

# HIDROFOBICIDAD DE POLIPIRROL SINTETIZADO POR PLASMA

E. Colín<sup>1,2</sup>, M.A. Enríquez<sup>1,2</sup>, M.G. Olayo<sup>1\*</sup>,  
G.J. Cruz<sup>1</sup>, M. Romero<sup>2</sup>, J. Morales<sup>3</sup>, R. Olayo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Síntesis y Caracterización, ININ, Apdo. Postal 18-1027, México, D.F., CP. 11801,

<sup>\*</sup>[gog@nuclear.inin.mx](mailto:gog@nuclear.inin.mx)

<sup>2</sup>División de Estudios de Posgrado, UAM-A, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, México, D.F.

<sup>3</sup>Departamento de Física, UAM-I, Apdo. Postal 55-534, Iztapalapa, México, D.F.

## Resumen

En este trabajo se estudia la afinidad hidrolítica que presenta el polipirrol (PPy) y el PPy dopado con yodo (PPy/I) sintetizados por plasma a diferentes potencias, entre 10 y 100 W. Una de las ventajas más atractivas de los polímeros semiconductores como biomateriales se debe al crecimiento de células debido a la compatibilidad hidrolítica y eléctrica entre células y polímeros. La compatibilidad hidrolítica de PPy y PPy/I se evaluó midiendo el ángulo de contacto en soluciones Krebs-Ringer, debido a que tiene composición química similar al líquido extracelular que se encuentra en el cuerpo, y en soluciones de NaCl y de NaCl-MgSO<sub>4</sub>. Estos compuestos se usaron debido a que sus elementos forman parte de los sistemas iónicos constituyentes de los organismos vivos. La conductividad eléctrica se evaluó midiendo la resistencia eléctrica de los polímeros en ambientes húmedos para cada una de las potencias de síntesis.

## Introducción

Por medio de plasmas se puede modificar casi cualquier polímero. Es un proceso complejo, ya que dependiendo de la potencia, del acoplamiento eléctrico, geométrico y de las características estructurales del material se pueden obtener diferentes resultados en la modificación. Los cambios pueden ser superficiales y/o alterar las propiedades fisicoquímicas globales en función de la profundidad de los impactos de las partículas que colisionan con las superficies. Este tratamiento permite el uso de materiales ya conocidos en nuevas aplicaciones. Por ejemplo, películas superficiales de polímeros que incrementen o reduzcan la hidrofobicidad de otros materiales y que beneficien su uso potencial en sistemas biológicos [1].

Dentro del campo de la salud, el procesamiento por plasma puede ser usado para formar o incrementar superficies biocompatibles al adicionar compuestos con grupos orgánicos similares a los de los seres vivos sobre el material de interés [2]. En este caso, la biocompatibilidad se expresa como la adaptación del sistema vivo al material con que interacciona. Muchos grupos funcionales se han implantado en materiales de distinta índole para estudiar la adhesión y el crecimiento de células. Los que hasta ahora han mostrado tener efectos positivos en esta función son: aminas, carbonilos, carboxilos e hidroxilos, entre otros [3].

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio hidrolítico de polímeros semiconductores biocompatibles sintetizados mediante la técnica de polimerización por plasma para un posible uso como regenerador celular. La biocompatibilidad y las características semiconductoras de PPy y sus derivados lo hacen un sustrato atractivo para diferentes implantes [4], debido a que su conductividad puede incrementarse hasta 5 órdenes de magnitud en función de la humedad que lo rodea. La adaptación de estos materiales a las transmisiones eléctricas entre células, debido a la humedad de los organismos vivos, puede promover la regeneración de tejidos dañados [5]. Otro uso que se ha estudiado en PPy es en la reproducción de músculos artificiales que sean capaces de producir desplazamientos moderados cuando son sometidos a reacciones electroquímicas [6].

Además de la adaptación eléctrica, la hidrofiliidad es muy importante en los biomateriales, ya que la mayoría de los seres vivos están formados con una gran cantidad de agua. Esta compatibilidad se puede evaluar midiendo el ángulo de contacto que forman las paredes de una gota de agua sobre la superficie de los materiales de interés [7, 8]. Si la gota se esparce se dice que el material es hidrofílico, pero si mantiene su esfericidad, entonces es hidrofóbico; y cada material responde de manera diferente. El ángulo de contacto se puede evaluar también con otras soluciones afines al sistema biológico de estudio.

En este trabajo se probaron diferentes soluciones sobre PPy y PPy/I, ya que los elementos de estos materiales, C, N, H e I, pueden formar biomoléculas que constituirán estructuras para llevar a cabo funciones vitales en el organismo. El agua se utilizó porque es la sustancia más abundante en el cuerpo y su polaridad favorece la interacción con otras moléculas. Se probó una solución Krebs-Ringer [9], debido a que tiene composición química similar al líquido extracelular que se encuentra en el cuerpo. Se usaron además otras soluciones de NaCl y una mezcla de NaCl-MgSO<sub>4</sub>, debido a que estos elementos son parte del sistema iónico de los organismos vivos [10].

## Experimental

La síntesis de PPy y PPy/I se realizó en un reactor cilíndrico de vidrio de 1500 cm<sup>3</sup> a diferentes potencias 10, 24, 40, 60, 80 y 100 W durante 180 min y presión del orden de 10<sup>-1</sup> mbar. Los polímeros se obtuvieron en forma de película delgada adherida sobre la superficie del reactor.

La hidrofiliidad se evaluó colocando, sobre la superficie de los polímeros, gotas de 0.2 ml de las siguientes soluciones: Agua destilada, Cloruro de Sodio [0.5 M] Cloruro de Magnesio [1.0 M], Sulfato de Sodio [1.0 M] y de Solución Krebs-Ringer. Se tomaron fotografías de las gotas sobre las superficies y se midieron los ángulos de incidencia para cada una de las soluciones, de cada una de las diferentes potencias de síntesis de los polímeros.

## Resultados y Discusión

### Hidrofobicidad

El ángulo de contacto es función, entre otras variables, de la energía superficial, de la morfología y de las cargas que actúan en la superficie. La evolución del ángulo de contacto de PPy y PPy/I, en función de la potencia de la descarga, se muestra en las Figuras 1 y 2. En todos los casos las tendencias son aproximadamente lineales.

El sistema PPy-Agua, ver Fig. 1, presenta un ángulo de 30° a 10 W, disminuyendo a 19° a 100 W. En la solución de NaCl a 10 W, el ángulo de contacto fue de 27°, reduciéndose hasta 16° a 100 W. Para la solución Krebs-Ringer, el ángulo calculado fue de 15.7° a 10 W y de 13° a 100 W. En este caso la diferencia del ángulo de contacto fue de 2.7°. En la solución de NaCl-MgSO<sub>4</sub>, el ángulo calculado a 10 W fue de 12.5° y a 100 W fue de 10.8°. La diferencia del ángulo de contacto entre la menor y mayor potencia estudiada fue de 1.7°.

En la Fig. 2 se presenta el ángulo de contacto para PPy/I como función de la potencia de la síntesis de los polímeros. Con agua destilada las muestras presentan un ángulo de contacto de 37° y 20°, para 10 y 100 W, respectivamente. Para la solución de NaCl, el ángulo fue de 22.7° a 10 W, disminuyendo a 14.6° en 100 W. Con la solución Krebs-Ringer, el ángulo de contacto fue de 16.5° y 13° en PPy/I a 10 y 100 W, respectivamente. Al aplicar la mezcla de NaCl-MgSO<sub>4</sub>, se observó un ángulo de contacto de 12.5° a 10 W, mientras que a 100 W presentó un ángulo de 8°.

En PPy, de 10 a 100 W, el ángulo de contacto disminuyó en 37% con agua destilada, 40% con NaCl, 17% con solución de Krebs-Ringer y 14% con NaCl-MgSO<sub>4</sub>. En el caso de PPy/I se redujo 45% con agua destilada, 35% con NaCl, 21% con solución de Krebs-Ringer y 36% con NaCl-MgSO<sub>4</sub>. La solución Krebs-Ringer es la que menos cambia el ángulo de contacto con el polímero y es la que tiene el ángulo menor en todas las potencias.

En términos generales, el ángulo de contacto disminuye al aumentar la potencia en la síntesis de los polímeros. El polímero se vuelve más hidrofílico y se puede relacionar con el incremento en la conductividad que muestran al aumentar la energía de las partículas en el plasma durante la síntesis [11].

El PPy presenta valores menores de ángulo de contacto comparados con los de PPy/I. Este resultado puede ser a causa de la gran electronegatividad del yodo que, combinado con los iones Na, Mg y Cl, modifican el equilibrio de cargas en las cadenas poliméricas, incrementando la hidrofobicidad. De todas las soluciones estudiadas, la de NaCl-MgSO<sub>4</sub> presentó la mayor hidrofiliicidad sobre ambos polímeros.

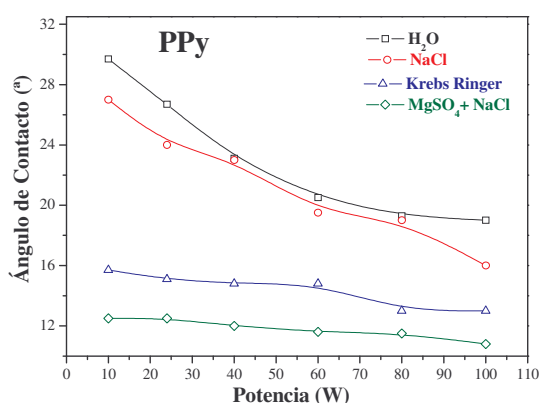


Fig. 1. Ángulo de contacto en PPy.

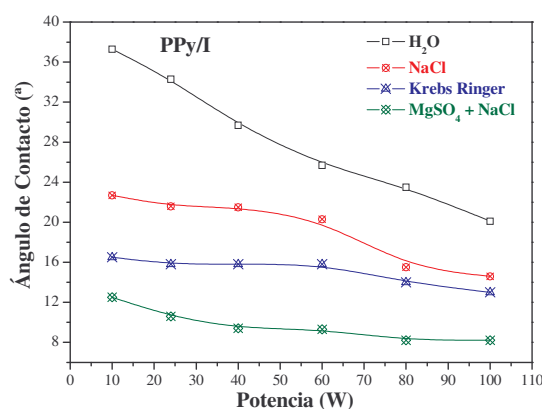


Fig. 2. Ángulo de Contacto en PPy/I.

### Conductividad Eléctrica

Las Figuras 3 y 4 muestran el comportamiento de la conductividad eléctrica como función de la humedad. La conductividad se calculó midiendo la resistencia de los polímeros en un arreglo capacitivo de 2 electrodos con la muestra en el centro. El dispositivo se colocó en un recipiente con diferentes valores de humedad relativa.

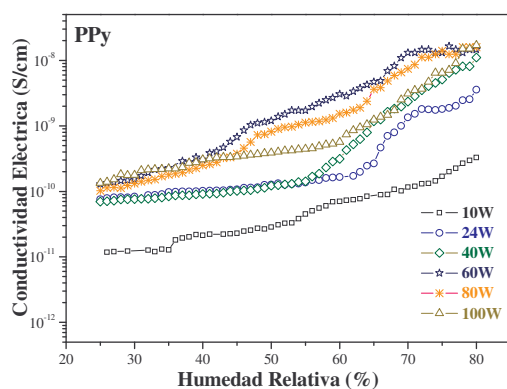


Fig. 3. Conductividad eléctrica en PPy.

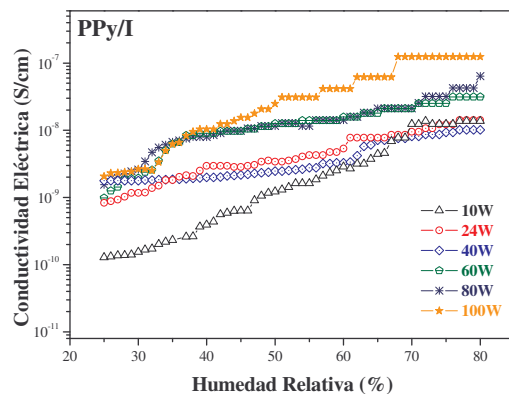


Fig. 4. Conductividad eléctrica en PPy/I.

En términos generales, la conductividad eléctrica en ambos polímeros se incrementa al aumentar la potencia de la descarga durante la síntesis, llegando a aumentar hasta 2 órdenes de magnitud entre 25 y 80% de humedad relativa. Este incremento en la conducción de PPy y PPy/I puede incrementar a su vez la biocompatibilidad del material debido a la transparencia que presenta a los impulsos eléctricos entre células y puede promover la regeneración de tejidos al facilitar el intercambio de cargas eléctricas en el organismo.

### Conclusiones

Se sintetizó PPy y PPy/I a diferentes potencias para estudiar la compatibilidad hidrolítica del material por medio de evaluaciones del ángulo de contacto con soluciones de sales con concentraciones similares a las del cuerpo humano. Se observó que al incrementar la potencia, ambos polímeros se vuelven más hidrofílicos, ya que se absorben y esparcen rápidamente las soluciones en las superficies tratadas.

La solución Krebs-Ringer es la de menor ángulo de contacto con los polímeros y la de mayor número de sales en solución. En el otro extremo, el agua destilada es la de mayor ángulo de contacto y la de menor concentración de sales. De acuerdo a este resultado, la concentración de iones incrementa la compatibilidad hidrolítica del sistema polímero-solución. Por otro lado, la influencia de los iones en solución es mayor que la de la potencia de la descarga para la síntesis de los polímeros.

La variación en la conductividad eléctrica en ambos polímeros fue de aproximadamente 2 órdenes de magnitud en el intervalo de humedad estudiado. La mayor conductividad alcanzó  $10^{-7}$  S/cm a 80% de humedad. Este valor puede ser tomado como un límite inferior de conductividad en este tipo de sistemas, ya que la humedad en la mayoría de los organismos vivos, donde se podrían implantar este tipo de polímeros, es mucho mayor.

### Referencias

1. L. Xu; W. Chen; A. Mulchandani *Angew. Chem.* 2005, 44, 6009-6012.
2. R. D'Agostino, *Plasma Process. Polym.* 2005, 2, 7-15.
3. B. Joseph; J. Grodzinski *J. Mol. Recognition* 1996, 9, 617-625.
4. A. Gallardo, C. Elvira, A. López, *Revista Plásticos Modernos*, 1999, 77, 60-69.
5. E. Chiellini; R. Solorano, *Tissue Engineering: An Overview*, MRS Bulletin, 1996, 18-19.
6. E. Smela; N. Gadegaard, *J. of Phys. Chem.* 2001, 39, 9395-9405.
7. G. Castellan, *Fundamentos de Fisicoquímica*, Ed. Fondo Interamericano, México 1971.
8. S.H. Maron, Prutton C.F., *Fundamentos de Fisicoquímica*, Ed. Limusa, México 1998.
9. W. K. Purves, D. Sadava, G.H. Heller, "Vida. La Ciencia de la Biología", Editorial Médica Panamericana 2003.
10. W. Mertz; *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*, Vol. 1 Ed. Acad. Press. Inc. USA 1997.
11. E. Colín, *Tesis Licenciatura*, Universidad Autónoma del Estado de México, 2003.