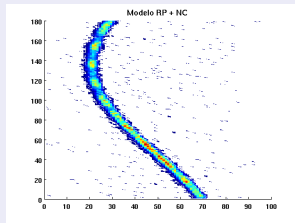
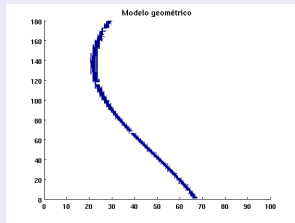
En general

- 1 Significación estadística de la matriz de sistema
- 2 Comparación entre métodos de reconstrucción
- 3 Resolución espacial (FWHM, *Full Width at Half Maximum*).
- 4 Relación señal ruido (SNR, *Signal-to-noise ratio*)
- 5 Error cuadrático medio (MRSE, *Mean root square error*)
- 6 Reconstrucción completa: Derenzo y MOBY.

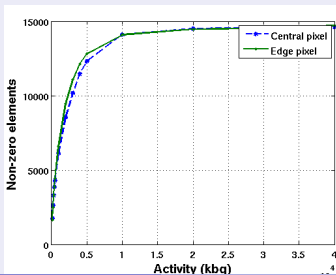
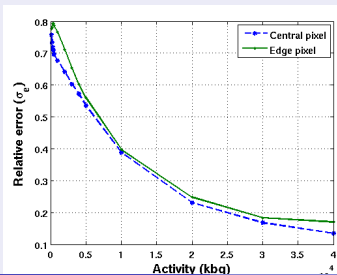


Matriz de sistema

Influencia del modelo físico

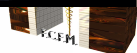
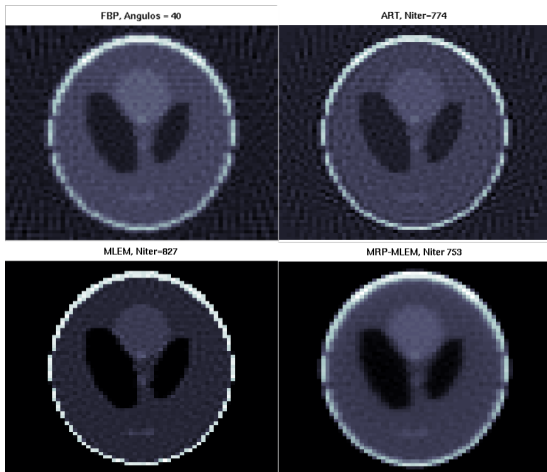
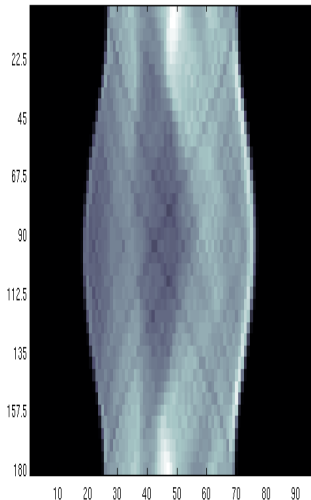


Error relativo y esparsidad



Comparación entre métodos de reconstrucción

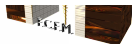
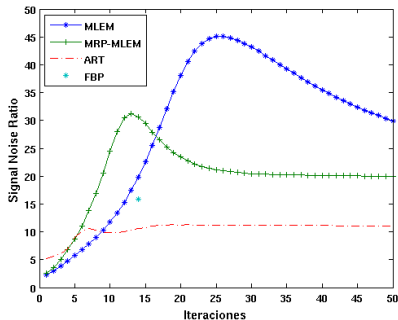
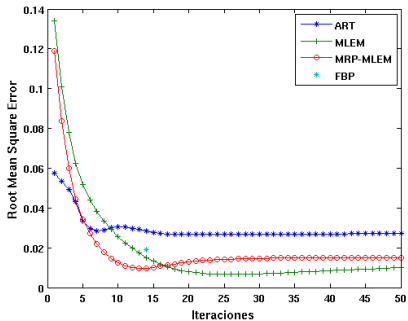
Senograma a 40 ángulos



Comparación entre métodos de reconstrucción

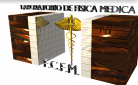
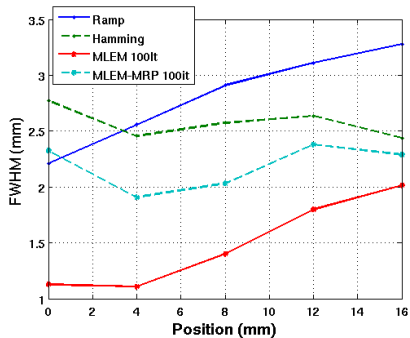
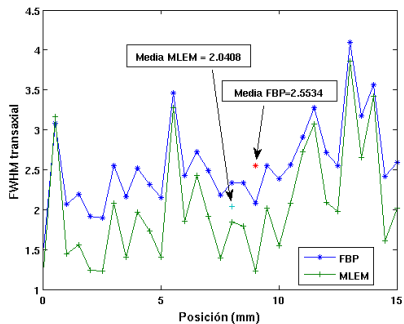
$$\text{MSE} = \sum_{i=1}^{M_{ROI}} \frac{(\hat{\lambda}_i - \lambda_i)^2}{M_{ROI}} \quad (9)$$

$$\text{SNR} = \frac{\sum_{i=1}^{M_{ROI}} \lambda_i^2}{\sum_{i=1}^{M_{ROI}} (\hat{\lambda}_i - \lambda_i)^2} \quad (10)$$

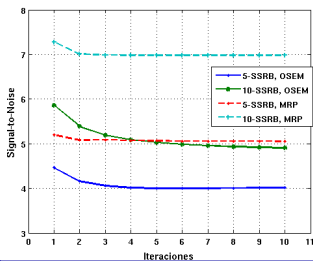
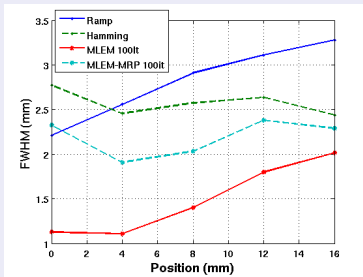
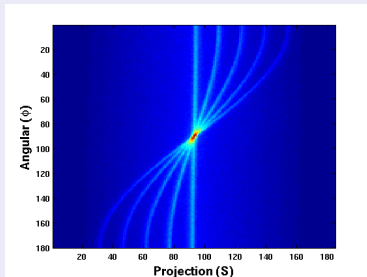


Resolución espacial

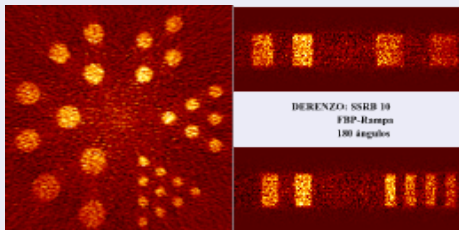
Fuente puntual



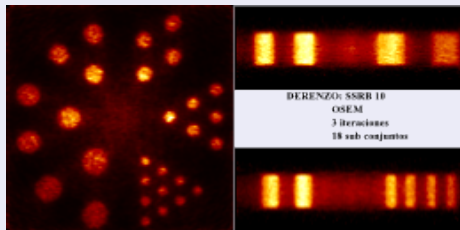
F-18



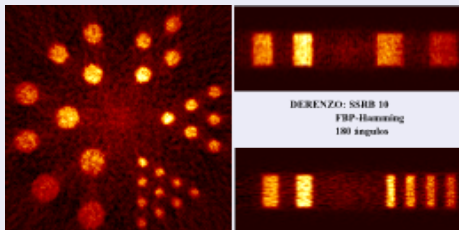
FBP-Rampa



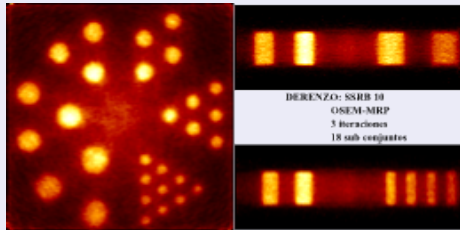
OSEM, 18 subsets, 3 iteraciones



FBP-Hamming



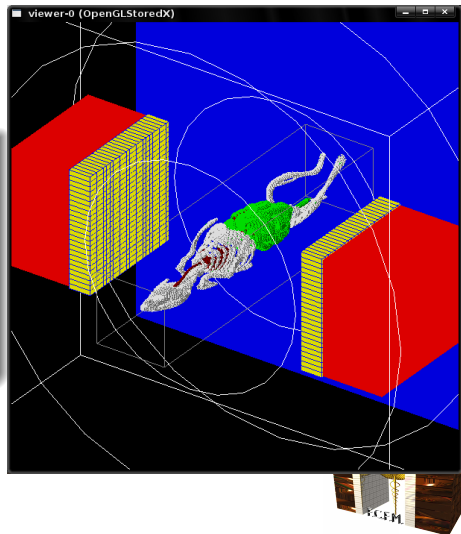
OSEM-MRP



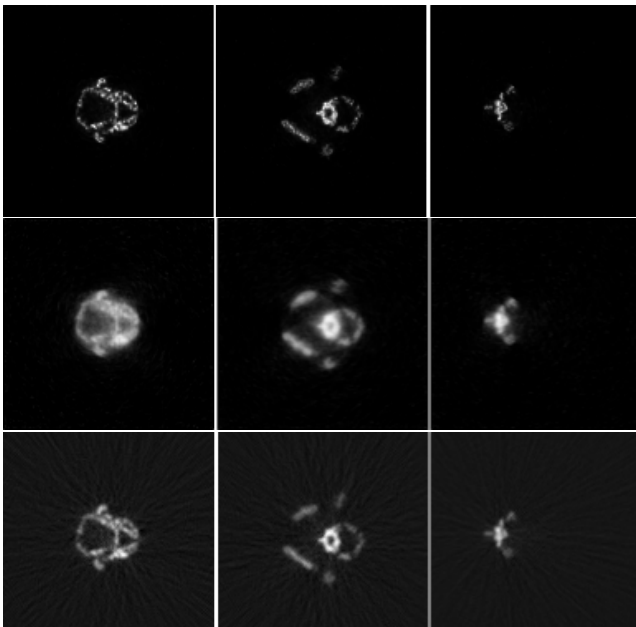
MOBY Mouse phantom

Características

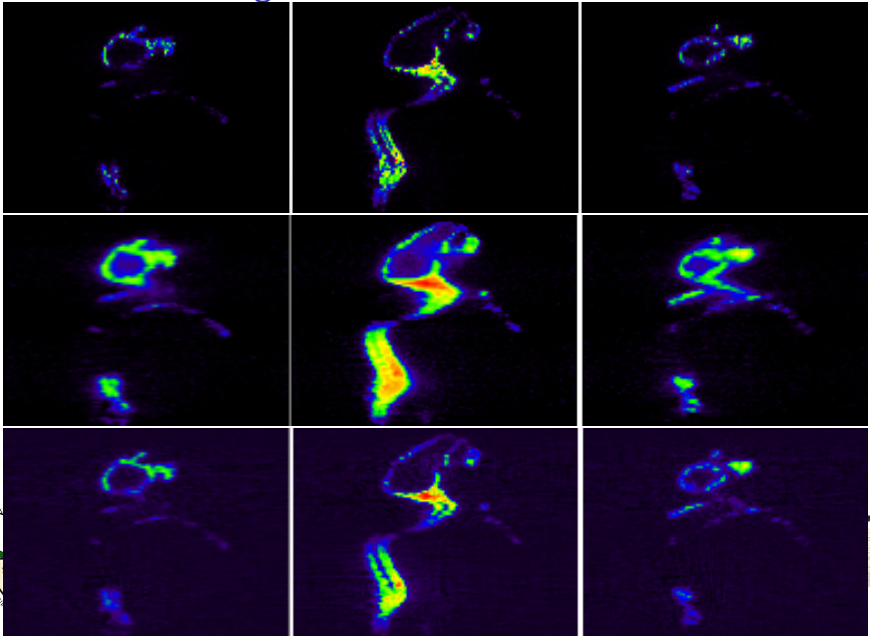
- 128x128x140 slices.
- 300 Bq por voxel.
- 6 min de adquisición F-18.
- SSRB-10 cristales.
- 47 planos reconstruidos



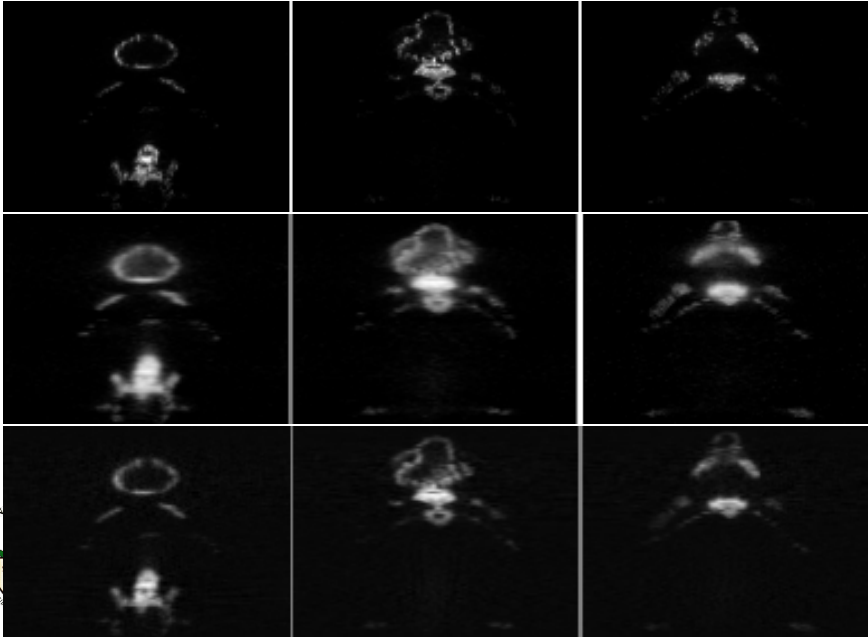
MOBY: Vista transversal



MOBY: Vista sagital



MOBY: Vista coronal



Conclusiones

- Sistema de reconstrucción 2D:
OSEM, OSEM-MRP, FBP-Rampa, FBP-Hamming.
SSRB, Matriz de Sistema (128, 64).
- 800000 eventos por pixel
- Resolución espacial: 1.2 mm
- “Curvas de mérito”
- Reconstrucciones 3D
- 0.2 s - FBP-Hamming, 0.5 s - OSEM, 69 s - OSEM-MRP

