

EFECTO DE LA HUMEDAD, EL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y LA FORMA DE PREPARACIÓN DE LA MUESTRA SOBRE LA SEÑAL DE Mg I EN ESPECTROSCOPIA DE PLASMAS GENERADOS POR LÁSER (LIBS) EN MUESTRAS DE SUELOS

S. López¹, J. Mejía², J. Pareja³, A. Molina⁴, Bioprocesos y Flujos Reactivos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia.

Recibido Mayo 5, 2011- Aceptado agosto 16, 2011

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v5n2.a02>

Resumen— La espectroscopia de plasmas inducidos por láser, LIBS, permite el análisis de la composición elemental en tiempo real de muestras gaseosas, líquidas y sólidas. Su aplicación en el análisis de la composición elemental de suelos está limitada por los efectos de matriz que se maximizan dada la heterogeneidad de las muestras sólidas. Mediante un montaje experimental en el cual se empleó un láser Nd:YAG en su frecuencia fundamental y un sistema de detección que involucra una cámara ICCD y un espectrógrafo Czerny-Turner, se analizó la variación de la intensidad de la señal LIBS para Mg I (285.2 nm) con cambios en la humedad (entre 0%_{peso} y 25%_{peso}) y en el tamaño de partícula (entre 500 μm y 1000 μm) de la muestra de suelo. Se evaluó también el efecto de la preparación de las muestras como pellets comprimidos en la intensidad LIBS. El promedio de cinco conjuntos de espectros, de 100 disparos individuales cada uno, muestra que valores de humedad por encima del 5% disminuyen la intensidad de la señal LIBS. Cuando la humedad es menor al 5%, la intensidad LIBS disminuye con una disminución de la humedad. No se observó un efecto evidente del tamaño de grano en la señal LIBS. Sin embargo, la preparación de muestras comprimidas en pellets tiende a producir más aerosol que puede interferir con la señal LIBS. Todos estos resultados están relacionados con la generación de una nube de aerosol alrededor de la muestra de sólido. Para el análisis de muestras de suelos mediante LIBS se recomienda realizar un presecado de la muestra, no comprimirla en pellets y limitar la variabilidad de tamaño de grano a 500 μm .

Palabras clave— Espectroscopia de plasmas inducidos por láser, LIBS, análisis de suelos

Abstract— Laser-induced plasma spectroscopy, LIBS, allows the analysis of the elemental composition in real time of gaseous, liquid and solid samples. Its application in the analysis of the elemental composition of soils is limited because of the effects of matrix which are maximized given the heterogeneity of solid samples. By means of an experimental setup in which was used an Nd:YAG laser in its fundamental frequency and a detection system that involves an ICCD camera and a Czerny-Turner spectrograph. The variation of the intensity of the LIBS signal for Mg I (285.2 nm) was analyzed with changes in humidity (between 0% weight and 25% weight) and the particle size (between 500 μm and 1000 μm) of the soil sample. Also the effect of the preparation of the samples as pellets compressed in the LIBS intensity was evaluated. The average of five sets of Spectra, 100 individual shots each, shows that values of humidity above 5% decline the LIBS signal strength. When humidity is less than 5%, the LIBS intensity decreases because of a decrease in the humidity. There was not an evident effect observed in the grain size in the LIBS signal. However, the preparation of samples compressed in pellets tends to produce more spray that may interfere with the LIBS signal. All these results are related to the generation of a cloud of spray around the solid sample. For the analysis of samples of soils by means of LIBS it is advised to make a pre-drying of the sample, not to compress it in pellets and limit the variability of grain size to 500 μm .

¹Sebastián López, Grupo de investigación Bioprocesos y Flujos Reactivos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

²Jonnattan Mejía, Grupo de investigación Bioprocesos y Flujos Reactivos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Jhon Pareja, Carrera 80 No 65-223, Bloque M7-214, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Teléfono: (57) +4 4255317. (correo e.: jhonpa667@gmail.com).

⁴Alejandro Molina, Carrera 80 No 65-223, Bloque M7-214, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Teléfono: (57) +4 4255317. (correo e.: amolinao@unal.edu.co).

Keywords— Spectroscopy of plasma induced by laser, LIBS, soil analysis

I. INTRODUCCIÓN

La espectroscopia de plasmas producidos por láser (Laser-induced Breakdown Spectroscopy – LIBS) es una técnica de análisis elemental que, mediante el enfoque de un pulso láser de alta energía sobre una muestra, logra la formación de un plasma. El plasma emite

radiación que se captura y se resuelve espectralmente a diferentes frecuencias. El espectro obtenido es característico de la muestra y depende en gran parte de sus componentes [1].

El análisis de suelos con LIBS ha permitido detectar la presencia de elementos metálicos contaminantes [2-4], al clasificar los tipos de suelos [5] y al analizar los fertilizantes [6]. Pocos análisis de elementos considerados nutrientes para las plantas (v.gr. Mg, Ca, Mn, K, P, Fe) se han realizados con LIBS [7-9], principalmente por la alta dependencia de la señal emitida por el plasma con el tipo de matriz estudiada.

Con respecto a las técnicas tradicionales de análisis elemental, LIBS presenta las siguientes ventajas: (i) bajo tiempo de análisis, (ii) poca preparación requerida de las muestras, (iii) carácter semidestructivo, (iv) análisis in situ y (v) capacidad de analizar gases, líquidos y sólidos. Sin embargo, LIBS aún no presenta un uso extendido en el análisis de suelos debido a ciertas dificultades en la cuantificación de elementos en muestras de este tipo [2], principalmente debido a los llamados “efectos de matriz” que pueden ser físicos o químicos [10].

Los efectos de matriz físicos hacen referencia a las propiedades de la muestra como el calor específico, el calor latente, entre otras, que son propiedades que determinan la cantidad de material ablacionado por el pulso láser y por ende la cantidad luz emitida por el plasma. Los efectos de matriz químicos se refieren a la influencia que puede tener un determinado elemento, o compuesto en la emisión de otros elementos.

Algunos parámetros, como la formación de aerosol, la potencia del pulso láser, la frecuencia de los pulsos, el gas alrededor de la muestra, el tamaño de partícula y la humedad de la muestra afectan de forma directa la intensidad de la señal LIBS [11-12]. Estos parámetros, a diferencia de los efectos de matriz, se pueden controlar con cierta facilidad. El tamaño de partícula y la humedad están muy relacionados con la preparación de la muestra de suelo previa al análisis. Por tanto, determinar sus efectos sobre la señal LIBS resulta esencial para el análisis elemental de suelos.

Este estudio tiene como objetivo determinar los efectos de la humedad, tamaño de partícula y forma de preparación de la muestra sobre la intensidad de la señal LIBS en muestras de suelos característicos de la región andina de Colombia.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A. Montaje Experimental

En la Fig. 1 se muestra un esquema del montaje experimental utilizado. El plasma se generó usando un láser pulsado Nd:YAG (Continuum Surelite I10) trabajando a su frecuencia fundamental de 1064 nm, con una energía aproximada de 300 mJ, una duración del pulso de 9 ns y una tasa de repetición de 3.33 Hz. El pulso láser se enfocó sobre la muestra de suelo, con un lente plano-convexo (UV-1064nm, distancia focal de 100 mm). La muestra, que se depositó en un plato petri de 10 cm de diámetro y una altura de 1 cm, se movió entre cada pulso para evitar que la formación de cráteres influyera en el análisis. La luz emitida por el plasma se enfocó por medio de un lente plano-convexo (UV-1064nm, distancia focal de 75 mm), sobre una fibra óptica (Princeton Instruments, 190 nm - 1100 nm). La radiación se transportó a través de la fibra óptica a un espectrómetro tipo Czerny–Turner (Princeton Instruments, SP 2300). En el espectrómetro se utilizó una apertura a la entrada de 25 μ m y una rejilla de 2400 ranuras/mm, con lo cual se logró una ventana espectral de aproximadamente 16 ± 0.2 nm. La intensidad de la señal espectral se midió usando una cámara ICCD (Princeton Instruments, 1024×156 pixeles). A menos que se indique lo contrario, para la medición de la radiación del plasma en la cámara ICCD se emplearon tiempos de retraso e integración de 4 μ s y 8 μ s respectivamente.

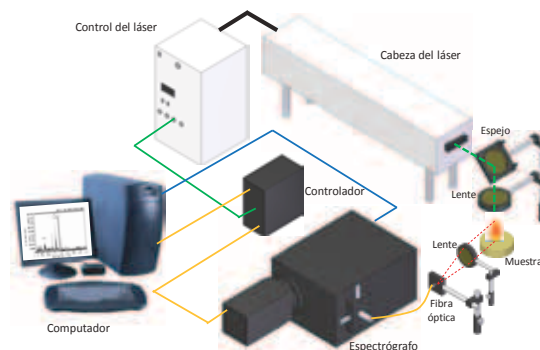


Fig. 1. Montaje experimental para medición de nutrientes con LIBS

B. Cuantificación de la Señal LIBS

Para evaluar el efecto de la humedad, tamaño de partícula y forma de preparación de la muestra en la señal LIBS se seleccionó la emisión de Mg I en 285.2 nm debido a que la emisión de este elemento en esta zona del espectro no presenta interferencias

con otros elementos [13]. Se midieron 100 espectros individuales para calcular un espectro promedio para así disminuir el efecto de la heterogeneidad espacial de la muestra. Se realizaron 5 repeticiones de cada conjunto de 100 espectros con el fin de evaluar la reproducibilidad de la medición.

Se usó un método de normalización que correlaciona la intensidad de la señal con respecto al background (línea base del espectro) para disminuir el efecto de variabilidad entre disparo y disparo (asociada a variaciones en el plasma, en posición de muestra, en composición de suelo, etc.) El background de una sección del espectro sin líneas de emisión da cuenta de la emisión continua de radiación debida a fenómenos Bremsstrahlung y depende de la densidad total del plasma, la cual está relacionada con el total de especies que emiten [1]. La normalización con respecto al background se calculó como la relación del área bajo el pico de emisión y el área del background (Fig. 2) [14].

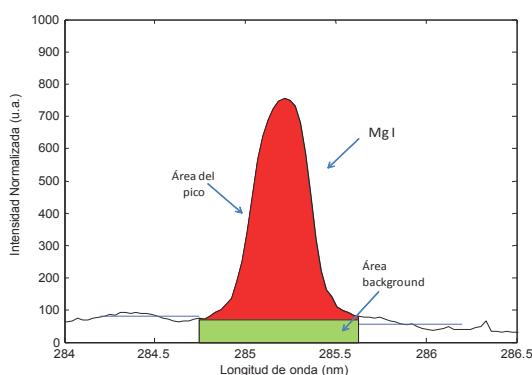


Fig. 2. Esquema que ilustra la forma cómo se realizó la normalización de la intensidad de la emisión de Mg I

C. Preparación de las Muestras

Para determinar el efecto de la humedad se usó una muestra de suelo tipo Inceptisol con un tamaño de partícula en el rango entre 500 μm y 1000 μm . El suelo se comprimió parcialmente, para cada ensayo, aplicando una leve presión con una superficie plana con el fin de homogenizar la superficie de la muestra.

Inicialmente se secó la muestra a una temperatura de 60 $^{\circ}\text{C}$ por dos días para lograr 0% de humedad. Para obtener humedades entre 0 % y 5 % (todas las concentraciones en porcentaje en este artículo se refieren a peso) la muestra seca se dejó al aire libre para que intercambiara humedad con el aire ambiente. Para obtener humedades entre el 5 % y el 25%, la muestra de suelo seco se saturó adicionando agua destilada hasta garantizar una uniformidad del agua en la muestra. Seguido, la muestra se secó parcialmente,

entre cada ensayo, para obtener el contenido de humedad deseado.

Para determinar el efecto del tamaño de partícula y forma de preparación de la muestra se usó un suelo tipo Andisol, el cual se secó completamente y se tamizó para obtener diferentes tamaños de partícula. Las muestras se clasificaron de acuerdo a los rangos de tamaño de partícula así: (i) diámetros menores a 500 μm , (ii) diámetros entre 500 μm y 1000 μm y (iii) diámetros mayores a 1000 μm . Se consideraron dos formas de preparación de muestra: sin comprimir y muestras comprimidas. Las muestras comprimidas se obtuvieron aplicando una presión de 5000 psi durante 3 minutos para formar unos pellets con un diámetro de 2.0 cm y un espesor de 7 mm.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Efecto de la Humedad en el Suelo Sobre la Señal LIBS

En la Fig. 3 se muestra la variación de la intensidad de la luz emitida por el elemento Mg (285.2 nm) en la muestra de suelo con respecto al contenido de humedad. Se encontró que para porcentajes de humedad por debajo del 5% existe un incremento en la intensidad de la señal conforme aumenta el contenido de humedad. Para humedades entre el 5% y el 25% la intensidad de la señal disminuye conforme aumenta el contenido de humedad. Este resultado es similar al encontrado por Wisbrun et al. [11] y por Bublitz et al. [12].

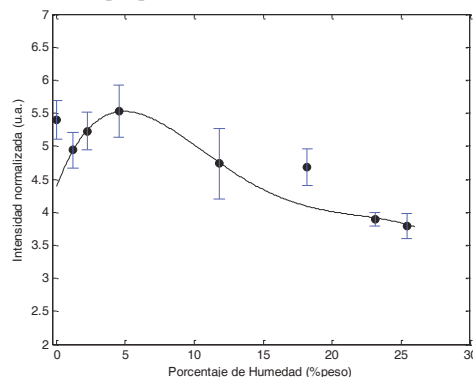


Fig. 3. Efecto de la humedad de la muestra en la intensidad de la señal para la línea espectral de Mg I en un análisis de suelos con LIBS. Las líneas verticales en esta figura y las otras a continuación representan la desviación estándar de 5 espectros promedios realizados sobre la misma muestra

El comportamiento de la señal emitida por el plasma con respecto al aumento del contenido de humedad de la muestra se puede explicar, asumiendo que la concentración de la especie que emite se mantiene constante, porque [11-12]:

i. La humedad en el suelo provoca una disminución en la formación de aerosol y por lo tanto la señal aumenta debido a que la luz no se dispersa por el aerosol y parte de la energía del láser no se absorbe por el aerosol formado.

ii. La humedad en el suelo provoca una disminución en la temperatura del plasma debido a que parte de la energía proveniente del láser se usa para evaporar el agua contenida en el suelo. Además, el contenido de humedad puede provocar que el plasma se enfríe más rápidamente. Por tal motivo las emisiones atómicas se dan en tiempos más cortos y con una menor intensidad.

Para humedades menores al 5% se encontró que la formación de aerosol era significativa. En la fig. 4 a. se observa la presencia de aerosol durante la formación del plasma para una humedad de 1 %. Para otras muestras con humedades inferiores al 5% se obtuvo un comportamiento similar. Este aerosol puede dispersar la luz proveniente del plasma y por tal motivo disminuir la cantidad de luz recolectada en la fibra óptica, lo cual causa que la intensidad de la señal sea baja. A medida que el contenido de humedad aumenta, la formación de aerosol disminuye y la intensidad de la señal aumenta hasta que se alcanza un contenido de humedad en el suelo del 5% donde la formación de aerosol es mínima (Fig. 4 b).

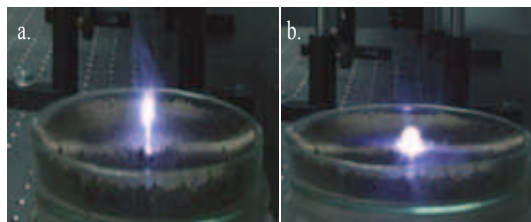


Fig. 4. Fotografía del plasma que se forma sobre la superficie de un suelo para el cual la humedad es 1% (a) y 5% (b). (Diámetro caja Petri = 10 cm)

Para humedades superiores al 5% la intensidad de la señal disminuye conforme aumenta el contenido de humedad. Este comportamiento es consecuencia en parte de que un mayor contenido de agua tiende a producir un plasma de menor temperatura, por lo que la emisión total disminuye. Se debe además considerar que un aumento en el contenido de humedad de la muestra disminuye, por dilución, la concentración de Mg. Lo anterior contribuye también a una disminución en la señal LIBS al aumentar la humedad.

Sin embargo, el efecto en la emisión total con el aumento de humedad es bastante considerable y pareciera dominar. De hecho, en la Fig. 5 se muestra cómo la señal del background (línea base del espectro)

disminuye conforme aumenta el contenido de humedad. Debido a que la intensidad del background es proporcional a la densidad electrónica y esta a su vez es proporcional a la temperatura del plasma, la fig. 5 sugiere que la temperatura del plasma disminuyó conforme aumentó el contenido de humedad.

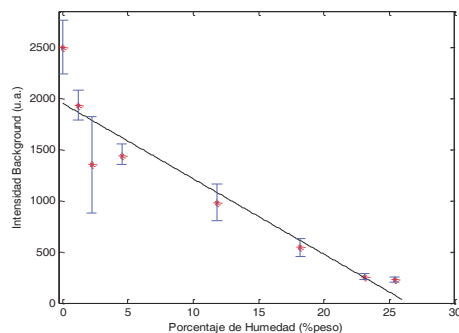


Fig. 5. Comportamiento de la Intensidad del Background con el contenido de humedad de la muestra de suelo

Al mismo tiempo que disminuye la temperatura del plasma, éste se puede enfriar más rápido cuando el contenido de humedad es mayor. Cuando se estudia la variación de la intensidad de la señal de la luz emitida por el elemento Mg a diferentes tiempos de retraso (manteniendo el tiempo de exposición constante) y para las diferentes humedades consideradas en la Fig. 6, se observa que la emisión de Mg, normalizada con respecto a aquella que se tiene a un tiempo de retraso de 2 μ s, disminuye más rápidamente cuando la humedad es mayor. Esto indica que las emisiones atómicas desaparecen más rápido a medida que el contenido de humedad de la muestra es mayor. Se sugiere que la tasa de desaparición de las emisiones atómicas más altas para humedades elevadas se debe a un enfriamiento más rápido del plasma.

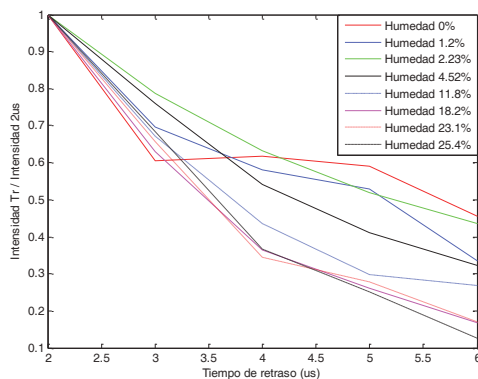


Fig. 6. Cambio de la intensidad de la señal de Mg con respecto al tiempo de retraso, para diferentes humedades de la muestra de suelo. El tiempo de exposición para todas las mediciones fue de 8 μ s

Algo interesante que se observa en la Fig. 3 es el punto con 0% de humedad el cual está por fuera de la línea de tendencia pues presenta una intensidad similar a la que se tiene cuando la humedad es del 5%. Este comportamiento, también se observa en los datos de Wisbrun et al. [11] y Bublitx et al. [12], sin embargo estos autores no dan ninguna explicación de este fenómeno. Una hipótesis que podría explicar este efecto es que a tan baja humedad la cantidad de aerosol generado es tan alta que se alcanza algún rompimiento sobre éste. Windom y Hahn [15] demostraron que el plasma generado sobre aerosol producto de la ablación LIBS podría presentar mejores características de detección de la técnica LIBS.

B. Efectos del Tamaño de Partícula y Forma de Preparación de la Muestra Sobre la Señal LIBS

En la Fig. 7 y 8 se muestra el comportamiento de la intensidad de la señal LIBS respecto al diámetro de partícula para muestras sin comprimir y comprimidas, respectivamente. Para los dos tipos de muestras no se encontró variación estadísticamente significativa de la señal LIBS en el rango de tamaños de partícula estudiado.

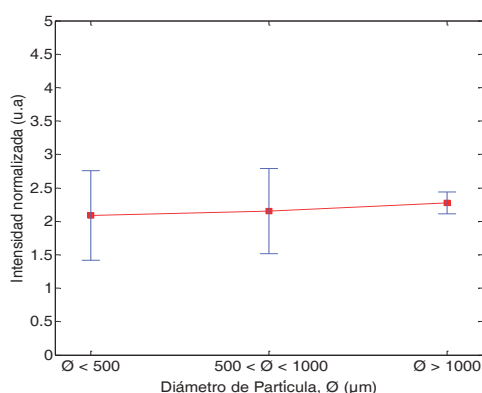


Fig. 7. Influencia del tamaño de partícula sobre la señal LIBS para suelos sueltos

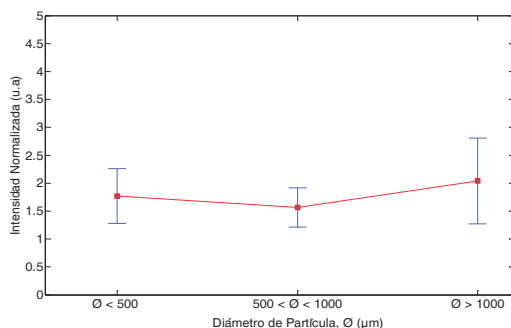


Fig. 8. Influencia del tamaño de partícula sobre la señal LIBS para suelos comprimidos

Para las muestras sin comprimir se obtuvo una disminución de la desviación estándar conforme aumentó el tamaño de partícula, es decir, se obtuvo una mejor repetitividad para tamaños de partícula mayores (Fig. 7).

Para todos los tamaños de partícula se obtuvieron señales LIBS de intensidad similar. Sin embargo, las fotografías del plasma que se muestran en la Fig. 9 muestran una mayor concentración de aerosol sobre las muestras de suelo comprimidas. La formación de aerosol en altas concentraciones, como sucede en la Fig. 9 a, disminuiría la señal LIBS [11]. Por lo anterior es preferible trabajar con muestras sin comprimir para poder usar altas frecuencias del láser.

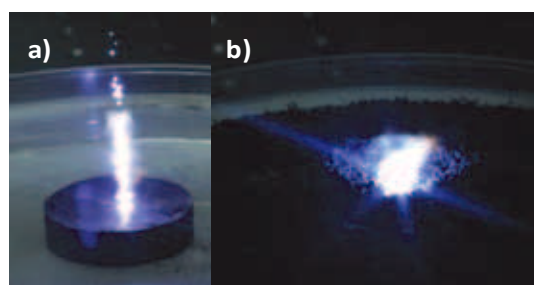


Fig. 9. Fotografía del plasma que se forma sobre la superficie de un suelo para el cual la preparación de la muestras es comprimida (a) (diámetro Pellet 2 cm) y la muestra es suelta (b) (diámetro cráter ~6 mm)

IV. CONCLUSIONES

La intensidad de la señal emitida por el plasma tiene una dependencia importante con el contenido de humedad de la muestra. Para humedades inferiores al 5% en el suelo hay un incremento en la intensidad de la señal emitida por el plasma conforme aumenta el contenido de humedad. Para humedades por encima del 5% el comportamiento es diferente. La intensidad de la señal emitida por el plasma disminuye conforme aumenta el contenido de humedad de la muestra.

Debido al fuerte efecto de la humedad en la intensidad de la señal emitida por el plasma en un análisis de suelos con LIBS, se debe garantizar que todas las muestras a analizar tenga un mismo contenido de humedad para obtener resultados comparables. Se recomienda trabajar con muestras completamente secas pues de esta forma se puede controlar con mayor facilidad el nivel de humedad y porque la intensidad de la señal en este punto es alta.

Los suelos sin comprimir no muestran un incremento significativo de la señal LIBS. Sin embargo, la dispersión de la señal disminuye al aumentar el tamaño de partícula.

En los suelos comprimidos no se obtuvo una tendencia clara del comportamiento de la señal LIBS ni de su dispersión con el incremento del tamaño de partícula.

Entre las dos formas de preparación de muestra que se compararon en este estudio, la metodología más apropiada es utilizar suelos sin comprimir, pues estos presentan una buena señal LIBS y mejor repetitividad.

AGRADECIMIENTOS

A las entidades financiadoras del proyecto: “Medición de nutrientes en suelos con Espectroscopia de Emisión de Plasmas Producidos por Láser (LIBS)” Colciencias (Contrato No. 111845221140), Portafolio de Proyectos de Innovación de la Facultad de Minas (Código QUIPU: 20701008160), Dirección de Investigación de la Universidad Nacional Sede Medellín – DIME (Código QUIPU: 20201006689). Al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por suministrar las muestras de suelos.

REFERENCIAS

- [1] D.A. Cremers, L.J. Radziemski, “*Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*”, Editorial. L. John Wiley & Sons. 2006.
- [2] A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter, “*Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Fundamentals and Applications*”, Editorial. Cambridge University Press. 2006.
- [3] Jr.D. Santos, L.C. Nunes, L.C. Treviza, Q. Godoi, F.O. Leme, J.W.B. Braga, F.J. Krug, “Evaluation of laser induced breakdown spectroscopy for cadmium determination in soils”. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2009. **64**(10): p. 1073-1078.
- [4] J.H. Kwak, C. Lenth, C. Salb, E-J Ko, K-W. Kim, K. Park, “Quantitative analysis of arsenic in mine tailing soils using double pulse-laser induced breakdown spectroscopy”. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2009. **64**(10): p. 1105-1110.
- [5] M.J. Coelho Pontes, J. Cortez, R.K. Harrop Galvão, C. Pasquini, M.C. Ugolino Araújo, R. Marques Coelho, M. Koiti Chiba, M. Ferreira de Abreu, B. Emöke Madari, “Classification of Brazilian soils by using LIBS and variable selection in the wavelet domain”. *Analytica Chimica Acta*, 2009. **642**: p. 12–18.
- [6] Y. Groisman, M. Gaft, “Online analysis of potassium fertilizers by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy”. *Spectrochimica Acta Part B*, 2010. **65**: p. 744–749.
- [7] L.C. Trevizan, Jr.D. Santos, R.E. Samad, N.D. Vieira Jr, C.S. Nomura, L.D. Nunes, I.A. Rufini, F.J. Krug, “Evaluation of laser induced breakdown spectroscopy for the determination of macronutrients in plant materials”. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008. **63**: p. 1151 - 1158.
- [8] L.C. Trevizan, Jr.D. Santos, R.E. Samad, N.D. Vieira Jr, C.S. Nomura, L.D. Nunes, I.A. Rufini, F.J. Krug, “Evaluation of laser induced breakdown spectroscopy for the determination of micronutrients in plant materials”. *Spectrochimica Acta Part B*, 2009. **64**: p. 369 - 377.

- [9] E.C. Ferreira, D.M.B.P. Milori, E.J. Ferreira, R.M. Da Silva, L. Martin-Neto, “Artificial neural network for Cu quantitative determination in soil using a portable Laser Induced Breakdown Spectroscopy system”. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008. **63**: p. 1216–1220.
- [10] A.S. Eppler, D.A. Cremers, D.D. Hickmott, M.J. Ferris, A. C. Koskelo, “Matrix Effects in the Detection of Pb and Ba in Soils Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy”. *Applied Spectroscopy*, 1996. **50**(9): p. 1175:1181.
- [11] R. Wisbrun, I. Schechter, R. Niessner, H. Schroder, H.L. Kompa, “Detector for Trace Elemental Analysis of Solid Environmental Samples by Laser Plasma Spectroscopy”. *Anal. Chem*, 1994. **66**: p. 2964 - 2975.
- [12] J. Bublitz, C. Dolle, W. Schade, A. Hartmann, R. Horn, “Laser-induced breakdown spectroscopy for soil diagnostics”. *European Journal of Soil Science*, 2001. **52**: p. 305 - 312.
- [13] D. Diaz, “Medición de contenido total de nutrientes en suelos mediante espectroscopia de emisión de plasmas producidos por láser (LIBS)”, Facultad de Minas. 2010, Universidad Nacional de Colombia: Medellín.
- [14] U. Aydin, P. Roth, C.D. Gehlen, R. Noll, “Spectral line selection for time-resolved investigations of laser-induced plasmas by an iterative Boltzmann plot method”. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008. **63**: p. 1060 - 1065.
- [15] B. C. Windom, D. W. Hahn. “Laser ablation—laser induced breakdown spectroscopy (LA-LIBS): A means for overcoming matrix effects leading to improved analyte response” *J. of Anal. Atom. Spect.*, 2009. **24**, 1665-1675.

BIOGRAFÍA



Sebastián López, Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Miembro del grupo de investigación Bioprocesos y Flujos Reactivos con interés en temas de investigación como las técnicas de diagnóstico láser.



Jonattan Mejía, Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Miembro del grupo de investigación Bioprocesos y Flujos Reactivos.



Jhon Pareja. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Antioquia. Estudiante de Maestría en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Miembro del grupo de Investigación Bioprocesos y Flujos Reactivos.



Alejandro Molina. PhD. en Ingeniería Química y de Combustibles en la Universidad de Utah, Posdoctorado en Sandia National Laboratories. Profesor asociado Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Miembro del grupo de investigación Bioprocesos y Flujos Reactivos.