

Caracterización de la dinámica de plasmas anulares generados por láser

Raimundo Hoppe, Mario Favre, Vicente valenzuela

Facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Abstract:

Se estudio utilizando el efecto schlieren la dinámica del la columna de plasma formada por un láser "A Nd : YAG" de 340 mJ, 3.5 ns, a 1.06 μm , el cual fue concentrado de forma anular (utilizando una combinación de lentes convergentes y un axicon) sobre blancos de Carbono y Titanio bajo distintas presiones de gas de fondo, ademas de incluir una medición bajo la presencia de un campo magnético axial. Tales mediciones se compararon bajo los modelos de onda de choque esférico y de arrastre con la intención de obtener tanto las velocidades iniciales de la pluma de plasma como la eficacia de ambos modelos para representar el fenómeno.

Introducción:

Es posible generar un plasma de forma anular utilizando un láser en conjunto con un set de espejos convergentes y un axicon. Este plasma luego comienza una fase de expansión desacelerada la cual puede ser bastante útil para confirmar o negar la validez general de los modelos de expansión del plasma establecidos dentro de la literatura. En específico utilizaremos 2 modelos durante esta experiencia.

Modelo de choque Esférico:

$$Z(t) = \alpha t^n$$

En el cual un valor usual para el n es de 0.4¹ y el segundo modelo es el arrastre, el cual sigue la siguiente ecuación:

$$Z(t) = \alpha(1 - e^{-\beta t})$$

Donde ademas resulta que $\alpha = v_0/\beta$, siendo v_0 la velocidad inicial del plasma.

Sabiendo esto, se pretende utilizar el efecto schlieren para poder observar de manera clara el movimiento del plasma en 2 ejes, el perpendicular a la base (Axial) y el paralelo a la base, siendo este ultimo medido tanto a 2.5mm de ella, como justo en frente.

Otros parámetros que manejaremos durante esta experiencia serán:

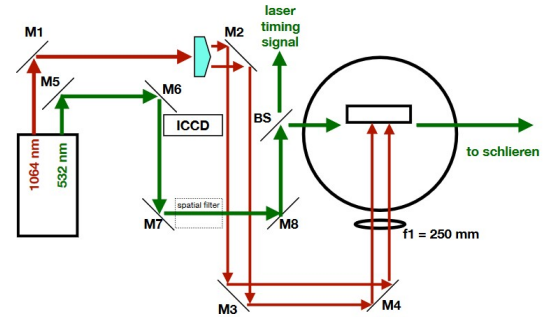
- El blanco en el que se produce el plasma (en esta ocasión Carbono o Titanio)
- El gas de fondo por el que la columna de plasma deberá moverse (Atmósfera de Aire o Argón)
- La presión de dicho gas de fondo (Se decidió utilizar 1, 1/3 y 1/5 Atm)
- La presencia o ausencia de un campo magnético axial generado por un imán

Con esto esperamos poder encontrar el modelo que mejor se ajusta a una expansión de dichas características y una primera aproximación a la velocidad inicial de la columna de plasma que se formara.

El Set-Up utilizado se muestra en la figura 1, mientras que en la figura 2 se puede ver un ejemplo de los datos obtenidos.

Una pequeña explicación del Set-Up:

se utilizaran 2 ases de luz, uno de longitud de onda 1064 nm (línea roja) y otro de 532nm (línea verde), la idea consiste en disparar el láser de 1064 nm, el cual atravesara el axicon y sera concentrado de forma anular en el blanco, mientras que se le aplica un delay definido al segundo haz, con el fin de que este pase en un momento dado y se le pueda tomar una foto en el momento requerido



Vicente Valenzuela, 23 Jan 2018

FIGURA 1. Diagrama del Set-Up del experimento

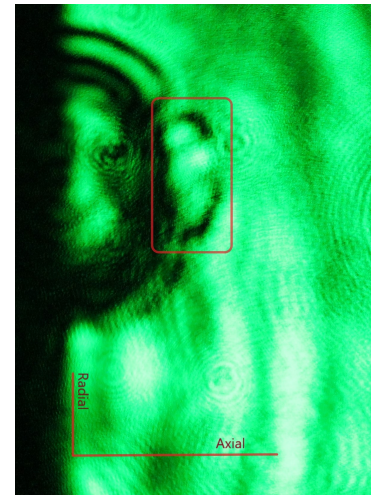


FIGURA 2. Ejemplo de los datos obtenidos, se enmarco ademas un tipo de estructura interna que se genero dentro de gran parte de las columnas de plasma

¹Valor encontrado en la guía "Dinámica de la pluma de plasma en fondo de gas" del grupo de plasmas de la pontificia universidad católica de Chile

Por ultimo es necesario mencionar que los modelos aplicados fueron modificados de manera ligera para que pudiesen ser utilizados de manera eficaz. Choque esférico:

$$(1) \quad Z(t) = \alpha(t - Delay)^n + C$$

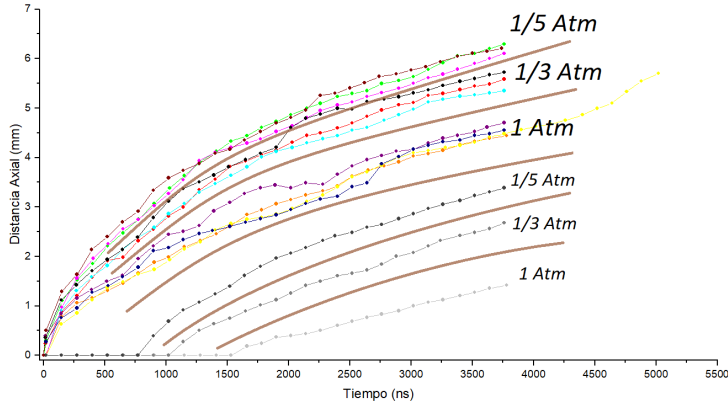
$$(2) \quad Z(t) = \alpha(1 - e^{-\beta(t-Delay)}) + C$$

Donde se agrego el termino de Delay para poder aplicarse a los sets de datos que no comenzaban en $t=0$, como es el caso de todas las mediciones del diámetro de la columna de plasma a $\sim 2,5mm$ de la base, y el termino C para considerar el hecho de que el plasma parte en forma anular con radio 1 mm.

Análisis:

Análisis Cualitativo de las curvas:

Observando en primer lugar la Figura 6 de la sección 1.1 del anexo podemos observar una clara separación entre las curvas correspondientes a 1, 1/3 y 1/5 de atmósfera, independiente tanto de la naturaleza del gas de fondo, como del blanco utilizado (con una pequeña excepción de el experimento cuyos datos se marcan en negro, pero esto fue debido a la aparición de una sub-estructura en la columna de plasma, como se ve en la figura 2. Para facilitar la apreciación de este hecho mostramos el siguiente gráfico:



Las diferencias individuales de estas curvas dentro de estos grupos no da indicios de que exista alguna correlación entre la distancia axial y el gas de fondo utilizado, aunque debido a las fluctuaciones en la velocidad de crecimiento de la columna de plasma debido a las estructuras internas que se forman podría ser que exista dicha relación, pero que es necesario un seguimiento mas prolongado para hallarla.

Por otra parte, si nos fijamos en el gráfico presentado en la figura 7 de la misma sección del anexo, vemos que se mantiene esta separación entre los 3 parámetros de presión usados, pero que esta vez el crecimiento del plasma no es afectado tanto

en el caso con la presencia del imán. Esto es cercano a lo que esperábamos, pues el imán utilizado pretendía situar un campo magnético axial.

Ademas podemos ver que el orden de las curvas dentro de los grupos formados fue modificado, lo que se mantiene dentro de lo dicho anteriormente.

Por ultimo en el tercer gráfico de la sección 1.1 se siguen viendo los grupos, los cuales se acentúan aun mas debido a la diferencia de tiempo en el que se las distintas columnas de plasma alcanzan los $\sim 2,5mm$ necesarios para la medición. Notar ademas que en el caso del experimento usando el blanco de carbono y el imán, la columna cuyo gas de fondo poseía una presión de 1 Atm no alcanzo los $\sim 2,5mm$ en los $\sim 3700s$ que fueron considerados.

Pasando entonces a la sección 2.1 del anexo, donde se comparan los 2 modelos vemos que en una primera etapa ($t \leq 2000 ns$) las curvas correspondientes a la distancia axial recorrida por las columnas de plasma son mayormente representadas por el modelo de choque esférico de mejor manera que con el modelo de arrastre, para luego en tiempos mas tardíos verse una transición al modelo de arrastre para ciertas curvas, por ejemplo, la curva celeste de la figura 7(B) correspondiente al experimento de blanco de carbono en 1/3 de atmósfera de aire o la curva negra de la figura 7(D) del experimento de blanco de titanio con 1/3 de atmósfera de aire.

De esto surge la siguiente interrogante ¿es posible que para presiones cercanas al 1/3 Atm el modelo de arrastre sea mas eficiente al momento de describir el fenómeno?, por desgracia nuestros datos no nos permiten avanzar mas en esta duda con respecto a la distancia axial, pero confirmaremos a continuación si esta tendencia se mantiene en las mediciones siguientes.

Luego con respecto al Diámetro externo del plasma (sección 2.2) se observa que todas las curvas se mantienen de manera muy cercana a lo predicho por el modelo de choque esférico, lo cual nos permite inmediatamente comenzar a dudar de la existencia de la relación estipulada por la interrogante, aunque esto no significa que no exista para la expansión axial de la columna.

Finalmente las tendencias descritas para el diámetro externo en la base del blanco se mantienen de igual manera validas a los $\sim 2,5mm$ de esta, aunque es necesario recalcar que la curva azul correspondiente al gráfico de la figura 8(E) no fue descrita particularmente bien por ninguno de los 2 modelos.

Análisis Cuantitativos de los Ajustes:

Los Parámetros utilizados para los modelos se muestran a continuación en las tablas 1,2 y 3.

Distancia Axial													
Elemento del Blanco	Carbono							Titanio					
Gas de fondo	Aire			Argon				Aire					
Presion	1 atm	1/3 atm	1/5 atm	1 atm	1/3 atm	1/5 atm	1 atm (con iman)	1/3 atm (con iman)	1/5 atm (con iman)	1 atm	1/3 Atm Aire	1/5 Atm Aire	1 Atm Argon
Arrastre Retrazado													
α	5.2990	6.0136	6.4751	6.5269	5.6636	6.1528	3.6881	4.1324	3.9523	4.9401	6.1025	6.3539	5.3432
Error α	0.0768	0.0989	0.1037	0.2338	0.0915	0.1043	0.6700	0.3821	0.0699	0.1363	0.1192	0.1341	0.3190
β	4.74E-04	6.37E-04	7.19E-04	3.24E-04	6.92E-04	7.62E-04	2.13E-04	3.63E-04	5.93E-04	6.39E-04	6.84E-04	7.82E-04	4.99E-04
Error β	5.04E-05	2.26E-05	2.26E-05	2.08E-05	2.69E-05	3.52E-05	4.64E-05	3.60E-05	2.67E-05	3.97E-05	3.18E-05	4.30E-05	5.11E-05
Delay (ns)	0	0	0	0	0	0	1530	3200	768	0	0	0	0
c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
χ^2	0.0192	0.0140	0.0245	0.0317	0.0171	0.0295	0.0013	0.0045	0.0043	0.0292	0.0281	0.0513	0.0060
R^2	0.9890	0.9949	0.9926	0.9869	0.9933	0.9905	0.9930	0.9827	0.9956	0.9837	0.9902	0.9835	0.9623
V_0 (m/s)	2485.27	3830.68	4654.80	2114.72	3918.13	4686.12	784.69	1499.93	2344.26	3134.53	4173.75	4969.13	2455.06

Choque Esferico													
α	0.0510	0.0681	0.1004	0.0249	0.0783	0.1074	0.0020	0.0077	0.0244	0.0599	0.0866	0.1293	0.0329
Error α	0.0022	0.0069	0.0089	0.0020	0.0077	0.0104	0.0002	0.0005	0.0017	0.0055	0.0094	0.0078	0.0043
n	0.8555	0.5397	0.5055	0.6323	0.5184	0.4929	0.8494	0.7385	0.6179	0.5310	0.5144	0.4745	0.5987
Error n	0.0089	0.0129	0.0113	0.0086	0.0125	0.0124	0.0144	0.0082	0.0088	0.0116	0.0139	0.0077	0.0166
Delay (ns)	0	0	0	0	0	0	1530	3200	768	0	0	0	0
c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
χ^2	0.0049	0.0208	0.0211	0.0101	0.0187	0.0244	0.0004	0.0008	0.0021	0.0111	0.0267	0.0105	0.0174
R^2	0.9972	0.9927	0.9936	0.9958	0.9927	0.9921	0.9983	0.9992	0.9986	0.9938	0.9907	0.9966	0.9883

Tabla 1: Parámetros de los ajustes de las curvas de distancia axial.

Diámetro Externo (Base)													
Elemento del Blanco	Carbono							Titanio					
Gas de fondo	Aire			Argon				Aire					
Presion	1 atm	1/3 atm	1/5 atm	1 atm	1/3 atm	1/5 atm	1 atm (con iman)	1/3 atm (con iman)	1/5 atm (con iman)	1 atm	1/3 Atm Aire	1/5 Atm Aire	1 Atm Argon
Arrastre Retrazado													
α	7.2563	9.3318	10.3720	9.9487	9.2456	9.8099	25.1263	8.6901	9.3163	6.0884	8.4846	10.7009	9.1732
Error α	0.4070	0.5979	0.3925	0.6791	0.5143	0.3723	15.0980	0.2234	0.2097	0.1243	0.2547	0.4674	0.9989
β	6.04E-04	5.22E-04	5.88E-04	3.28E-04	5.85E-04	6.57E-04	1.13E-04	8.81E-04	9.60E-04	0.00102	7.14E-04	5.07E-04	3.54E-04
Error β	7.45E-05	6.70E-05	4.79E-05	3.85E-05	7.02E-05	5.78E-05	7.44E-05	5.19E-05	5.57E-05	6.53E-05	5.26E-05	4.34E-05	6.26E-05
Delay (ns)	0	0	0	0	0	0	1530	3200	768	0	0	0	0
c	2	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2
χ^2	0.2249	0.3009	0.1900	0.2495	0.3229	0.2420	0.0558	0.0036	0.0067	0.0862	0.1499	0.1634	0.2177
R^2	0.9442	0.9536	0.9709	0.9532	0.9482	0.9675	0.9819	0.9887	0.9847	0.9643	0.9670	0.9739	0.9348
V_0 (m/s)	4386.08	4867.58	6085.90	3160.14	5410.56	6442.81	2832.13	7654.98	8940.03	6210.17	6057.47	5422.66	3243.22
Choque Esferico													
α	0.0691	0.0779	0.1095	0.0385	0.0827	0.1075	0.0048	0.1298	0.2006	0.2169	0.1500	0.0800	0.0374
Error α	0.0162	0.0074	0.0085	0.0202	0.0237	0.0016	0.0081	0.0122	0.0211	0.0096	0.0095	0.0079	0.0079
n	0.5993	0.5678	0.5446	0.6203	0.5656	0.5456	0.9121	0.5262	0.4801	0.4123	0.4884	0.5801	0.6324
Error n	0.0353	0.0265	0.0086	0.0303	0.0310	0.0281	0.0425	0.0083	0.0080	0.0125	0.0080	0.0087	0.0285
Delay (ns)	0	0	0	0	0	0	1530	3200	768	0	0	0	0
c	2	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2
χ^2	0.2024	0.1624	0.0245	0.1741	0.2440	0.2572	0.0525	0.0128	0.0188	0.0345	0.0195	0.0220	0.0927
R^2	0.9498	0.9750	0.9963	0.9674	0.9608	0.9653	0.9830	0.9976	0.9970	0.9857	0.9996	0.9965	0.9722

Tabla 2: Parámetros de los ajustes de las curvas del diámetro exterior en la base de la columna de plasma.

Diámetro Externo (~2.5mm)													
Elemento del Blanco	Carbono							Titanio					
Gas de fondo	Aire			Argon				Aire					
Presion	1 atm	1/3 atm	1/5 atm	1 atm	1/3 atm	1/5 atm	1 atm (con iman)	1/3 atm (con iman)	1/5 atm (con iman)	1 atm	1/3 Atm Aire	1/5 Atm Aire	1 Atm Argon
Arrastre Retrazado													
α	8.4654	9.2855	10.0446	7.8894	8.9723	9.5393	Null	Null	5.0882	7.0125	8.7248	10.0372	7.1236
Error α	0.4796	0.1221	0.3356	0.3156	0.2409	0.2352	Null	Null	0.2465	0.1287	0.2032	0.2581	0.2782
β	5.98E-04	8.23E-04	8.15E-04	0.00104	8.44E-04	9.88E-04	Null	Null	0.0034	9.80E-04	0.00136	8.91E-04	0.00101
Error β	5.43E-05	2.44E-05	6.27E-05	1.22E-04	5.21E-05	6.39E-05	Null	Null	2.73E-04	4.16E-05	7.68E-05	5.79E-05	8.79E-05
Delay (ns)	1410	772	648	1660	768	648	Null	Null	2640	1140	768	520	1380
c	0	0	0	0	0	0	Null	Null	0	0	0	0	0
χ^2	0.0318	0.0176	0.1522	0.4024	0.0746	0.1299	Null	Null	0.0306	0.0191	0.1263	0.1352	0.0669
R^2	0.9620	0.9973	0.9784	0.8897	0.9869	0.9802	Null	Null	0.9890	0.9951	0.9796	0.9818	0.9815
V_0 (m/s)	5179.27	7643.68	8185.12	8215.38	7575.33	9404.41	Null	Null	12211.75	6871.95	30120.78	8947.47	7194.81
Choque Esferico													
α	0.0842	0.1122	0.1473	0.3308	0.1285	0.2247	Null	Null	0.1370	0.0957	0.2376	0.1826	0.1085
Error α	0.0041	0.0152	0.0136	0.0280	0.0084	0.0122	Null	Null	0.0246	0.0193	0.0453	0.0193	0.0064
n	6.82E-01	5.50E-01	5.23E-01	0.38834	5.29E-01	4.70E-01	Null	Null	0.51599	5.45E-01	0.4576	4.98E-01	0.53414
Error n	1.59E-02	1.78E-02	1.21E-02	0.01139	8.56E-03	7.14E-03	Null	Null	0.02736	2.70E-02	0.02527	1.38E-02	0.008
Delay (ns)	1410	772	648	1660	768	648	Null	Null	2640	1140	768	520	1380
c	0	0	0	0	0	0	Null	Null	0	0	0	0	0
χ^2	0.0166	0.0667	0.0406	0.0451	0.0153	0.0162	Null	Null	0.0173	0.0786	0.1799	0.0633	0.0062
R^2	0.9558	0.9897	0.9942	0.9886	0.9973	0.9975	Null	Null	0.9998	0.9800	0.9730	0.9915	0.9883

Tabla 3: Parámetros de los ajustes de las curvas del diámetro exterior a ~2.5mm de la base de la columna de plasma.

En primer lugar se observa que utilizando el modelo de arrastre como primera aproximación a la velocidad inicial del plasma (v_0), encontramos que su valor típico es del orden de $3 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ para el crecimiento axial, mientras que para el radial este valor es mas cercano a $6 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, aunque este valor tiene una tendencia a crecer a medida de que la presión disminuye, como se puede ver en las figuras 3,4 y 5.

Es necesario ademas recalcar el hecho de que las mediciones de

velocidad del experimento que se realizo en un blanco de titanio con fondo de aire son las únicas que se escapan a la tendencia mencionada, pero estas son ademas las que anteriormente se hicieron notar por su alta variabilidad (causada por estructuras internas que se formaron durante el crecimiento).

Por otro lado otro hecho importante radica en el valor encontrado para n en los ajustes correspondientes al modelo de choque esférico, viéndose que en promedio de este es cercano a $\sim 0,54$, lo que difiere en un 35 % con el valor encontrado en

la literatura (0.4), hecho que puede ser causado por la forma anular del láser comparación al puntual con el que fue realizado el modelo.

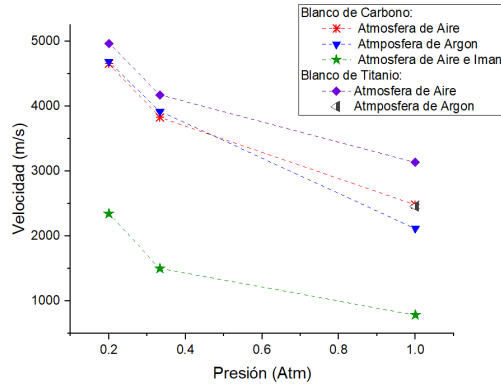


FIGURA 3. Gráfico presión vs velocidad inicial para la medición axial

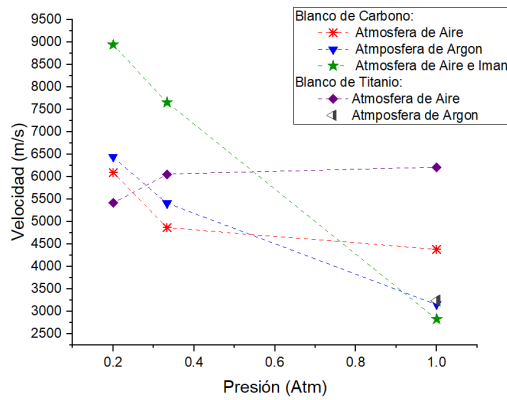


FIGURA 4. Gráfico presión vs velocidad inicial para la medición radial en la base

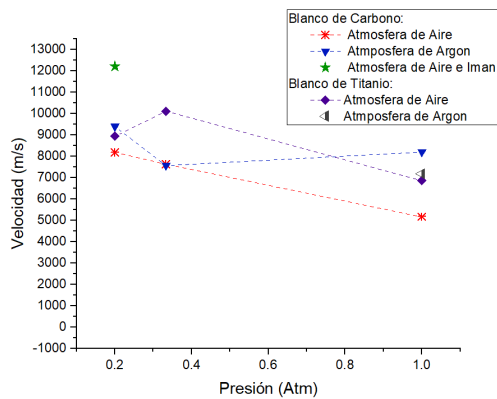


FIGURA 5. Gráfico presión vs velocidad inicial para la medición radial a $\sim 2,5mm$ de la base

Conclusiones:

Entonces, a modo de resumen, se puede concluir que:

1- Existe una relación inversa entre el crecimiento que alcanza el plasma y la presión del gas de fondo, pudiéndose diferenciar a simple vista los grupos que forman.

2- Para ambos ejes de movimiento tanto el modelo de choque esférico como el de arrastre son buenas aproximaciones de los fenómenos, habiendo en el caso del eje axial ocasiones en las que uno de los 2 modelos se acercaba claramente mas a la realidad en tiempos tempranos, para luego realizar una transición al otro modelo en tiempos tardíos, mientras que para el eje paralelo al blanco se encontraba mayoritariamente mejor modelado por el choque esférico.

notando ademas que el indice n del modelo de choque esférico encontrado fue cercano a 0.5 mas que a 0.4 como se estipula en la literatura.

3- Se encontró utilizando el modelo de arrastre que la velocidad inicial del plasma es cercana a $3 \cdot 10^3 m/s$ para el eje axial, mientras que para el eje radial es mas cercana a 2 veces esta cantidad, diferencia que es posiblemente causada por el hecho de que el plasma puede expandirse fácilmente en direcciones completamente contrarias en el eje radial, mientras que en el axial solo puede alejarse del blanco.

4- La presencia de un campo magnético axial parece haber causado solamente un retraso en la formación de la columna de plasma, manteniéndose después un crecimiento muy similar al resto de los casos.

Dentro de lo que esperamos se realice en un futuro cercano seria la ampliación del los tiempos considerados en este experimento y la realización de nuevos experimentos con distintos gases de fondo, con la intención de encontrar una relación mas clara de como afectan estos gases a la mecánica del sistema.

Referencias:

- Dynamics of laser produced annular plasmas-V. Valenzuela-Villaseca et al.
- "Time- and space-resolved spectroscopic characterization of a laser carbon plasma plume in an argon background"- H. M. Ruiz et al.
- Caracterización Temporal y Espacial de un Plasma de Carbón Generado por Láser en un Ambiente de Argón - H. M. Ruiz 2012 (Tesis de Doctorado)

Anexo:

1.1- a continuación se muestran gráficamente todos los datos obtenidos.

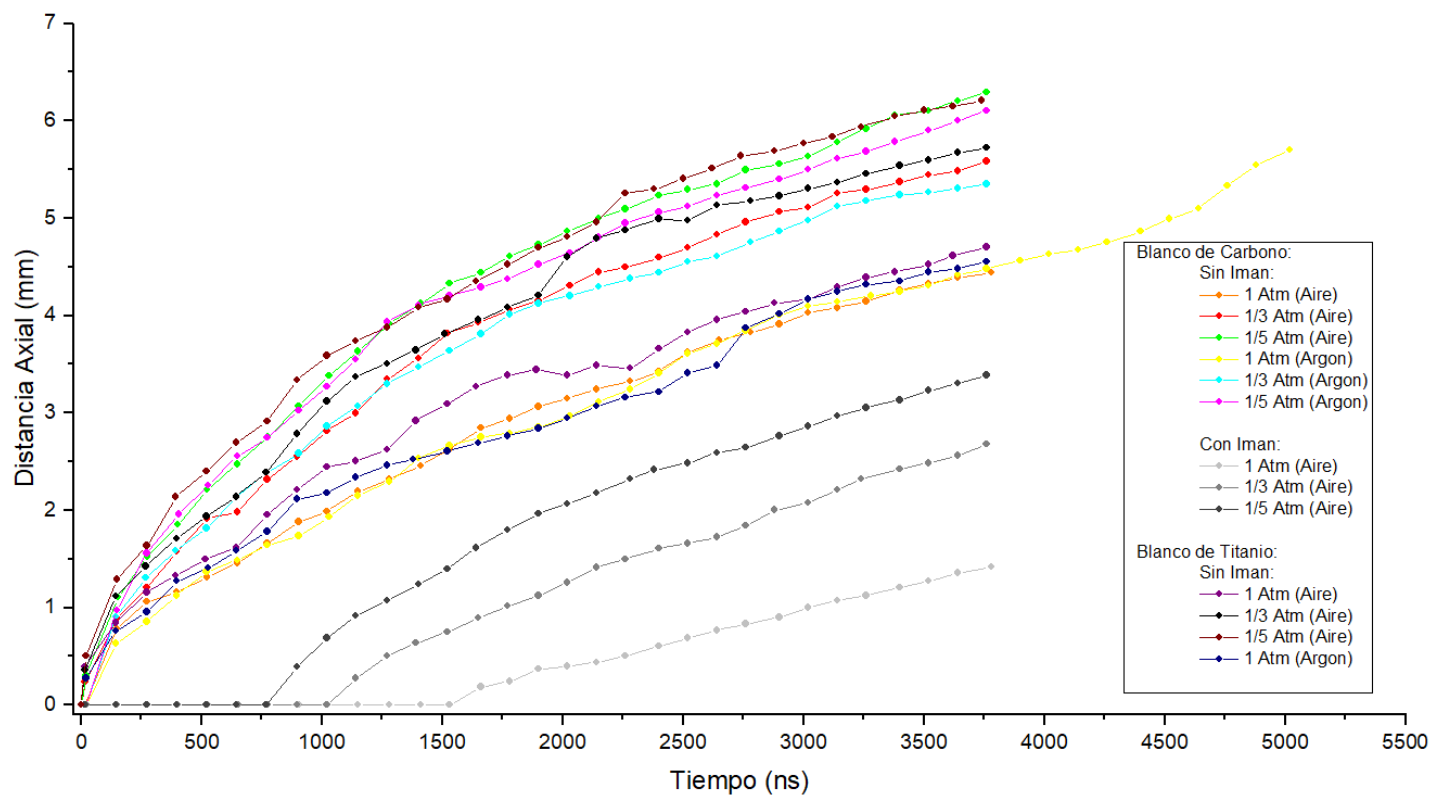


FIGURA 4. Tiempo vs Gráfico Distancia Axial

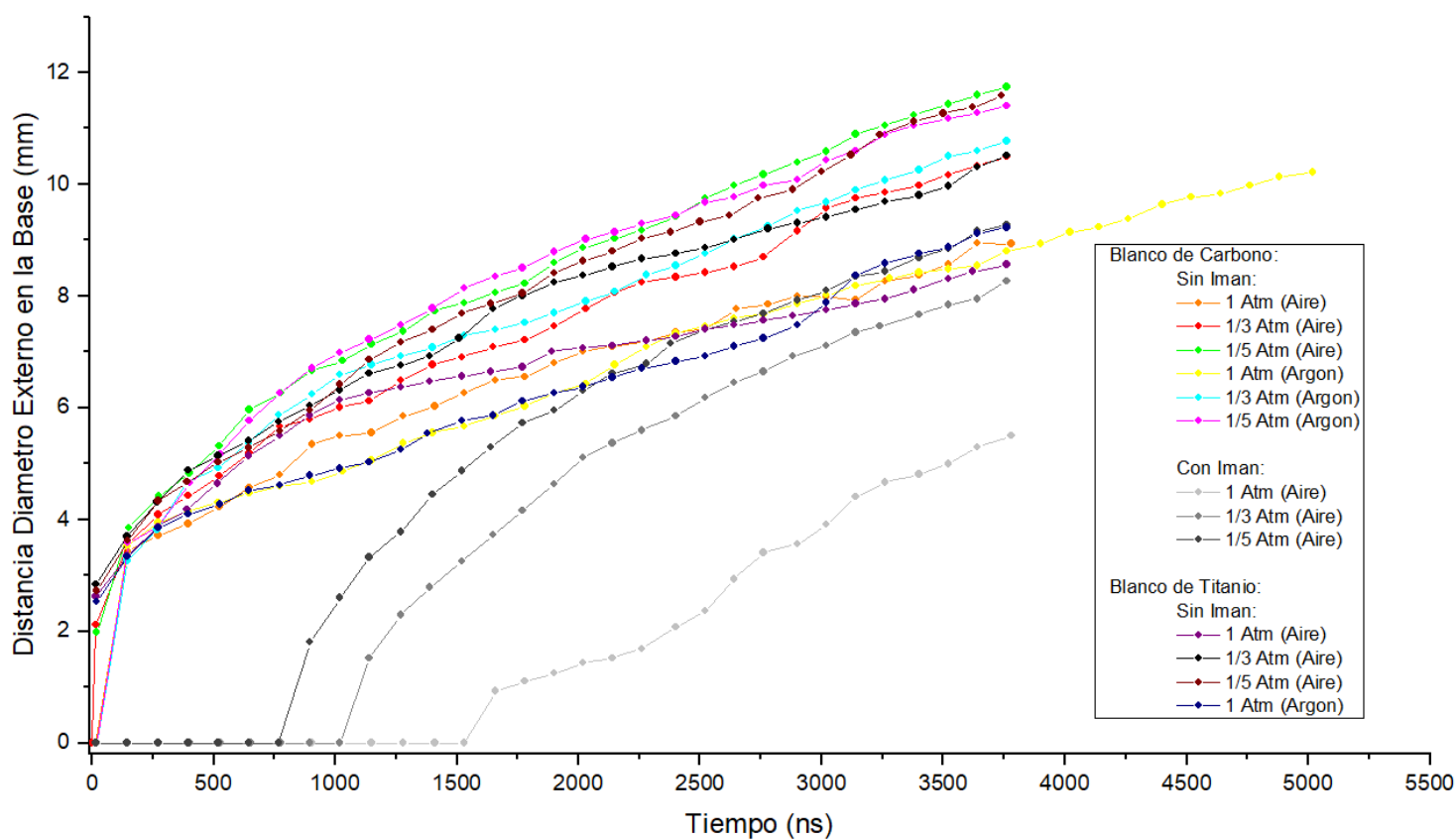


FIGURA 5. Tiempo vs Gráfico Diámetro del plasma en la base del blanco

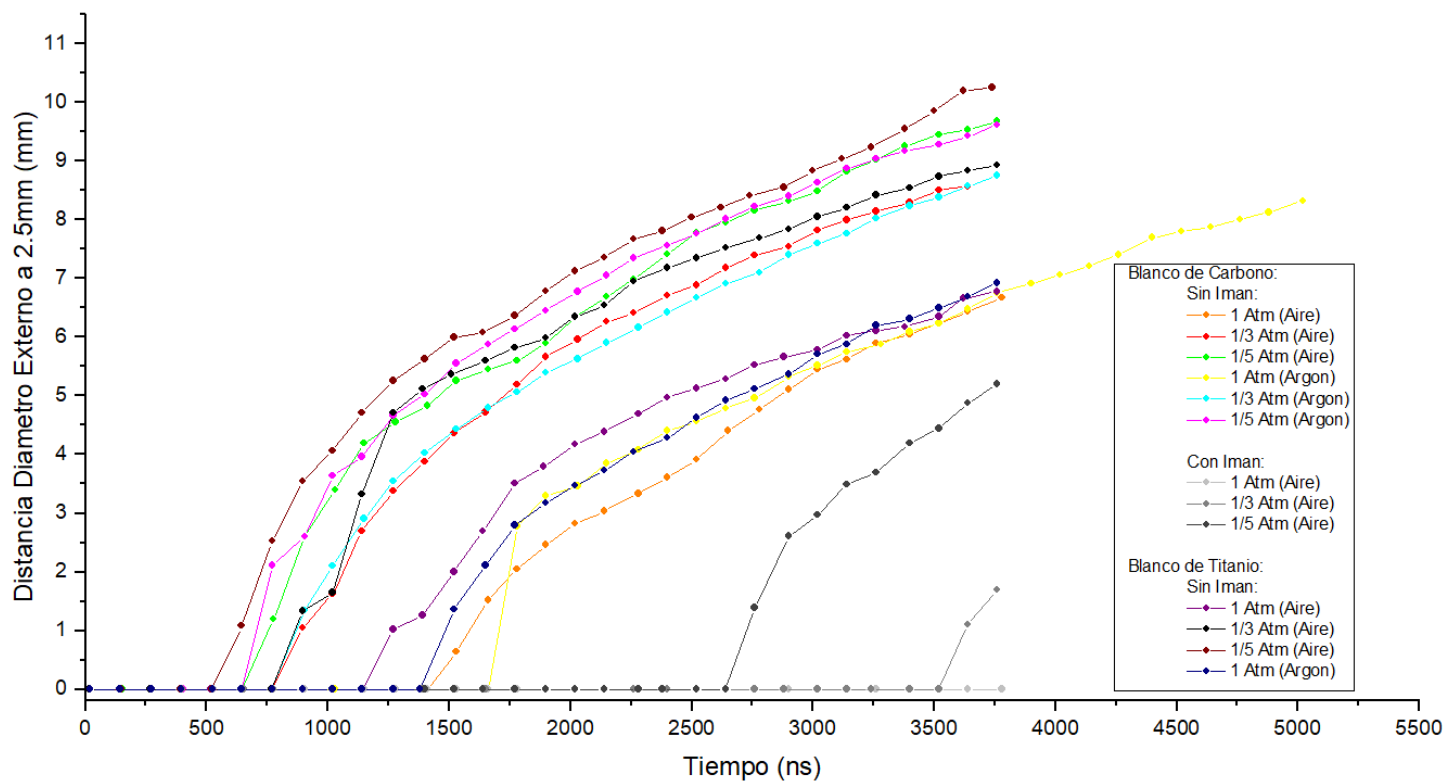


FIGURA 6. Tiempo vs Gráfico Diámetro del plasma a $\sim 2,5\text{mm}$ del blanco

2- Se mostraran individualmente los datos con sus ajustes realizados con los modelos de onda de choque esférico y de arrastre.

2.1- Distancia Axial:

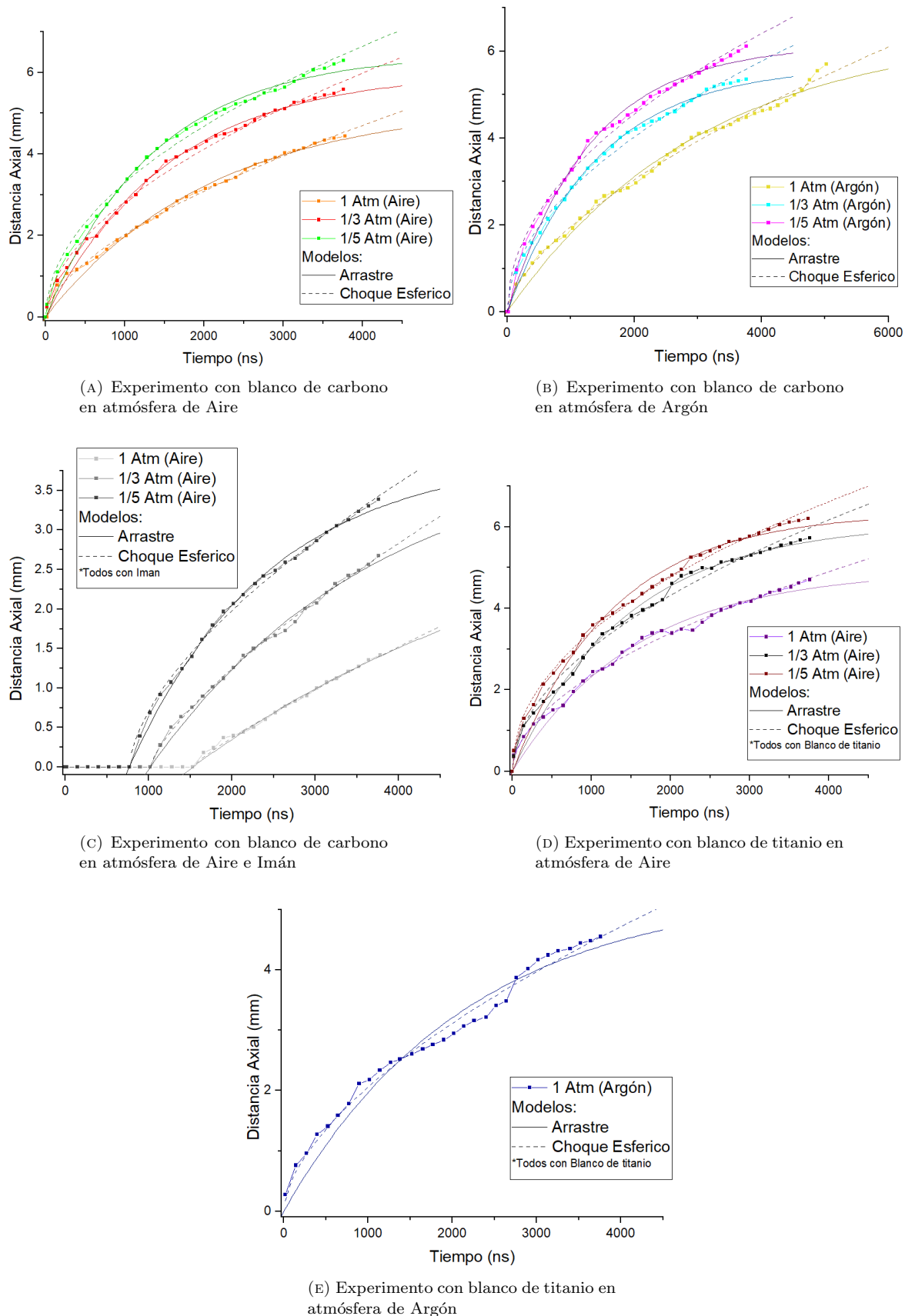


FIGURA 7. Gráficos de la Distancia Axial del plasma vs el Tiempo, incluyendo los modelos de onda de choque esférico y de arrastre

2.2- Diámetro de la columna de plasma en la base del blanco:

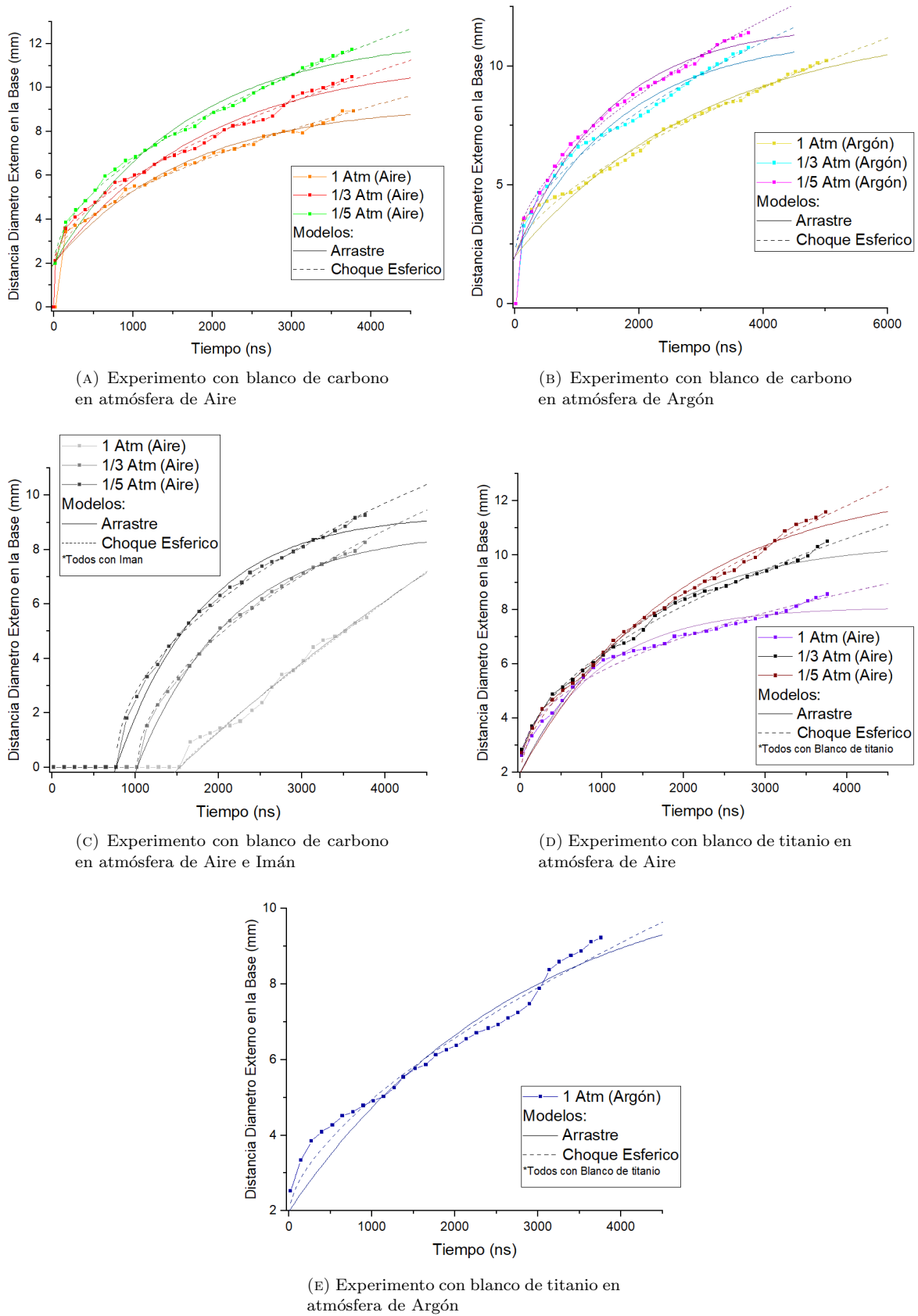


FIGURA 8. Gráficos del diámetro de la columna de plasma en la base del blanco vs el Tiempo, incluyendo los modelos de onda de choque esférico y de arrastre

2.3- Diámetro de la columna de plasma a $\sim 2,5\text{mm}$ del blanco:

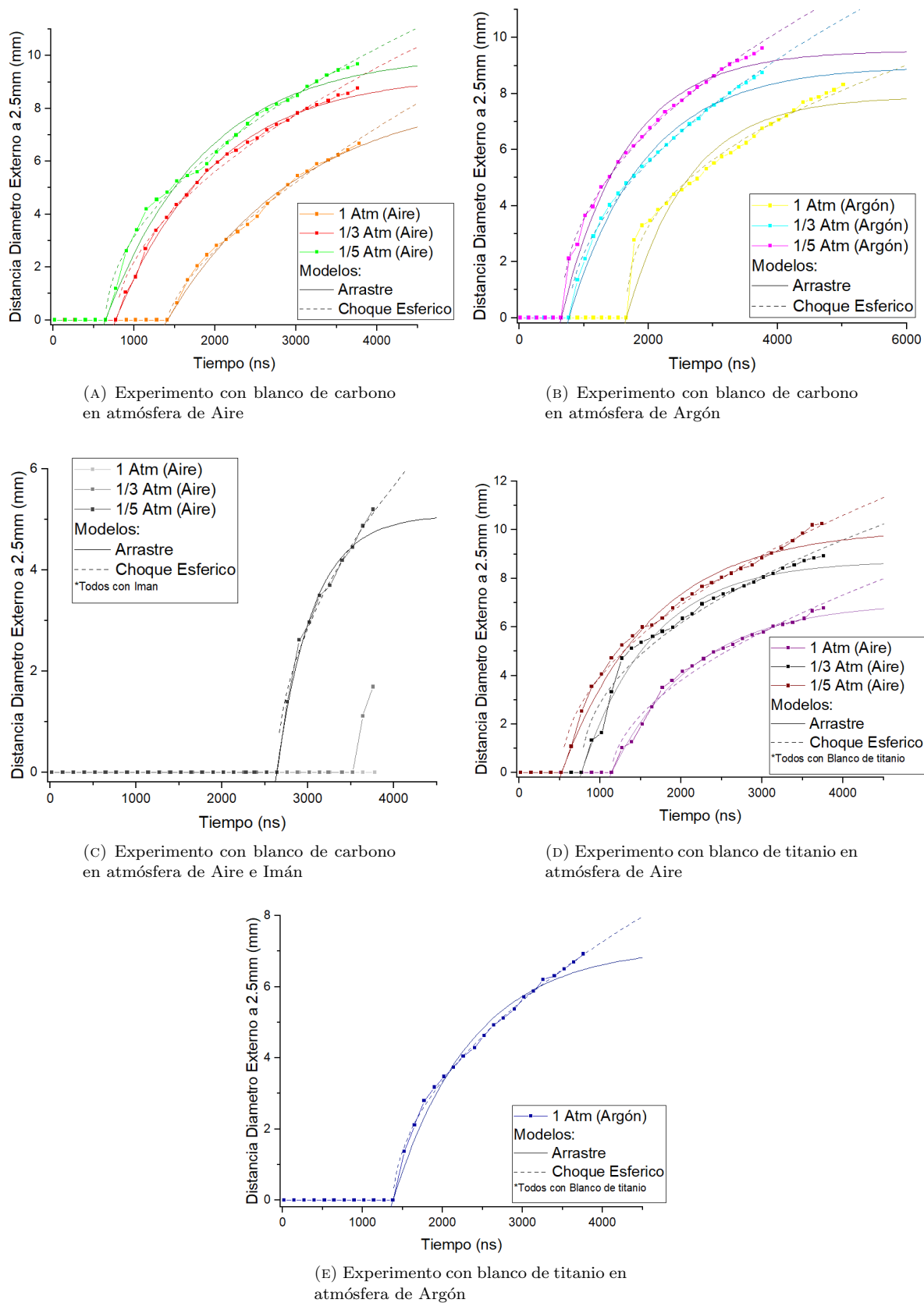


FIGURA 9. Gráficos del diámetro de la columna de plasma a $\sim 2,5\text{mm}$ del blanco vs el Tiempo, incluyendo los modelos de onda de choque esférico y de arrastre