

# **PISTOLA COAXIAL DE PLASMA DE LA USB.**

## **MEDICIONES PRELIMINARES**

**R. Castell**<sup>1</sup>, **E. Iglesias**<sup>1</sup>, **J. Ruiz-Camacho**<sup>2</sup> y **J. Ramírez**<sup>3</sup>  
Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

<sup>1</sup> Laboratorio de Espectroscopia Láser y Plasma,

<sup>2</sup> Laboratorio de Física de Plasmas

<sup>3</sup> Laboratorio de Alta Tensión

### **RESUMEN**

En este trabajo se presentan resultados obtenidos de la cinética del plasma expulsado por una pistola de plasma, tipo Marshall, que opera en atmósferas puras de Helio o Nitrógeno a presiones entre 50 y 500 militorr. El tiempo de vuelo del frente de choque plasma-gas se diagnosticó en su propagación, a lo largo de una cámara de expansión de 50 cm, usando una sonda de Langmuir en la dirección longitudinal. Se utilizó también la técnica de deflectometría con un haz láser de He-Ne para detectar el paso del plasma. Líneas de transmisión de diferentes geometrías, materiales y parámetros de amortiguamiento, se utilizaron para generar descargas con corrientes pico de 35 kA y períodos de oscilación entre 20 y 60  $\mu$ s al descargar en la pistola la energía de un condensador de 12.5  $\mu$ F a 25 kV.

**Palabras Clave:** Descargas pulsadas, Pistolas de plasma, Sondas de Langmuir, Deflectometría, Propagación de Plasmas.

### **Autores**

**Ricardo Castell**, Ph.D. en Física de la Universidad de Pittsburgh, PA, EE.UU.

Profesor Titular de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

**Enrique Iglesias**, Ph.D. en Física de la Universidad de Maryland, College Park, Maryland, EE.UU. Profesor Titular de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

**José Ruiz-Camacho**, Ph.D. en Física de la Universidad de Londres, Imperial College, Londres, UK. Profesor Asociado de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

**Jorge Ramírez**, Ing. Electricista, M.Sc, Diploma de Estudios Avanzados de la Universidad Carlos III de Madrid, España. Profesor Asociado de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

## Introducción

Desde comienzos de los años sesenta surgió un gran interés por el estudio de las características de aceleradores coaxiales, también conocidos como *pistolas de plasma coaxial* (PPC) [1], destacándose en particular los trabajos de J. Marshall [2] de USA y N. Filippov [3], de la antigua Unión Soviética. Gran parte de esas investigaciones experimentales han demostrado que los mismos modelos teóricos que se usan para el estudio de las PPC de altas energías (entre 100 J y 10000 J) pueden ser extendidos a las PPC que trabajan en un régimen de bajas energías (entre 10 y 100 J) [4-6].

Las pistolas coaxiales son conocidas por su capacidad de producir perturbaciones sobre un gas de fondo que se propagan con altos números de Mach. Las temperaturas, densidades electrónicas y velocidades de propagación asociadas tanto con el frente de choque como con el plasma así generados, son de gran utilidad en diversas áreas de la física de plasmas para estudiar estabilidad, transporte de especies, hidrodinámica y espectroscopía, entre otros aspectos.

Se presentan aquí los resultados preliminares obtenidos sobre la cinética del plasma expulsado por la pistola, a partir de las mediciones de una sonda doble de Langmuir [7] colocada a lo largo del eje de expansión del plasma. Simultáneamente se realizaron mediciones usando la técnica de deflectometría láser, midiendo la deflexión que experimenta un haz láser (He-Ne) continuo dirigido perpendicularmente a la dirección de propagación del plasma [8]. Estos resultados se utilizarán en el diseño de una nueva pistola con inyección de gas pulsado para introducir inestabilidades en otro plasma.

## Materiales y Método

La pistola está constituida por dos electrodos cilíndricos concéntricos de acero inoxidable de 17 cm de longitud. El electrodo interno -cátodo- tiene 2,6 cm de diámetro y el electrodo externo -ánodo- tiene 4,6 cm. Un disco de acero separa los electrodos en uno de sus extremos por una pequeña brecha (2 mm) en la cual se inicia la descarga. Este conjunto es llamado *cátodo hueco* (ver Figura 1). La energía almacenada en el condensador de 12,5  $\mu\text{F}$  que se carga a 25 kV es transferida al cátodo hueco a través de una línea de transmisión al accionar un interruptor mecánico presurizado con  $\text{SF}_6$ . Las características de

la línea son: una inductancia de 180 nH, una resistencia de 0,2  $\Omega$ , y una capacitancia de 600 pF.

La descarga inicial produce una corriente laminar que se mueve radialmente entre los electrodos y luego adquiere una forma parabólica, tal como se muestra en la Figura 2. El frente plano y anular de corriente se auto propulsa debido a la inducción magnética acimutal creada por la corriente axial del electrodo central. La fuerza de Lorentz resultante,  $\vec{j} \times \vec{B}$ , acelera el plasma a lo largo del eje de la cámara, ionizando el gas que se encuentra a su paso. El proceso completo [9] puede ser dividido en tres fases claramente distinguibles: en la primera se produce la ionización o rompimiento del gas con la formación del frente de corriente con forma parabólica en el extremo inicial, en la segunda se produce la aceleración hidromagnética del frente de corriente con simetría axial y radial a lo largo de los electrodos coaxiales y finalmente en la tercera fase, al llegar al extremo del acelerador, la lámina o anillo de plasma se propaga y expande en dirección axial y radial.

En este experimento la cámara de expansión es un cilindro de vidrio Pyrex de 10 cm de diámetro y 50 cm de longitud colocada coaxialmente con la pistola. Todo el sistema es previamente evacuado por una bomba mecánica hasta alcanzar presiones base por debajo de 0.1 millitorr. Una válvula de precisión permite controlar el flujo permanente del gas de alta pureza (helio o nitrógeno) donde se propaga el anillo de plasma. La evolución de una señal que es proporcional a la densidad electrónica del plasma se mide con una sonda de Langmuir en la dirección axial de expansión. A 2 cm del extremo final de la pistola y dentro de la cámara de expansión el haz continuo de un laser de He-Ne cruza perpendicularmente el eje común de todo el sistema e incide en un detector de cuadratura de respuesta rápida ( $< 50$  ns) que permite registrar las desviaciones hasta del orden de los microradianes que el plasma pulsado produce sobre la trayectoria del haz laser. Las señales de la sonda de Langmuir y del deflectómetro láser fueron almacenadas simultáneamente en un osciloscopio digital Tekronix (modelo TDS3032B, 300 MHz). Una bobina de Rogowski de 50 kA fue utilizada para registrar la corriente de la descarga y a la vez permitir la sincronización de todos los registros electrónicos con el inicio de la descarga. En este experimento todas las descargas fueron bajo las mismas condiciones eléctricas: 25 kV y corrientes pico de 35 kA.

## Resultados y discusión

La impedancia de la pistola de plasma en función de la frecuencia se obtuvo a partir del cociente entre la transformada de Fourier (FFT) de la tensión aplicada a la entrada de la pistola y la transformada Fourier de la corriente medida en el circuito. La respuesta en frecuencia se conoce también como la función de transferencia ya que relaciona la tensión medida a la entrada de la pistola con la corriente que circula por ella. Esta técnica caracteriza la respuesta del circuito.

En la Figura 3 se muestran las señales de tensión y corriente medidas durante la operación de la pistola. De estas se deriva un valor aproximado de 0,2 ohms para la impedancia del sistema en el rango de frecuencias de 1 a 5 kHz. Esta respuesta es similar a la impedancia de un circuito en serie RL, donde L representa la inductancia del cátodo hueco y R la resistencia efectiva de la corriente laminar de descarga, ambas variables en función del tiempo.

El diferencial de presión que se origina debido a la lámina de corriente que arrastra (por un “*efecto pistón*”) tanto al plasma generado como al gas neutro da lugar a un gradiente de densidad que se propaga con la onda expansiva que acompaña al plasma. En la Figura 4 se observan registros temporales característicos de estos fenómenos obtenidos en dos presiones diferentes de nitrógeno (300 y 500 millitorr). Mientras que la señal de la sonda de Langmuir indica claramente el comportamiento de la carga eléctrica negativa que viaja con el plasma, la señal del deflectómetro señala la presencia de rápidos gradientes de densidad tanto del gas neutro como de los electrones del plasma. Estas medidas se realizan a través de los correspondientes gradientes del índice de refracción del plasma, observando la deflexión del haz (láser) cuando atraviesa la columna (ver Figura 1). La alta reproducibilidad de las mediciones, promediando un mínimo de 5 disparos consecutivos bajo condiciones similares, asegura una variación en los resultados, inferior al 15%.

La Figura 5 muestra el comportamiento del tiempo de vuelo de la señal de plasma, medida con una sonda doble de Langmuir, en un rango de distancias entre 3 y 45 cm del borde de la pistola. De la tendencia lineal (para distancias inferiores a 30 cm) se infieren velocidades entre 4 y 20 km/s, dependiendo de las presiones y el tipo de gas, que concuerdan con los valores observados en otros experimentos [10]. Con el valor medido de las velocidades asintóticas y haciendo uso de la densidad del gas neutro, se estimó una cota

superior para el número Reynolds entre  $1.2 \times 10^3$  y  $2 \times 10^4$ . El número de Reynolds mide la proporción entre la inercia del frente de choque y las fuerzas viscosas y por lo tanto es un índice de la estabilidad del frente. En este tipo de experimentos se deben obtener números de Reynolds menores a  $10^4$ , como condición necesaria, para considerar el plasma estable. Sin embargo la Figura 4, muestra trazas de la sonda de Langmuir que evidencian un frente de choque bien formado, no turbulento, a pesar de su cercanía -2 cm- de la salida de la pistola. Este frente mantiene su estructura e integridad hasta distancias de 50 cm.

Finalmente, la variación de la intensidad de corriente del plasma registrada por la sonda doble de Langmuir a lo largo de la cámara de expansión para los dos gases estudiados, en función de la presión, se resume en la Figura 6. El decaimiento de la señal muestra claramente el efecto de la expansión y la variación de la transferencia de energía, entre el plasma eyectado y el gas neutro de fondo, dependiendo de las características de éste último.

## **Conclusiones**

Se realizaron mediciones preliminares de la cinética del plasma, confirmando valores de propagación entre 7 y 20 km/s en un gas liviano (He) y entre 4 y 7 km/s en un medio más pesado ( $N_2$ ), a presiones comparables de 300 y 500 millitorr.

El plasma generado por este acelerador, para las condiciones eléctricas establecidas, se disipa a una distancia del orden de 50 cm desde su salida de la pistola.

Se probó la utilidad del deflectómetro láser construido en el laboratorio para detectar la presencia de dos eventos refractivos de diferente naturaleza propagándose con la lámina de plasma.

## Referencias

- [1] Mather J, *Phys. Fluids Suppl.* **7**, S5-S28 (1964).
- [2] Marshall J, *Phys. Fluids* **3**, 134 (1960).
- [3] Petrov P, Filippov N *et al*, “*Plasma Physics and the Problems of the Controlled Thermonuclear Reactions*”, Vol. 4, Pergamon, New York, p. 198 (1960).
- [4] Soto L, Esaulov M, *et al*, *Phys. Plasmas* **8**, 2572 (2001).
- [5] Silva P, Soto L, *et al*, *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 2583 (2002).
- [6] Moreno J, Silva P y Soto L, *Plasma Sources Sci. Technol.* **12**, 39 (2003).
- [7] Schott L, *Plasma Diagnostics*, Chap. 11, North-Holland, Amsterdam (1968).
- [8] B. A. Knyazev, J. B. Greenly, D. A. Hammer, E. G. Krastelev y M. E. Cuneo, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, **5**, 2310 (2001)
- [9] Mather J y Williams A, *Phys. Fluids. Res. Note* **9**, 2081 (1966).
- [10] Pert J E, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **3**, 203 (1970).

## Subtítulos de las Figuras

**Figura 1.** Diagrama esquemático del montaje experimental

**Figura 2.** Diagrama esquemático de la evolución de la lámina de corriente en la pistola de plasma pulsado.

(a) La descarga comienza en la base de los electrodos y la corriente laminar es formada en la superficie del aislante.

(b) La corriente laminar es acelerada a lo largo de los electrodos coaxiales.

(c) La corriente laminar continua propagándose después de pasar el extremo libre de los electrodos.

**Figura 3.** Comportamiento temporal del voltaje y la corriente eléctrica registrados en la pistola durante la descarga y la función de transferencia (impedancia) del sistema.

**Figura 4.** Señales características adquiridas simultáneamente con la sonda doble de Langmuir y el deflectómetro durante la descarga cerca de la salida del acelerador.

**Figura 5.** Velocidades de propagación del plasma a lo largo de la cámara de expansión en He y N<sub>2</sub> a diferentes presiones, derivadas a partir del registro de la densidad electrónica máxima para diferentes posiciones de la sonda axial a lo largo de la cámara de expansión.

**Figura 6.** Evolución espacial de la densidad electrónica del plasma medida con la sonda doble de Langmuir a lo largo de la cámara de expansión en nitrógeno y helio puros a diferentes presiones atmosféricas.

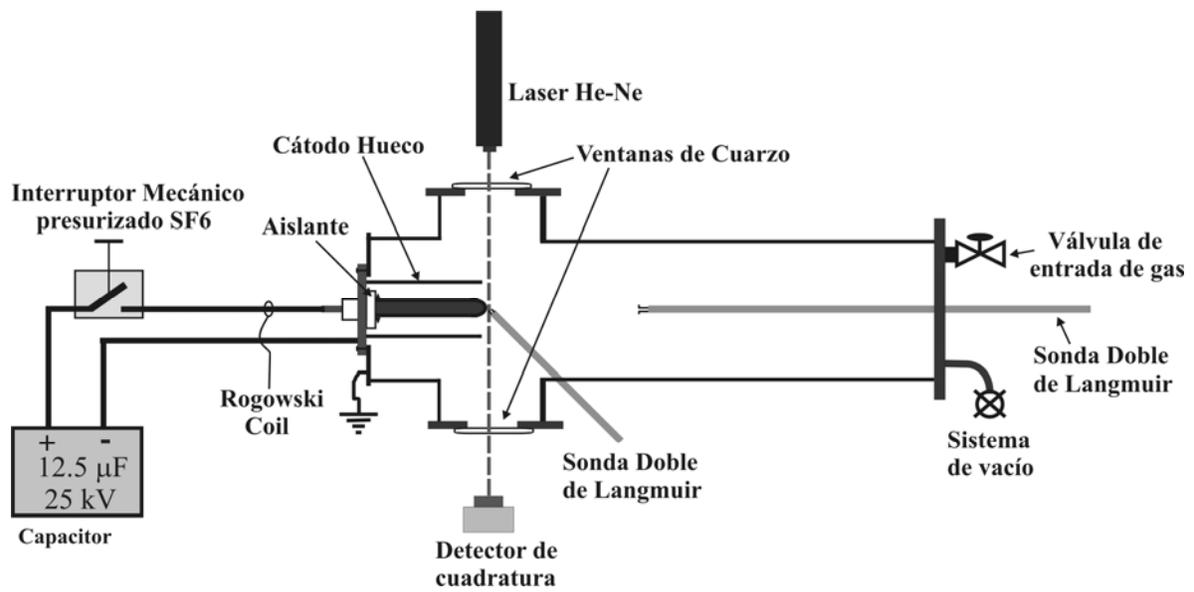


Figura 1

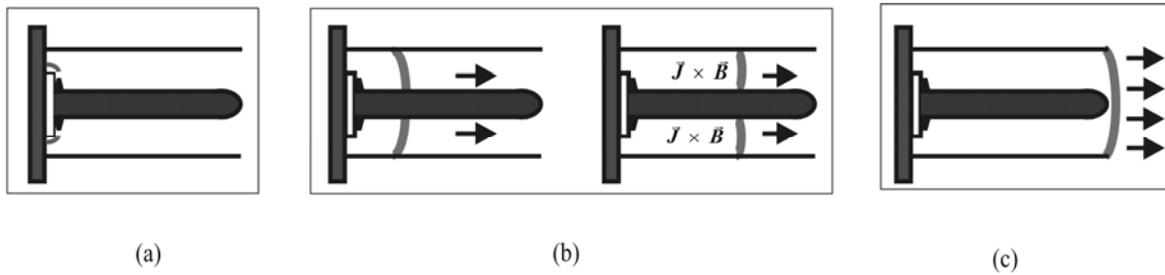


Figura 2

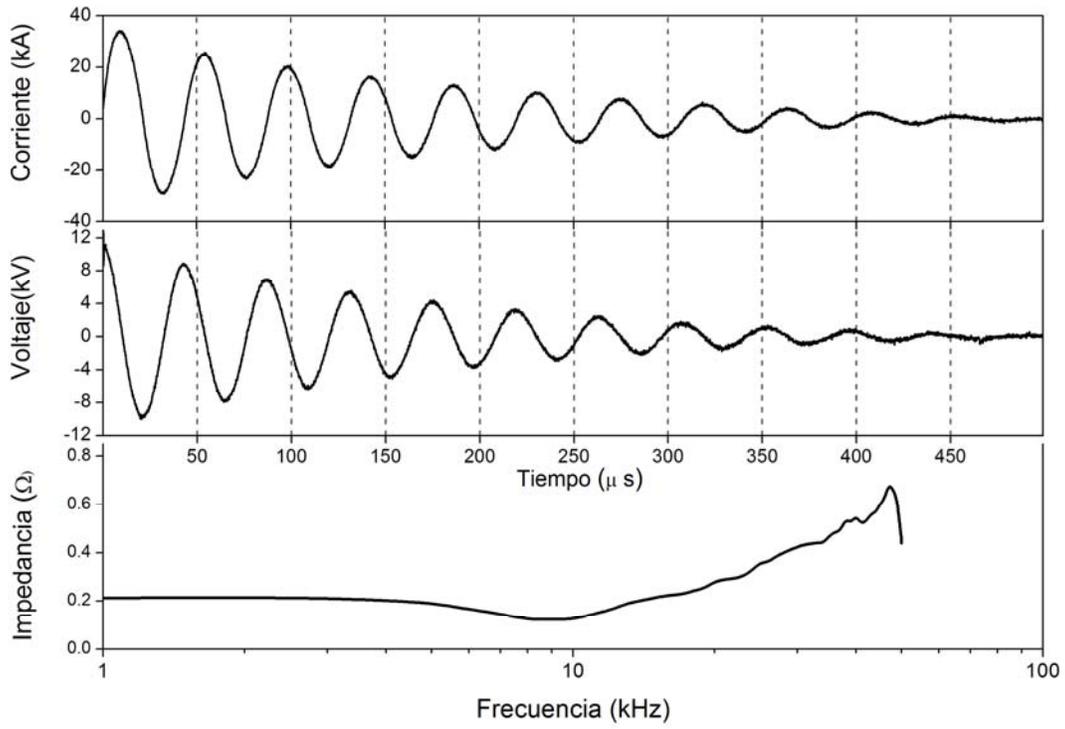


Figura 3

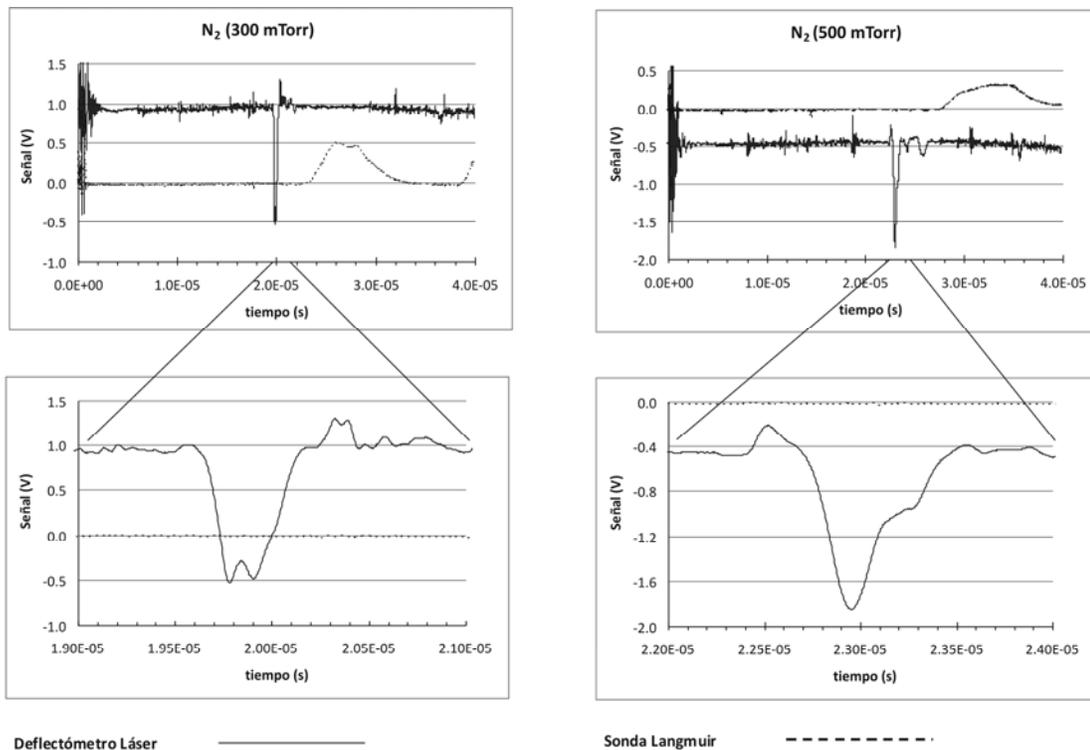


Figura 4

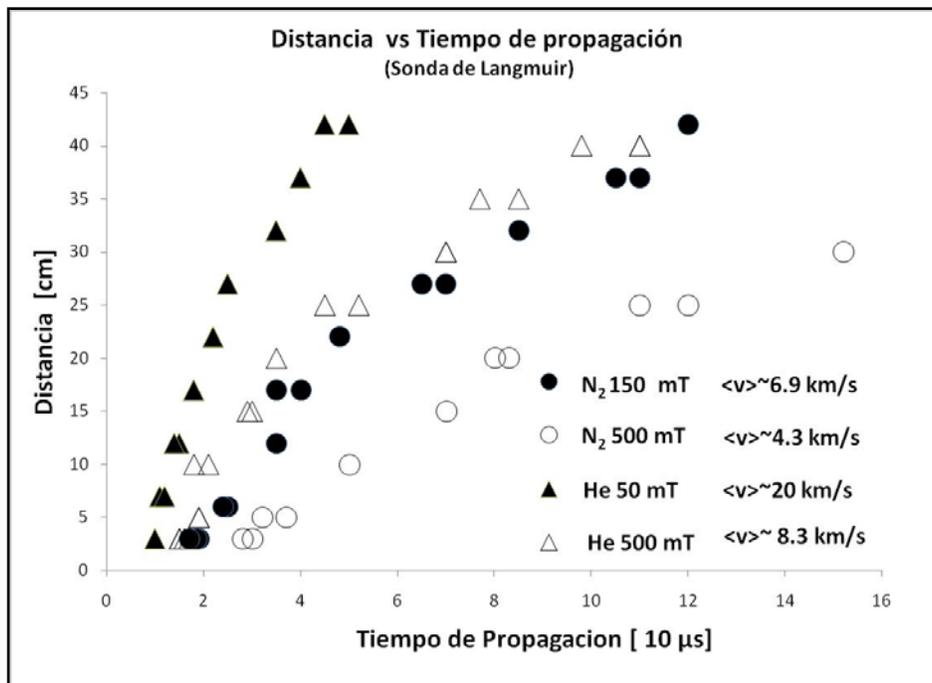


Figura 5

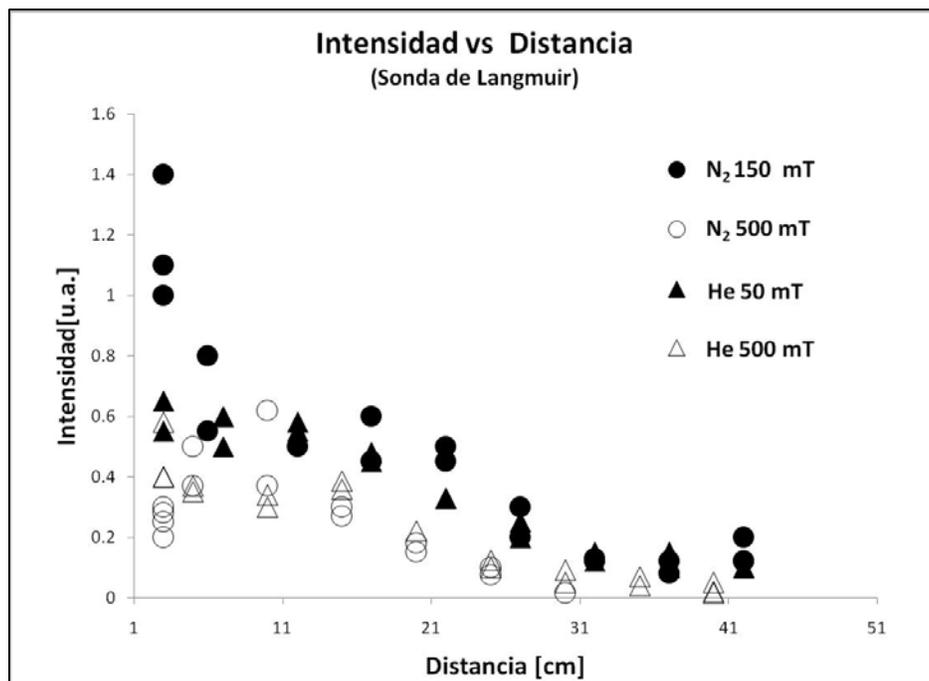


Figura 6