

Estudio fotoacústico de los efectos del tiempo de ablación en la síntesis de nanopartículas de plata

Jhenry F. Agreda Delgado^{1,3}; Claver W. Aldama Reyna^{2,3}

¹jhenryad@gmail.com

²claveraldama@gmail.com

³Laboratorio de Óptica y Láseres, Departamento de Física, Universidad Nacional de Trujillo.

Recibido: 22-09-2015

Aceptado: 20-03-2016

RESUMEN

Se estudió los efectos del tiempo de ablación en las características de los coloides de nanopartículas de plata obtenidos por ablación láser en etanol. La caracterización de los coloides se realizó mediante fotoacústica pulsada y espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-Vis). Los espectros de absorción de los coloides mostraron que las nanopartículas de plata obtenidas eran esféricas y que el tamaño promedio de las nanopartículas no cambió conforme aumento el tiempo de ablación. El estudio mediante fotoacústica pulsada mostró un incremento en la amplitud de las señales fotoacústicas de los coloides conforme aumento el tiempo de ablación. Se comprobó que existe una dependencia lineal entre la amplitud de la señal fotoacústica y la absorbancia a 250 nm de los coloides de nanopartículas de plata; como la absorbancia a 250 nm está relacionada directamente con la cantidad de nanopartículas de plata en el coloide, esto probó que la amplitud de la señal fotoacústica es proporcional a la cantidad de nanopartículas de plata en el coloide. Por lo tanto, la absorbancia a 250 nm de los espectros de absorción y la amplitud de la señal fotoacústica de los coloides de nanopartículas de plata mostraron que la cantidad de nanopartículas de plata aumenta con el tiempo de ablación y en el rango de 2 a 10 minutos ese aumento es lineal.

Palabras clave: Ablación láser en medios líquidos, nanopartículas de plata, fotoacústica pulsada, espectroscopia Ultravioleta-Visible.

ABSTRACT

The effects of ablation time was studied in the characteristics of the colloids of silver nanoparticles obtained by laser ablation in ethanol. The characterization of colloids was performed using pulsed photoacoustic and Ultraviolet-Visible spectroscopy (UV-Vis). The absorption spectra of colloids showed that silver nanoparticles obtained were spherical and the average size of nanoparticles not change as time increased ablation. The study by pulsed photoacoustic showed an increase in the amplitude of the photoacoustic signals colloids according ablation time increases. It was found that there is a linear dependence between the amplitude of the photoacoustic signal and the absorbance at 250 nm of silver nanoparticle colloid; as the absorbance at 250 nm is directly related to the amount of silver nanoparticles in the colloid, it proved that the amplitude of the photoacoustic signal is proportional to the amount of silver nanoparticles in the colloid. Therefore, the absorbance at 250 nm of the absorption spectra and the amplitude of the photoacoustic signal of the silver nanoparticle colloids showed that the amount of silver nanoparticles increases with time and ablation in the range of 2 to 10 minutes this increase is linear.

Keywords: Laser ablation in liquid media, silver nanoparticles, pulsed photoacoustic, Ultraviolet Visible spectroscopy.

I. INTRODUCCIÓN

Muchos estudios se han hecho sobre los nanomateriales debido a sus características únicas que los diferencian de los materiales de la escala macroscópica. En particular, las nanopartículas de plata han sido ampliamente estudiadas debido a las propiedades ópticas, eléctricas, antibacterianas y catalíticas que poseen. (Dorranian et al., 2013: 93; López et al., 2013: 28).

La síntesis de nanopartículas mediante ablación láser en medios líquidos se caracteriza por una configuración experimental relativamente simple (Talukder et al., 2010: 296). Es una técnica joven y en desarrollo, para la cual no hay un procedimiento universal definido. Los parámetros están divididos en dos categorías: parámetros de los materiales (blanco para la ablación, solvente, sistema de temperatura y presión) y parámetros del láser (longitud de onda, duración del pulso, energía por pulso, número de pulsos o tiempo de ablación) (Amendola y Meneghetti, 2009: 3808; Alba, 2013: 11-12). Esta técnica ha demostrado ser eficiente para generar y/o fragmentar nanopartículas (Amendola y Meneghetti, 2009: 3814-3817). Presenta 2 ventajas principales respecto a la síntesis química: La simplicidad del procedimiento y la ausencia de reactivos químicos en la solución (Tsuji et al., 2002: 80).

Las propiedades de las nanopartículas como la forma, tamaño, distribución de tamaño y concentración dependen de los parámetros usados para la ablación como la longitud de onda, frecuencia de repetición (número de pulsos láser por segundo), número de pulsos o tiempo de ablación y energía del pulso láser (Elsayed et al., 2013: 499; Amendola y Meneghetti, 2009: 3814).

El tamaño promedio, la forma y la homogeneidad de las nanopartículas pueden ser descritos cualitativamente mediante la posición y la forma del espectro de absorción (Talukder et al., 2010: 296). El corrimiento del pico correspondiente a la resonancia del plasmón de superficie del espectro de absorción es un indicativo del cambio en tamaño de las nanopartículas (Dorranian et al., 2013: 95).

La técnica fotoacústica pulsada se basa en el análisis de las ondas acústicas generadas en una muestra debido a la absorción de pulsos láser (Valverde et al., 2015: 341). Entonces la absorción de luz por parte de las nanopartículas puede ser aprovechada para estudiar las características de los coloides de nanopartículas de plata utilizando la fotoacústica pulsada en el régimen termoelástico, debido a que al incidir un haz láser sobre los coloides de nanopartículas se induce ondas de presión, estas ondas se pueden detectar como ondas acústicas utilizando un transductor adecuado, por ejemplo, un transductor piezoeléctrico. La señal fotoacústica en el régimen termoelástico se obtiene con fluencias por debajo del umbral de ablación láser de la muestra en estudio, asegurando que su principal mecanismo de producción sea la expansión termoelástica, la cual no modifica ni daña las fuentes de donde proviene la señal fotoacústica. Según lo reportado por Alba (2013: 29), la señal fotoacústica de los coloides en el régimen termoelástico depende de la cantidad de nanopartículas (concentración) y de sus diámetros (tamaño).

Dado que hay poca literatura respecto a la aplicación de la fotoacústica pulsada en el estudio de la caracterización de nanopartículas, se depende del uso de técnicas adicionales para correlacionar los resultados del trabajo con aquellos obtenidos por otras técnicas. En la presente investigación nos apoyamos en la espectroscopia UV-Vis; debido a que se trata de nanopartículas metálicas, conviene obtener sus espectros UV-Vis, con estos espectros se puede obtener información del tamaño, forma, monodispersidad y concentración de las nanopartículas sintetizadas.

En el presente trabajo, a partir de las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata se pudo obtener información de los efectos del tiempo de ablación en la concentración de las nanopartículas de plata.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 OBJETO DE ESTUDIO

Las señales fotoacústicas de los coloides con nanopartículas de plata producidas por ablación láser de un blanco solido en etanol y su relación con los efectos del tiempo de ablación en las características de las nanopartículas de plata.

2.2 INSTRUMENTACION

Para la síntesis de los coloides de nanopartículas de plata; se utilizó:

- Láser de Nd: YAG Brilliant de Quantel operando en su armónico principal (1064 nm), 7 ns de duración del pulso, frecuencia de repetición de 10 Hz.
- Lente convergente de 100 mm de distancia focal.
- Espejo de alta reflectancia para radiación láser pulsada de alta energía IR y visible.
- Blanco de plata de 99.99 % de pureza (Sigma-Aldrich) y dimensiones 12 mm x 12 mm x 1.2 mm.
- Un vaso de precipitado pyrex de 25 ml.
- Etanol de 96°.
- Lentes de protección para radiación láser infrarroja.
- Dispositivo giratorio sobre el cual se fija el vaso de precipitado. Este mecanismo evita la ablación en una misma zona del blanco.

Para la detección de las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata; se utilizó:

- Láser de Nd: YAG Brilliant de Quantel, operando en su 2^{do} armónico (532 nm), 10 ns de duración del pulso, frecuencia de repetición de 10 Hz.
- Osciloscopio digital Tektronix DPO 3054 500 MHz, 2.5 GS/s de cuatro canales.
- Computadora personal HP 450 Intel Core i3.
- Cubeta de cuarzo de 1 cm x 1 cm x 5 cm.
- Sensor piezoeléctrico de 254 KHz (PZT).
- Fotodiodo de respuesta rápida.
- Lámina de vidrio de 76 x 26 x 1 mm³, la cual se utilizó para dividir el haz láser en dos componentes. Un componente se dirige al fotodiodo y el otro se dirige a la cubeta de cuarzo que contiene al coloide.
- Etanol de 96°.
- Lentes de protección para radiación láser verde (532 nm).

2.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS

El procedimiento seguido consistió de dos etapas: síntesis de los coloides de nanopartículas de plata y caracterización de las propiedades ópticas de los mismos mediante las técnicas de fotoacústica pulsada y espectroscopia UV-Vis.

2.3.1 Síntesis de los coloides de nanopartículas de plata.

La fig. 1 muestra el esquema experimental utilizado. Los coloides de nanopartículas de plata fueron producidos por el método de ablación láser de una placa de plata de 99.99% de pureza, sumergida en un vaso de precipitado que contenía 20 ml de etanol. La placa fue irradiada por pulsos de un láser Nd:YAG operando con su armónico principal (1064 nm); para dirigir y enfocar el haz láser sobre la placa se utilizaron un espejo de alta reflectancia y una lente convergente de 100 mm de distancia focal. Además se empleó un mecanismo giratorio que cumple dos funciones las cuales son: evitar la ablación de la placa en una única zona y agitar la solución coloidal. Considerando la energía del láser de 12

mJ/pulso y una frecuencia de repetición de 10 Hz se prepararon coloides con diferentes tiempos de ablación: 2, 4, 6, 8 y 10 minutos.

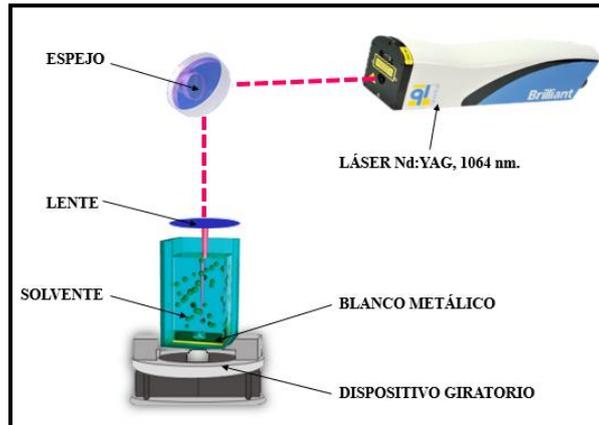


Fig. 1. Montaje experimental para la síntesis de los coloides de nanopartículas de plata mediante el método de ablación láser en etanol.

2.3.2 Detección de las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata.

La Fig. 2 muestra el esquema experimental utilizado. Las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata fueron obtenidas mediante la técnica de fotoacústica pulsada. Se utilizó el segundo armónico de un láser Nd:YAG (532 nm) a una frecuencia de repetición de 10 Hz, debido a que la absorción de luz por parte de las nanopartículas producirá el efecto fotoacústico. Las señales fotoacústicas se detectaron mediante un sensor PZT adherido a una de las caras de una cubeta de cuarzo de dimensiones 1 cm x 1 cm x 5 cm, la cual contenía 3 ml del coloide de nanopartículas de plata, al incidir el haz láser sobre la cubeta de forma perpendicular al sensor PZT; estas señales fueron adquiridas con un osciloscopio digital (DPO 3054 500 MHz, 2.5GS/s) y los datos exportados a una computadora para su posterior análisis. Se utilizó un fotodiodo como mecanismo de disparo del osciloscopio para que este pueda registrar las señales detectadas por el sensor PZT. Además la energía del haz láser utilizada fue de 0.5 mJ/pulso debido a que se debe emplear energías por pulso por debajo del umbral de ablación (régimen termoelástico) donde no se daña o deforman las fuentes de donde proviene la señal fotoacústica; de esta forma la señal fotoacústica obtenida proporcionara información acerca de las nanopartículas sin modificarlas.

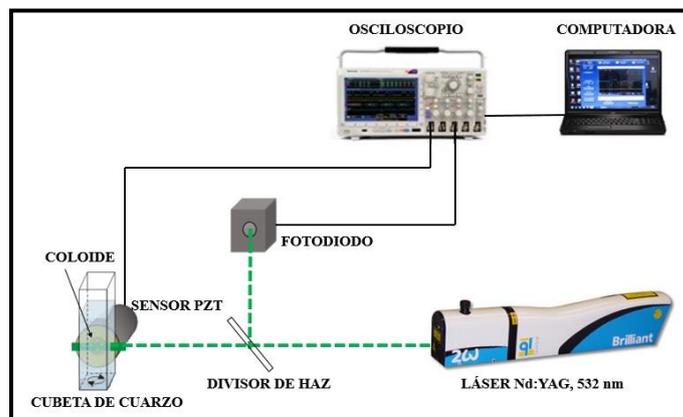


Fig. 2. Montaje experimental para la detección de las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata.

Adicionalmente los espectros de absorción óptica de los coloides de nanopartículas de plata se midieron mediante un espectrofotómetro ultravioleta-visible (Varian).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El color de los coloides de nanopartículas de plata es más intenso conforme aumenta el tiempo de ablación como se observa en la Fig. 3. Esto se debe a que la síntesis de nanopartículas por ablación láser en medios líquidos depende del tiempo, es decir a mayores tiempos se espera una mayor concentración de nanopartículas.

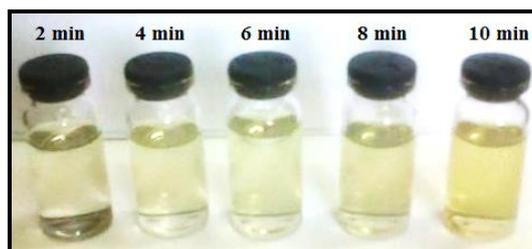


Fig. 3. Coloides de nanopartículas de plata obtenidos a diferentes tiempos de ablación láser: 2, 4, 6, 8 y 10 min.

Según lo reportado por Talukder et. al., (2010: 296); el tamaño, la forma y la homogeneidad de las nanopartículas se pueden describir cualitativamente mediante la posición del pico y la forma de la resonancia del plasmón de superficie (RPS) de su espectro de absorción. Por lo tanto, se obtuvieron los espectros de absorción de los coloides de nanopartículas de plata producidos a diferentes tiempos de ablación, los cuales se muestran en la Fig. 4. (a).

Respecto al efecto del tiempo de ablación en el tamaño de las nanopartículas de plata; Mafune et al., (2000: 9116) y Dorrnian et al., (2003: 95) han reportado, que la disminución o aumento del tamaño de las nanopartículas se puede observar mediante el desplazamiento del pico de la resonancia del plasmón de superficie del espectro de absorción hacia longitudes de onda más cortas (azul) o más largas (rojo) respectivamente. Entonces para verificar si en los coloides producidos se observa el desplazamiento a longitudes de onda más cortas de la resonancia del plasmón de superficie conforme aumenta el tiempo de ablación, que se podría atribuir a la re-ablación en nanopartículas más pequeñas de las nanopartículas más grandes ya producidas; normalizamos los espectros de absorción obtenidos, lo que nos permitió observar el desplazamiento del pico de la resonancia del plasmón de superficie. Los espectros normalizados se muestran en la Fig. 4. (b).

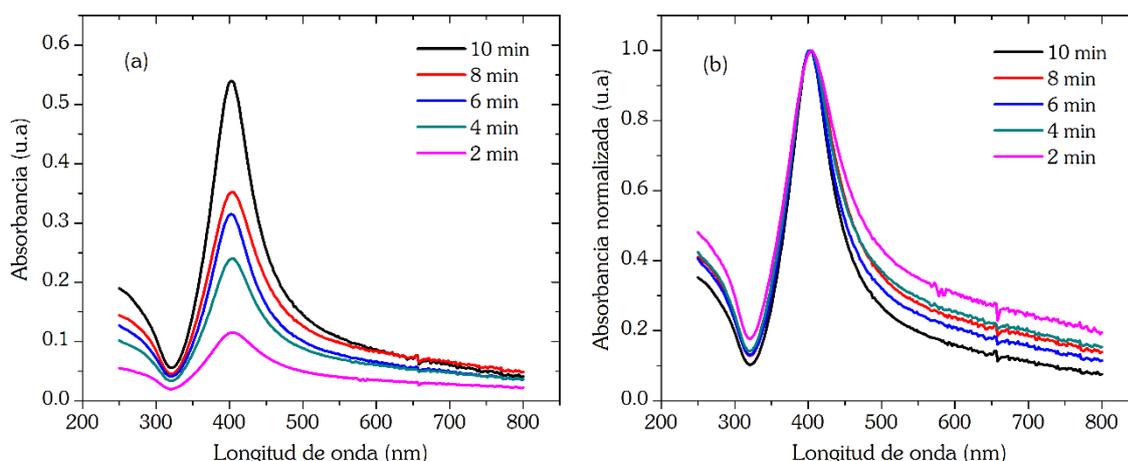


Fig. 4. (a) Espectros de absorción de los coloides de nanopartículas de plata obtenidos a diferentes tiempos de ablación. (b) Espectros de absorción normalizados.

En la Fig. 4. (a) se observa que los coloides de nanopartículas de plata producidos, tienen un único pico de la resonancia del plasmón de superficie en 404 nm. Este único pico es consistente con el hecho de que las nanopartículas de plata presentes en el coloide son de forma esférica.

En la Fig. 4. (b) como no se observa desplazamiento al azul de los picos de la resonancia del plasmón de superficie del espectro de absorción conforme aumenta el tiempo de ablación, se puede afirmar que el tamaño de las nanopartículas producidas no cambia significativamente; entonces la intensidad de los picos de la resonancia del plasmón de superficie que se observan en la Fig. 4.a se deberá al aumento de las interacciones entre las nanopartículas producidas debido a una mayor concentración de nanopartículas de plata en el coloide. La homogeneidad del tamaño de las nanopartículas de plata también se puede mejorar con tiempos más largos de ablación como se evidencia por el estrechamiento de la curva de la resonancia del plasmón de superficie conforme aumenta el tiempo de ablación, lo que indica mejor uniformidad de las nanopartículas producidas. Posiblemente se tenga un proceso de fragmentación de las nanopartículas más grandes, ello implicaría una distribución de tamaños con una desviación estándar menor lo que daría como resultado una curva de la resonancia del plasmón de superficie más estrecha.

Estos resultados son concordantes con los reportados por: Díaz, (2013: 44-49); quien mediante análisis de microscopía electrónica de transmisión (TEM); reportó que el tiempo de ablación afecta a la polidispersidad del tamaño de las nanopartículas, sin embargo el tamaño promedio de las nanopartículas se ve muy poco afectado. López et al., (2013: 32), reportaron que no existe una diferencia apreciable en el tamaño ni en la forma de las nanopartículas con el aumento del tiempo de ablación. Pyatenko et al., (2004: 805) reportaron que dependiendo del tiempo de ablación, los valores de la longitud de onda correspondientes al pico de la resonancia del plasmón de superficie del espectro de absorción se mantuvieron constantes.

Analizando el espectro de absorción de los coloides de nanopartículas de plata producidos, se observó un valor significativo de absorción en la longitud de onda de 532 nm; razón por la cual se realizó estudios mediante fotoacústica pulsada de los coloides de nanopartículas de plata considerando esta longitud de onda. Es importante recalcar que se obtuvieron las señales fotoacústicas en el régimen termoelástico. Según lo reportado por Alba (2013: 29), la señal fotoacústica en el régimen termoelástico, depende de la cantidad (concentración) y tamaño de las nanopartículas. En la presente investigación, las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata producidos solo dependerán de la cantidad de nanopartículas (concentración) debido a que se ha demostrado que el tamaño de las nanopartículas no cambia significativamente. En la Fig. 5 se muestran las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata producidos.

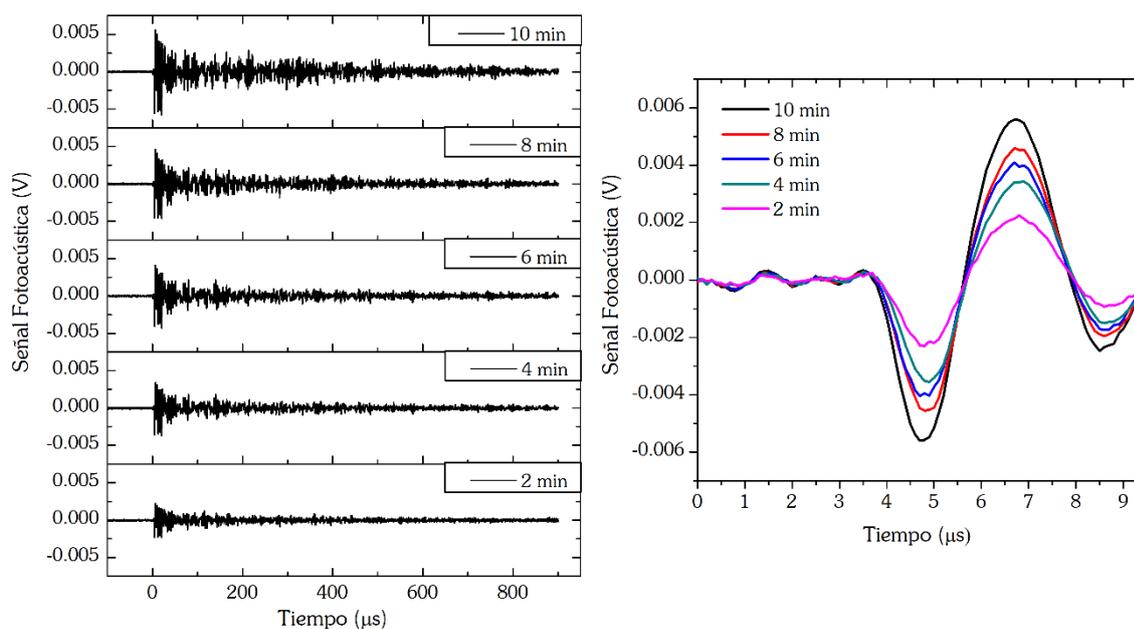


Fig. 5. Señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata obtenidos a diferentes tiempos de ablación.

Se observa que la intensidad de la señal fotoacústica de los coloides de nanopartículas de plata se incrementa conforme aumenta el tiempo de ablación. La razón de este incremento se debe al aumento de la cantidad de nanopartículas de plata en el coloide, dando lugar a nuevas fuentes de contribuciones termoelásticas para el efecto fotoacústico; por lo tanto, más fuentes para el efecto fotoacústico implican incrementos en la intensidad de la señal fotoacústica.

Respecto al efecto del tiempo de ablación en la cantidad (concentración) de nanopartículas de plata en el coloide. Pyatenko et al., (2004: 805); utilizó la absorbancia máxima correspondiente a la banda de la resonancia del plasmón de superficie del espectro de absorción para cuantificar la cantidad de nanopartículas de plata presente en el coloide; pero la absorbancia en la banda de la resonancia del plasmón de superficie depende de la forma y el tamaño de las nanopartículas. Mafune et al. (2000: 9113), Tsuji et al., (2002: 81) utilizaron la absorbancia a 250 nm en la región correspondiente a las transiciones entre bandas de la plata, la forma de esta banda no depende de la forma y el tamaño de las nanopartículas, por tal razón, la absorbancia en esta región está relacionada directamente con la cantidad de plata en el coloide. Las transiciones entre bandas para la plata implica transiciones entre la banda ocupada 4d a la banda no ocupada 5sp. Entonces utilizaremos la absorbancia a 250 nm para cuantificar la cantidad de nanopartículas de plata presente en el coloide.

Según lo reportado por Mafune et al. (2000: 9113) la concentración de nanopartículas se puede derivar de la absorbancia si se conoce la distribución del tamaño de las nanopartículas. En nuestra investigación, no conocemos las distribuciones de tamaño de las nanopartículas producidas; entonces adoptaremos el término "abundancia relativa" de las nanopartículas de plata de la absorbancia a 250 nm. Evidentemente, la abundancia relativa es proporcional a la cantidad (concentración) de las nanopartículas de plata en el coloide.

Para los coloides producidos, como la absorbancia máxima de la banda correspondiente a la resonancia del plasmón de superficie de los espectros de absorción tienen características bastante similares (forma y tamaño de las nanopartículas), entonces esta absorbancia representará la cantidad de nanopartículas en el coloide. La Fig. 6 muestra los valores de la absorbancia a 250 nm y la absorbancia máxima en función del tiempo de ablación.

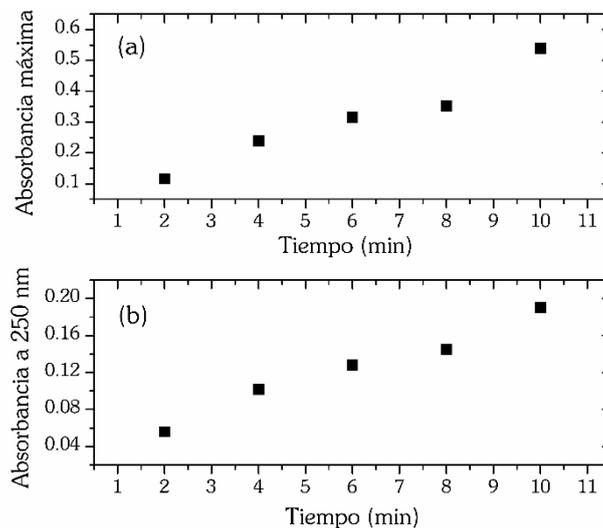


Fig. 6. (a) Absorbancia máxima en función del tiempo de ablación. (b) Absorbancia a 250 nm en función del tiempo de ablación.

Se observa que en el rango de 2 a 10 minutos los valores de la absorbancia a 250 nm y la absorbancia máxima se incrementan linealmente conforme aumenta el tiempo de ablación. Como la absorbancia a 250 nm está relacionada con la abundancia relativa (concentración) de nanopartículas de plata, entonces podemos inferir que la concentración aumenta con el tiempo de ablación. Estos resultados son concordantes con los obtenidos por Mafune et al., (2000: 9115-9116) y Pyatenko et al., (2004: 805).

En el análisis fotoacústico, se graficó los valores de la amplitud de las señales fotoacústicas de los coloides de nanopartículas de plata en función del tiempo de ablación; los resultados se muestran en la Fig. 7.

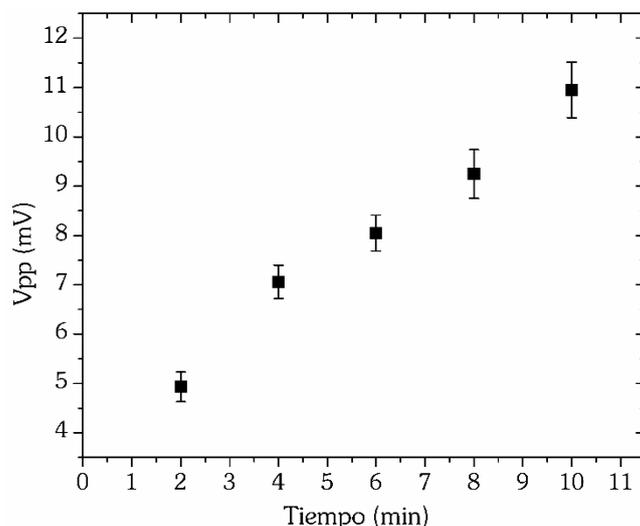


Fig. 7. Amplitud de la señal fotoacústica (V_{pp}) de los coloides de las nanopartículas de plata en función del tiempo de ablación.

Se observa que en el rango de 2 a 10 minutos los valores de la amplitud de la señal fotoacústica se incrementan linealmente conforme aumenta el tiempo de ablación. Aquí, nos referimos a incrementos de la señal fotoacústica como incrementos en el máximo de la amplitud (Voltaje pico-pico) de dicha señal. Atribuimos este incremento al aumento de la cantidad (concentración) de las nanopartículas de plata en el coloide.

Finalmente, la relación entre la amplitud de la señal fotoacústica (V_{pp}) y la absorbancia a 250 nm de los coloides de nanopartículas de plata se muestra en la Fig. 8.

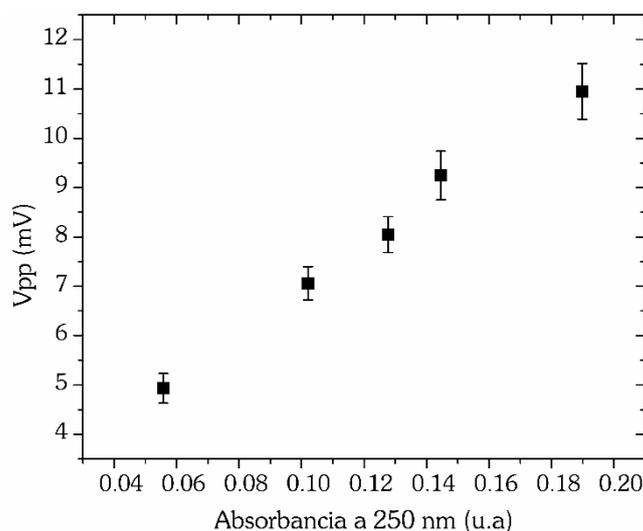


Fig. 8. Amplitud de la señal fotoacústica (V_{pp}) en función de la absorbancia a 250 nm del espectro de absorción, de los coloides de nanopartículas de plata producidos.

Se observa que existe una dependencia lineal entre la amplitud de la señal fotoacústica y la absorbancia a 250 nm. Como se probó anteriormente que la absorbancia a 250 nm está relacionada directamente

con la cantidad (concentración) de nanopartículas de plata en el coloide; por lo tanto, la amplitud de la señal fotoacústica será proporcional a la cantidad de nanopartículas de plata en el coloide.

Este estudio es uno de los primeros intentos reportados que utiliza la fotoacústica pulsada para hacer un seguimiento del comportamiento de las nanopartículas de plata variando los parámetros de síntesis. Como se comprobó los resultados obtenidos son concordantes con los de la técnica de caracterización de espectroscopia UV-Vis ampliamente aceptada por la comunidad científica.

IV. CONCLUSIONES

Se presenta evidencia referente a que la fotoacústica pulsada puede ser utilizada para estudiar los efectos del tiempo de ablación en las características de los coloides de nanopartículas de plata obtenidos por ablación láser en etanol.

Se comprobó que existe una dependencia lineal entre la amplitud de la señal fotoacústica y la absorbancia a 250 nm del espectro de absorción de los coloides de nanopartículas de plata. Como la absorbancia a 250 nm está relacionada directamente con la cantidad de nanopartículas de plata en el coloide; se comprueba que la amplitud de la señal fotoacústica es proporcional a la cantidad (concentración) de las nanopartículas de plata en el coloide.

La absorbancia a 250 nm de los espectros de absorción y la amplitud de la señal fotoacústica de los coloides de nanopartículas de plata mostraron que la cantidad de nanopartículas de plata aumenta con el tiempo de ablación, y en el rango de 2 a 10 minutos ese aumento es lineal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Óptica y Láseres del Departamento Académico de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional de Trujillo y se desarrolló dentro del PIC N° 11-2014 III Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica financiado con recursos del Canon Minero. Los autores agradecen al Ing. Noé Costilla de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Trujillo por haber facilitado el uso de un espectrofotómetro UV-Vis; al Dr. Tupak García Fernández por haber proporcionado la muestra de plata de alta pureza y al Mg. Miguel Valverde Alva estudiante de doctorado de la UNAM-México por la revisión del manuscrito original y sus valiosas sugerencias.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amendola, V., and Meneghetti, M. 2009. **Laser ablation synthesis in solution and size manipulation of noble metal nanoparticles.** Phys. Chem. Phys., 11. 3805-3821.
- Alba, J. 2013. **Estudio de la Ablación Láser mediante la Fotoacústica Pulsada: Síntesis de Nanopartículas.** Tesis de Maestría en la Universidad de Guanajuato, México. 1-74
- Díaz, M. 2013. **Obtención de nanopartículas de plata por ablación láser soportadas en hilo de sutura de seda.** Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico en la Universidad Autónoma del Estado de México. 1-71.
- Dorranian, D., Tajmir, S., Khazanehfar, F. 2013. **Effect of Laser Fluence on the Characteristics of Ag Nanoparticles Produced by Laser Ablation.** Soft Nanoscience Letters, 3. 93-100.
- Elsayed, K. A., Imam, H., Ahmed, M., Ramadan, R. 2013. **Effect of focusing conditions and laser parameters on the fabrication of gold nanoparticles via laser ablation in liquid.** Optics & Laser Technology, 45. 495-502.
- López, G., Morales, R., Olea, O., Sánchez, V., Trujillo, J., Valera, V., Vilchis, A. 2013. **Nanoestructuras metálicas; síntesis, caracterización y aplicaciones.** Libro de Editorial Reverte, Universidad Autónoma del Estado de México. 1-50.

- Mafune, F., Kohno, J., Takeda, Y., Kondow, T. 2000. **Formation and Size Control of Silver Nanoparticles by Laser Ablation in Aqueous Solution.** J. Phys. Chem. 104. 9111-9117.
- Pyatenko, A., Shimokawa, K., Yamaguchi, M., Nishimura, O., Suzuki, M., 2004, **Synthesis of silver nanoparticles by laser ablation in pure water.** Appl. Phys. A 79. 803-806.
- Talukder A. I., Sultana, P., Haider, A. F., Wahadoszamen, M., Abedin, K. M., Farhad, S. F. 2010. **Power dependence of size of laser ablated colloidal silver nanoparticles.** Eur. Phys. J. D. 60. 295-300.
- Tsuji, T., Iryo, K., Watanabe, N., Tsuji, M. 2002. **Preparation of silver nanoparticles by laser ablation in solution: influence of laser wavelength on particle size.** Applied Surface Science 202. 80-85.
- Valverde, M., García, T., Villagrán, M., Sánchez, C., Castañeda, R., Esparza, E., Sánchez, C., Sánchez, J., Márquez, C. 2015. **Synthesis of silver nanoparticles by laser ablation in ethanol: A pulsed photoacoustic study.** Applied Surface Science 355. 341–349.