



# BNCT el reactor RA-6: Fuente de Neutrones

Juan Manuel Longhino  
Gustavo SantaCruz

Comisión Nacional de Energía Atómica



# Fuentes de neutrones para BNCT

- En 2001 se publica el TECDOC 1223, en el cual se sugieren parámetros deseados de una fuente de neutrones de reactor para BNCT.
- Este documento se basa en la división estricta entre tratamiento superficial (con neutrones térmicos) y profundo (con epitérmicos).

**(Sobrevuela el paradigma de GBM)**

- El procedimiento de irradiación postulado indica campo único, de duración inferior o igual a 30min.



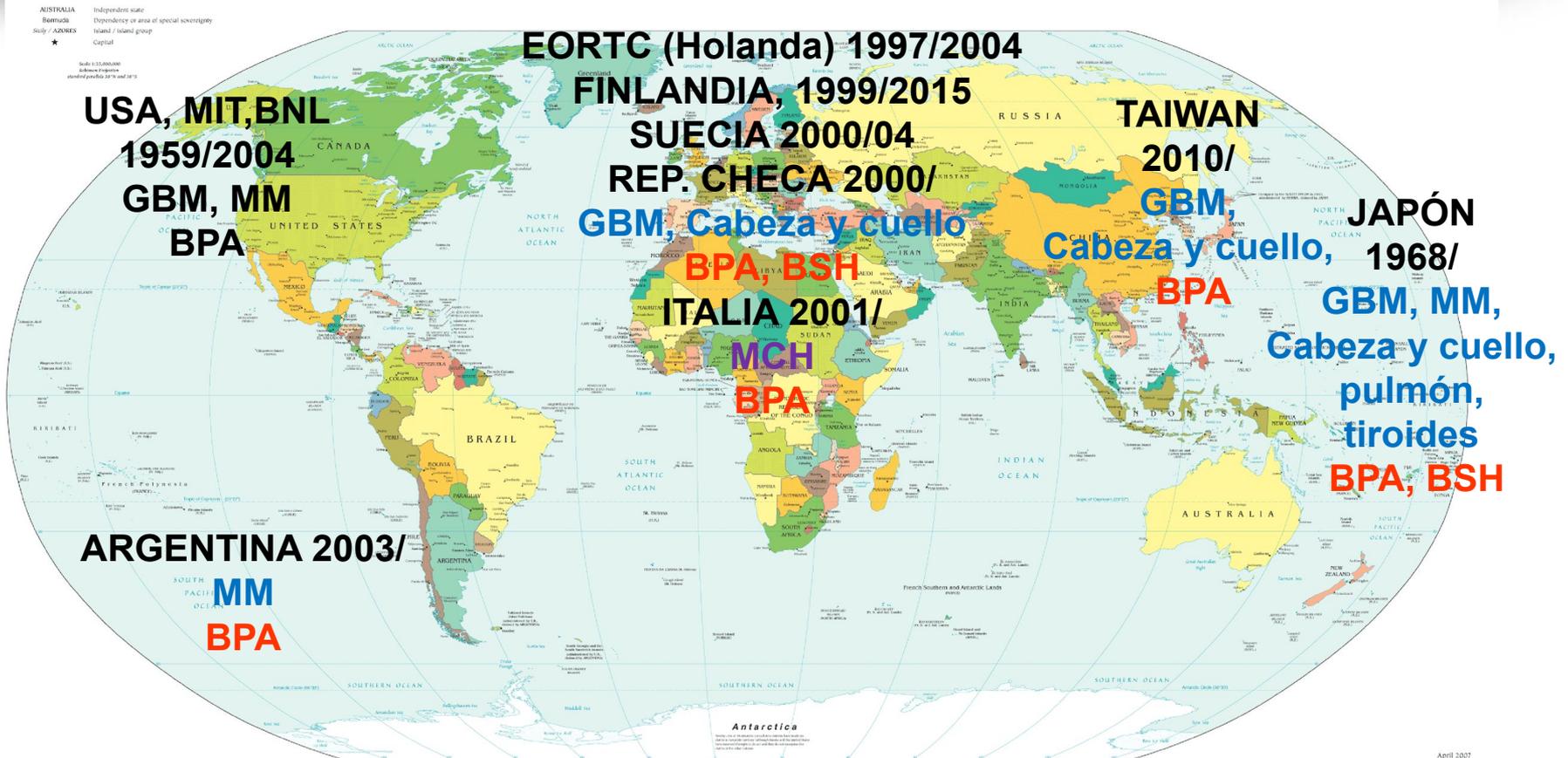
# Fuentes de neutrones para BNCT

- Como parámetros deseados del haz bruto, Se sugirió **(siempre en Aire!)**:
  - Flujo de neutrones epitérmicos (0.5eV-10keV) mayor a  $10^9 \text{ cm}^2\text{seg}^{-1}$ .
  - Dosis de neutrones rápidos (>10keV) menor a  $10^{-13} \text{ Gy cm}^2/n_{\text{epi}}$
  - Dosis de fotones menor a  $2 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2/n_{\text{epi}}$
  - Alta colimación,  $J/\phi \geq 0.7$
- Que corresponden fuertemente a la descripción del FIR-1, y mejorado por el MITRR M67...



# Ensayos Clínicos de BNCT en el mundo

Political Map of the World, April 2007



GBM: Glioblastoma multiforme, MM: Melanoma metastásico,  
MCH: metástasis de colon en hígado



# Protocolos BNCT de reactor

(Bart et al, 2012 + Información de otras fuentes on line)

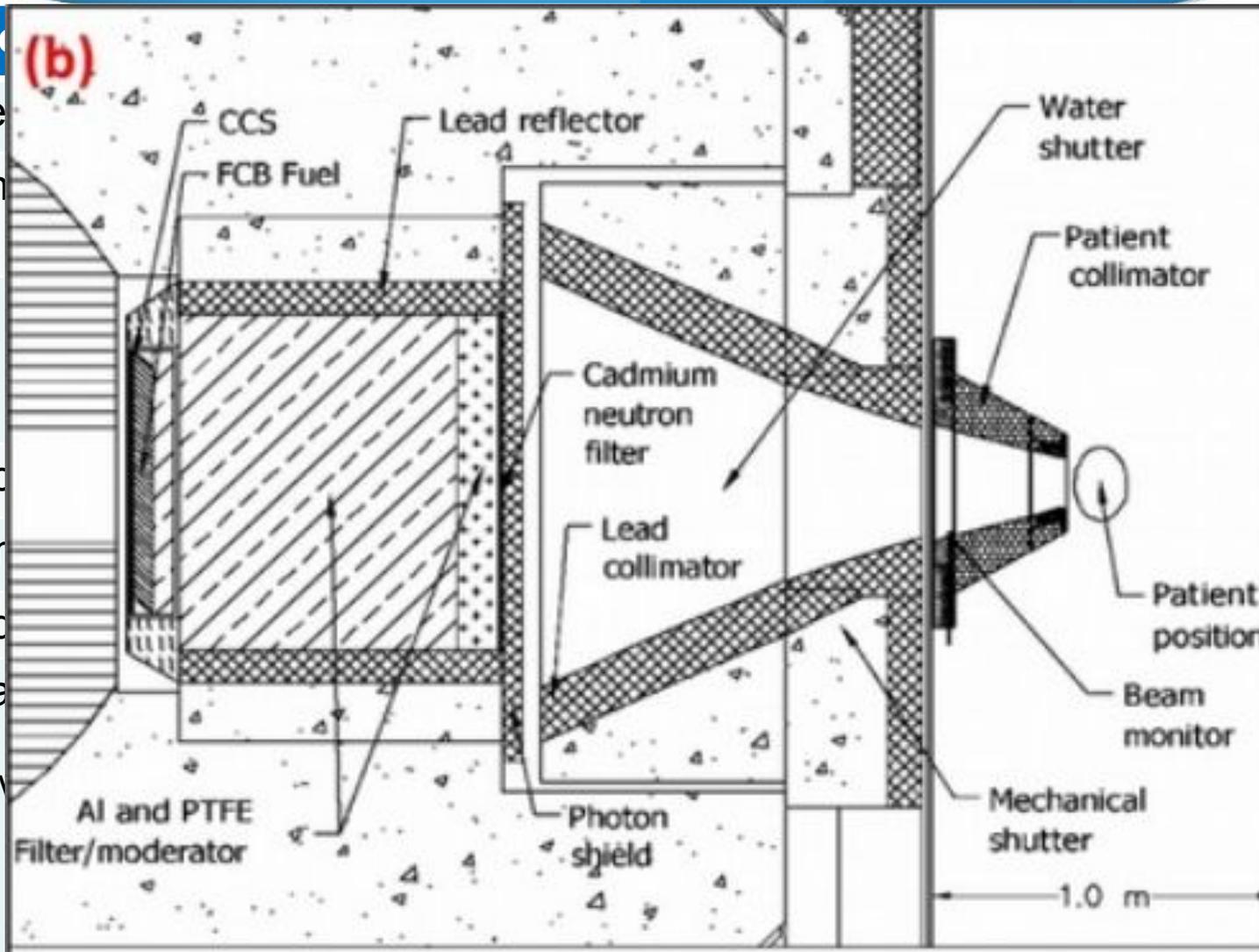
- Con protocolos clínicos humanos:

| Reactor   | País       | Procedimientos                                    |
|---|------------|---|
| BMRB  | EEUU       | 53 GBM  |
| FiR 1<br>(de personas enteras, no se enojen en Pavia! ) | Finlandia  | 50 GBM, 30 H&N<br>(~260 incl. Off-protocol)       |
| HFR   | Holanda    | 26 GBM, 4 IC MM                                   |
| JRR4  | Japón      | (~107 incl. Off-protocol)                         |
| KURR  | Japón      | 235 GBM, 182 H&N<br>27 MM, 66 otros               |
| LVR-15  | Rep. Checa | 5 GBM   |
| MITRR-II M67  | EEUU       | 26 GBM, 2 IC MM                                   |
| R-20  | Suecia     | 29 GBM, 12 rGBM<br>1 rMeningioma, 1rcondrosarcoma |
| RA 6  | Argentina  | 8, MM   |
| THOR  | Taiwán     | 10, rH&N  |



# Algunas Instalaciones Puntuales: MITRR II M67- EEUU

Reac  
Pote  
Com  
Haz  
Filtro  
Colim  
Blind  
Carac  
(a 5M



[cGy/min]<sup>fast</sup> 5.0



# Algunas Instalaciones Puntuales: FIR1 - Finlandia

Reac

Poten

Comb

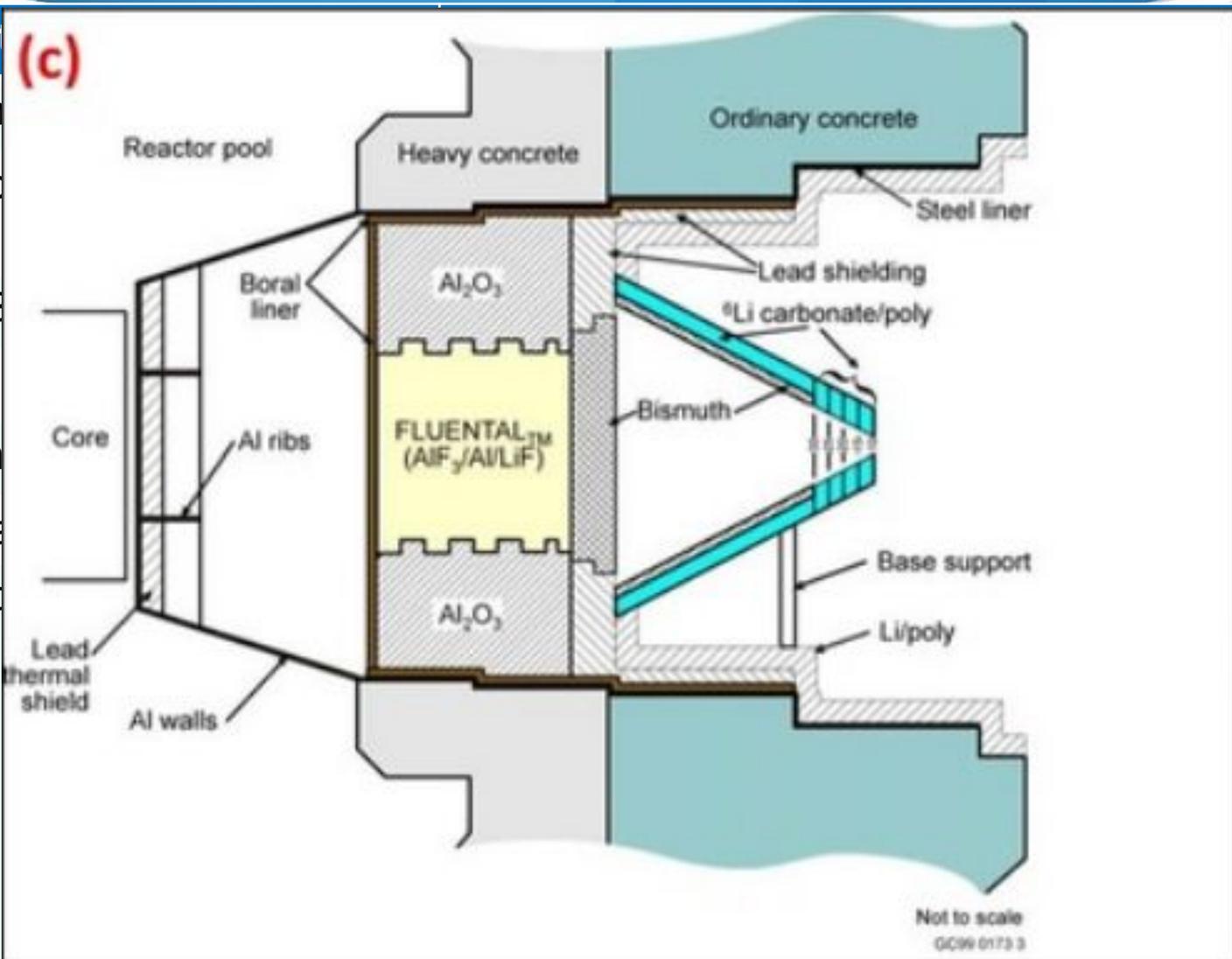
Haz B

Filtro

Colim

Blinda

Carac

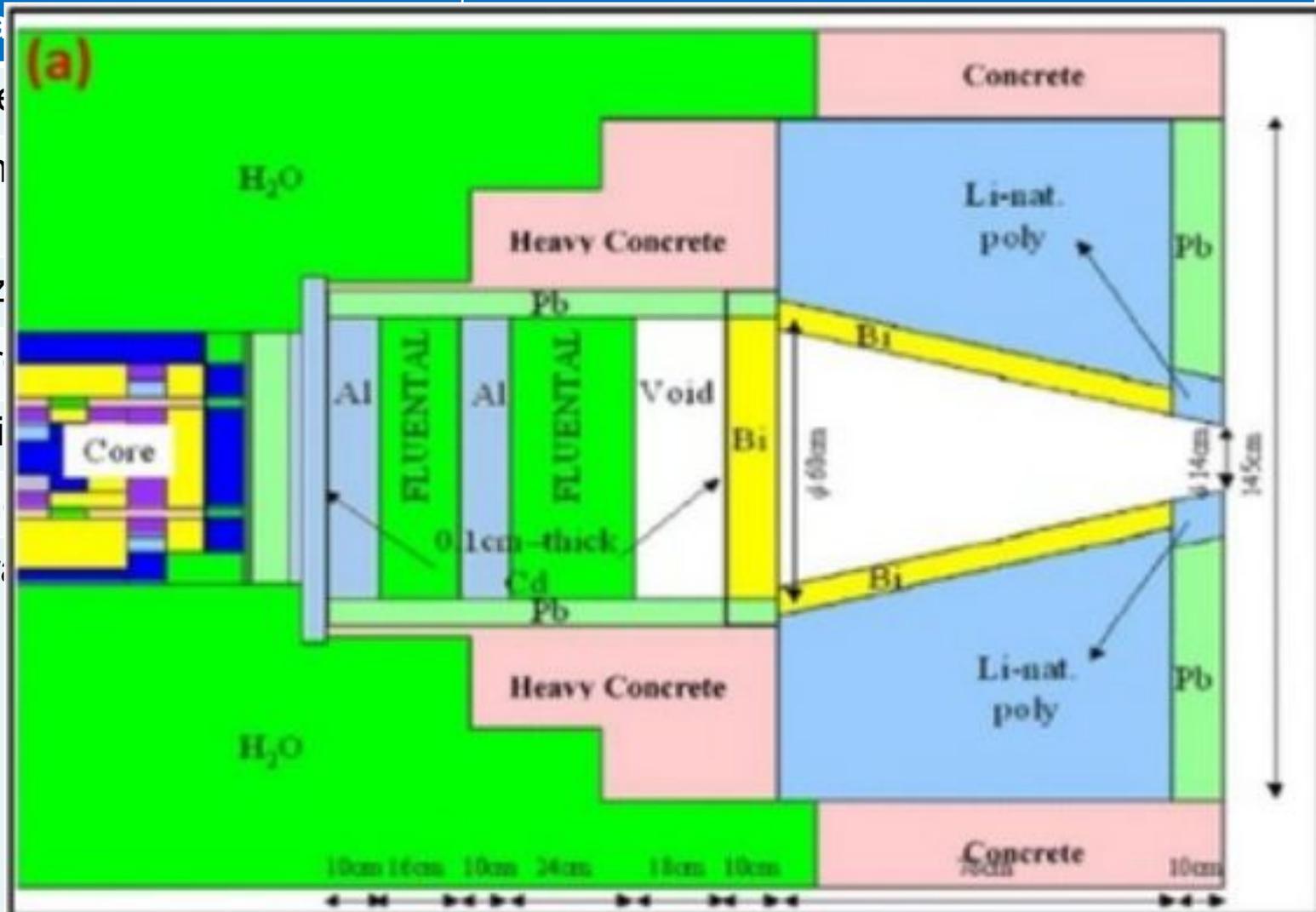


m)



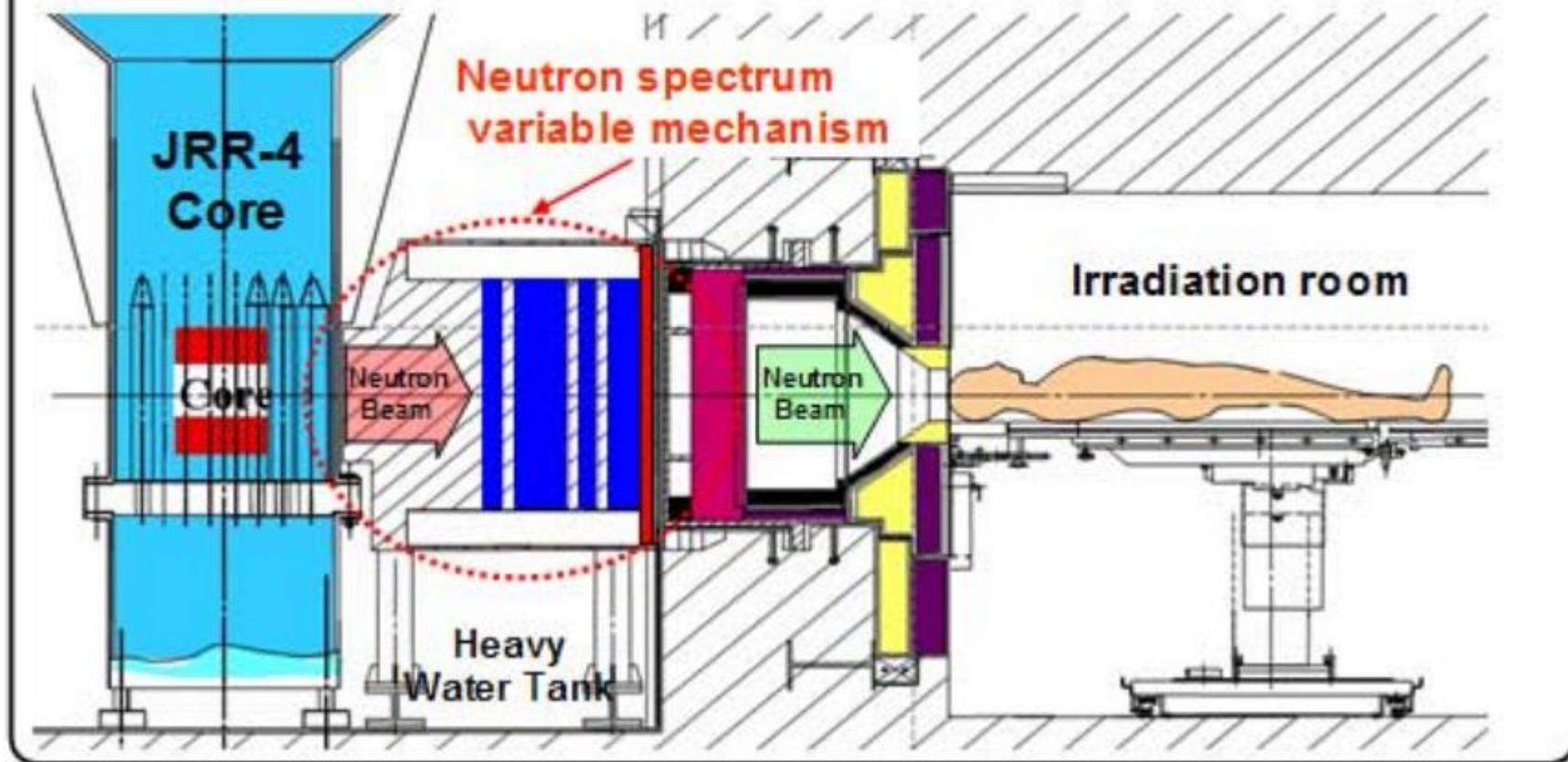
# Algunas Instalaciones: THOR - Taiwan

Rea  
 Pot  
 Con  
 Haz  
 Filtr  
 Coli  
 Blin  
 Car



# Algunas Instalaciones: JRR4- Japón

## JRR-4 Neutron Beam Facility



from csg



The image shows the interior of a nuclear reactor core, specifically the RA6 reactor in Argentina. The central focus is a fuel element assembly, which is a cylindrical structure containing fuel rods. This assembly is surrounded by a complex network of support structures, including various pipes, cables, and structural beams. The entire scene is illuminated with a strong blue light, which highlights the metallic surfaces and the intricate geometry of the reactor's internal components. The perspective is from within the core, looking down the length of the fuel element assembly.

# Argentina, Reactor RA6

# BNCT en el reactor RA-6

El haz epitérmico (instalado en 1998) fue diseñado para compensar los bajos niveles de densidad de potencia del núcleo mediante la proximidad de la posición de irradiación a la fuente.

Esto se logró mediante el reemplazo de la anterior columna térmica, interna y externa, la cual permite el acceso a una cara completa del núcleo.

El diseño global del haz comprende:

- Un filtro Epitérmico in-pool (Aluminio + Alumina).
- Una etapa externa de filtrado y colimación (Bismuto, Plomo, Polietileno Borado, PTFE y Acrílico).



# BNCT en el reactor RA-6

↗ **Conceptual: ANISN +Vitamin-C / Validación: MCNP4B + ENDF V**

1994-2001: **Diseño**, implementación y utilización de un Haz Epitérmico (bajo el paradigma del tratamiento enfocado en **tumores de localización profunda**).

2001-2007: **Modificación** de la Instalación; conformación de un Haz Hipertérmico (**Haz B1**, bajo el paradigma de tumores semi-superficiales. Start-up de Protocolo Clínico de Investigación).

↘ **Agregado de Filtrado externo; MCNP5 + ENDF VI**

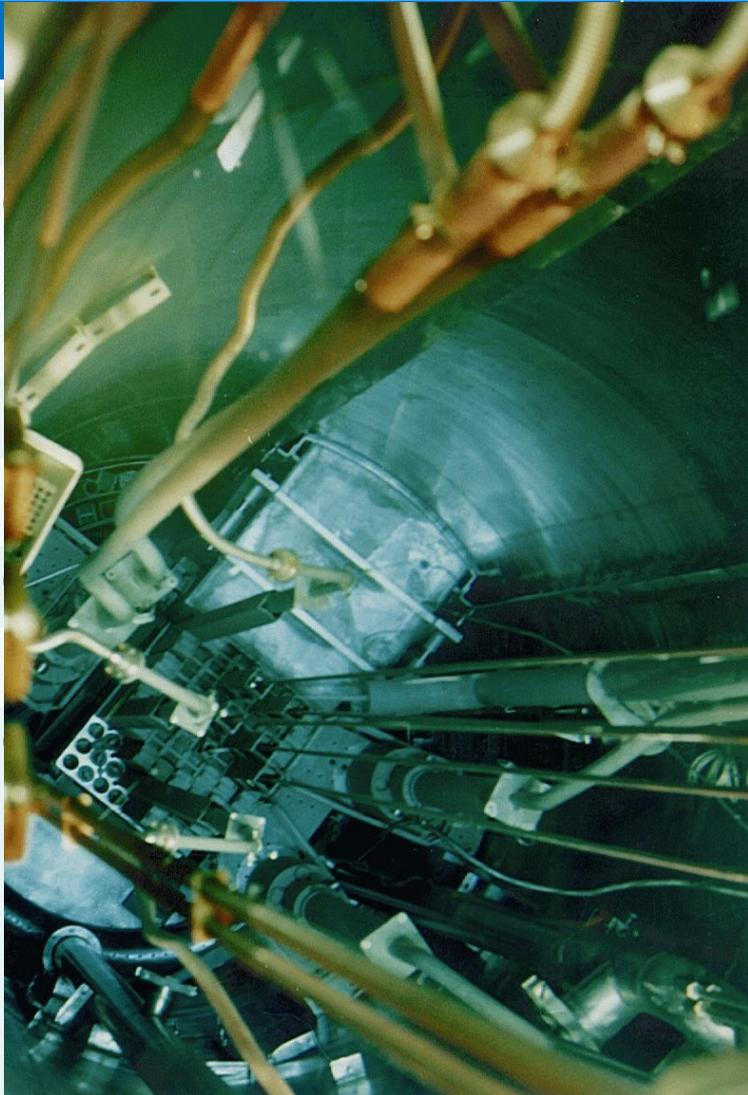
2007-2009: Impasse en la utilización del Haz BNCT del RA6, debido al Proyecto UBERA6 (**Cambio de núcleo del reactor e incremento de potencia del mismo**).

↗ **Íntegramente MCNP5 + ENDF VII (+bibliotecas in-house)**

2009-2018: **Rediseño** de la Instalación, implementación y utilización de una nueva versión del Haz Hipertérmico (**Haz B2**, incluyendo optimizaciones a los filtros y blindajes externos, Colimación del haz y habitabilidad de la sala de Irradiación).



# Haz Epitérmico



$N_{fast}$   
[cGy/min]

3.2

2.7 (a 1cm)



# Haz B1: Haz Hipertérmico

Reactor Tipo

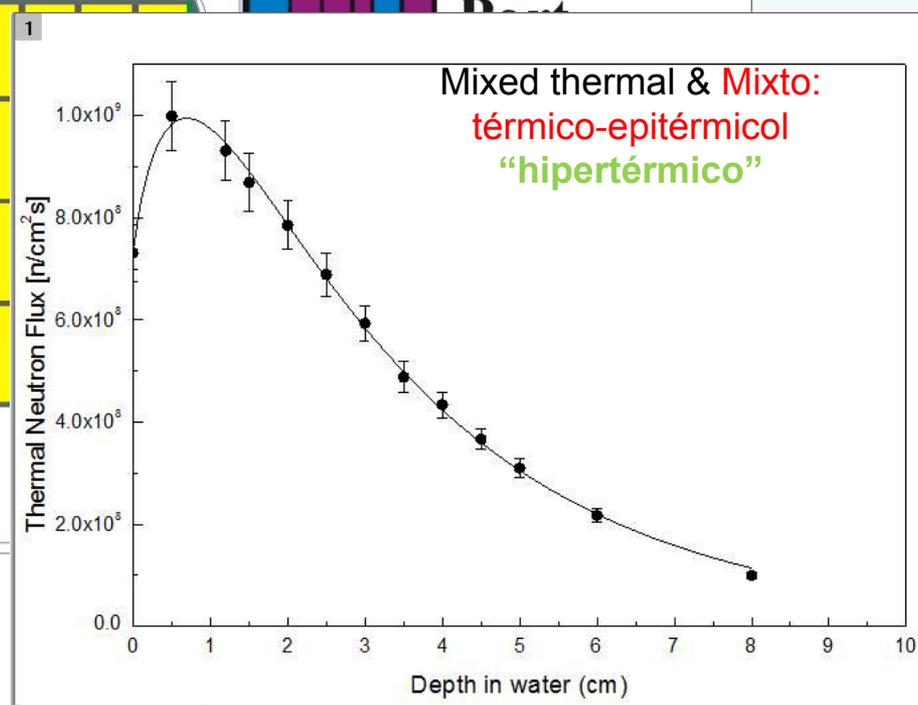
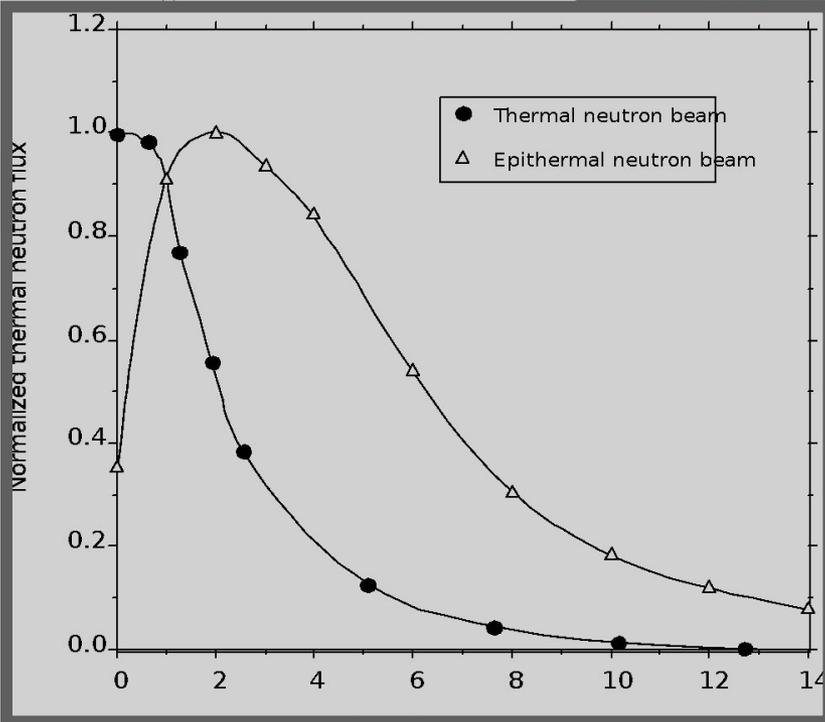
Pileta Abierta tipo A

Potencia  
Combustión

Reactor  
Core

Neutron  
Filter

Beam  
Depth

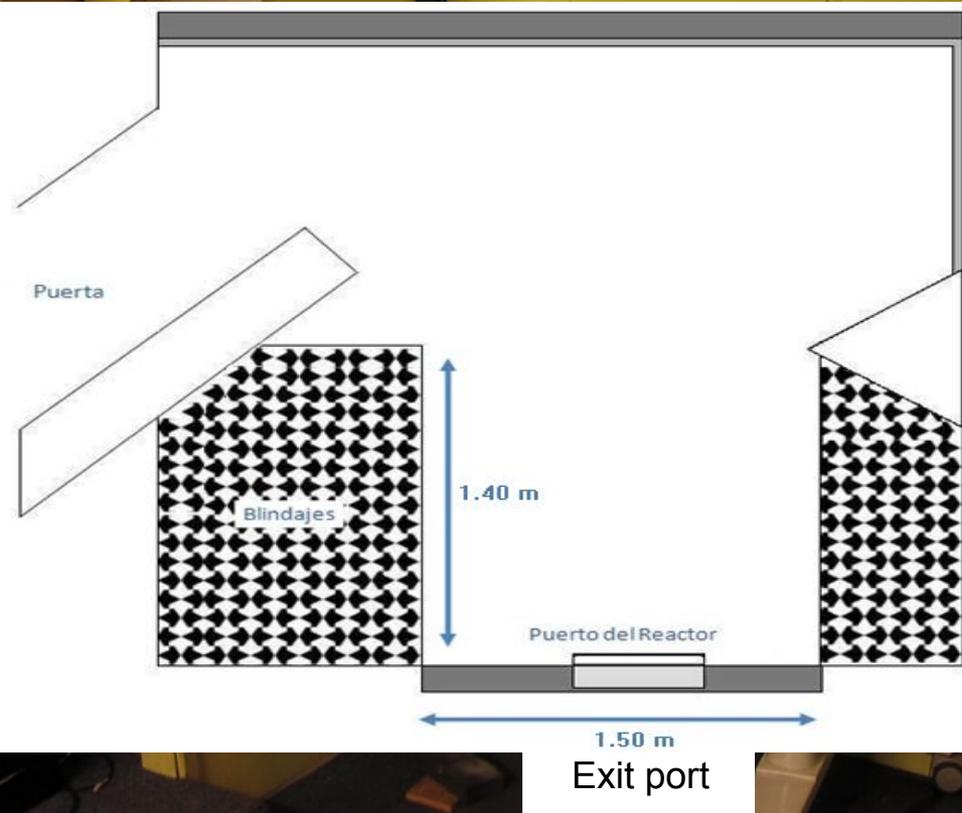


- Borated Polyethylene
- Acrilic

- Iron
- Cadmium
- Beam Monitors



# Sala de Irradiación del Haz B1:



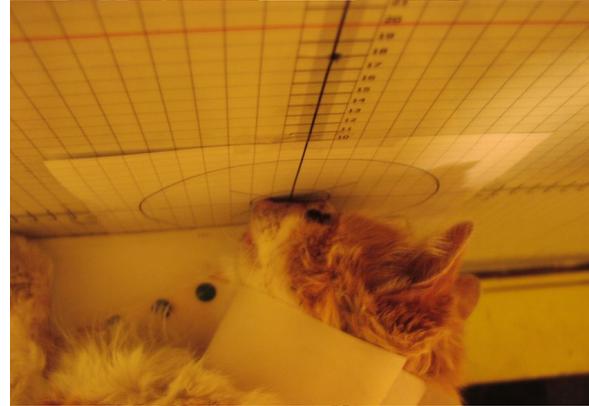
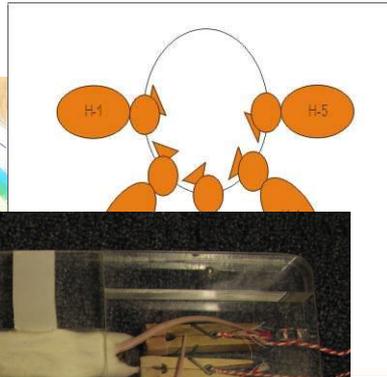
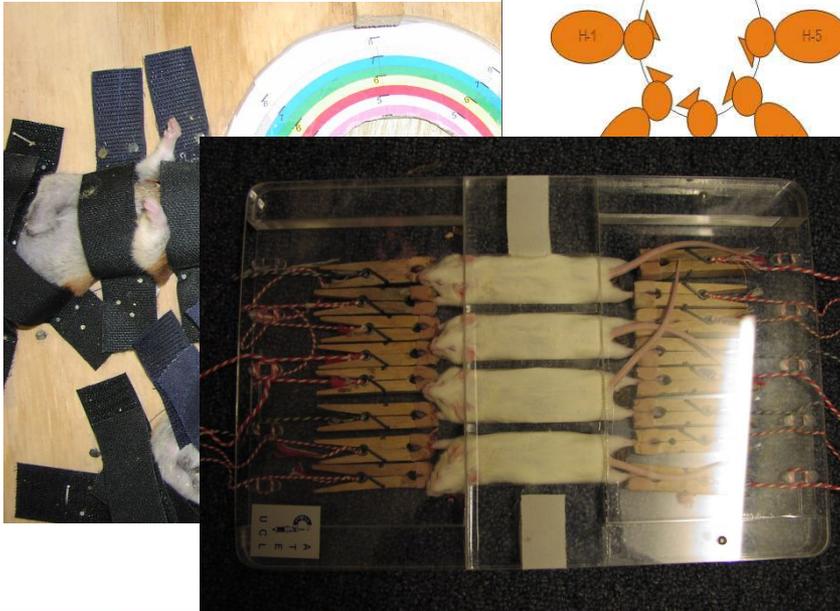
# Utilización del Haz B1 #2

- Modelos Animales:

Modelo de cáncer oral en Hámsters.

UTC en ratones nude.

Otros modelos (H&N en felinos, ratones, ratas)



# Proyecto UBERA-6

Los combustibles de alto enriquecimiento (Aluminuro de U, 90%, BU>40%) utilizados entre 1983 y 2007 fueron reemplazados por nuevos EECC de menor enriquecimiento (20%, siliciuro de U) en el marco del programa **RERTR**. Se llamó a esto “ Proyecto UBERA-6”.

**El proyecto incluía la reconfiguración del núcleo y un incremento de potencia nuclear hasta los 2MW, (aunque se licenció a 1MW).**

Se produjo además la readecuación de los sistemas e instalaciones a las nuevas características del reactor.

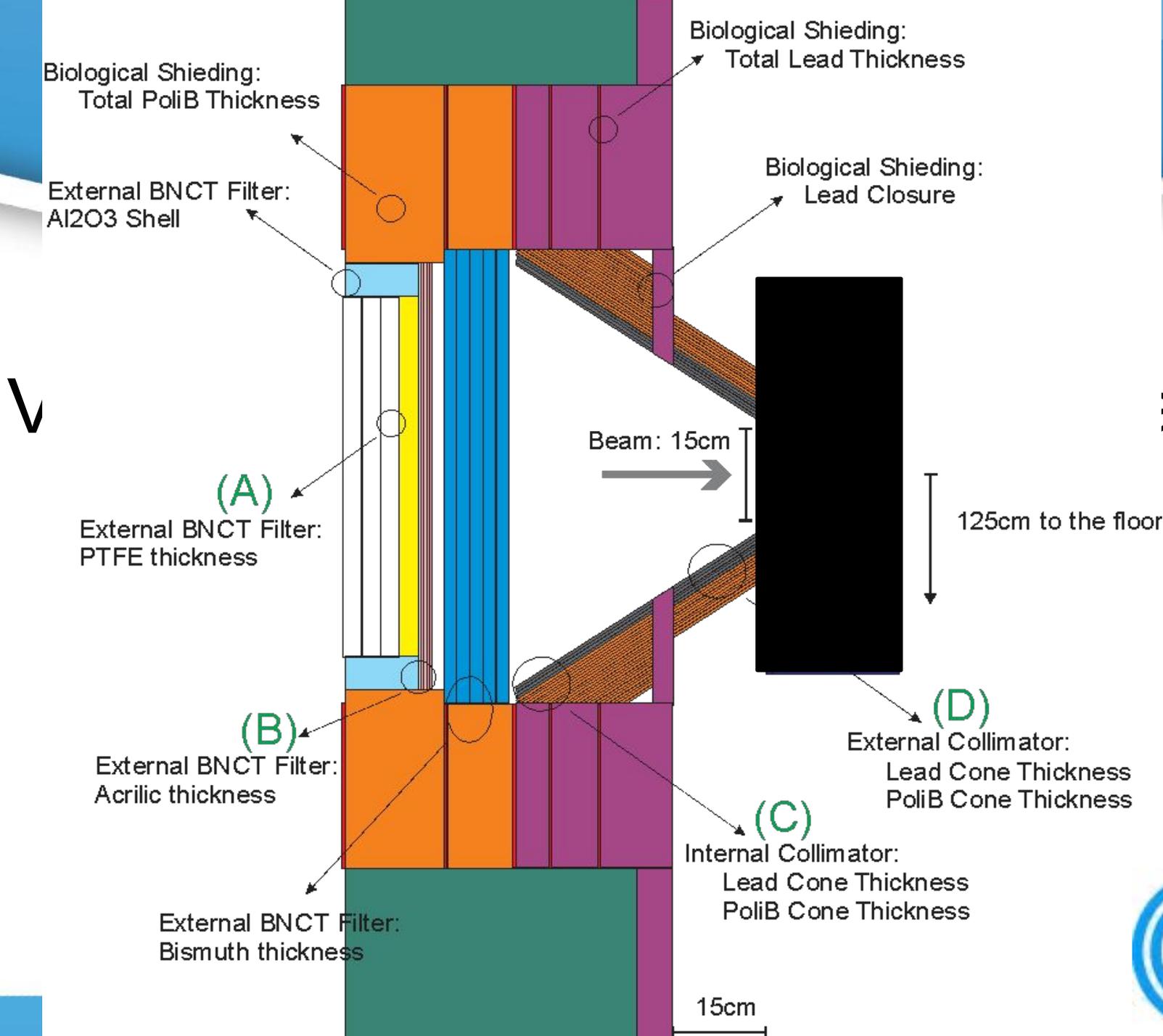
Haciendo uso de la oportunidad, se emprendió el rediseño de la instalación de BNCT para mejorar performance y “usabilidad”.



# Haz B2: Haz Hipertérmico

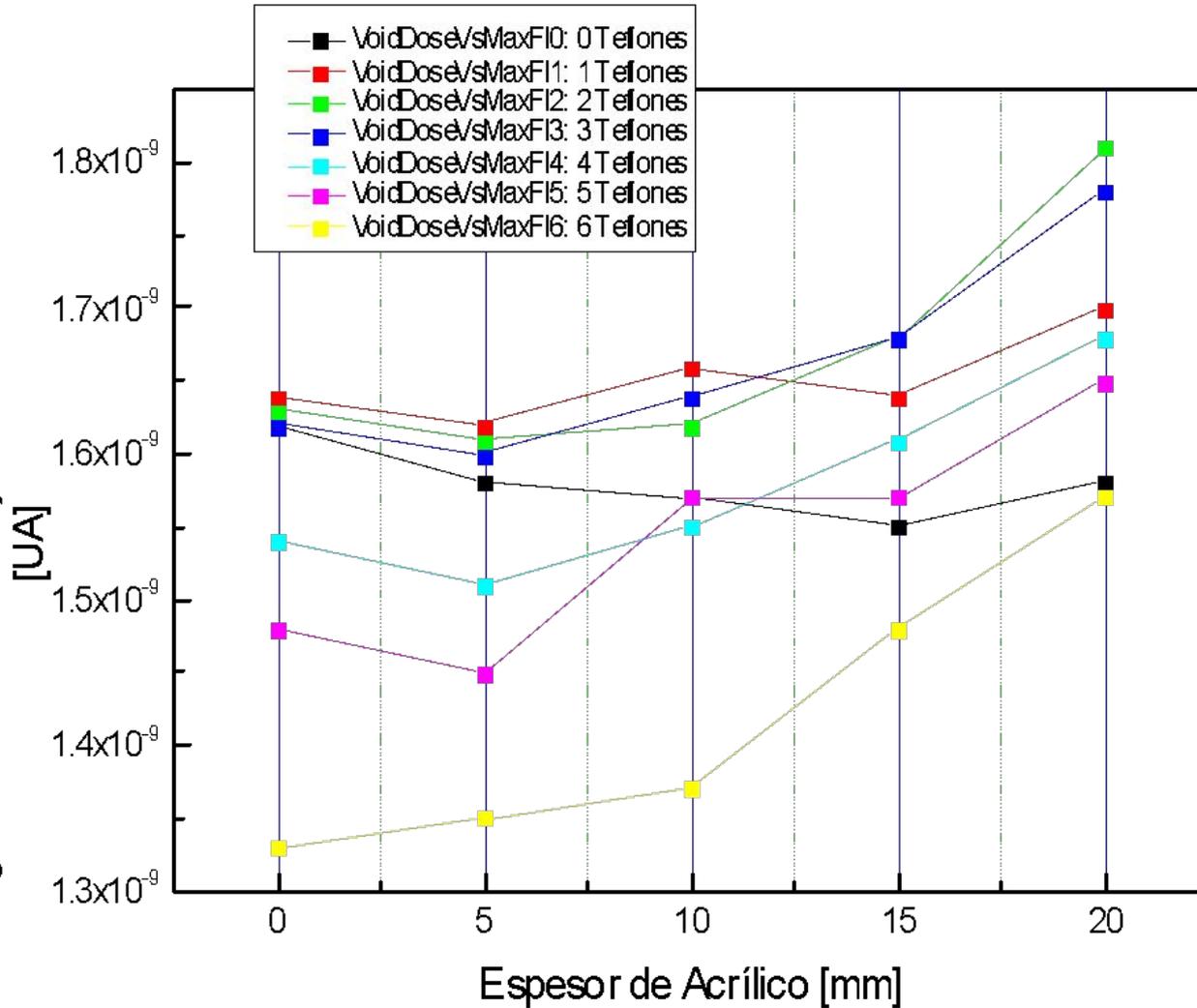
| Reactor Tipo     | Pileta Abierta tipo A  |                       |                                 |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|
| Potencia         | <b>1 MW</b>  |                       |                                 |
| Combustibles     | Tipo MTR de placas<br><b>Enriquecidos al 20%</b>             |                       |                                 |
| Haz BNCT         | Hipertérmico (o Mixto)                                       |                       |                                 |
| Filtro           | Aluminio y Alúmina (+Cd), <b>Alúmina + PTFE + PMMA (ext)</b> |                       |                                 |
| Colimador        | <b>Cónico, protuberante en 15cm, salida de 15cm</b>          |                       |                                 |
| Blindajes        | Bismuto, Plomo y PoliBoro                                    |                       |                                 |
| Caracterización: |  | En vacío              | En FR                           |
|                  | Flujo Térmico [n/cm <sup>2</sup> seg]                        | 2.8 x 10 <sup>8</sup> | 1.05 x 10 <sup>9</sup> (a 1 cm) |
|                  | Dosis G<br>[cGy/min]   | 4.2                   | 9.8 (a 1.2cm)                   |
|                  | Dosis N <sub>fast</sub><br>[cGy/min]                         | 1.7                   | 1.4 (a 1.2c                     |





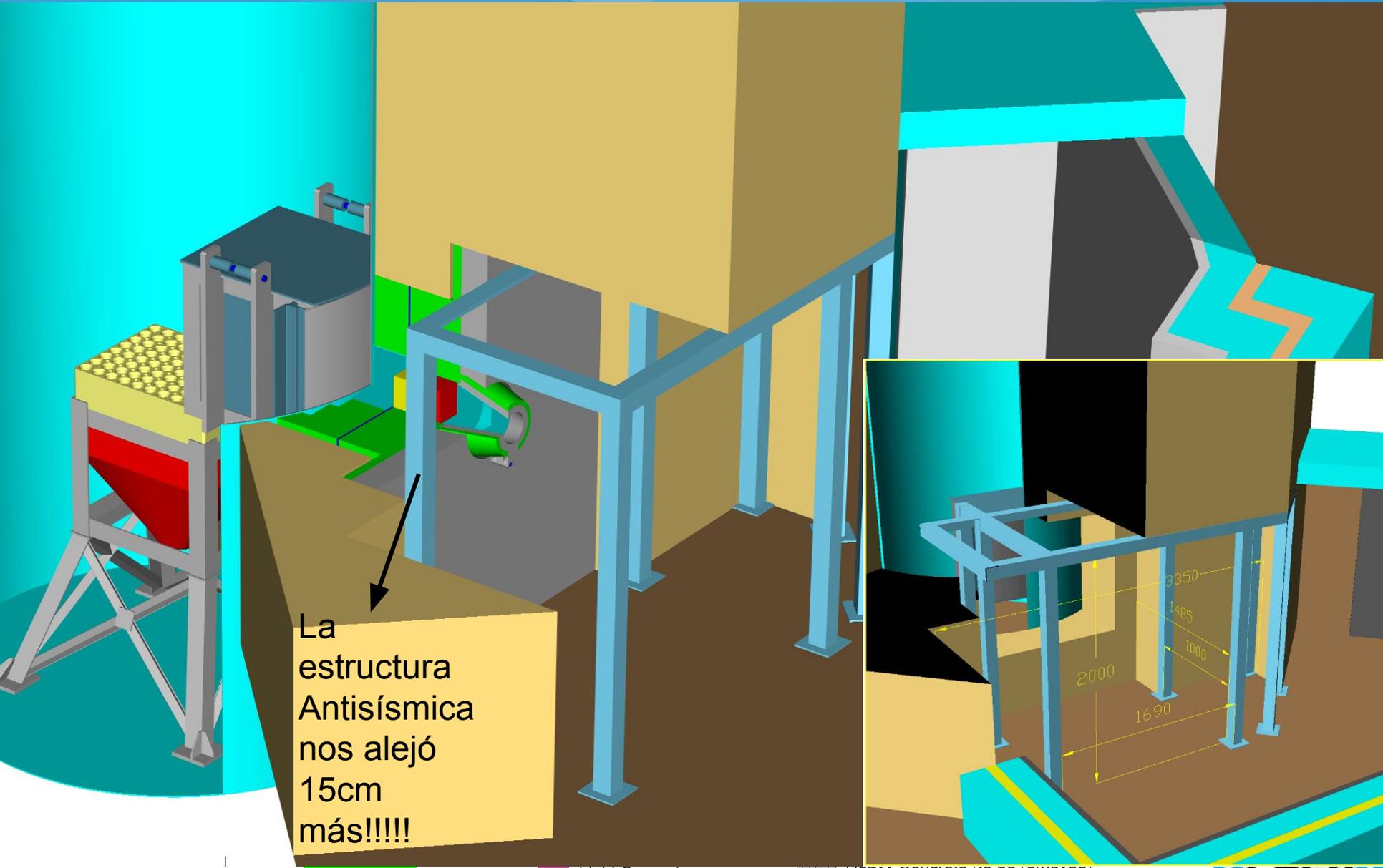
# Performance del Haz B2

DosisBackground en Vacío / Flujo Promedio 1<sup>er</sup> cm Fantoma [UA]



al  
s





La estructura Antisísmica nos alejó 15cm más!!!!

- Light Concrete
- Poliboron
- Heavy Concrete (to be removed)
- Heavy Concrete (to be added)



# Nueva facilidad de BNCT – desde 2014



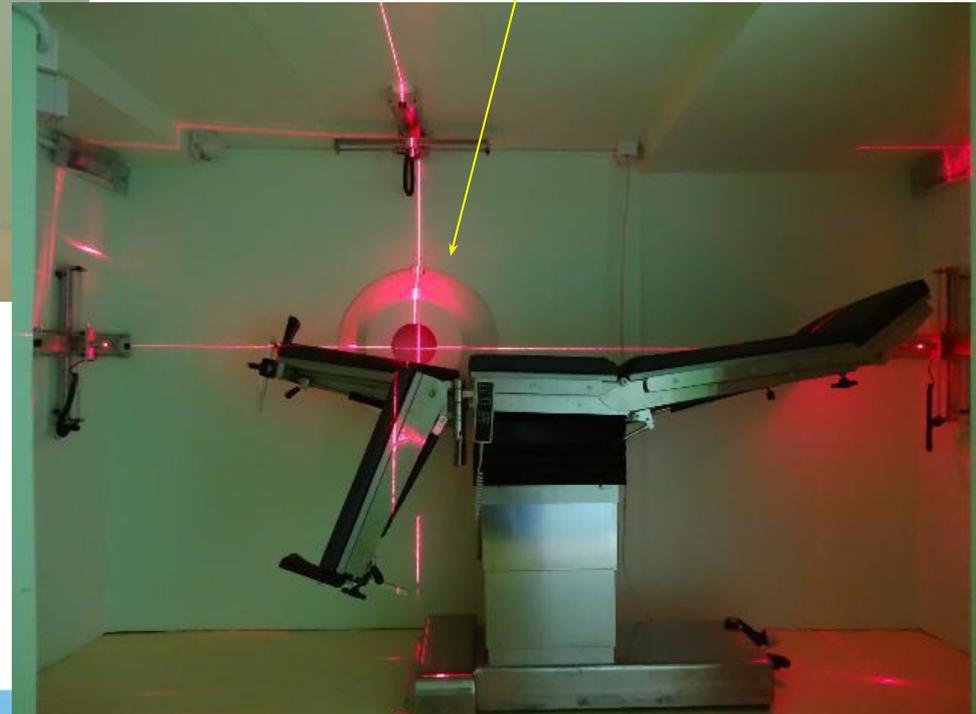
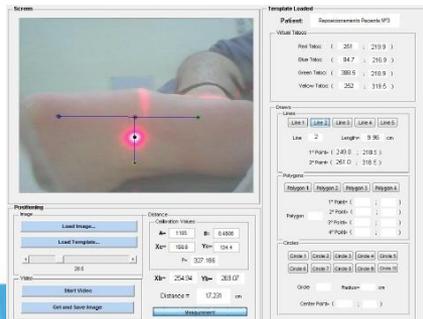
3 m ancho.

Cono protuberante de 15 cm.

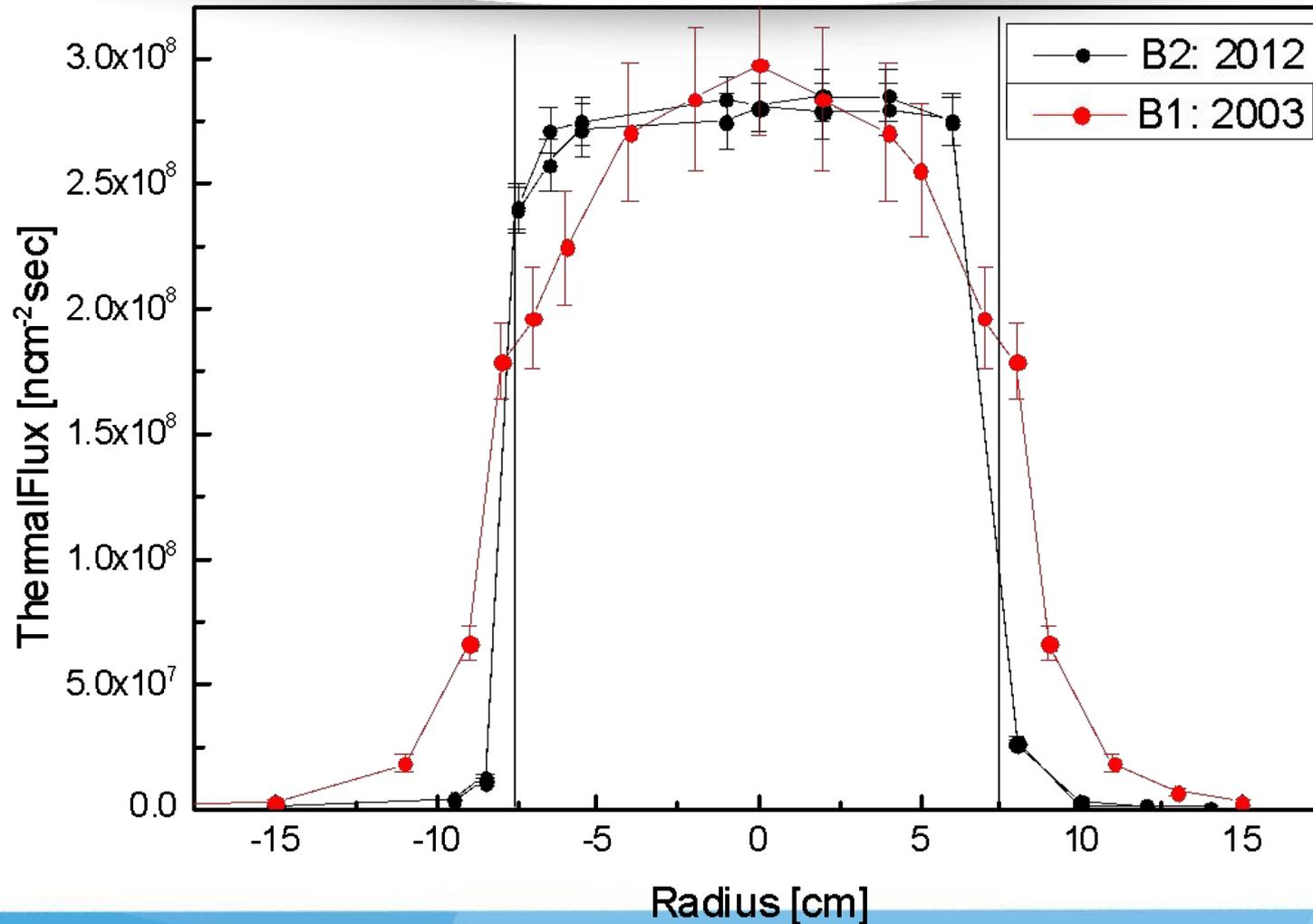
Nueva camilla electromecánica.

Nuevo sistema de láseres de posicionamiento y marcación.

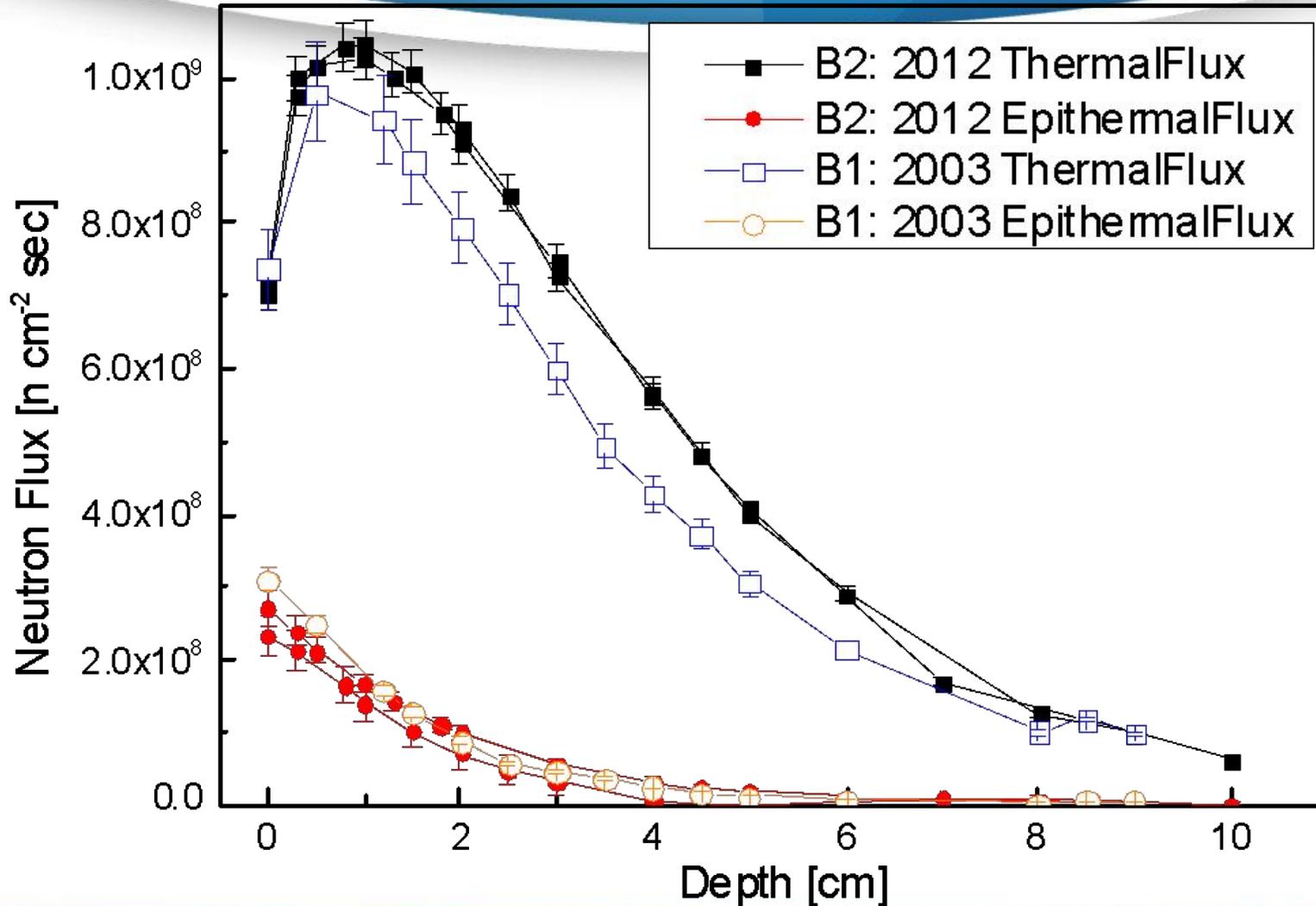
Sistema de visualización interno.



# Haz B2: Caracterización en vacío



# Haz B2: Caracterización en FR



# EN RESUMEN DEL HAZ B2 (actual)

**Se mejoró la usabilidad del haz:**

- a) mediante la prolongación del colimador en 15cm protuberantes sobre el blindaje, y
- b) la expansión de la sala en sus dimensiones laterales.

**El blindaje periférico del Haz (gamma y rápido) fue incrementado sensiblemente (10cm de PoliB y ~25cm de Pb).**

**Se preservó espectro e intensidad del Haz B1.**



# EN RESUMEN DEL HAZ B2 (actual)

El reactor se encuentra licenciado para operación a 1MW; sin embargo **por diseño**, es posible considerar operación a 2MW.

- Es posible el incremento de intensidades de fuente hasta el doble

La configuración actual de núcleo tiene 3 EECC enfrentados al filtro interno de BNCT.

- Es posible la reconfiguración del núcleo, incrementando en uno (1) el número de EECC frente a BNCT (desplazado desde otra posición), y por lo tanto incrementando la fuente cercana en hasta un 30% -

Por lo dicho, se demuestra un alto grado de flexibilidad del Haz, a **requerimiento**.

(escaleo por aumento de potencia, y/o modificación de espectros – como se vio antes-)



Sin  
ope  
eva  
y g  
1.



cia de  
**filtros**

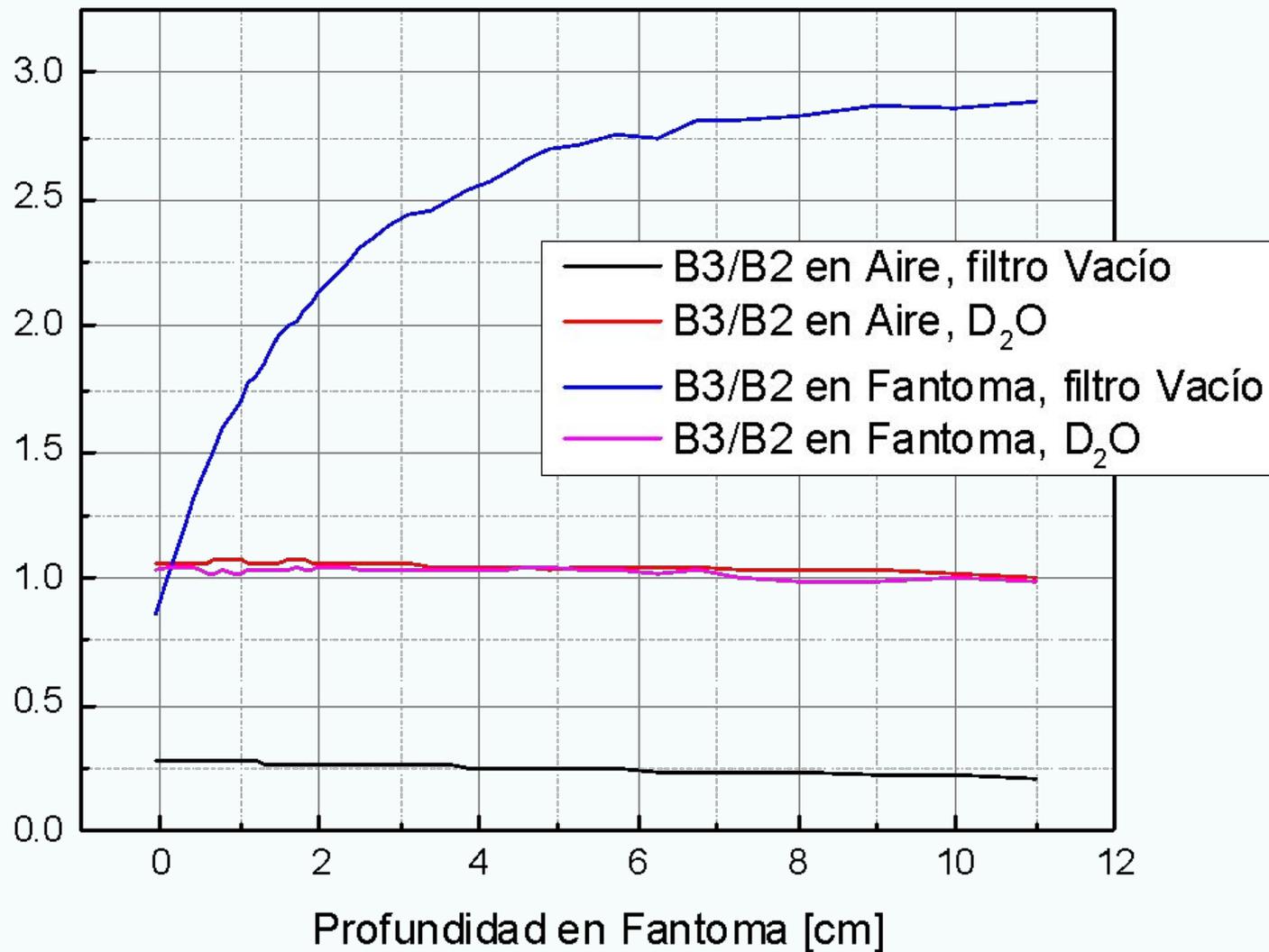
acidad  
mplazo  
líquido

da y/o  
térmico/

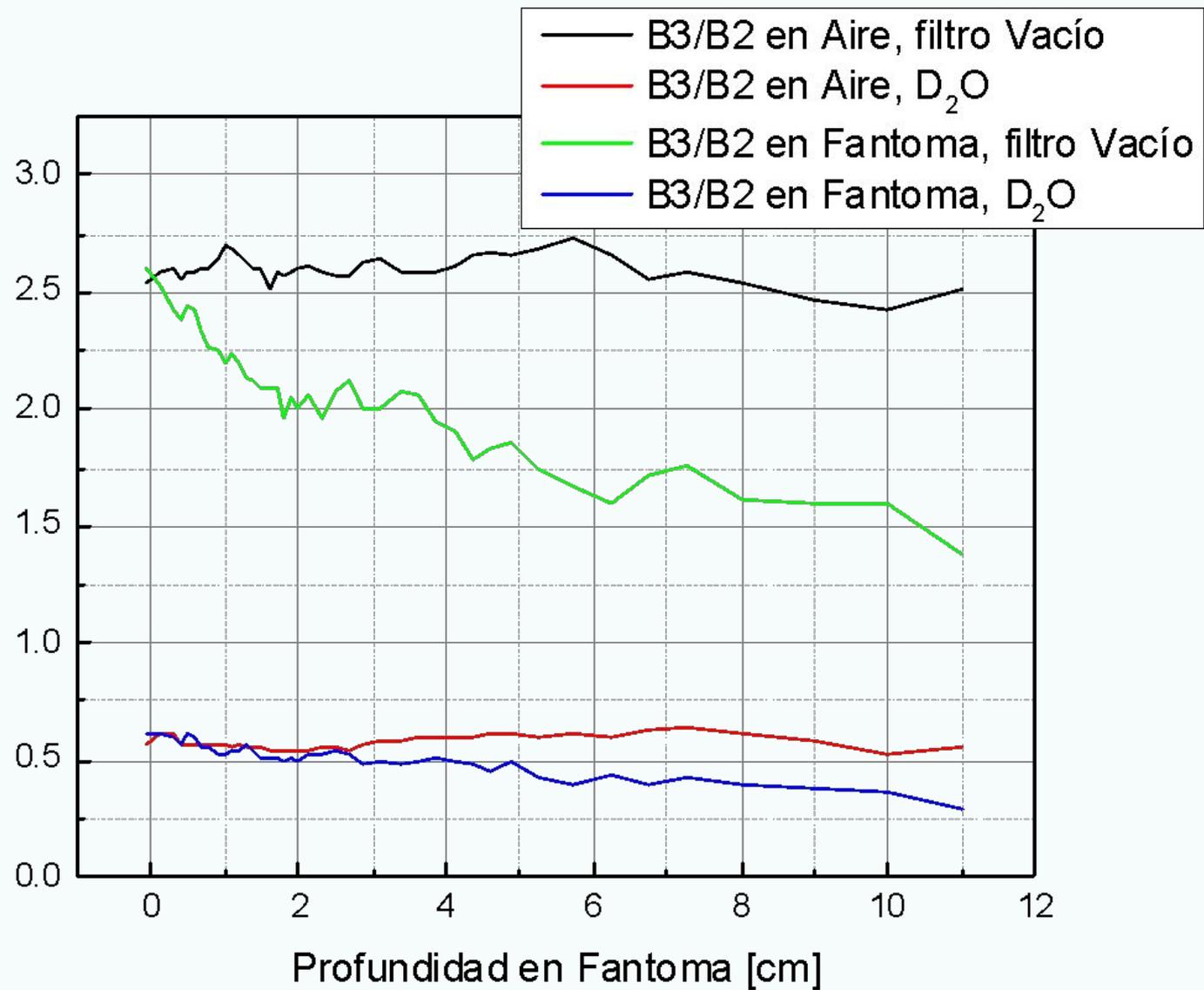
m))



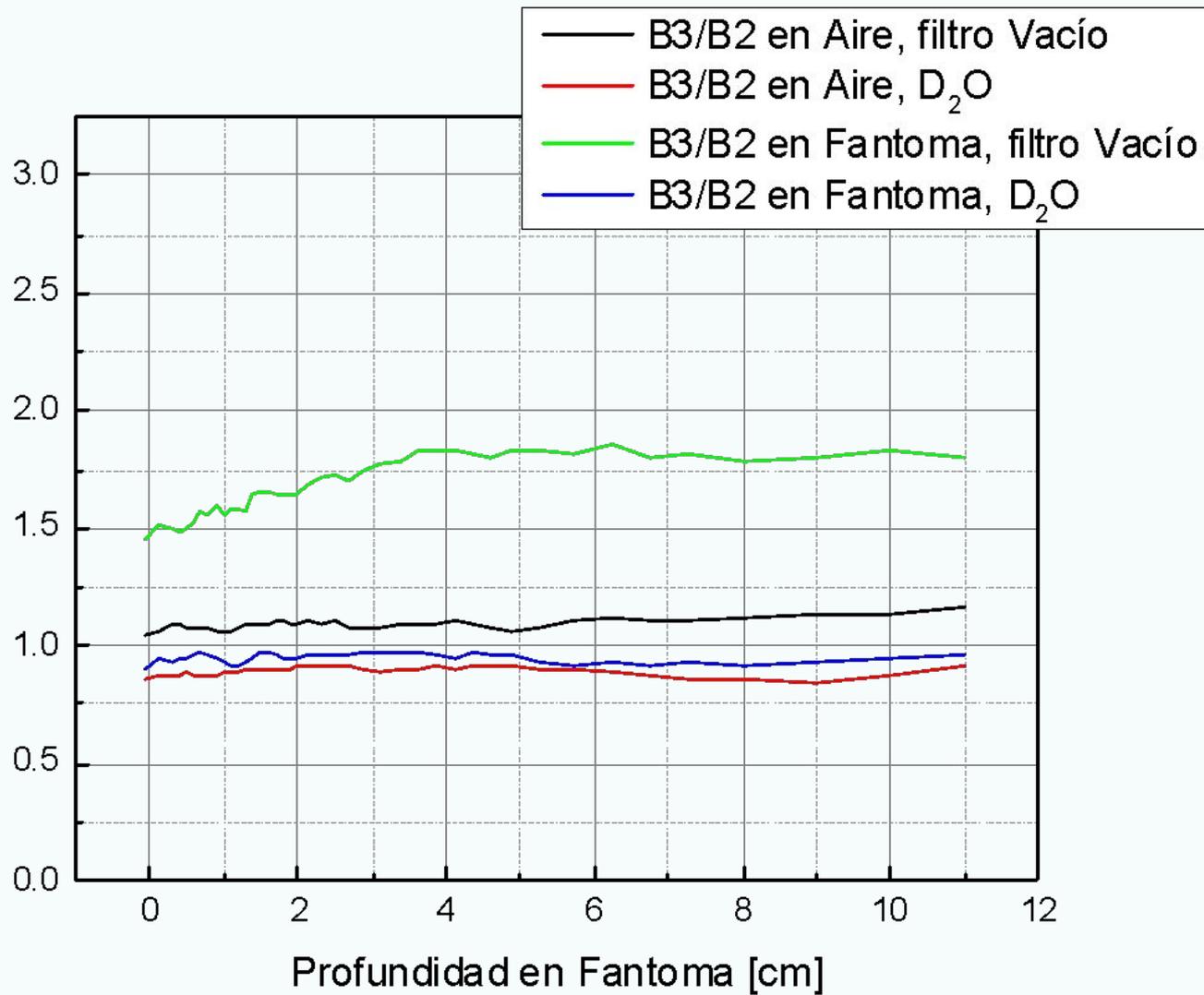
Flujo Térmico relativo: B3/B2



Dosis de Neutrones (relativa): B3/B2



Dosis de Fotones (relativa): B3/B2



0



# Evaluaciones Actuales #2

2. Se encuentra en etapa de caracterización un dispositivo móvil (independiente de la estructura del haz) capaz de movilizar **dinámicamente y en operación**, filtros gamma, de neutrones y condiciones de contorno a un haz más reducido.

\* El dispositivo está planteado para aprovechar la uniformidad radial del Haz colimado para conformar campos mixtos de fotones y neutrones arbitrarios, con el fin TECNOLÓGICO de proveer un campo de calibración único para detectores con sensibilidad a las distintas componentes de radiación (Gamma, neutrones térmicos, neutrones rápidos)

\* Se considera posible aprovechar esta experiencia para proponer una modificación del cono protuberante, incluyendo actuadores para cambio del tamaño y forma del Haz Saliente, y/o filtrado de segundo orden sobre las componentes directas.



# Diseño Conceptual

| Material                      | Base BNCT beam<br>$\Sigma_{el}$ | $\Sigma_{abs}$ | Neutron effects              | Photon effects  |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------------------|---|
| Bismuth                       | 0.2654                          | 0.0010         | Moderator (weak) / Scatterer | Negligible Shielding<br>production Gamma booster            |
| PMMA                          | 1.8842                          | 0.0183         | Moderator                    | 2223keV from $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$               |
| HBO <sub>2</sub>              | Calibration beam<br>1.0508      | 18.73          | Absorber/Moderator           | 477keV from $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$          |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | mobile device<br>0.4516         | 32.50          | Absorber                     | 477keV from $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$<br>walls |
| PoliB                         | 2.3704                          | 3.292          | Absorber/Moderator           | 477keV from $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$          |
| PTFE                          | 0.3265                          | 0.0006         | Moderator (weak) / Scatterer | Negligible Production<br>Photon Filter<br>Tallies           |
| Graphite                      | 0.4584                          | 0.0004         | Moderator (weak) / Scatterer | Negligible Production<br>volume                             |
| Cadmium                       | Bismuth<br>0.3513               | 117.32         | Absorber                     | 558-651keV from $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$  |

■ Cadmium  
■ PMMA  
■ Aluminium





# PROTOTIPO



Cristal B2O3 3mm,  
Pared de Grafito,  
Sin Filtro de fotones

Filtro de  
Fotones  
(plomo)

Prototipo del Disp  
En Sala de Irradiacion



# PROTOTIPO



Rieles

Gamma Booster

**PROTOTIPO:  
VISTAS  
POSTERIORES**



# Evaluaciones Actuales #3

3. A nivel estrictamente académico, se encuentra que la performance del Polietileno Borado es insatisfactoria en su función de blindaje. En experiencias paralelas se encontró que parafina al 30% de óxido de Boro natural supera las prestaciones del PoliB.

... Dando lugar al planteo de reducción de las dimensiones del blindaje, con eventual mejora de sus prestaciones, así como su uso en un eventual Colimador/Delimitador dinámico



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

Contactos: [longhino@cab.cnea.gov.ar](mailto:longhino@cab.cnea.gov.ar)  
[santacr@cnea.gov.ar](mailto:santacr@cnea.gov.ar)

