

Estudio microestructural y elemental de una munición de la Batalla de La Trinidad de Sarapiquí de 1856

Microstructural and elemental study of a bullet from the Battle of Trinidad de Sarapiquí in 1856

Irene Rojas Rodríguez

Universidad de Costa Rica, Escuela de Física, San José, Costa Rica

ire.rojas@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7063-4015>

Paula Calderón Mesén

Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas, San José, Costa Rica.

paula.calderonmesen@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0002-6243-8054>

Óscar Andrey Herrera-Sancho

Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas, Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares, Instituto de Investigación en Arte y Escuela de Física. San José, Costa Rica.

oscar.herrerasancho@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-8871-171X>

Referencia/ reference:

Rojas, I., Calderón, P., y Herrera-Sancho, O. (2021). Estudio microestructural y elemental de una munición de la Batalla de la Trinidad de Sarapiquí de 1856. *Yulök Revista de Innovación Académica*, 5 (1), 56-67. <https://doi.org/10.47633/yulk.v5i1.372>

Recibido: 10 de junio del 2021

Aceptado: 25 de junio del 2021

56

Resumen

Este estudio pretende generar un conocimiento integral acerca de la complejidad del hecho histórico de la Batalla en la Trinidad de Sarapiquí de la Campaña Nacional de 1856-1857, particularmente en establecer un diagnóstico de referencia de la macroestructura, microestructura y análisis químico elemental de una munición Minié recuperada de este evento histórico. Por lo tanto, en la investigación reportada aquí se llevó a cabo el primer estudio piloto de una munición tipo Minié recuperada en el 2016 en una excavación en el sitio de La Trinidad, en Sarapiquí, perteneciente al Museo Histórico Cultural Juan Santamaría. Con el fin de obtener información tanto de su estructura interna y externa, se utilizaron las técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y análisis elemental por energía dispersiva de rayos X para determinar zonas de interés en la munición y además especificar la composición del revestimiento blanco (pátina) el cual contiene primordialmente tres tipos de elementos: Pb, C y O. Aquí también identificamos la posible presencia de cristales de cerusita en el revestimiento superficial de carbonato de plomo en una munición Minié de 165 años de antigüedad. Cabe destacar que, conocer el arma de origen, es evidencia de gran importancia para contribuir a la reconstrucción del contexto histórico en el cual se desarrolló este hecho bélico y nos permitirá establecer cuáles armas se estaban utilizando en la época, tanto por los combatientes nacionales y centroamericanos, así como las armas del ejército filibustero.



Figura 1. Visualización artística del estudio de una munición tipo Minié en conjunto con la simbología de la microestructura por medio de un microscopio. Reproducida con permiso de Michelle Rojas Rojas.

Palabras clave: Comunicación cultural, Ciencia y sociedad, Sitios arqueológicos, Objetos arqueológicos.

Abstract

This study aims to generate a multidisciplinary understanding about the complexity of the historical battle in La Trinidad de Sarapiquí de La Campaña Nacional of 1856-1857, particularly in establishing a baseline diagnosis of the macrostructure, microstructure and elemental chemical analysis of a Minié bullet recovered from this historical event. We therefore carried out the first pilot study of a Minié ball recovered in 2016 in an excavation at the site of La Trinidad, in Sarapiquí, belonging to the Museo Histórico Cultural Juan Santamaría. In order to obtain information on both its internal and external structure, the techniques of optical microscopy, scanning electron microscopy and elemental analysis by energy dispersive X-rays were used to determine areas of interest in the bullet and also to specify the composition of the white patina which contains primarily three types of elements: Pb, C and O. Here, we identify the possible presence of cerussite crystals in the lead carbonate surface coating in a 165-year-old Minié bullet. It should be noted that knowing the rifle of origin and its bullet is evidence of great importance to contribute to the reconstruction of the historical context in which this event took place and will therefore allow us to establish which artifacts were being used at the time, both by national and Central American adversaries

Keywords: Cultural communication, Science and society, Archaeological sites, Archaeological objects.



Figure 1. Artistic visualization of the study of a Minié-type bullet along with the symbology of the internal gaze through an optical microscope. Reproduced with permission from Michelle Rojas Rojas.

Introducción

El acontecimiento bélico conocido como la Campaña Nacional de 1856-1857, es a un hecho histórico de importancia en Costa Rica y América Central el cual corresponde a la batalla contra el ejército estadounidense liderado por William Walker que llevó a la unión de los pueblos (Costa Rica, Guatemala, Honduras y el Salvador) a la lucha por la soberanía de los países centroamericanos. No obstante, dicha historia ha estado enterrada por más de 160 años en los sitios de batalla de los cuales, la Trinidad de Sarapiquí (22 de diciembre 1856), ha sido poco explorado, pues se han considerado históricamente como episodios más relevantes la Batalla de Santa Rosa (20 de marzo 1856) y la batalla de Rivas (11 de abril 1856), entre otros (Arias, 2013). A pesar de esto, desde el punto de vista estratégico, la batalla de la Trinidad de Sarapiquí es considerada como fundamental ya que se interrumpe fuertemente el suministro de pertrechos militares a los invasores y por lo tanto representa una gran oportunidad de investigación y de obtención sistemática de información de gran valor cultural (Arias, 2007).

Debido a la oportunidad de estudio en el sitio de la batalla de la Trinidad de Sarapiquí, recientemente se realizó una investigación llevada a cabo por Sánchez y Novoa (2019) en el cual se realizó un primer estudio cuyo objeti-

vo general consistía en demostrar e interpretar el contexto espacial y cultural de estos eventos. En este estudio se logró obtener valiosa información sobre el suceso bélico, logrando recuperar numerosos objetos de la batalla los cuales fueron transferidos al Museo Histórico Cultural Juan Santamaría (MHCJS) para su salvaguarda. Este museo fue creado el 4 de diciembre de 1974, mediante la Ley N° 5619 de la República de Costa Rica, con el propósito de recuperar, custodiar y divulgar el patrimonio histórico de La Campaña Nacional de 1856-1857 (Sistema Cultural, 2014). Entre los artefactos encontrados en las excavaciones depositados en el MHCJS, se destacan diversas municiones, las cuales se hipotetiza que fueron utilizadas por las fuerzas de combate durante el 22 de diciembre 1856 (MHCJS, 2020).

Los artefactos encontrados corresponden especialmente a perdigones de diversos diámetros y pesos y a municiones tipo Minié (denominada de esta manera por su co-desarrollador, Claude-Étienne Minié), la cual es una bala cilindro-cónica generalmente de plomo (Pb) blando (Burton, 1855). Las municiones producto de la excavación fueron clasificadas por Novoa y Sánchez (2019), en cinco tipos basados especialmente en características morfológicas externas. Además, las autoras realizaron un esfuerzo por identificar y asignar la posible arma utilizada para cada una de estas municiones apoyándose en la

descripción macroscópica y el análisis de documentación histórica. A pesar de esto, Novoa y Sánchez (2019) señalan la necesidad de realizar estudios a nivel microestructural y elemental que permitan un análisis detallado de las municiones y por tanto acumular mayor información para aportar a la reconstrucción del contexto histórico de la batalla.

Las técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) y análisis elemental por energía dispersiva de rayos X (EDX por sus siglas en inglés), han sido ampliamente utilizadas en el análisis de muestras arqueológicas, logrando información sobre la microestructura, procesos de manufactura, grietas y abolladuras que sugieren posibles usos o sucesos y la composición elemental de una serie de objetos como artefactos metálicos (Leal, 2010), cerámicas (Amaya et al., 2008), fibras (Arenas et al., 2015), obras pictóricas (Barrantes-Madrigal et al., 2021), por mencionar algunos ejemplos. En el caso del análisis de municiones arqueológicas, se han realizado numerosos estudios dentro de los cuales se mencionan por ejemplo, Zalakain et al. (2017). Los autores realizaron un estudio comparativo entre dos municiones encontradas en la Real Fábrica de Municiones de Eugi en Navarra utilizando las técnicas de caracterización SEM y EDX, que les permitió conocer los procesos de manufactura. Scott (2004) utilizó microscopía óptica para explorar una munición recuperada de la Iglesia Luterana Immanuel en Pilot Knob, Missouri, EE.UU., la cual se hipotetizó que tuvo su origen en la Guerra Civil estadounidense de 1861-65. Dougherty et al. (2009) realizaron estudios comparativos sobre las heridas provocadas por las balas Minié. En general, la composición elemental de las balas Minié puede variar entre estructuras y proporciones de plomo, pero aproximadamente corresponde al 90% de la masa total de la munición (Sanderson et al., 2017). Debido a lo anterior y a la toxicidad de este elemento, el estudio de las municiones en el mundo y particularmente en sitios de tiro al blanco deportivo, ha recibido una atención particular debido a su potencial efecto en el medio ambiente (Knechtenhofer et al., 2003; Chen et al., 2002).

Las técnicas modernas de análisis microestructural y de composición elemental son una valiosa herramienta para poder aportar al estudio de muestras arqueológicas y por tanto, contribuir al conocimiento científico y cultural de acontecimientos históricos. El presente estudio es una fase inicial del estudio de municiones de las excavaciones del sitio de batalla en la Trinidad de Sarapiquí.

Se plantea iniciar un proceso de investigación para conocer las características microestructurales y de composición elemental de las municiones que permitan responder a preguntas tales como: el tipo de munición, el arma de origen, los acontecimientos alrededor del uso de dichas municiones y finalmente contribuir a definir cuáles armas se estaban utilizando en la época, tanto por los combatientes nacionales y centroamericanos, así como las armas del ejército filibustero.

El objetivo del presente estudio es la caracterización microestructural y de composición elemental de una munición tipo Minié recuperada de La Campaña Nacional de 1856-1857 por medio de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y análisis elemental de energía dispersiva de rayos X. Se pretende que esta primera fase permita conocer las herramientas y protocolos para el estudio de este tipo de municiones con el fin de obtener la información necesaria para identificar las municiones, el arma utilizada y obtener información que contribuya a conocer el contexto en que sucedió la batalla.

Este tipo de investigaciones contribuirán al conocimiento científico e histórico para el país y para Centroamérica, al acervo histórico y cultural y proveerá información para la educación y turismo nacional e internacional. Asimismo, el conocimiento, la valoración y la preservación de estos bienes es de primordial importancia para la construcción de las identidades individuales, colectivas y para la sensibilidad intercultural, las cuales se encuentran contenidas por componentes materiales e inmateriales.

La información presentada en esta investigación está organizada de la siguiente manera: la sección metodológica que describe la munición utilizada, el protocolo de limpieza, los equipos y análisis realizados, posteriormente se presentan los resultados más relevantes junto con la discusión de los mismos y se finaliza con una descripción de las conclusiones obtenidas en el estudio.

Metodología

Esta sección comienza describiendo la selección de la muestra utilizada en nuestra investigación y sus características macroscópicas. Seguidamente se presenta la metodología utilizada para realizar la limpieza interna de la munición. Finalmente, presentamos los instrumentos utilizados para todas las mediciones llevadas a cabo en nuestro estudio y sus características.

Selección de las muestras

En este primer acercamiento al estudio de muestras arqueológicas de municiones, se seleccionó únicamente una de las municiones extraídas del sitio de la Trinidad de Sarapiquí, de la investigación realizada por Sánchez y Novoa (2018). Particularmente el estudio se enfocó en una munición tipo Minié, las cuales representan parte importante de los artefactos obtenidos en la excavación. La denominación de la bala corresponde a C3-G4, operación 2 localizada a 30 cm de profundidad del sitio de excavación en la Trinidad (Sánchez y Novoa, 2018).

Este primer estudio exploratorio nos permitirá establecer el protocolo específico para el análisis de todas las municiones de la excavación. Cabe resaltar que este estudio forma parte de un proyecto de investigación de la Universidad de Costa Rica (UCR) en colaboración con el MHCJS, por lo que todos los protocolos, permisos y manipulación de la munición fueron establecidos por personal del MHCJS.

Limpieza del contenido de la munición

Las muestras de municiones son aportadas por el MHCJS siguiendo un protocolo establecido para su custodia y manipulación. La muestra fue llevada al laboratorio de la Escuela de Física de la UCR con el fin de extraer el material depositado en la parte interna de la munición. Es importante mencionar que toda la superficie de la munición se mantuvo intacta para no alterar su naturaleza. Asimismo, para realizar la totalidad de este procedimiento se contó con la asistencia de la arqueóloga Valentina Castro.

La munición se colocó sobre una superficie estéril y el contenido interno fue ligeramente raspado con espátula y hebra sobre una superficie de papel aluminio, el cual fue doblado y colocado en viales estériles con su respectivo etiquetado. Por último, la zona interna de la munición fue limpiada delicadamente con un hisopo que contiene una mezcla de 50% de alcohol etílico al 90% y 50% de agua destilada. Seguidamente, se dejó unos minutos para que se secase y se volvió a colocar en su contenedor. Las muestras particuladas extraídas se guardaron en estufas para su conservación y posteriores análisis.

Caracterización microestructural y química de la munición

La muestra fue analizada por microscopía óptica y microscopía electrónica con el fin de documentar las altera-

ciones, desgastes y estrías presentes en el material. Para este fin, se utilizó un microscopio óptico "*Microflip-Pocket Microscope*" de la marca Carson. La muestra se colocó sobre un fondo oscuro sobre la platina del microscopio para la adquisición de imágenes del estado físico externo.

Para analizar la microestructura y composición elemental de la muestra, se utilizó un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3700N con un detector de energía dispersiva de rayos X IXRF Systems (SEM-EDX). La muestra fue colocada en una base metálica y sujeta con dos piezas metálicas sin adherirse para evitar cualquier daño al material. Posterior a esto, se colocó en el microscopio electrónico para la adquisición de imágenes y análisis elemental.

El material extraído de la munición se analizó por SEM-EDX con el fin de obtener imágenes de esta muestra particulada y su composición elemental. Para esto, el material se colocó en una base metálica y se adhirió a la misma con cinta de carbón doble cara. Los análisis se realizaron en el Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas en la Universidad de Costa Rica.

Resultados y discusión

En esta investigación, el objetivo fue evaluar la macroestructura, microestructura y análisis químico elemental con el fin de obtener información tanto de la estructura interna y externa, así como de la composición de una munición Minié recuperada de la Batalla en la Trinidad de Sarapiquí de la Campaña Nacional de 1856-1857. Por consiguiente realizamos el primer estudio piloto en una munición utilizada en un evento histórico único de hace 165 años.

La munición seleccionada presenta una forma cilíndrica-cónica, que termina en la parte de abajo (donde se coloca propiamente el cartucho) en un hueco cóncavo hacia abajo (ver Figura 2). Sus medidas son aproximadamente 24 mm de largo (h), 10 mm de diámetro en la región cónica (d1), 15 mm de diámetro en la región cilíndrica (d2) y tiene un peso de 38 g. El color de su superficie en su mayoría es blanco (el cual fue identificado como carbonato de plomo, $PbCO_3$), sin embargo, posee adicionalmente zonas sin la pátina en donde se observan secciones de la munición oxidada y una variedad de granos en colores oscuros como: café, rojizo y negro. La superficie de la munición se muestra rugosa, con detalles de granos, muescas y fisuras.

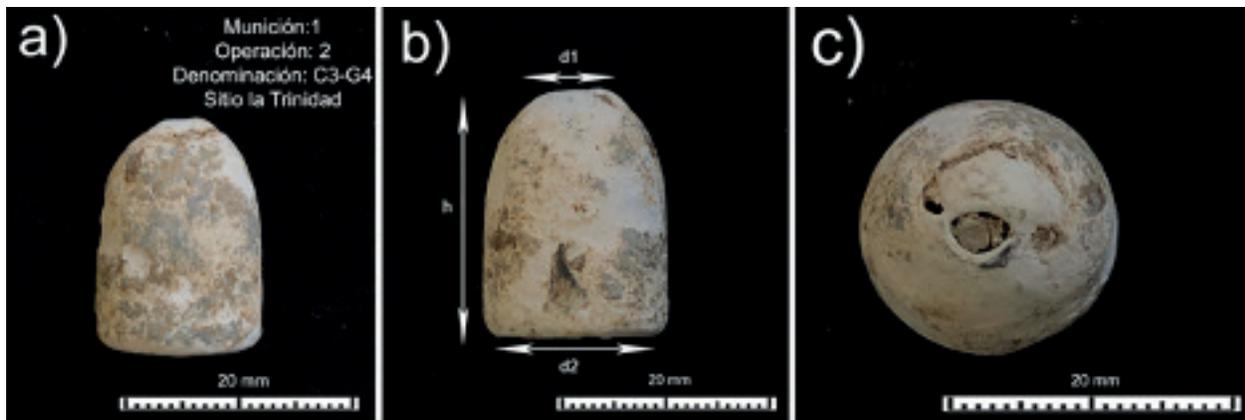


Figura 2. Imágenes de perspectivas longitudinales y transversales de la munición C3-G4 estudiada en este trabajo en donde se evidencia su forma cilíndrica y terminación de tipo conoide. En el panel a) y b) se muestran dos perspectivas longitudinales en conjunto con la identificación de los parámetros macroscópicos correspondientes al largo (h), diámetro mayor (d2) del cilindro y diámetro menor (d1) del conoide. El panel c) representa la vista transversal observada desde el punto de impacto en su terminación de conoide. (elaboración propia)

Basados en las mediciones macroscópicas y en la forma de esta munición, Sánchez y Novoa (2018) han clasificado esta munición junto a otras similares, como una bala tipo Minié de la Fábrica Royal Small Arms de Inglaterra. Para este presente trabajo, se tomaron las medidas de esta munición en específico y, de acuerdo con sus características, se determinó que esta muestra concuerda con la definición de una munición Minié. Según Edwards (1982) y Coates (1990) (en Dougherty et al., 2009), las balas Minié son conoides, varían en tamaño y peso, siendo generalmente entre 0,54 y 0,58 pulgadas (1,37 mm y 1,47 mm, respectivamente) y pesan aproximadamente (29-35) g. Este tipo de munición tiene un diámetro más pequeño que el calibre del rifle desde el que se dispara, tienen forma de cono con la base hueca que se expande cuando se dispara, activando así el estriado del cañón para impartir el giro de la bala y estabilizarla en vuelo (Dougherty et al. 2009, Arp, 2002).

Las impresiones y desgastes que se muestran en la Figura 3 panel a) y Figura 3 panel b), así como la incrustación y fisura mostrada en la Figura 3 panel c), sugiere que esta bala fue disparada y posiblemente impactó en alguna persona y objeto. Debido al espesor de la pátina presente en la muestra, no fue posible estudiar en más detalle la información sobre marcas microscópicas que evidencian uso y abrasión, por lo cual no es posible definir con exactitud el suceso ocurrido con esta bala. Aunado a esto, no fue posible observar marcas de estrías, por lo cual no se puede relacionar con exactitud con el arma de la cual fue disparada. Sánchez y Novoa (2018) recomiendan calcular el calibre promedio según parámetros europeos y

así verificar la asociación de armamento, para esto sería necesario remover parte de la pátina de la munición para exponer la superficie.

Material obtenido de la limpieza

Dentro de la sección cóncava de la base de la munición, se obtuvo material particulado que fue analizado por SEM-EDX. En la Figura 3 se muestra el análisis de las partículas obtenidas, las cuales rondaban desde unos pocos micrómetros hasta 250 μm aproximadamente. Las partículas presentaban dos tonalidades distintas de grises al ser observadas con electrones retrodispersados, unas con secciones brillantes y otras opacas, evidenciando diferencias en la composición elemental. Al realizar el análisis EDX se observa que las partículas con zonas más brillantes presentan una mayor concentración de plomo (46,25%), en comparación con las opacas (22,89%), ver Cuadro A.1 y Cuadro A.2, respectivamente, en la sección de Anexos. Aunado a esto, se detectó, tanto en las partículas brillantes como en las opacas, la presencia de una serie de elementos, distintos a los observados en la superficie de la munición.

El análisis de las partículas obtenidas, evidencian una mezcla entre restos de la munición (ver Cuadro A.3), posibles restos de la pólvora utilizada en este tipo de armas avancarga y restos de suelo, debido a que las mismas estuvieron enterradas en el sitio de batalla durante más de 165 años. Cabe mencionar que elementos como C, O, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti y Fe encontrados en las partículas son comunes en la composición química de suelos (Bohn et al., 2001).

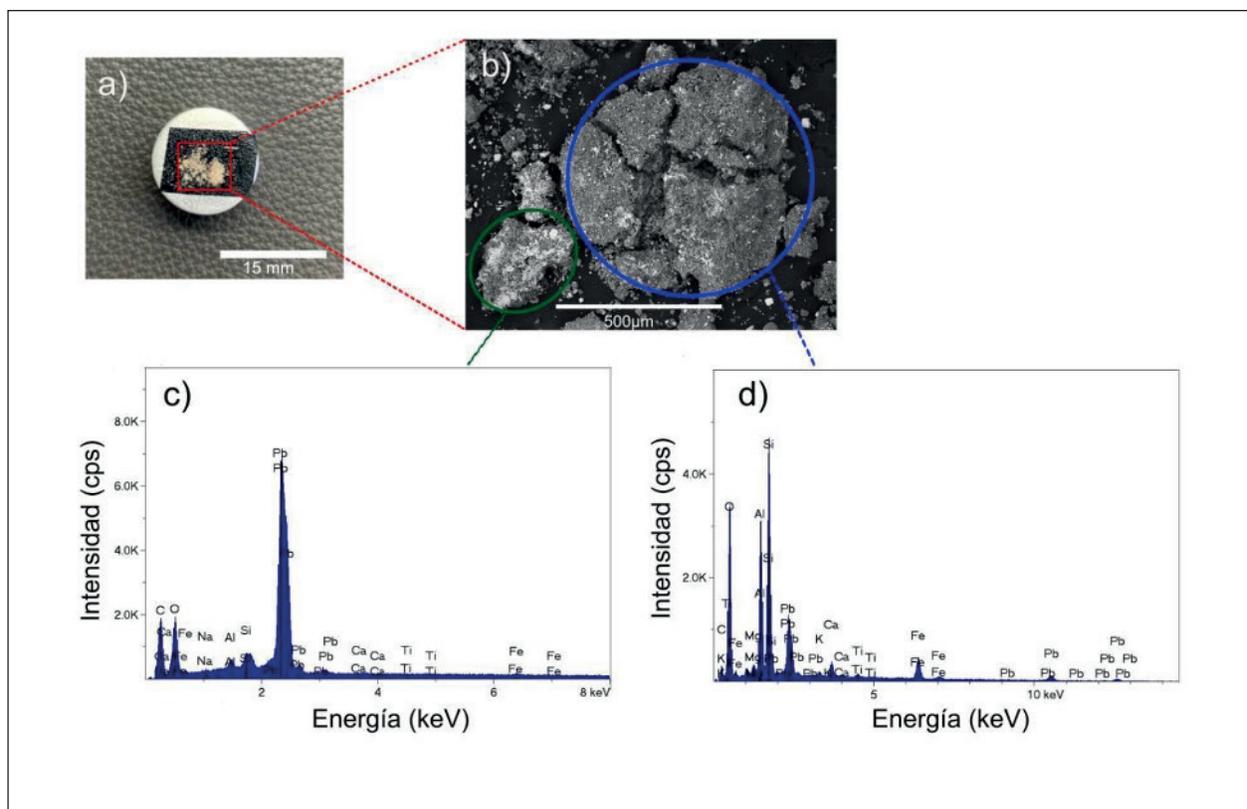


Figura 3. Material particulado encontrado en la parte interna de la munición Minié analizado. El panel a) presenta una fotografía de la muestra extraída en conjunto con el portamuestras. La microestructura de este material medida por medio de SEM-EDX se observa en el panel b) con dos zonas resaltadas: una más brillante (promedio de eventos con número atómico más alto) con respecto a otra. La región particulada con mayor presencia de Pb (más brillante) se encuentra en el panel c) y con menor aparición de Pb (región opaca) en el panel d). Ver la descripción de los resultados semicuantitativos de EDX en los Cuadros A.1 y Cuadro A.2 en la sección de Anexos. (elaboración propia)

Munición Minié de la Batalla de la Trinidad de Sarapiquí de 1856

Ahora se enfoca la atención en la evidencia experimental relacionada con la microestructura del estudio piloto en la munición tipo Minié. Como se mencionó anteriormente, esta munición presenta visualmente deterioros a manera de desgastes, grietas, zonas de posible impactación, diferentes grados de corrosión y pátinas de diversos colores aparentes como blanco, gris y café. Por lo tanto, utilizando el microscopio electrónico de barrido (SEM), se estudió la morfología y microestructura de diferentes capas en la munición. Es muy importante tener en mente que no fue posible recubrir la munición (por ejemplo, con una capa de oro o de carbono para aumentar la resolución en las imágenes SEM) ni tampoco llevar a cabo ninguna extracción de material en la superficie para las mediciones que se reportan a continuación. Lo anterior se debe a razones de preservación y conservación del artefacto en el estado en el que fue recolectado durante la excavación realizada por las arqueólogas Sánchez y Novoa (2018).

La Figura 4 muestra la macroestructura, microestructura y el análisis químico elemental de la munición Minié por medio de SEM-EDX. La identificación de la región de interés mostrada en el panel b) fue considerada para mostrar una zona con características contrastantes en la munición. Según las observaciones morfológicas realizadas con el SEM, el revestimiento blanco (ver panel c)) se encuentra conformado por varias capas y con una estructura de tipo quebradiza. Este revestimiento superficial es conocido como pátina (García, 2012) y se encuentra compuesto primordialmente de carbonato de plomo ($PbCO_3$) (Jorgensen y Willems, 1987). Esta pátina protege el metal de una corrosión mayor al mismo tiempo que previene la liberación de Pb al medio ambiente. El $PbCO_3$ puede formar estructuras cristalinas periódicas y uniformes conocidas como cerusita e hidrocerusita dependiendo de las propiedades del suelo, las cuales pueden identificarse con imágenes de SEM (Li et al., 2015)

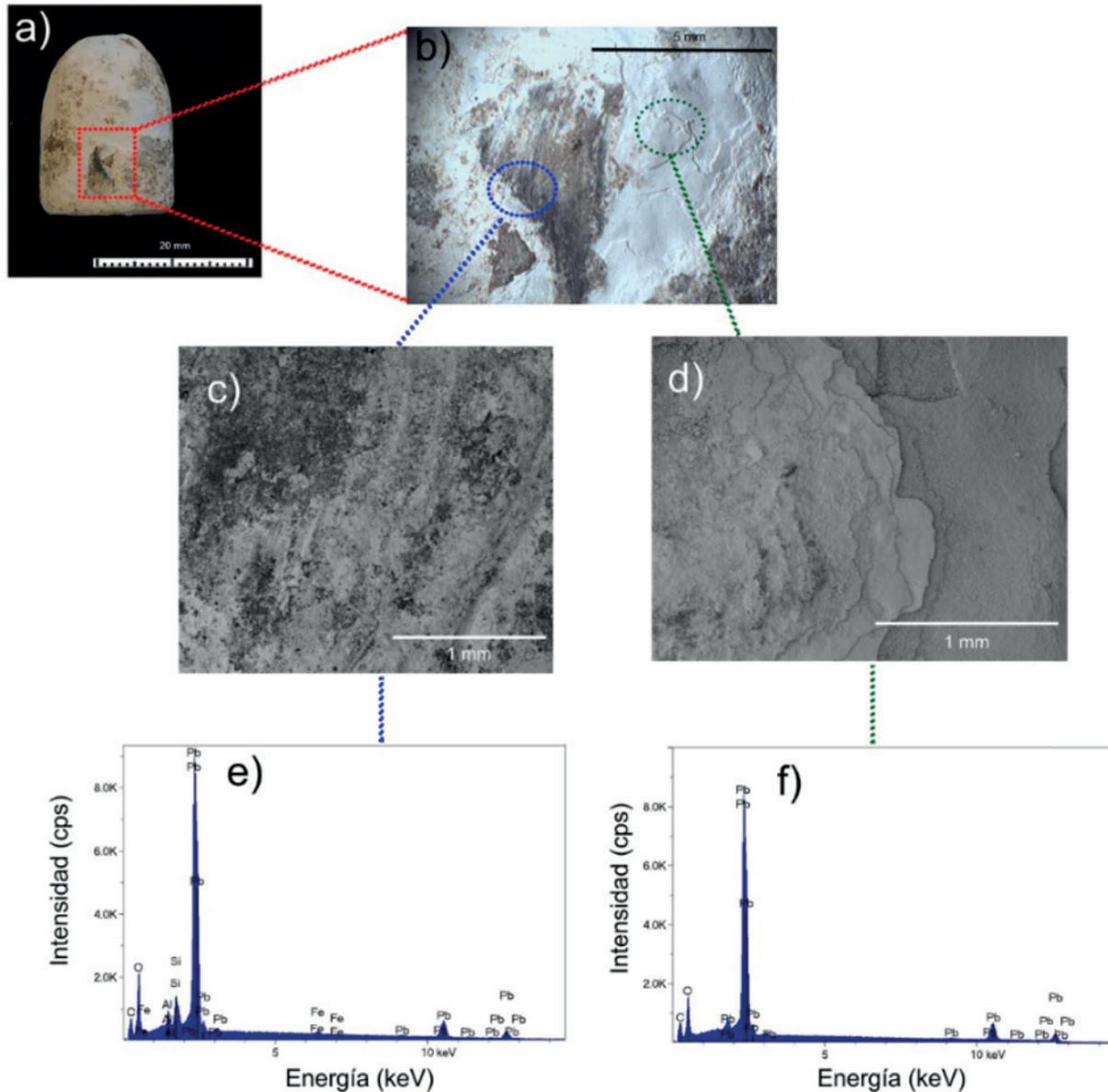


Figura 4. Representación de la macroestructura, microestructura y el análisis químico elemental de la munición Minié. El panel a) muestra la perspectiva longitudinal de la munición presentada en la Figura 2 para su respectiva comparación con los siguientes paneles. El panel b) ofrece un acercamiento mediante microscopio óptico a una zona de interés establecida por las grietas y el revestimiento superficial color blanco. Los paneles c) y d) corresponden a microestructuras observadas con el microscopio electrónico de barrido (SEM) para las zonas de interés indicadas en b). Los paneles e) y f) revelan la composición química elemental de las zonas características de c) y d), respectivamente, utilizando el detector de energía dispersiva de rayos X (EDX). Ver la descripción de los resultados semicuantitativos de EDX en los Cuadros A.3 y Cuadro A.4 en la sección de Anexos. (elaboración propia).

El análisis EDX revela que el revestimiento blanco (pátina) únicamente tiene tres tipos de elementos: Pb, C y O (ver Cuadros A.3 y Cuadro A.4 en la sección de Anexos). Estas observaciones sugieren que la pátina presumiblemente corresponde a carbonatos. Investigaciones previas han reportado que, cuando las municiones son depositadas en el suelo, se forma una capa protectora en la superficie de Pb producto de la exposición al aire y

agua por medio de difusión de oxígeno y de dióxido de carbono (Rooney et al., 2007). Esta pátina está compuesta de varios compuestos de Pb, primordialmente cerusita (PbCO_3) e hidrocerusita ($\text{Pb}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Los resultados reportados aquí son congruentes y favorecen los estudios anteriores y además sugieren que la pátina corresponde a cerusita (PbCO_3) y/o hidrocerusita ($\text{Pb}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Debido al hecho de que el EDX no puede identificar la

existencia de hidrógeno, no es posible descartar la posibilidad de que la muestra contenga cantidades de hidrocerusita. Análisis realizados por medio de EDX para diferentes zonas de la pátina presentan un porcentaje elevado de Pb (79%), mientras regiones oscuras sin la pátina revelan una cantidad menor de Pb (68%) en conjunto con un aumento de la concentración de O y aparición en pequeñas cantidades de Al y Si. Estas observaciones confirman que las dos regiones seleccionadas muy probablemente han sufrido procesos de meteorización diferentes, evidenciando la complejidad de este estudio piloto. Muy probablemente, el origen de estas diferencias en zonas tan cercanas en la munición haya sido por condiciones iniciales en la superficie ocasionadas por el disparo o por el impacto sufrido hace 165 años.

Retornando a la posible determinación planteada anteriormente relacionada con el tipo de pátina presente en nuestras observaciones: cerusita (PbCO_3) y/o hidrocerusita ($\text{Pb}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), es importante notar que, aunque no es posible determinar la diferencia entre estos dos cristales por medio de EDX, es favorable utilizar aumentos mayores en el SEM y particularmente emplear el modo de operación de electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) para caracterizar la morfología superficial de la estructura. Lo anterior es importante pues estudios anteriores han reportado configuraciones opuestas para la cerusita y la hidrocerusita. Los cristales de cerusita presentan las siguientes propiedades: cristales alargados, estriados, formas tabulares y apariencia prismática. En contraste, los cristales de hidrocerusita muestran una apariencia hexagonal (Li et al., 2015). La Figura 5 presenta tres imágenes de BSE para una región de la pátina en la munición estudiada. En la mayoría de las zonas exploradas, se observa un primer plano sin periodicidad

ni orden, compuesto primordialmente por un material distribuido de forma aleatoria (ver panel b)) y en el segundo plano, una estructura con mayor orden (ver panel c)). En una de las zonas evaluadas (panel c), fue posible obtener la presumible presencia de cristales de cerusita en el revestimiento superficial de PbCO_3 . No obstante, con la muestra limitada en este estudio piloto y también considerando que este cristal fue únicamente observado en una zona de la pátina, estos resultados por lo tanto deben interpretarse con cautela. En consecuencia, se recomiendan estudios futuros sobre el tema actual específicamente limpiando la munición y asimismo extrayendo secciones transversales de la pátina en zonas de interés establecidas. Sería interesante evaluar los efectos producidos por las municiones en el suelo del sitio de la excavación e, igualmente, explorar correlaciones entre la composición química elemental del suelo en conjunto con las municiones excavadas.

Conclusiones y pasos futuros

Esta investigación tuvo como objetivo proporcionar un diagnóstico de referencia de la macroestructura, microestructura y análisis químico elemental de una munición Minié recuperada de la Batalla en la Trinidad de Sarapiquí de la Campaña Nacional de 1856-1857. Este estudio pretende generar un conocimiento completo acerca de la complejidad del hecho histórico bélico sucedido hace 165 años a partir de metodologías integrales y multidisciplinarias. La descripción macroscópica de la munición permitió evidenciar fracturas, zonas de desgaste e incrustaciones de material, lo que sugiere que la munición fue detonada e impactada sobre una superficie. Uno de los resultados más importantes de esta investigación, hecho posible por el estudio superficial y de composición ele-

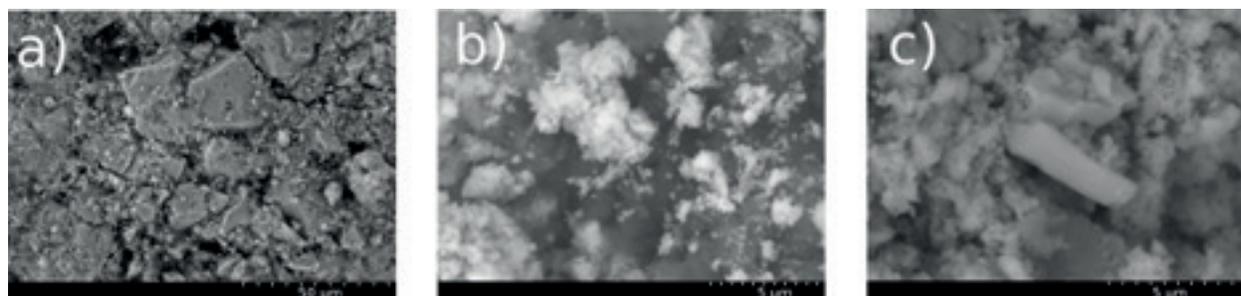


Figura 5. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) de la capa de carbonato de plomo (PbCO_3) en la munición Minié. El panel a) muestra una zona quebradiza correspondiente a los productos de Pb observados en la capa de la munición identificados como PbCO_3 con EDX a una resolución de 1000x. El panel b) y c) representan aumentos a 7000x y 9000x, respectivamente, de zonas de interés seleccionadas de a). El panel c) evidencia la aparición de una estructura periódica con forma y tamaño muy similar al cristal de cerusita PbCO_3 observada en investigaciones anteriores (elaboración propia).

mental de la morfología de la munición, fue la identificación de zonas de interés que han sufrido procesos de meteorización diferentes, evidenciando la complejidad de los procesos llevados a cabo cuando la munición es depositada en el suelo y el Pb interactúa con el aire y agua. Se encontró que el revestimiento blanco (pátina) quebradizo, producto de la transformación explicada anteriormente, precisamente tiene tres tipos de elementos: Pb, C y O. Un hallazgo importante de mencionar es la posible identificación de cristales de cerusita en el revestimiento superficial de $PbCO_3$ en la muestra estudiada por medio de imágenes de electrones retrodispersados.

Sin embargo, es necesario reconocer varias limitaciones del estudio piloto reportado aquí. El tamaño limitado de la muestra, únicamente a una munición, es importante de mencionar pues es indispensable generar comparaciones y estadísticas con una mayor cantidad de muestras. Asimismo, el lector debe tener en cuenta que este estudio se basa en una muestra que tampoco fue intervenida en términos de remover o limpiar material de la superficie para salvaguardar su estado de conservación y preservación desde la excavación. La investigación actual no fue diseñada específicamente para evaluar factores relacionados con la cantidad de capas en la pátina ni tampoco para dilucidar el proceso de meteorización llevado a cabo en diferentes zonas de la munición. Aunado a esto, sería necesario remover capas de la pátina que permitan analizar la munición a nivel químico y microestructural en busca de marcas de estrías, así como la microestructura y composición de la cavidad interna que lleva a dilucidar con mayor exactitud el origen de la bala, los procesos de manufactura y el arma utilizada.

Se considera indispensable realizar estudios adicionales para establecer si los cristales predominantes en la pátina de las municiones Minié corresponden a cerusita o hidrocerusita. Más investigación sobre el papel de las propiedades del suelo sobre las municiones y viceversa sería interesante de explorar. Una progresión natural de este trabajo corresponde a analizar los efectos producidos por las variables atmosféricas, propiedades del suelo y los compuestos químicos principales encontrados en esta investigación.

Agradecimientos

Se agradece a las arqueólogas Maureen Sánchez Pereira y Valentina Castro por toda la colaboración relacionada con la excavación, selección y limpieza de la munición estu-

diada en nuestro trabajo. Asimismo, se agradece a todo el personal del Museo Histórico Cultural Juan Santamaría por la asistencia con respecto a la información, acceso y préstamo de la munición. Un agradecimiento muy especial a Michelle Rojas Rojas, estudiante de la carrera de Diseño Gráfico, de la Sede de Occidente de la Universidad de Costa Rica, por llevar a cabo la ilustración gráfica (Figura 1) de nuestra investigación y también a la docente M.Sc. Laura Saborío Taylor, por el acompañamiento en este proceso creativo y educativo. Igualmente se agradece la revisión filológica de corrección y estilo llevada a cabo por la M.A. Alejandra Rodríguez Rojas. Finalmente un agradecimiento muy especial al apoyo brindado por el Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas y a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica para realizar este trabajo de investigación.

Referencias

- Amaya, Y., Muñoz, R. y Quiñones, J., (2008). Análisis de fragmentos arqueológicos del lago de Valencia mediante microscopía óptica de polarización, microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 6(2), 1-8.
- Arenas, J., Rendón, L., Cañetas, J., Zorrilla, C., y Silva, Y. (2015). Aplicación de técnicas de microscopía electrónica al estudio de material de origen arqueológico y de obras de arte. *Instituto Universitario De Restauración Del Patrimonio De La UPV, Instituto de Física UNAM*, (20-364), 149-156.
- Arias Sánchez, R. (2007). *Los soldados de la Campaña Nacional (1856-1857)*. Editorial Universidad Nacional a Distancia. <https://books.google.co.cr/>
- Arias Sánchez, R. (2013). Juan Rafael Mora y las tres fases de la Campaña Nacional. *Revista Comunicación*, 19(Especial), 60-68. <https://doi.org/10.18845/rc.v19iEspecial.947>
- Arp, D. (2002). Battlefield Oddities: Explaining two minié balls from Pea Ridge National Military Park. *Nebraska Anthropologist*, 69, 1-6.
- Barrantes-Madrigal, M., Zúñiga-Salas, T., Arce-Tucker, R., Chavarría-Sibaja, A., Sánchez-Solís, J., Mena-Vega, J., Acuña-Umaña, K., Gómez Tencio, M., Wang-Qui, K., Lizano-Sánchez, F., Marín-Cruz, C., y Herrera-Sancho, O. A. (2021). Revealing time's secrets at the National Theatre of Costa Rica via innovative software for cultural

- heritage research. *Scientific Reports*, 11(8560).
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-88066-1>
- Bohn, H.L., B.L. McNeal y G.A. O'Connor. (2001). *Soil Chemistry* (3ed). John Wiley and Sons Inc. USA.
- Burton, J. (1855). The Minie and the American expanding bullets. *Scientific American*, 10(21).
- Chen, M., Daround, S., Ma, L., Harris, W., y Cao, X. (2002). Characterization of lead in soils of a rifle/pistol shooting range in central Florida, USA. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 11(10), 1-17. <https://doi.org/10.1080/20025891106664>
- Dougherty, P., y Collins, H. (2009). Wound ballistics: Minié ball vs. full metal jacketed bullets: A comparison of Civil War and Spanish-American war firearms. *Military Medicine*, 174 (4), 403-407. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-02-2307>
- Edwards. WB. (1962). Civil war Guns. The Stackpole Company, USA.
- García, M. (2012). *Deterioro químico de geomateriales*. Instituto de Historia (CCHS-CSIC). <https://library.co/document/yr8mkjjz-deterioro-quimico-de-geomateriales.html>
- Jorgensen, S. y Willems, M. (1987). The fate of lead in soils: the transformation of lead pellets in shooting-range soils. *Ambio*, 16(1), 11-15. <https://www.jstor.org/stable/4313312?seq=1>
- Knechtenhofer, L., Xifra, I., Scheinost, A., Flühler, H., y Kretzschmar, R. (2003). Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow. *Journal of plant nutrition and soil science*, 166(1), 84-92. <https://doi.org/10.1002/jpln.200390017>
- Leal, A. (2019). *Caracterización de artefactos metálicos arqueológicos de excavación de la zona de Yaguachi Ecuador mediante microscopía* [Trabajo de titulación presentado como requisito para la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Universidad San Francisco de Quito USFQ]. Universidad San Francisco de Quito USFQ.
- Li, Y., Zhu, Y., Zhaob, S. y Liu, X. (2016). The weathering and transformation process of lead in China's shooting ranges. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2015(17), 1620-1633.
- Museo Histórico Cultural Juan Santamaría. (2021). *Visión y misión*. <https://www.museojuansantamaria.go.cr/>
- Rooney C., McLaren R., y Condrón, L.(2007). Control of lead solubility in soil contaminated with lead shot: effect of soil pH. *Environmental Pollution*, 149(2), 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.009>
- Sánchez, M y Novoa, E. (2018). *Recuperación e interpretación de la evidencia cultural de la Batalla de la Trinidad durante la Campaña Nacional de 1856-1857, Sarapiquí*.
- Scott, D. (2004). Analysis of a .54-caliber Minie ball from the Immanuel Church, Pilot Knob, Missouri. *Lincoln, NE*.
https://www.battleofpilotknob.org/uploads/8/2/4/6/82468692/bullet_found_below_trap_door_at_immanuel.pdf
- Sanderson, P., Naidu, R., Bolan, N., Bowman, M., M., McLure. (2012). Effect of soil type on distribution and bioaccessibility of metal contaminants in shooting range soils. *Science of The Total Environment*, 438, 452-462. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.014>
- Sistema de información cultural de Costa Rica. (6 de junio de 2021). *Museo Histórico Cultural Juan Santamaría*. <https://si.cultura.cr/infraestructura/museo-historico-cultural-juan-santamaria.html>
- Zalakain, I., Berlanga, C., Alvarez, L., Asa, L., Labé, P., Rivero, P., Valencia, J., y Rodríguez, R. (2017). Characterization of two iron bullets from the royal ammunition factory of EUGI. *Journal of Mining and Metallurgy Section B: Metallurgy*, 54(1), 91-99.

Anexos

Cuadro A.1 Análisis semicuantitativo por EDX de una muestra de partículas extraídas (zona brillante, Figura 3 panel c)) de una bala tipo Minié.

Conc % peso atómico	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Fe	Pb
Análisis 1	5,73	29,869	0,321	0,443	7,17	11,531	0,337	0,3	0,604	0,341	4,223	39,132
Análisis 2	18,23	14,393	0,417	0,444	1,143	1,491	0,735	0	0,102	0,083	0,331	62,631
Análisis 3	12,895	29,14	0,25	0,525	5,818	9,664	0,259	0,246	0,407	0,365	3,428	37,003
Promedio	12,285	24,467	0,329	0,47	4,71	7,562	0,444	0,182	0,371	0,263	2,661	46,255
Desv. Std.	6,272	8,732	0,084	0,047	3,162	5,34	0,256	0,16	0,253	0,156	2,057	14,222
Min	5,73	14,393	0,25	0,443	1,143	1,491	0,259	0	0,102	0,083	0,331	37,003
Max	18,23	29,869	0,417	0,525	7,17	11,531	0,735	0,3	0,604	0,365	4,223	62,631

Cuadro A.2 Análisis semicuantitativo por EDX de una muestra de partículas extraídas (zona opaca, Figura 3 panel d)) de una bala tipo Minié.

Conc % peso atómico	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Pb
Análisis 1	5,978	30,074		0,571	9,436	15,603	0,443	0,673	0,949	8,703	27,568
Análisis 2	6,321	35,56	0,643	0,721	11,171	17,291	0,376	1,556	0,494	5,521	20,346
Análisis 3	6,839	36,411	0,453	0,561	9,765	18,287	0,6	0,699	0,452	5,17	20,765
Promedio	6,379	34,015	0,548	0,618	10,124	17,06	0,473	0,976	0,632	6,465	22,893
Desv. Std.	0,433	3,439	0,135	0,089	0,922	1,356	0,115	0,502	0,276	1,947	4,054
Min	5,978	30,074	0,453	0,561	9,436	15,603	0,376	0,673	0,452	5,17	20,346
Max	6,839	36,411	0,643	0,721	11,171	18,287	0,6	1,556	0,949	8,703	27,568

Cuadro A.3 Análisis semicuantitativo por EDX de la superficie de una bala tipo Minié (microestructuras observadas con el SEM para las zonas de interés indicadas en Figura 4 panel c)).

Conc % peso atómico	C	O	Al	Si	Fe	Pb
Análisis 1	6,868	19,268	1,371	2,297	0,712	69,484
Análisis 2	6,43	18,992	2,104	3,305	0,839	68,33
Análisis 3	7,127	19,858	1,586	2,774	0,837	67,819
Promedio	6,808	19,373	1,687	2,792	0,796	68,544
Desv. Std.	0,352	0,442	0,377	0,504	0,073	0,853
Min	6,43	18,992	1,371	2,297	0,712	67,819
Max	7,127	19,858	2,104	3,305	0,839	69,484

Cuadro A.4 Análisis semicuantitativo por EDX de la superficie de una bala tipo Minié (microestructuras observadas con el SEM para las zonas de interés indicadas en Figura 4 panel d)).

Conc % peso atómico	C	O	Pb
Análisis 1	6,63	14,975	78,395
Análisis 2	6,653	14,956	78,39
Análisis 3	6,431	14,203	79,365
Promedio	6,572	14,712	78,717
Desv. Std.	0,122	0,44	0,562
Min	6,431	14,203	78,39
Max	6,653	14,975	79,365