

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**DETERMINACIÓN DEL ALCANCE DE LA pXRF COMO TÉCNICA DE
ANÁLISIS EN ESTUDIOS DE PROCEDENCIA DE VASIJAS DE CERÁMICA:
EL CASO DE PUERTO NUEVO Y LAS REDES DE INTERCAMBIO DEL
HORIZONTE TEMPRANO EN LOS ANDES CENTRALES**

Tesis para optar el grado de Magíster en Química que presenta

JUAN PABLO MEDINA JURADO

Dirigido por

LUIS ORTEGA SAN MARTÍN

San Miguel, 2017

Resumen

El presente trabajo de tesis se encuentra enmarcado dentro del proyecto multidisciplinario “Redes de intercambio marítimas y terrestres a larga distancia de vasijas de cerámica de prestigio en los Andes centrales durante el primer milenio antes de nuestra era: Un enfoque interdisciplinario”. El objetivo principal de esta tesis es determinar el alcance de la fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) como técnica de análisis que permita discriminar entre grupos y su posible procedencia, de cerámicas encontradas en el sitio arqueológico de Puerto Nuevo. Para lograr lo anterior, se han estudiado 119 fragmentos de cerámica recogidos de la zona de excavación de Puerto Nuevo, además de 30 azulejos de control preparados a partir de material arcilloso recabado de diferentes zonas aledañas a la excavación. El análisis químico de estos grupos de piezas se realizó mediante pXRF con el fin de obtener la información composicional expresada como las áreas netas bajos los picos (NPA). A partir de esta información, mediante análisis de componentes principales y análisis de clúster, se construyeron los grupos composicionales. Se han encontrado 4 grupos composicionales y 2 casos extraños, los que, al ser comparados con el material arcilloso de control por medio de análisis discriminante, muestran que los fragmentos de cerámica podrían ser en su mayoría de origen local. Además, los grupos construidos mediante pXRF fueron contrastados con los grupos encontrados por medio de análisis petrográfico, y se observó una buena correlación entre los resultados de ambos enfoques. Finalmente, se ha determinado que la pXRF, empleada junto a un análisis estadístico adecuado, ha demostrado resultados lo suficientemente buenos como para constituir a la pXRF en una alternativa para estudios de este tipo.



*“Es mejor saber después de haber pensado y discutido,
que aceptar los saberes que nadie discute para no tener
que pensar” – Fernando Savater*

*“El conocimiento descansa no solo sobre la verdad sino
también sobre el error” – Carl Gustav Jung*

*“No habitamos una nación, sino un idioma.
No se equivoquen, nuestra lengua materna es nuestra
verdadera patria” – Emil Cioran*

Agradecimientos

Esta tesis ha sido realizada bajo la dirección del profesor Luis Ortega. Le agradezco particularmente por permitirme trabajar en su laboratorio, por la confianza y la libertad que me otorgó para realizar este trabajo. Su tiempo y disponibilidad, su competencia científica y sus consejos me permitieron crecer científica y personalmente, y poder así concluir este trabajo de la mejor manera.

También agradezco a la Dirección de Gestión de la Investigación, DGI, por el financiamiento otorgado a mi trabajo de tesis de maestría a través del Programa de Apoyo a la Investigación para Estudiantes de Posgrado, PAIP 2016.

Deseo agradecer a todos los miembros del Grupo de Análisis de Materiales de Patrimonio Cultural, GAMPAC, con quienes pude tener numerosas y valiosas discusiones. En particular, agradezco al estudiante Alejandro Rey de Castro, quien ha sido un excelente compañero a lo largo de este trabajo.

Quisiera expresar mi agradecimiento y reconocimiento a la profesora Patricia Gonzales y al profesor Jalh Dulanto por haber aceptado ser jurado de este trabajo de tesis.

No me olvidaré de los investigadores, tesistas, compañeros y personal de la Sección Química. Les agradezco por toda la ayuda que me dieron, así como por su simpatía, que contribuyó a hacer estos años más agradables.

Agradezco a todos mis compañeros en el laboratorio: Luis Felipe, Diego, Jimmy, Rodrigo, Mariela, Álvaro, Alonso, Malena, Aldo, Luis, por su gran ayuda y por su buen humor a lo largo de todo este tiempo. De manera especial, agradezco a mis amigos, Santiago Álvarez, Marvin Sarango y Ernesto Aguirre, por los buenos momentos que pasamos durante todo este tiempo.

A mis padres, Walter y Lucía, y a mis hermanos, ningún agradecimiento será suficiente para todo lo que me han dado.

Contenido

1.	Introducción	1
2.	Objetivos	5
2.1.	Objetivo general	5
2.2.	Objetivos específicos.....	5
3.	Marco de Referencia	6
3.1.	Puerto Nuevo y las poblaciones del primer milenio antes de nuestra era	6
3.2.	Estudios de procedencia y la fabricación de cerámicos	10
3.3.	Técnicas analíticas empleadas en estudios de procedencia	15
3.3.1.	Fluorescencia de Rayos X portátil	16
3.4.	Estadística multivariante y los estudios de procedencia.....	22
3.4.1.	Análisis de componentes principales (PCA)	22
3.4.2.	Análisis de Clúster (CA).....	24
3.4.3.	Análisis Discriminante (DA)	27
4.	Metodología.....	29
4.1.	Equipos y software empleados.....	29
4.1.1.	Equipos.....	29
4.1.2.	Software.....	29
4.2.	Preparación de muestra	29
4.3.	Fluorescencia de rayos X	33
4.4.	Análisis estadístico	33
4.4.1.	Análisis de Componentes Principales.....	34
4.4.2.	Análisis de Clúster	35
4.4.2.1.	Análisis de clúster jerárquico	36
4.4.2.2.	Análisis de clúster k-medias	36
4.4.3.	Análisis Discriminante.....	36
4.4.4.	Análisis del material arcilloso.....	36
5.	Resultados y Discusión	38
5.1.	Determinación de las condiciones de medida	38
5.2.	Interpretación de los espectros pXRF y determinación de la composición química relativa.....	39
5.3.	Análisis de componentes principales.....	41
5.4.	Análisis de clúster.....	47
5.4.1.	Análisis de clúster jerárquico	47
5.4.2.	Análisis de clúster k-medias	50
5.5.	Análisis discriminante	54
5.6.	Análisis del material arcilloso e interpretación de los grupos composicionales	56

6. Conclusiones y Recomendaciones.....	65
6.1. Conclusiones.....	65
6.2. Recomendaciones.....	66
7. Bibliografía	67
Anexos	70



Índice de tablas

Tabla 1. Códigos de los azulejos recibidos del departamento de Arqueología junto con la información detallada de la ubicación geográfica de donde fueron recogidas las arcillas empleadas en su fabricación.....	31
Tabla 2. Intensidades netas de los picos para el Fe y Rh obtenidas a 60, 90, 120 y 200 s y su cociente de normalización.....	39
Tabla 3. Resultados de los ensayos previos sobre la pertinencia de un PCA sobre los datos composicionales.....	41
Tabla 4. Varianzas explicadas por cada una de las 15 componentes principales calculadas y varianza acumulada.....	42
Tabla 5. Comunalidades encontradas para las 15 variables cuando el número de componentes principales ha sido fijado en 6 por defecto por el programa.....	43
Tabla 6. Cargas factoriales calculadas para 6 y 4 componentes principales.....	44
Tabla 7. Comunalidades encontradas para las 15 variables para los casos sometidos al PCA para los 4 componentes principales fijados.....	45
Tabla 8. Varianza explicada por los componentes principales antes y después de la rotación por el método de Varimax.....	46
Tabla 9. Cargas factoriales de los 4 componentes principales encontrados con el método de rotación de Varimax. Se muestran solo las cargas factoriales mayores a 0.30.....	46
Tabla 10. Resumen del número de casos en cada grupo composicional encontrado.....	50
Tabla 11. Composición química (expresada como NPA) de los cuatro grupos composicionales y los dos casos extraños encontrados.....	53
Tabla 12. Distribución de los 119 fragmentos de cerámica en los grupos composicionales encontrados por pXRF así como por petrografía.....	59

Índice de figuras

Figura 1. Cronología de los primeros años de las poblaciones en el Perú.....	6
Figura 2. Mapa geopolítico en el que se muestra la ubicación del sitio de Puerto Nuevo.....	8
Figura 3. Grupos de cerámicos encontrados en Puerto Nuevo junto con alguna de sus principales características.	9
Figura 4. Esquema de las etapas involucradas en la formación de una cerámica.	11
Figura 5. Corte transversal de un fragmento cerámico en el que se muestran las inclusiones sobre la matriz arcillosa.	12
Figura 6. Cambios involucrados en el quemado de una cerámica según la temperatura alcanzada.	13
Figura 7. Procesos involucrados en la XRF, (a) El proceso de excitación por ionización, (b) la relajación por autoionización y; (c), (d) y (e) la relajación por fluorescencia.	17
Figura 8. Curvas de eficiencia cuántica (rendimiento de fluorescencia) respecto al número atómico, para cada tipo de transición (K, L o M)..	18
Figura 9. Diagrama que muestra la contribución de la dispersión de la muestra (background) junto con las líneas de fluorescencia de los elementos, lo que origina el espectro XRF de una matriz.	19
Figura 10. Diagrama que muestra los fenómenos que ocurren cuando el haz incidente interactúa con la superficie de la muestra a analizar. Como consecuencia de esta interacción se origina la fluorescencia de los elementos presentes junto con la dispersión propia de la muestra.	20
Figura 11. Dendrograma en el que se muestran dos líneas de corte y los diferentes grupos que originan.	26
Figura 12. Mapa en el que se muestran la ubicación del sitio de Puerto Nuevo, así como los lugares de los que se extrajo el material arcilloso para la fabricación de los azulejos.	31
Figura 13. Perfil de temperatura empleado en la cocción de los azulejos.....	32
Figura 14. Espectros de XRF, obtenidos por medio del software ARTAX, de la pieza PN13-401-004 a 60 s (rojo), 90 s (verde), 120 s (violeta) y 200 s (azul).	38
Figura 15. Espectro pXRF de la pieza PN13-012-00, en el que se muestran los 15 elementos encontrados, además del Rh.....	40
Figura 16. Dendrograma encontrado por el análisis de clúster jerárquico para los 119 fragmentos de cerámica de la zona de Puerto Nuevo.....	48
Figura 17. Diagrama de distancia entre grupos respecto al número de grupos encontrado.	50
Figura 18. Dendrograma encontrado por medio de análisis de clúster jerárquico en el que se muestran los 4 grupos composicionales y los 2 casos extraños determinados por el análisis de clúster de k-medias.	51
Figura 19. Diagrama del espacio de las componentes principales 1 y 2, en el que se muestran los cuatro grupos composicionales (clúster 1, 3, 4 y 5) y los dos casos extraños (clúster 2 y 6).	54
Figura 20. Representación en el espacio de las funciones discriminantes 1 y 2 en la que se muestran los clúster encontrados.....	55
Figura 21. Diagrama del espacio de los componentes principales 1 y 2 en el que se muestran los cuatro grupos composicionales encontrados (clúster 1, 3, 4 y 5), los dos casos extraños (clúster 2 y 6) y el material arcilloso de control. Además, marcados como centros, se muestran para cada clúster sus respectivos centros.	58
Figura 22. Representación en el espacio de las funciones discriminantes 1 y 2 en la que se muestran los grupos composicionales, casos extraños y el material arcilloso de control..	58
Figura 23. Dendrograma en el que se incluyen los grupos petrográficos encontrados (A-F) junto con la clasificación realizada por medio de pXRF.	61

Figura 24. Grupos composicionales encontrados por pXRF respecto de la ubicación del material arcilloso de control en el espacio de las dos funciones discriminantes.63

Figura 25. Grupos encontrados por petrografía respecto de la ubicación del material arcilloso de control en el espacio de las dos funciones discriminantes.64



1. Introducción

Los estudios de procedencia son importantes en arqueología porque permiten establecer cuáles fueron las características del mercado y comercio presentes en una determinada población y en una época concreta. Estos estudios se realizan sobre los materiales que se tengan disponibles, aunque últimamente se vienen realizando sobre todo en fragmentos de cerámicos, gracias al avance en la instrumentación de los equipos. Todo estudio de procedencia asume que las materias primas empleadas en la fabricación del objeto son de origen local, es decir, que no existía un comercio de larga distancia para materias primas. Para el caso particular de los cerámicos lo anterior es casi siempre cierto, más aún si la población a estudiar es de un período muy antiguo.^{1,2}

La idea central detrás de un estudio de procedencia está en encontrar los denominados grupos composicionales. Para lograrlo se pueden emplear dos grupos de técnicas, el análisis petrográfico o el análisis químico composicional. Entre las principales técnicas de análisis composicional están la fluorescencia de rayos X (XRF), el análisis por activación de neutrones (NAA) y la ablación láser acoplada a espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (LA-ICP-MS).^{2,3} Todas estas técnicas buscan determinar la composición elemental en la muestra a analizar. Los elementos encontrados de esta manera pueden agruparse, según su abundancia en la muestra, como mayores, menores o traza. Estos últimos, generalmente elementos pesados, son los que más importancia tienen en la determinación de la procedencia de una materia prima.

En los últimos años, la fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) ha llamado la atención de numerosos investigadores. El motivo se encuentra en que estos equipos portátiles cuentan con buenos límites de detección, mucho menor costo (en comparación al resto de técnicas disponibles), gran accesibilidad, fácil manejo, carácter no destructivo y una amplia distribución en la comunidad de arqueólogos y laboratorios de análisis químicos. Dado el carácter histórico de las muestras a analizar, la técnica analítica a emplear debe cumplir ciertos requisitos, relacionados principalmente con la posible destrucción de la muestra, que permitan conservar lo mejor posible los objetos a analizar, convirtiendo a la pXRF en una alternativa atractiva.

Usualmente, los equipos de pXRF arrojan como resultado de una medición un valor, expresado en cuentas, para el área neta bajo el pico (NPA) para cada uno de los elementos encontrados. Dado que la concentración de un elemento en la matriz es

proporcional a su NPA es posible, mediante la construcción de una curva de calibración, determinar la concentración, expresada en ppm o porcentaje en peso, para cada elemento. La dificultad se encuentra en la construcción de las curvas de calibración necesarias, ya que es normal encontrar alrededor de quince o más elementos en un fragmento de cerámico. Además, dada la gran variedad y complejidad de los cerámicos resulta problemático poder replicar su matriz para conseguir estándares apropiados para una calibración.

Es por esto que en algunas investigaciones se emplean las curvas de calibración que se incluyen por defecto en los equipos comerciales, lo que muchas veces no es adecuado ya que éstas no se prepararon para describir el comportamiento de los cerámicos. Otra alternativa es emplear curvas de calibración construidas en base a materiales diferentes de un cerámico pero que sean adecuados para su caracterización, respecto del número de elementos y su contenido.⁴ Sin embargo, esto requiere de mediciones previas que permitan comprobar su correcta aplicación, lo que implicaría emplear alguna de las otras técnicas disponibles, lo cual no siempre está disponible o simplemente no es una opción para el estudio dado el carácter destructivo de éstas.

En consecuencia, uno de los mayores obstáculos en el análisis de cerámicos mediante pXRF es la determinación cuantitativa. Algunos autores han optado por renunciar a obtener datos cuantitativos y trabajan con lo que se conoce como información semicuantitativa, aprovechando la relación lineal entre la concentración y su respectiva NPA.^{5,6} El problema de trabajar con información de este tipo, está en que se generan números que solo son consistentes internamente, que si bien permiten discriminar los grupos composicionales, no permiten realizar ninguna comparación ni permiten su posterior réplica por otros investigadores (que muchas veces emplean equipos y condiciones diferentes de trabajo). El empleo de datos semicuantitativos ha sido objeto de crítica y debate,⁷⁻⁹ si bien su uso en la discriminación de grupos es medianamente claro.

El presente trabajo de tesis se encuentra en el marco del proyecto de investigación “Redes de intercambio marítimas y terrestres a larga distancia de vasijas de cerámica de prestigio en los Andes centrales durante el primer milenio antes de nuestra era: un enfoque interdisciplinario” (en adelante, Proyecto Interdisciplinario). Lo que este proyecto interdisciplinario busca es determinar la existencia y la naturaleza de posibles redes de intercambio establecidas entre los puertos de Ancón (Lima) y Puerto Nuevo (Pisco-Ica), pertenecientes a la primera mitad del primer milenio antes de nuestra

era (a.c.), lo cual corresponde al periodo conocido como Formativo Medio, por medio de un estudio de procedencia de cerámicas con enfoque integral, es decir, incluye tanto análisis petrográfico como análisis químico composicional. Dentro del proyecto mencionado, la presente tesis está centrada en el caso de Puerto Nuevo y las posibles redes de intercambio a las que pudo haber pertenecido.

En ese contexto, esta investigación busca determinar grupos composicionales mediante pXRF en 119 fragmentos de cerámica encontrados en la zona arqueológica de Puerto Nuevo y poder así determinar si la procedencia de las materias primas empleadas en su fabricación se corresponden con arcilla de origen local o foráneo. Esta última parte empleará material arcilloso recogido de la zona de excavación como grupo de control, con el fin de determinar si los fragmentos cerámicos se corresponden con alguno de éstos. Para lograr lo anterior, se trabajará con datos semicuantitativos y se realizará un análisis estadístico secuencial. Este tipo de análisis en estudios de procedencia no es común, e incluye en primer lugar realizar un análisis de componentes principales (PCA) con el fin de poder determinar los grupos composicionales. Con las componentes obtenidas en el PCA, se procederá a realizar el análisis de clúster (CA) que permita determinar el número adecuado de grupos. Además, se realizará un análisis discriminante (DA) que busque contrastar los grupos composicionales encontrados con el material arcilloso del grupo de control.

Proponemos un análisis de este tipo, ya que este permite superar las dificultades que se han presentado al realizar estas técnicas en estudios anteriores.^{4,10,11} En éstos, se realiza el PCA, CA y DA por separado. En el caso del PCA no habría diferencia, pero en el caso del CA la ventaja de nuestra propuesta está en que al no usar las variables originales (las que podrían estar fuertemente relacionadas entre sí y, por tanto, serían más difíciles de discriminar) y utilizar los componentes principales (que por condición del PCA no deben tener similitud entre sí) permitirían una mejor construcción y diferenciación de los grupos composicionales. Para el caso del DA, que necesita de una clasificación previa, esta será provista por el CA y no por algún agrupamiento que pueda ser visual o empírico, como se ha observado en otros trabajos.¹²

Lo grupos composicionales obtenidos como resultado del análisis por pXRF y nuestro análisis estadístico secuencial, se contrastarán frente al obtenido en el proyecto interdisciplinario mediante análisis petrográfico. Finalmente, se procederá a establecer la posibilidad del uso de la pXRF por sí sola como una técnica factible para dar respuesta a las preguntas planteadas por la arqueología, en este caso relacionada con las redes de intercambio a larga distancia en Puerto Nuevo.

La importancia de un estudio como este está en que en la época de Puerto Nuevo, alrededor de 850 – 500 a.c. suceden cambios económicos y políticos, que son el preámbulo de la aparición de una economía de bienes de prestigio, ¹³ por lo que las posibles redes de intercambio a larga distancia presentes en Puerto Nuevo ayudarían a comprender mejor la situación de este período de la historia.¹⁴



2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Determinar el alcance de la pXRF como técnica de análisis que permita discriminar entre grupos y su posible procedencia de cerámicas encontradas en el sitio arqueológico de Puerto Nuevo.

2.2. Objetivos específicos

1. Establecer las condiciones adecuadas de análisis por pXRF para obtener la información composicional de 119 fragmentos de cerámica.
2. Establecer una secuencia adecuada de análisis estadísticos (usando PCA, CA y DA) en base a los datos composicionales que permita dividir en grupos bien diferenciados a los 119 fragmentos.
3. Determinar mediante análisis estadístico la posible procedencia de los grupos obtenidos a partir de los 119 fragmentos respecto a los datos composicionales de 30 azulejos fabricados con arcilla de la región.
4. Comparar los resultados del análisis estadístico realizado por medio de pXRF con los grupos de fragmentos obtenidos en paralelo por otro grupo de investigadores mediante petrografía.

3. Marco de Referencia

3.1. Puerto Nuevo y las poblaciones del primer milenio antes de nuestra era

Las redes de intercambio en el Perú, en el primer milenio antes de nuestra era, constituyen un fenómeno que aún no se ha esclarecido. Existen claros indicios de intercambio entre zonas geográficamente distantes, siendo los objetos de intercambio los denominados bienes exóticos o de prestigio (por ejemplo, las conchas de *spondylus*, un tipo de molusco). El caso de nuestro interés es el del Período Formativo Medio (ver Figura 1), que abarca los años 1200 a 700 a.c..¹⁵ Para comprender la naturaleza de los posibles intercambios es necesario entender la naturaleza de las poblaciones y la forma de vida que llevaban. En el período mencionado, es posible distinguir dos tipos de asentamientos, los permanentes y los nucleados. La principal diferencia entre ambos es que los asentamientos nucleados se encuentran alrededor de un centro. Respecto a su economía, la alimentación estaba constituida por peces y mariscos, junto con productos vegetales cultivados. Adicionalmente, y vinculados a estos alimentos, se encuentran los objetos cerámicos que cumplían función de almacenaje, cocina, fermentación o como bien de intercambio.¹⁵ Este último caso, el de las cerámicas de intercambio, contiene lo que habitualmente se denomina como cerámicas de prestigio, que son las piezas mejor trabajadas y con decoración detallada, acompañada usualmente de motivos locales, vinculados con las creencias de la población, o con algún motivo foráneo.

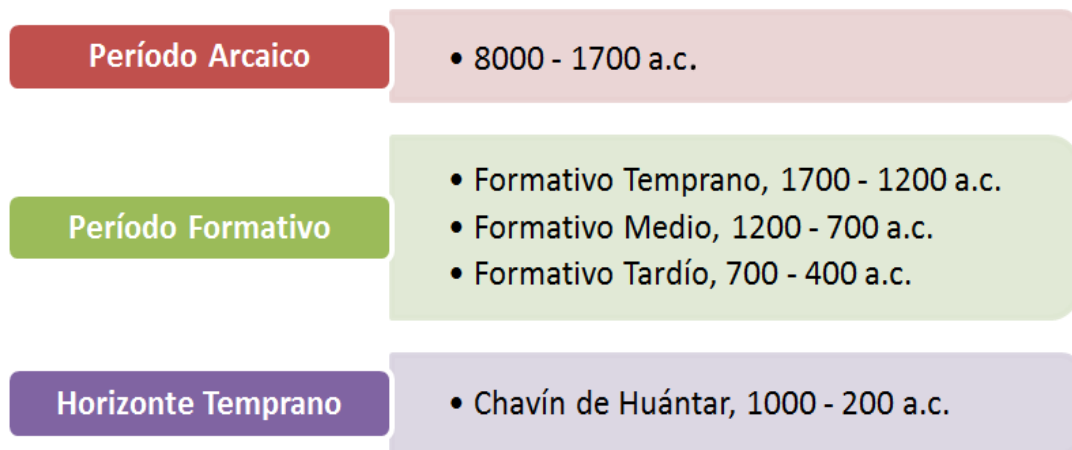


Figura 1. Cronología de los primeros años de las poblaciones en el Perú. Adaptado de Kaulicke.¹⁵

La importancia de establecer las posibles redes de intercambio radica en que su conocimiento permitiría entender cómo era la organización de la población que sea objeto de estudio, pues estas redes están relacionadas con la economía doméstica, la cual, a su vez, se ve afectada por los cambios políticos, sociales y económicos de gran escala.¹³

Sin embargo, para el caso del período Formativo, el estudio de su economía es particularmente complicado por el llamado “problema Chavín”. El centro Chavín de Huántar, considerado como uno de los más importantes en el Horizonte Temprano, es aún objeto de estudio, pero la mayoría de autores coinciden en que se trataba de un centro importante, donde se ha encontrado evidencia de objetos que provenían de lugares lejanos, como la costa sur y norte. Sin embargo, la naturaleza y origen de este centro es aún objeto de debate. Por un lado, se sostiene que Chavín se trataría de una síntesis tardía de los estilos precedentes a este y, por otro, se postula que su origen es una secuencia compleja y larga que se remontaría hasta el período Arcaico. El problema reside en lo que se conoce como estilo Chavín, que incluye usualmente elementos exóticos para la zona en que se encuentra, y que determina en muchos casos lo que se entiende como Chavín o pre-Chavín.¹⁵

Respecto a la costa en el período Formativo, se han encontrado evidencias de construcción de plantas en forma de U lo que da indicios de que los asentamientos en esta zona tenían cierta complejidad e independencia y no eran solo refugios para pescadores. Estos asentamientos tendrían al mar como principal fuente de recursos, no solo de alimentos sino como proveedor de materia prima (totora) para embarcaciones. Además, el mar constituye un camino natural para migraciones o intercambio (en caso necesitaran algún otro bien, lo podían trocar por pescado). De esta manera, las poblaciones que tenían acceso al mar gozaban de una mayor variedad de productos y relativa facilidad de conseguirlos, esperándose que poblaciones de esta naturaleza sean pescadores autosuficientes. Además, dado el mayor tiempo libre del que presumiblemente disponían estas poblaciones, es lógico creer que ellos se dedicaran a la producción de bienes suntuosos, los que requieren de una mayor especialización del artesano. Lo anterior no puede ser aplicado a poblaciones que dependen de productos agrícolas, ya que estos requieren siembra y cosecha, dos actividades que son estacionales y no siempre estaban garantizadas. Todas las características anteriormente descritas acerca de las poblaciones de la costa, los convierten en los candidatos perfectos para ser mercaderes y, de hecho, existen señales de trueque a lo largo de toda la costa.^{15,16}

El sitio de Puerto Nuevo (ver Figura 2) se encuentra en el km 20 de la carretera Pisco – Puerto San Martín, entre las desembocaduras de los ríos Pisco – Ica, a aproximadamente 3,30 km al norte de Paracas y a 400 m al este de la línea de playa actual. Las comunidades que habitaron Puerto Nuevo, tenían a su disposición al mar como fuente de recursos, agua dulce y totora (provista por antiguos totorales de los que se tiene evidencia que existían), además de una protección natural contra oleajes y corrientes. Lo anterior invita a creer que Puerto Nuevo estuvo habitada por comunidades de pescadores. Los estudios del sitio de Puerto Nuevo son escasos y de estos destacan el de Dulanto,¹⁴ Engel¹⁷ y García¹⁸. En el caso de Engel se tiene un problema de interpretación por lo que ya mencionamos como el problema Chavín, ya que él identifica en los fragmentos de cerámicos encontrados dos estilos: uno, al que denomina Disco Verde, y otro, al que se refiere como Chavín. La posterior investigación de García llega a la conclusión de que tal estilo Chavín no existe como tal, sino que se trata de uno local, al que denomina Puerto Nuevo.



Figura 2. Mapa geopolítico en el que se muestra la ubicación del sitio de Puerto Nuevo.

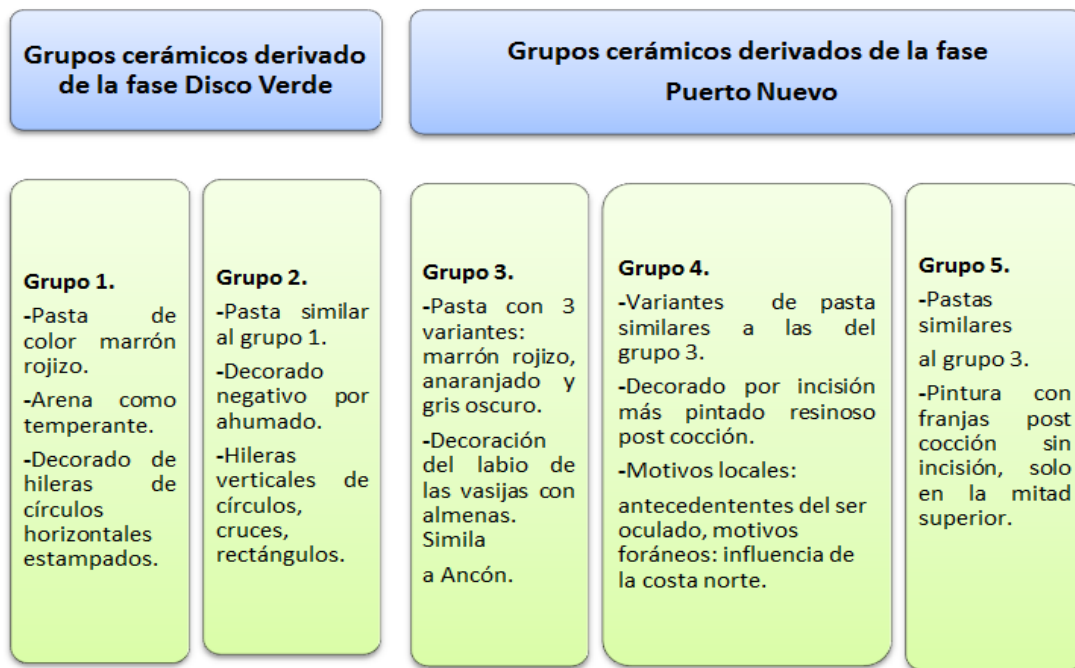


Figura 3. Grupos de cerámicos encontrados en Puerto Nuevo junto con alguna de sus principales características. Adaptado de Dulanto.¹⁴

Sin embargo, el estudio más reciente de Dulanto¹⁴ muestra que es posible identificar, por medio de un análisis de las cerámicas encontradas que incluye variables como forma, decoración y tecnología, hasta cinco grupos de cerámicos (ver Figura 3). Dos de estos se derivan de lo que García considera como Disco Verde, y los otros tres lo hacen de lo que considera como Puerto Nuevo. Estos grupos constituyen lo que se asume como local o de origen Puerto Nuevo. Es importante mencionar que dentro de los grupos que derivan de Puerto Nuevo hay uno de ellos que es bastante similar a los fragmentos encontrados en Ancón (afirmación dada por Burger, además de que García menciona que Ancón presenta estilos similares a los de Puerto Nuevo).¹⁸ Además de los cinco grupos considerados como locales se han encontrado piezas con estilos de la costa norcentral y con estilo dragoniano que evocan al de Chavín. Dulanto menciona además,¹⁴ que para estas piezas, consideradas como foráneas, es necesario un análisis composicional (ya sea petrográfico o químico o ambos) con el fin de determinar si son piezas importadas de otras regiones o copias locales.

Toda la evidencia anterior sugiere la existencia de redes de intercambio de larga distancia con regiones costeñas (no hay indicios de contacto con la sierra más allá del cinabrio encontrado), posiblemente de bienes exóticos de prestigio (vasijas cerámicas finamente decoradas), por vía marítima (no se han encontrado restos de camélidos). Además, y como ya mencionamos, al ser Puerto Nuevo posiblemente un asentamiento

de pescadores, estos serían autosuficientes y en cierta medida autónomos frente a posibles centros foráneos, por lo que no sería raro que hayan sido marginados socialmente además de geográficamente (viven alejados de los valles agrícolas), lo que los convierte en candidatos a ser intermediarios en el intercambio de bienes. ¹⁴

3.2. Estudios de procedencia y la fabricación de cerámicos

Los estudios de procedencia son importantes porque permiten determinar la naturaleza de las redes de intercambio. Ayudan a responder preguntas como ¿Qué bienes se intercambiaron? ¿Entre qué sitios? ¿Cómo se movilizó la mercancía? Implican, además, determinar el origen de los objetos que toman parte del intercambio más no necesariamente el origen de las materias primas. Todo estudio de procedencia se encuentra sustentado en la suposición de que las materias primas utilizadas en su elaboración son de origen local y éstas no se comercializan a grandes distancias. ^{2,19} Esto es casi siempre cierto en el caso de las cerámicas por lo que, tanto la arena, arcilla y el temperante (constituyentes básicos de un cerámico) se encontrarían cerca del centro de producción. Estos materiales son trabajados por el alfarero para fabricar el cerámico.

El origen de la cerámica en el nuevo mundo está relacionado con la transición al sedentarismo. La arqueología estudia fuertemente los cerámicos (básicamente los fragmentos o tiestos) ya que estos están distribuidos en todas partes del mundo y con ellos se pueden realizar comparaciones entre lugares. Además, los tiestos de cerámica son mucho más resistentes que la mayoría de materiales arqueológicos y no han sido objeto de saqueo a diferencia de los objetos completos, porque no tienen valor en el mercado negro o para los coleccionistas. ¹ También, a través del estudio de su método de manufactura, es posible determinar las tecnologías que tenían a mano y, por medio de sus características (forma, decoración, composición) es posible entender el comportamiento y la historia de las civilizaciones. ¹

En consecuencia, no es de extrañar que los estudios de procedencia se realicen frecuentemente sobre los fragmentos de cerámicas, por lo que entender su fabricación es muy relevante. Una manera de comprender el proceso de elaboración de un cerámico es entenderlo como la fabricación de una roca artificial. El primer paso en la elaboración de los cerámicos (ver Figura 4) es la formación de la pasta cruda, obtenida por la mezcla adecuada de arcilla (parte plástica), agua y modificadores (arena y temperante), que le otorgue al material un estado de plasticidad adecuado que le permita mantener al objeto

su forma. Esta mezcla está condicionada por las características de la arcilla que utilice el alfarero.

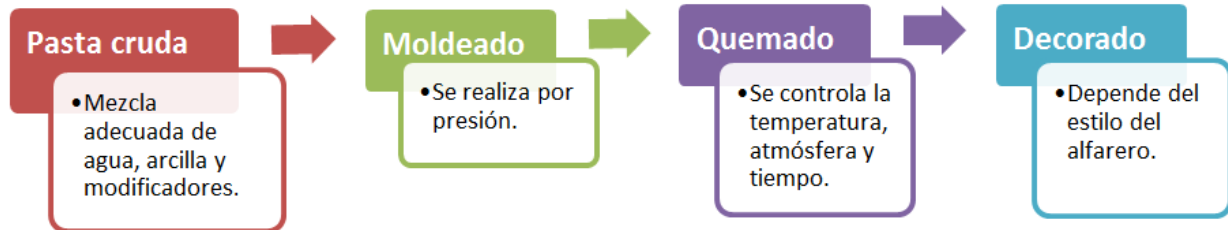


Figura 4. Esquema de las etapas involucradas en la formación de una cerámica.

Las arcillas son producto de la ruptura y descomposición de rocas ricas en Al_2O_3 , principalmente rocas ígneas. El mineral más común en las arcillas son los feldespatos. Desde el punto de vista químico, los feldespatos son aluminosilicatos de calcio, sodio o potasio y son los minerales más abundantes en la corteza terrestre. Definir qué es una arcilla usualmente puede generar debate, pudiendo entenderse como un material con determinado grado de finura o como un grupo de determinados minerales. Sin embargo, podemos asociarle algunas características que ayuden a comprenderlo. Es así que las arcillas serían depósitos sedimentarios de muchas rocas antiguas (formados a partir de rocas ígneas o metamórficas) con tamaño de partícula pequeño (diámetro menor a $2 \mu\text{m}$). Químicamente, la mayoría son variantes de minerales con composición $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$, con estructura laminar, lo que permite que entre las capas de silicato se encuentren moléculas de agua. ^{1,19-21}

Es así que la formación de la pasta cruda implica una primera mezcla de la arcilla con una limitada cantidad de agua, lo que gracias a la granulometría de la arcilla da como producto un material plástico. El origen de la plasticidad de esta mezcla no está en el agua químicamente enlazada (el agua entre las capas de los aluminosilicatos de la arcilla) sino en el agua adsorbida sobre la gran superficie de la arcilla como consecuencia de los diámetros pequeños de sus partículas. Es usual en esta etapa agregar o retirar material de la arcilla con el fin de lograr una adecuada plasticidad. Los materiales que se agregan son los temperantes (conocidos también como materiales inelásticos, no plásticos, aditivos o modificadores) que dan origen a lo que posteriormente se conocerá como inclusiones. Entre algunos de los materiales empleados como temperante tenemos arena, piedra molida, conchas marinas, tiestos de cerámicos y restos orgánicos vegetales o animales. En la Figura 5 se muestra el

corte transversal de un fragmento de cerámica, en la que se pueden observar la matriz arcillosa, así como las inclusiones.



Figura 5. Corte transversal de un fragmento cerámico en el que se muestran las inclusiones sobre la matriz arcillosa. Adaptado de Druc.²¹

A la pasta cruda obtenida se le da la forma deseada y posteriormente es sometida a cocción. Esta es una etapa de quemado, en la que se suelen adicionar agentes de fusión como el CaO , y se produce la pérdida progresiva de agua, además de algunos cambios de estructura de los minerales originales contenidos en la arcilla. Las variables importantes en esta etapa son el tiempo de cocción, la temperatura máxima alcanzada y la atmósfera de quemado. Respecto a la atmósfera de quemado, ésta se encuentra relacionada con la ausencia o presencia de aire (especialmente oxígeno) dando lugar a atmósferas reductoras u oxidantes, respectivamente. De esta manera, cerámicos quemados en atmósferas reductoras tienden a ser negros, producto de la presencia mayoritaria de Fe^{2+} , mientras que cerámicos cocidos en medios oxidantes tienden a ser marrones, como consecuencia de la presencia de Fe^{3+} . La temperatura de quemado se puede asociar a ciertos cambios en la pasta cruda (ver Figura 6). En general, podemos encontrar que, en la etapa de cocción, se pierde primero el agua adsorbida junto con los materiales volátiles y luego se pierde el agua químicamente enlazada junto con la materia orgánica. Finalmente, a temperaturas más elevadas, se descomponen algunos de los minerales o sufren algún cambio en su estructura. Una vez que la arcilla ha sido quemada se obtiene el cerámico, que es resistente y duro, ya que ha perdido la plasticidad original de forma permanente.^{1,19}

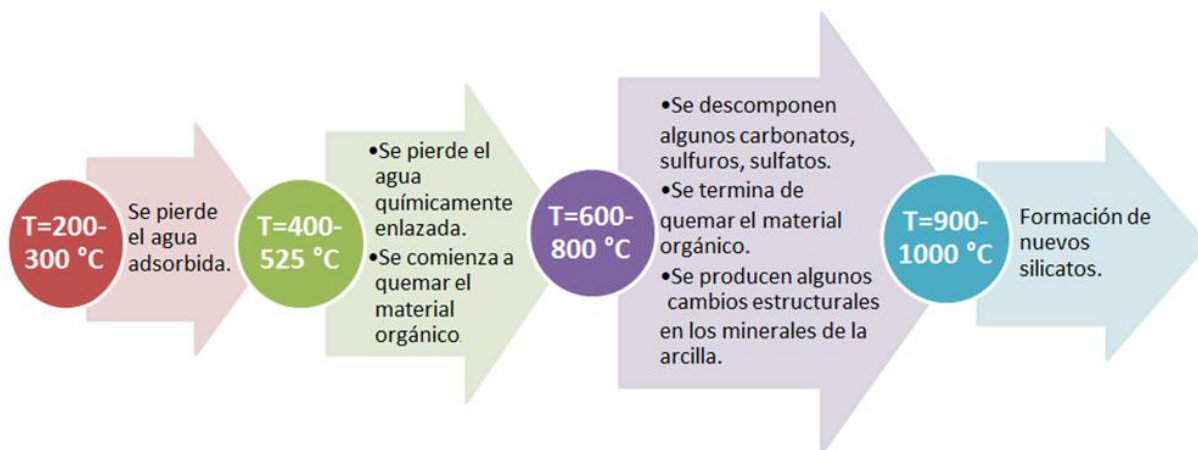


Figura 6. Cambios involucrados en el quemado de una cerámica según la temperatura alcanzada.

Dada la enorme cantidad de combinaciones posibles de materia prima en la elaboración de una pasta cruda con adecuada plasticidad, se asume, en los estudios arqueológicos, que cada zona de producción tenía su propia receta para ésta, siendo este el motivo por el cual se considera que la pasta de un cerámico constituye una marca de su procedencia. Los cerámicos producidos son distribuidos o intercambiados según el tipo de organización existente en la población, ya sea por reciprocidad (entre individuos y por parentesco), redistribución (la producción se acumula y se relocaliza) o por intercambio (se cambia un bien por otro o por un servicio). Respecto al intercambio, se le puede denominar a este como comercio si la distancia y el medio de transporte son significativos. Existen al menos cinco posibilidades para el intercambio: que el comprador se mueva hacia el alfarero, que el alfarero se mueva hacia el comprador, que ambos se muevan hacia un mercado, que el cerámico se mueva hasta un intermediario (un tercero) el cual realiza el intercambio con el comprador o que el cerámico vaya a una agencia central encargada de los intercambios. ^{1,2,19}

Es en este contexto que las redes de intercambio, locales o de larga distancia, cobran importancia ya que proveen los bienes necesarios, las relaciones económicas, sociales y el flujo de información necesario en una población. Es así que los estudios de procedencia constituyen un primer paso en el estudio de la producción de cerámicos, y se realiza por comparación de la composición entre cerámicos y/o materias primas de origen conocido. La base de estos estudios está en el postulado de procedencia, que se sustenta en que las diferencias entre distintas fuentes de materia prima pueden ser reconocidas analíticamente y, además, las variaciones composicionales entre diferentes fuentes de materia prima son mayores que las variaciones dentro de una misma fuente. Es así que el postulado de procedencia enuncia que, si la composición de dos cerámicos

A y B son diferentes, entonces las fuentes de las arcillas, A y B, son diferentes también.^{1,2,19} Como es lógico de esperar, los estudios de procedencia se centran en el análisis de la pasta presente en el cerámico. Ésta se encuentra constituida básicamente por la matriz arcillosa (originada a partir de la arcilla) y las inclusiones (minerales, rocas o materiales incrustados en la matriz que son de un tamaño de partícula mucho mayor que la matriz).

El estudio de procedencia comienza con la caracterización composicional de la pasta. Existen dos formas de abordar el problema del análisis de una pasta: la petrografía y el análisis químico composicional. La petrografía, es una técnica que implica la observación, estudio y clasificación de las inclusiones. El análisis químico composicional, que abarca una serie de técnicas instrumentales como la fluorescencia de rayos X (XRF), el análisis de activación de neutrones (NAA) y la ablación láser acoplada a espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (LA-ICP-MS), se encarga de proveer información acerca de la composición química elemental de la pasta en su conjunto, matriz e inclusiones. Un tercer enfoque es el denominado por Ghezzi como “integral” que engloba ambas formas de estudio.² Estas formas de análisis, ya sea petrografía o análisis químico, tienen como objetivo determinar la composición química elemental de la cerámica asumiendo que ésta es una marca de su procedencia (es como la firma o huella dactilar de la región de origen). La petrografía puede presentar un mayor grado de error en la determinación de la procedencia de un fragmento debido a que depende, en gran medida, de la capacidad y experiencia de análisis del petrógrafo y se centra, principalmente, en las inclusiones (que dan información de la técnica de elaboración más que del lugar de procedencia). En consecuencia, es el análisis químico composicional la técnica más ampliamente utilizada en los estudios de procedencia.^{2,21}

Los elementos encontrados en los cerámicos mediante un análisis químico pueden clasificarse como mayores, menores o trazas. Los elementos mayores dan información acerca de las fuentes de materia prima o el método de producción, los elementos menores dan una idea acerca de las variaciones dentro de un grupo y los elementos traza determinan la proveniencia de los minerales en la pasta y ayudan a diferenciar grupos de cerámicos. En consecuencia, y según el criterio de procedencia, si un grupo de cerámicos exhibe la misma composición química elemental, este constituye un indicador de que podrían provenir de un mismo centro local, y se pueden agrupar en cúmulos o clúster, denominados grupos composicionales. Por el contrario, si se observan cerámicas con composiciones diferentes que no se agrupan con las anteriores (quedan fuera de los clúster) estas podrían considerarse como no locales. Aunque la

premisa es sencilla, la dificultad en este paso se encuentra en determinar bajo qué criterios una composición química elemental es similar o no. Afortunadamente, existen herramientas estadísticas que ayudan a resolver este problema.

3.3. Técnicas analíticas empleadas en estudios de procedencia

Para poder construir los grupos de cerámicos con herramientas estadísticas y conseguir que los resultados sean coherentes y útiles, se necesitan dos condiciones mínimas. Primero, que los casos que sean sometidos a la estadística sean representativos del grupo de cerámicas que se está estudiando, es decir, que la forma de muestreo sea adecuada. Esto se logra seleccionando las piezas a analizar mediante una clasificación previa a nivel macroscópico según criterios de tipo de pasta, manufactura del objeto arqueológico, forma del mismo y su decoración. En segundo lugar, es necesario que los elementos encontrados para cada caso, por medio de alguna de las técnicas de Análisis Químico, sean fiel reflejo de la composición de la pasta y, además, incluyan lo que se denomina elementos clave (elementos menores y traza). En este caso cobran importancia los detalles de cada una de las técnicas instrumentales de análisis químico.

La mayoría de análisis composicionales se realizan actualmente por NAA, ya que cuenta con una gran exactitud y sensibilidad.^{4,10} Es una técnica destructiva pero no requiere de grandes cantidades de muestra (alrededor de 50-200 mg). Sus puntos débiles son el largo tiempo de análisis, de alrededor de 5-6 semanas y, principalmente, la necesidad de contar con un reactor nuclear que pueda servir como fuente de neutrones. Una técnica que presenta, al igual que el NAA, gran sensibilidad y exactitud, pero no tiene el inconveniente del uso de un reactor nuclear es la LA-ICP-MS. Esta técnica, que no daña sustancialmente la muestra, es considerablemente más barata que el NAA y detecta prácticamente cualquier elemento de la tabla periódica.^{22,23} Finalmente, la XRF es una técnica no destructiva, de más fácil acceso, mucho más antigua que las dos anteriores, con buenos límites de detección y exactitud, aunque no a los niveles del NAA o LA-ICP-MS.²⁴ El rango de elementos que detecta es también menor a las dos técnicas anteriores. Sin embargo, la XRF al ser una técnica con mayor tiempo en la comunidad científica se ha favorecido de los avances propios de la tecnología, llegando a ofrecerse en el mercado equipos portátiles de XRF (pXRF). Estos equipos portátiles cuentan con buenos límites de detección, mucho menor costo (en comparación al resto de técnicas disponibles), gran accesibilidad, fácil manejo, carácter no destructivo y una amplia distribución en la comunidad de arqueólogos y laboratorios de análisis químico. En el

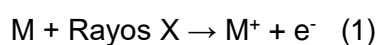
Perú recién en los años 70 se comenzaron a realizar estudios utilizando técnicas instrumentales, siendo la XRF así como el NAA (en menor frecuencia) las principales técnicas utilizadas.^{2,3} Es por tanto esperable que exista un espacio para el crecimiento de una técnica como la pXRF.

3.3.1. Fluorescencia de Rayos X portátil

El uso de la pXRF comenzó alrededor del año 2000 y, justamente por su amplia distribución y fácil manejo, ha sido muchas veces mal utilizada o sus resultados han sido mal interpretados. Sin embargo, la pXRF se ha utilizado en diversos ámbitos como el análisis de suelos, el análisis de cerámicos mayas e incluso en estudios de procedencia.^{8,25} Dentro de estos últimos se cuenta con los trabajos en el estudio de grupos en fragmentos cerámicos del valle del Nilo,²⁶ el estudio de procedencia de fragmentos recogidos en Petén, Guatemala,²⁷ el estudio de procedencia de ánforas Corintias,²⁸ la determinación de las fuentes de cerámicos en el sudoeste de Estados Unidos,⁴ entre otros.^{12,29-31}

Otro problema que enfrenta la pXRF es la posibilidad de arrojar valores cuantitativos para la composición química. Esto está limitado por lo que se conoce como efecto matriz. Para comprender mejor este fenómeno se necesita conocer el fundamento de la XRF (ver Figura 6). La XRF consiste en la irradiación de la muestra a analizar con rayos X (radiación electromagnética de longitud de onda pequeña, en el orden de los Å). Estos rayos X son generados de manera controlada en los equipos a partir del choque de electrones, generados por la acción de una corriente eléctrica sobre filamentos de wolframio, por ejemplo, con una superficie metálica (como rodio o plata) que constituye el ánodo del equipo. Este proceso origina la liberación de rayos X por parte del ánodo, los cuales pueden llegar a la muestra y ser absorbidos, o interactuar con los electrones emitidos por el filamento (cátodo). En este último caso se origina, por medio del efecto Compton, radiación de menor energía, la que podría ser detectada por equipo.

Sin embargo, la mayoría de la energía emitida por el ánodo es absorbida por los átomos presentes en la muestra y se generan sus respectivos iones por la pérdida de electrones de las capas internas K, L o incluso M (ver Figura 7a). Así, por ejemplo, un elemento M se ioniza según la ecuación 1:



Los iones obtenidos se relajan posteriormente mediante dos posibles vías. La primera es la emisión de radiación, en la que, por determinadas transiciones electrónicas se

cubren los espacios dejados en las capas internas por parte de electrones de niveles superiores. Se tiene por ejemplo en la Figura 7c una transición del tipo K, cuando un electrón de un nivel superior ocupa el espacio dejado en la capa K producto de la ionización inicial. De igual manera, se tienen transiciones L o M (ver Figura 7d y e) en la que los electrones han ocupado los espacios vacíos dejados en las capas L o M respectivamente. La energía emitida en estas transiciones corresponde a la fluorescencia de rayos X y su valor es característico de cada elemento.³²

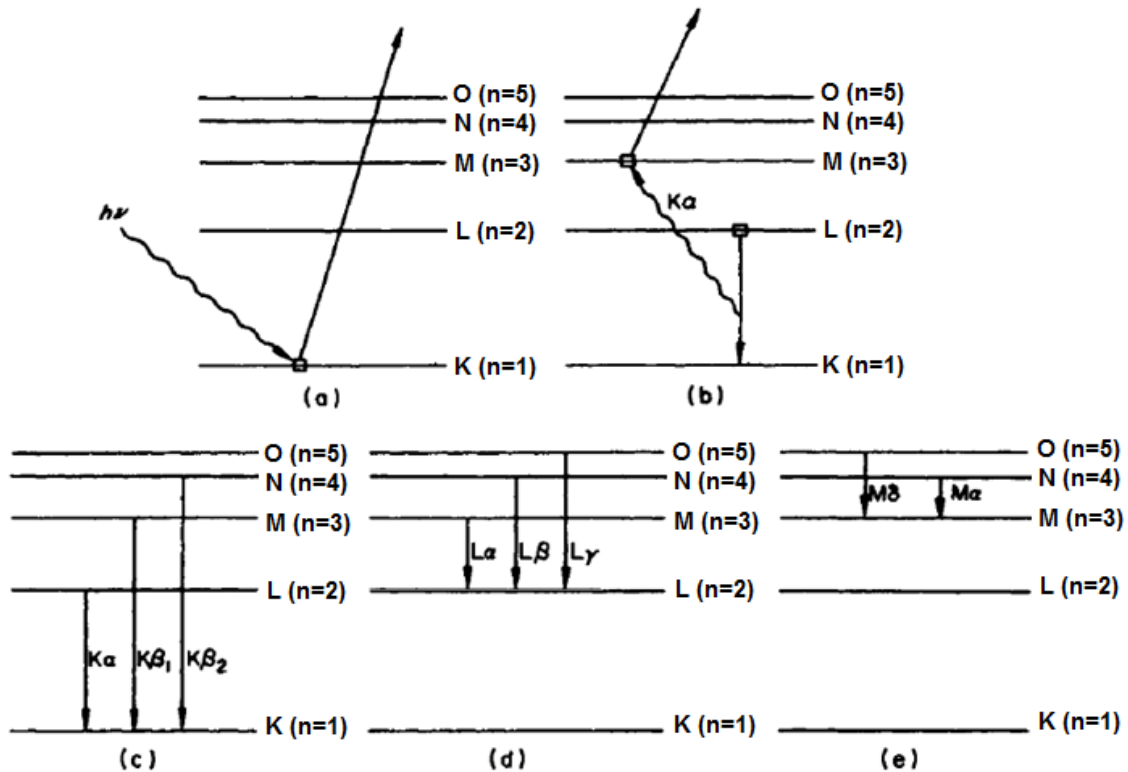


Figura 7. Procesos involucrados en la XRF, (a) El proceso de excitación por ionización, (b) la relajación por autoionización y; (c), (d) y (e) la relajación por fluorescencia. Adaptado de Jenkins.³²

La otra vía de relajación es la que se conoce como autoionización o proceso Auger. En este proceso también sucede la transición de un nivel superior hacia el nivel interno donde se encuentre la posición vacante dejada por la ionización (ver Figura 7b); la diferencia radica en que no se emite radiación, sino que la energía involucrada en esta transición es utilizada para ionizar un segundo electrón. La preferencia de un proceso u otro depende en gran medida de la energía de la radiación incidente, del tiempo de exposición y del número atómico del elemento a analizar. Es usual que para elementos ligeros el proceso Auger tenga un peso importante. Una manera de determinar cuál de los dos procesos de relajación, fluorescencia o procesos Auger, predomina, es la eficiencia cuántica. Esta se define como la relación entre los fotones procedentes de la fluorescencia respecto del número total de fotones emitidos. En la Figura 8 se muestra

como varia esta eficiencia cuántica, de la que se desprende que para elementos con números atómicos menores de 20 la fluorescencia no es el principal proceso de relajación para el caso de transiciones del tipo K, y es prácticamente despreciable para transiciones del tipo L y M. ³²

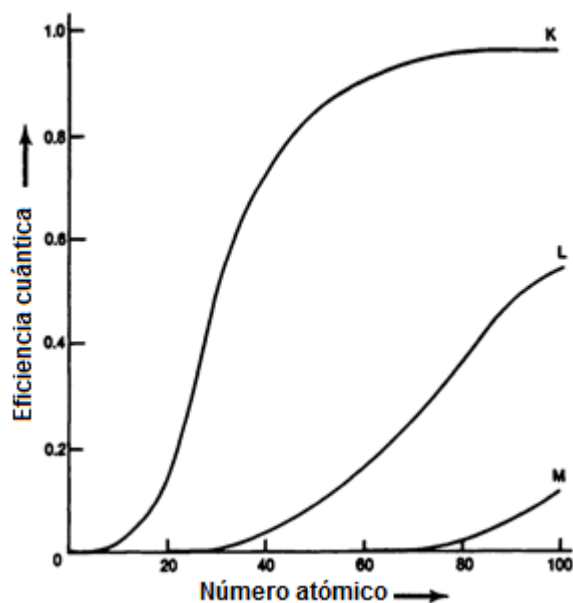


Figura 8. Curvas de eficiencia cuántica (rendimiento de fluorescencia) respecto al número atómico, para cada tipo de transición (K, L o M). Adaptado de Jenkins. ³²

El fenómeno de fluorescencia trae como consecuencia que, para una muestra, se pueda obtener un espectro de XRF que muestre cada elemento presente. Además, la intensidad de estos picos está relacionada con la cantidad presente de cada elemento. Esta intensidad de fluorescencia es expresada en función del área neta de los picos (NPA) expresada en cuentas. Entonces, para cada muestra, se puede obtener el perfil de los elementos presentes junto con su respectiva NPA, lo que constituye su composición química relativa (esto se conoce como datos semicuantitativos). Luego, de ser posible, se vinculan las NPA encontradas mediante algún método de cuantificación, con su respectiva composición química. Como consecuencia, la XRF es considerada como una técnica de análisis de propósito general, que permite el análisis de cualquier combinación de elementos (dentro del rango de detección) en cualquier matriz.

El espectro que se origina por medio de la fluorescencia de rayos X puede entenderse que es compuesto por dos contribuciones: la de la dispersión de fondo o background, y por las líneas de fluorescencia de los elementos presentes. Estas contribuciones a la formación del espectro XRF se muestran en la Figura 9. La contribución de la dispersión

de fondo (Figura 9b) es producto de la interacción de la muestra con la fuente de rayos X originando los picos a y b que son propios de la naturaleza de la fuente. Por otro lado, la contribución de fluorescencia (Figura 9c) es consecuencia de las transiciones de fluorescencia de rayos X de los elementos presentes, en este caso representados por c y d. De esta manera, un espectro XRF (Figura 9d) está compuesto por los picos de los elementos presentes (c y d) y por los picos propios de la fuente de rayos X (a y b).

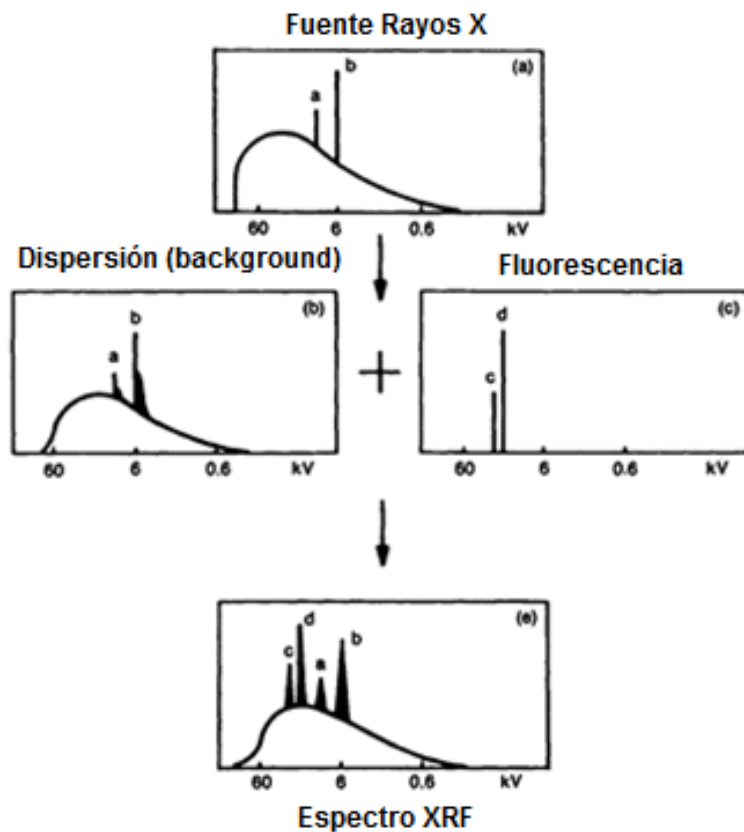


Figura 9. Diagrama que muestra la contribución de la dispersión de la muestra (background) junto con las líneas de fluorescencia de los elementos, lo que origina el espectro XRF de una matriz. Adaptado de Jenkins.³²

Para comprender estas contribuciones es necesario profundizar en los fenómenos de interacción entre la energía incidente y la muestra a analizar. Cuando el haz de radiación incidente, con intensidad I_0 y longitud de onda λ_0 , entra en contacto con la superficie de la muestra, suceden dos tipos de fenómenos (ver Figura 10). Una parte de la radiación es reflejada (dispersada) ya sea de forma elástica, sin pérdida de energía, $\lambda = \lambda_0$; o inelástica, con pérdida de energía, $\lambda_c > \lambda_0$. El resto de la radiación es absorbida por la muestra, de modo que para una penetración d respecto a la superficie del material, la intensidad del haz (transmitido) es ahora I con una longitud de onda λ_0 . La relación entre

la intensidad del haz incidente respecto a la intensidad del haz transmitido sigue la relación que se muestra en la ecuación 2:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_0 \rho d} \quad (2)$$

Donde μ_0 es el coeficiente de atenuación másica, y depende de la composición de la matriz y de λ_0 ; ρ es la densidad de la matriz y d es la penetración respecto de la superficie. Se considera que un haz penetra una superficie hasta que se ha absorbido el 99,99 % de la radiación, es decir la intensidad del haz transmitido, I , es 0,01 % de I_0 .

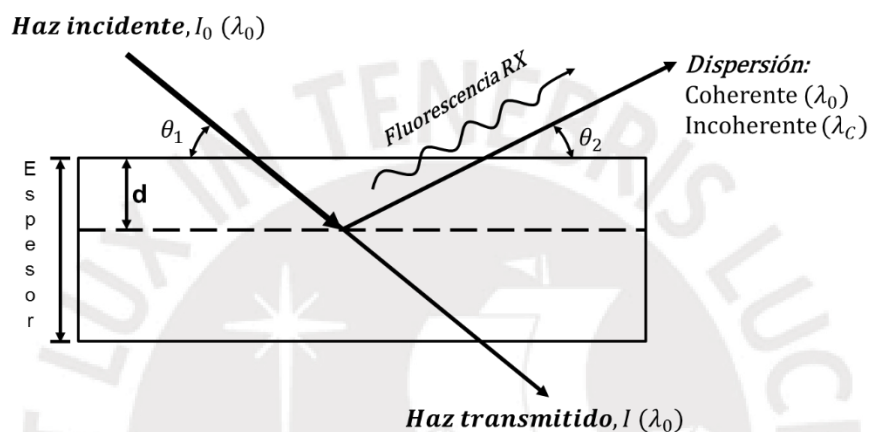


Figura 10. Diagrama que muestra los fenómenos que ocurren cuando el haz incidente interactúa con la superficie de la muestra a analizar. Como consecuencia de esta interacción se origina la fluorescencia de los elementos presentes junto con la dispersión propia de la muestra.

La parte de la radiación del haz incidente que es absorbida origina la fluorescencia de los elementos que estén presentes en la matriz. Esta radiación de fluorescencia emitida es atenuada por la matriz, o lo que es lo mismo, por los elementos presentes en la muestra. Por tanto, la intensidad de una señal en un espectro XRF depende no sólo del átomo en cuestión sino de todos los átomos presentes.^{32,33} Esto trae un problema para el caso de los cerámicos ya que, por la naturaleza propia de su composición y fabricación, es virtualmente imposible replicar con exactitud su matriz, lo que ocasiona la imposibilidad de construir curvas de calibración de uso general y por ende obtener una determinación cuantitativa.

El principio de la cuantificación sostiene que la intensidad de fluorescencia de un elemento es proporcional a su concentración en la muestra, según la ecuación 3:

$$C_i = a_i I_i \quad (3)$$

Esta relación entre intensidad de fluorescencia y concentración será aplicable a todo caso en el que la fluorescencia del elemento a cuantificar sea independiente de su matriz.³³ Como ya se ha explicado, para el caso de los cerámicos analizados por medio de pXRF, el efecto matriz es considerable y, además, las matrices de estos materiales son difíciles de replicar (tanto por el número de elementos presentes como por su composición).

Si bien existen métodos de corrección para este efecto matriz, como el de los parámetros fundamentales o el de coeficientes empíricos, resulta dificultoso aplicarlos al caso de los cerámicos.³⁴⁻³⁷ Para el caso de los parámetros fundamentales, haría falta el software pertinente dado la elevada complejidad de los cálculos que involucra. También, y aún más determinante, está el hecho de que para aplicar este método se necesita encontrar previamente los parámetros fundamentales de la matriz a analizar, lo que a su vez implica conocer la composición de un número de muestras que sean similares a la matriz a analizar. Este problema lo comparte, en cierta manera, con el método de coeficientes empíricos, el cual necesita de estándares de calibración (muestras de composición conocida y efecto matriz similar a los casos a analizar) que permitan construir un modelo matemático que exprese la concentración de un elemento en función de su propia intensidad de fluorescencia y del resto de elementos presentes.^{8,33} Entonces, la mayor dificultad en aplicar algún método de corrección del efecto matriz para el caso de cerámicos se encuentra en el encontrar muestras que sean similares en todo aspecto (composición, número de elementos, fases mineralógicas) a la matriz a analizar. Esto es solo posible si se tiene previamente información de la matriz que se está analizando, y es poco recomendable su uso para un primer estudio de una matriz.

Como se ha mostrado, determinar la composición química en cerámicos para estudios arqueométricos es complicado, ya que lo que se busca es no ser destructivo con la muestra a analizar. Para el caso particular de la pXRF cuantificar implicaría tener conocimiento previo de la matriz a analizar. A pesar de todo lo anterior, es posible obtener buenos resultados utilizando únicamente composiciones relativas apoyadas en un correcto uso de la estadística, como lo demuestran los trabajos de Bissett y Claassen, y De Francesco.^{5,6}

3.4. Estadística multivariante y los estudios de procedencia

Una primera consideración al abordar el problema de la diferenciación de composiciones lo constituye el número de variables o dimensiones que se tienen para un solo caso. Es común encontrar un gran número de elementos cuando se realiza un análisis químico composicional, más aún cuando las técnicas instrumentales como XRF, NAA o LA-ICP-MS pueden proveer información de decenas de elementos a la vez.^{2,3} Por lo anterior, este tipo de estudios se abordan dentro de la estadística multivariante.

Entre las técnicas estadísticas más utilizadas se encuentran el análisis de componentes principales (PCA), el análisis de clúster (CA) y el análisis discriminante (DA). El PCA consiste en reducir el número de variables, gracias a que puede medir la magnitud y dirección de la varianza, creando nuevas variables, los denominados Componentes Principales, que resultan de la combinación lineal de las variables originales. Los Componentes Principales así obtenidos incluyen en su interior la información de la composición y además deben incorporar la mayor parte de la varianza de las variables originales. La importancia del PCA radica en que, además de reducir el número de variables a unas pocas, permite construir gráficos de dispersión que permitan la identificación de grupos de cerámicos.^{4,12,38,39} Por su parte, el CA construye clúster o cúmulos a partir de las variables tomando como criterio la distancia intra e intergrupala, la cual da lugar a un dendrograma (un diagrama donde se encuentran agrupados los casos y se muestran las distancias relativas entre ellos). Finalmente, el DA es también un análisis de grupos, pero éste necesita tener una agrupación previa (que puede ser provista por el CA). En el DA se crean las denominadas funciones discriminantes por combinación lineal de las variables originales, pero a diferencia del PCA lo que se busca es aumentar la distancia entre grupos y minimizar la distancia dentro de los grupos. Como resultado final de un DA se obtiene un mapa de proximidades, junto con una probabilidad de pertenencia al clúster. En trabajos anteriores, se hace evidente el amplio uso del PCA y en gran parte también del CA,^{4,12,28,38,39} sin embargo, el DA aún no ha sido explorado del todo.

3.4.1. Análisis de componentes principales (PCA)⁴⁰⁻⁴³

Consideremos un conjunto de datos composicionales en los que se han encontrado “n” elementos. Las variables composicionales serán entonces x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) y una composición concreta de un cerámico “j” por ejemplo, será x_{ij} ($i=1, 2, 3, \dots, n$). A partir de estas variables se pueden construir otras “k” variables nuevas, Z_k , las que se conocen

como componentes principales y que resultan de la combinación lineal de las variables originales x_i , según la ecuación 4:

$$Z_k = a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + a_{3k}x_3 + \dots + a_{nk}x_n \quad (4)$$

donde los números a_{ik} reciben el nombre de coeficientes de puntuación factorial.

La idea detrás de la creación de estos componentes principales es poder explicar o estimar variables que directamente no pueden ser medibles o identificar relaciones entre variables que de otra manera no serían posibles de encontrar dado el elevado número de éstas. Lo anterior se logra disminuyendo el número de dimensiones de manera que de las “n” variables originales se puedan crear “k” componentes principales ($k < n$), las que deberán incluir dentro de sí mismas la mayor cantidad de varianza de los datos originales. Ya que la idea del proceso de creación de los componentes principales implica explicar relaciones entre variables, las nuevas variables construidas Z_k serán independientes entre sí. Entonces, si entendemos cada componente principal Z_k como un vector, estos requisitos se cumplirán si los componentes principales son ortogonales entre sí.

De esta manera, cada componente principal Z_k explica una porción de la varianza de las variables originales, y unas cuantas de estas componentes captan la mayor información. Es así que, mediante la ecuación 5, podemos escribir que cada variable x_i será explicada por las componentes principales Z_k ,

$$x_i = c_{i1}Z_1 + c_{i2}Z_2 + \dots + c_{ik}Z_k + u_i \quad (5)$$

La parte de la varianza de x_i que es explicada por las componentes principales recibe el nombre de comunalidad y la varianza no explicada está dada por u_i . Los coeficientes c_{ik} se determinan por el método de regresión lineal y reciben el nombre de cargas factoriales.

Normalmente, el proceso de obtención de las componentes principales se realiza sobre datos normalizados (es decir media cero y desviación estándar de uno), para evitar que una variable controle en exceso alguno de los componentes principales. Además, debe verificarse la existencia de las relaciones entre las variables, ya que de no ser el caso un PCA sería de poca utilidad. Entre los ensayos que permiten determinar la pertinencia de un PCA se encuentran la prueba de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin), el test de esfericidad de Bartlett y las matrices de correlación entre casos y variables.^{42,43} A partir de los resultados de estos ensayos se debe tomar la decisión de si es adecuado realizar un

PCA o si, de ser el caso, se deben retirar algunos casos para recién proceder con el análisis. Otro aspecto a tener en cuenta es cómo elegir el número “k” de componentes principales óptimas que expliquen el comportamiento de las variables originales. Existen algunos criterios, como el de la varianza, que nos dice que debemos elegir un número de componentes que expliquen al menos 63,21 % de la varianza. ³⁹ También se encuentra la regla de Kaiser, que recomienda elegir componentes principales que tengan autovalores mayores que 1. ⁴²

Una vez encontrados los componentes principales, es posible mejorar los resultados que estos arrojan mediante procesos de rotación. Estos pueden entenderse como una manera de redistribuir la varianza entre los componentes encontrados. Es común que los primeros componentes principales expliquen mucha mayor varianza que los siguientes, por lo que al aplicar algún método de rotación este efecto se disminuye. Los métodos de rotación no cambian las comunalidades de las variables, es decir no cambia la varianza total explicada. Entre los métodos de rotación el que destaca más es el de Varimax, que busca minimizar el número de variables x_i que expliquen las componentes Z_k . ⁴²

Un análisis de componentes principales es muchas veces solo una etapa previa, que requiere del cálculo del valor de cada componente principal para cada caso, lo que se denomina como puntuación. Es usual que a partir de los componentes principales se construyan gráficos de dispersión de manera que se puedan identificar grupos o clúster utilizando los componentes como ejes.

3.4.2. Análisis de Clúster (CA) ⁴⁰⁻⁴³

Los análisis de clúster son técnicas en las que no se conocen los grupos con anterioridad, es decir, no hay una clasificación previa y busca encontrar grupos en los datos composicionales a partir de la proximidad de las composiciones. Así, para dos composiciones cualesquiera, sean x_{i1} y x_{i2} , la distancia entre estas se puede estimar a partir de la distancia euclidiana entre sus puntos, si asumimos los datos composicionales como vectores, y estaría dada por la ecuación 6,

$$d = \sqrt{(x_{11} - x_{12})^2 + (x_{21} - x_{22})^2 + \dots + (x_{n1} - x_{n2})^2} \quad (6)$$

La creación de los clúster comienza asumiendo que cada composición es un grupo por si sola. Luego, las composiciones más próximas entre si se agrupan en un nuevo clúster, buscando que las distancias entre los clúster construidos sean mayores que las distancias internas dentro de cada grupo. Existen distintos métodos para determinar

estas distancias, por ejemplo, el de los vecinos más próximos, los vecinos más lejanos o respecto al centroide del clúster. Como resultado final de este análisis se obtiene un dendrograma, que muestra las distancias relativas entre cada elemento que forma parte de los clúster creados. En la Figura 11 se muestra un dendrograma de ejemplo, en el que el eje vertical contiene a los casos y el eje horizontal a las distancias relativas entre los casos. Para conocer el número de grupos a una determinada distancia basta con trazar una línea a esta. Por ejemplo, a una distancia de 20 unidades se encuentra la línea 1. El dendrograma y la línea 1 se cortan en dos puntos, marcados en un círculo en el diagrama, los que originan los dos grupos composicionales. También se muestra la línea 2, trazada a aproximadamente 2 unidades, que corta al dendrograma en 7 puntos originando así 7 grupos composicionales.

Este método de agrupamiento se conoce como jerárquico, ya que una vez que una composición se ha asociado a un clúster esta no se cambia. A partir de esta información y a través de un gráfico de sedimentación construido a partir de las distancias relativas entre cada clúster, es posible determinar el número adecuado de clúster presentes en los datos composicionales analizados. Sin embargo, agrupar de esta manera tiene limitaciones, como el hecho de que los casos atípicos (casos muy diferentes al resto de observaciones) influyan fuertemente en la construcción de los grupos o la poca estabilidad del análisis respecto al método de distancia empleado.

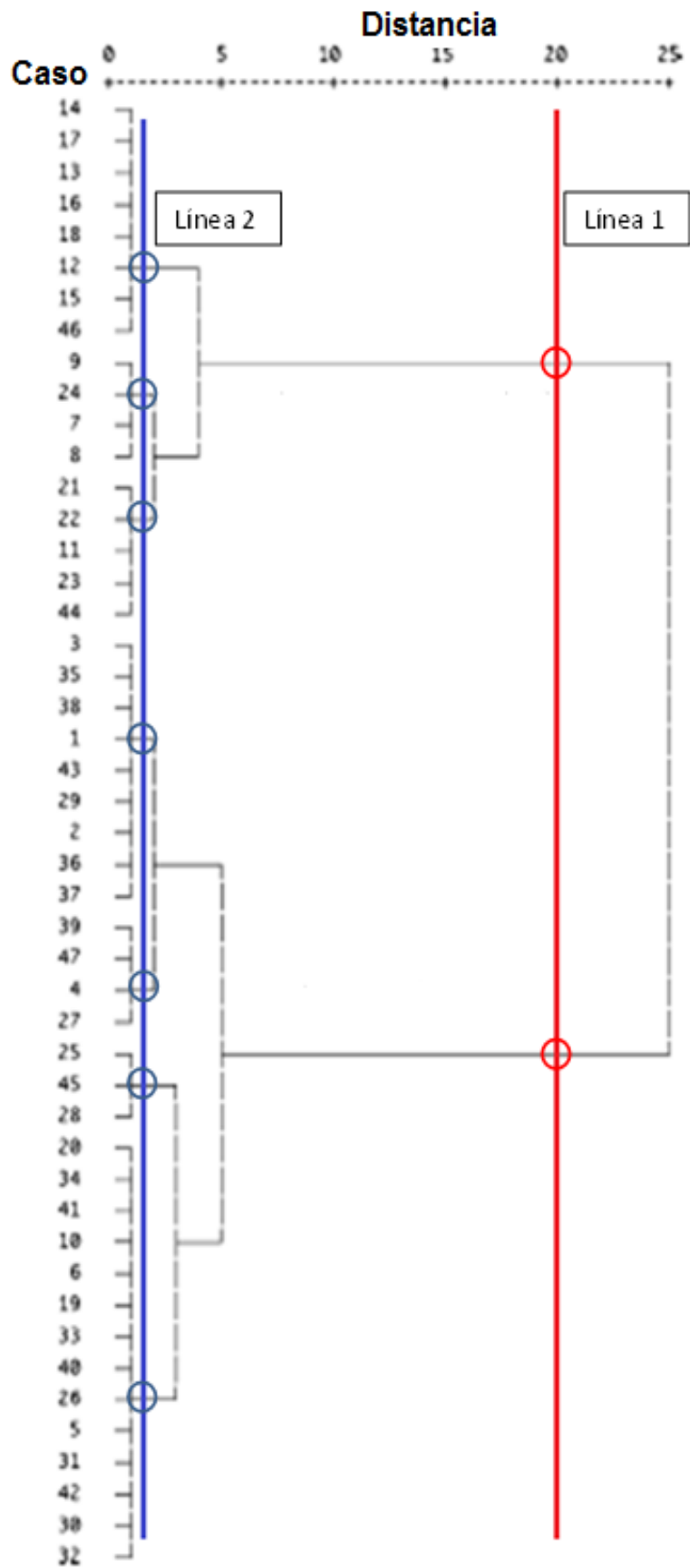


Figura 11. Dendrograma en el que se muestran dos líneas de corte y los diferentes grupos que originan.

Otra forma de abordar la clasificación es la de los métodos no jerárquicos, como el método de k-medias. En este método se requiere fijar un número de clúster con anterioridad (este puede ser dado por el número óptimo encontrado en el método jerárquico o puede ser fijado por el investigador), y a partir de este se construyen los grupos solicitados usando las distancias de las composiciones a los centroides de los clúster. Este método de construcción de grupos también está influenciado por los casos atípicos y, además, por los diferentes órdenes de magnitud de las variables.

Como se ha mostrado, los métodos de agrupamiento están fuertemente condicionados por las variables, por lo que se debe tener cuidado al elegir las variables para clasificar. Es altamente recomendable someter primero las variables originales a algún método de reducción de dimensiones (como el PCA) con el objetivo de disminuir el número total de variables, y que éstas sean independientes entre sí y como consecuencia de esto sea posible obtener un mejor agrupamiento. Como pauta final es importante que los grupos construidos posean un significado para el investigador.

3.4.3. Análisis Discriminante (DA) ⁴⁰⁻⁴³

El análisis discriminante, al igual que el PCA, crea una nueva variable, la denominada función discriminante, F , por combinación lineal de las variables originales, pero a diferencia del PCA necesita de una agrupación previa de las composiciones. Esta puede ser dada por medio de una clasificación por parte del investigador o ser provista por el CA. Además, la función F puede ser construida no solo a partir de las variables originales sino a partir de los componentes principales obtenidos en el PCA. La idea es que la función discriminante obtenida maximice las diferencias entre los grupos y minimice las diferencias internas. El objetivo final de esta técnica es determinar si una composición desconocida pertenece a algunos de los clúster o grupos fijados con anterioridad. La manera de realizar lo anterior es calculando el valor de F para la composición desconocida y ubicándola en alguno de los grupos encontrados con anterioridad.

La función discriminante F se puede obtener de dos maneras. Una es partiendo los datos composicionales en dos partes, de tal manera que con una se determina la función F y con la otra se determina la pertenencia de las composiciones a los grupos. El otro método consiste en la construcción de la función F a partir de todos los datos composicionales excepto uno, y luego se utiliza este dato para comprobar si pertenece al clúster que debería. Este proceso se repite para cada dato composicional y se obtiene para cada composición una probabilidad de pertenencia a su respectivo clúster. De este

modo, es posible obtener un mapa de proximidades donde se muestren los clúster definidos y los valores de la función F para cada dato composicional.



4. Metodología

4.1. Equipos y software empleados

4.1.1. Equipos

Se ha empleado un **espectrómetro de fluorescencia de rayos X portátil** modelo Bruker Tracer III – SD. Este equipo cuenta con un tubo de rodio como fuente de rayos X con potencial máximo de 40 kV, detector Xflash SDD de 10mm² y resolución de 145 eV a 100000 cuentas/s. Este equipo permite el análisis de elementos desde el magnesio hasta el uranio.

Así mismo, se ha empleado un **horno tipo mufla** con controlador PLC de hasta 6 etapas programables y una temperatura máxima de 1000 °C.

4.1.2. Software

S1PXRF, incluido con el equipo de pXRF, permite recoger los espectros de fluorescencia de rayos X y guardar los datos para poder ser tratados con el software ARTAX.

ARTAX v7.4.0.0, provisto por Bruker, permite obtener la información composicional, así como el área neta de los picos correspondientes, a partir de los espectros recabados en el equipo de pXRF.

IBM SPSS Statistics 23: Permite realizar análisis de estadística multivariante entre los que se encuentran: PCA, CA y DA.

4.2. Preparación de muestra

El número de fragmentos de cerámicos que forman parte de esta investigación son 119 y han sido escogidos por medio de un análisis visual macroscópico, que buscaba incluir en la muestra fragmentos que representaran el total de los posibles tipos de pastas encontradas en el sitio arqueológico de Puerto Nuevo. Esta selección fue realizada por Dulanto y colaboradores,⁴⁴ a partir de los fragmentos encontrados durante su excavación en el año 2013. La selección incluye criterios de tamaño, localización y tipo de sitio, además de los criterios propios de los cerámicos como estilo, tipo de pasta y forma. De esta manera los fragmentos de cerámicos seleccionados son comparables

entre sí, y permiten realizar sobre éstos un estudio de procedencia. En el Anexo 1 (ver página 71) se encuentran las fotografías correspondientes a los 119 fragmentos de cerámica.

La selección realizada por el departamento de Arqueología, en el marco del proyecto interdisciplinario, encontró 9 tipos de pasta, de manera que los 119 fragmentos recibidos incluyen muestras de cada uno de estos tipos. Como ya se mencionó, esta selección solo incluye fragmentos de cerámica con calidad similar y, además, que hubieran sido obtenidos empleando los mismos métodos y técnicas.

Los códigos internos empleados en este trabajo (de 1 a 119), así como los códigos de las piezas asignados por los arqueólogos, se muestran en el Anexo 2 (ver página 77). Estos códigos tienen la estructura PNXX-YYY-ZZZ, en la que PN hace alusión a Puerto Nuevo, XX al año en que se recabaron los fragmentos, YYY al número de bolsa en el que se almacenó el fragmento y ZZZ al número individual de cada fragmento en la bolsa YYY. Por ejemplo, el fragmento PN13-012-009, corresponde a un fragmento recogido de la zona de Puerto Nuevo el año 2013, recabado en la bolsa 012, siendo el fragmento número 9 de esta bolsa.

Por otro lado, se han recibido 30 azulejos rectangulares preparados con arcillas recogidas de zonas conocidas en Puerto Nuevo. Esta recolección se ha realizado en el marco del proyecto interdisciplinario. En la Tabla 1 se muestran los códigos de estos azulejos, así como las coordenadas geográficas de dónde fueron obtenidos los materiales arcillosos empleados en su fabricación. La Figura 12, muestra la ubicación de estos lugares en la zona.

Tabla 1. Códigos de los azulejos recibidos del departamento de Arqueología junto con la información detallada de la ubicación geográfica de donde fueron recogidas las arcillas empleadas en su fabricación.

Código Arcilla	Coordenada Geográfica	Código Arcilla	Coordenada Geográfica	Código Arcilla	Coordenada Geográfica
GEO0002	0373107 E-8492451 N	GEO0026	0425093 E-8456425 N	GEO0046	0430257 E-8395180 N
GEO0004	0374050 E-8485949 N	GEO0027	0424597 E-8456604 N	GEO0047	0368407 E-8471161 N
GEO0005	0374023 E-8485277 N	GEO0028	0424623 E-8455333 N	GEO0048	0358494 E-8468803 N
GEO0006	0374277 E-8485198 N	GEO0031	0422499 E-8447164 N	GEO0051	0358228 E-8468974 N
GEO0007	0374579 E-8484377 N	GEO0032	0425396 E-8425150 N	GEO0054	0370295 E-8485586 N
GEO0008	0368452 E-8486377 N	GEO0033	0430442 E-8399331 N	GEO0059	0370892 E-8486341 N
GEO0018	0431269 E-8465755 N	GEO0034	0430442 E-8399331 N	GEO0060	0370892 E-8486341 N
GEO0020	0429279 E-8462057 N	GEO0035	0430442 E-8399331 N	GEO0061	0369621 E-8486176 N
GEO0022	0429491 E-8464702 N	GEO0036	0430442 E-8399331 N	GEO0064	0378539 E-8485846 N
GEO0024	0426721 E-8460653 N	GEO0037	0430442 E-8399331 N	GEO0065	0378745 E-8485069 N

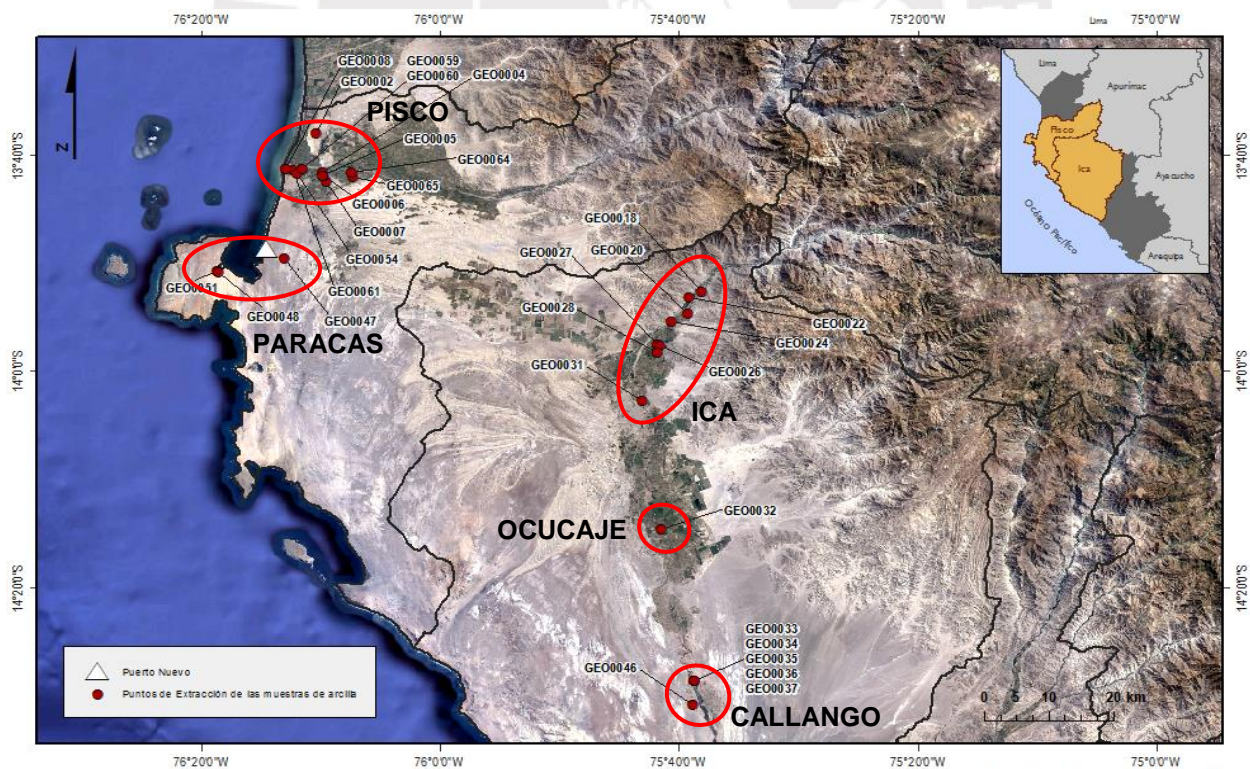


Figura 12. Mapa en el que se muestran la ubicación del sitio de Puerto Nuevo, así como los lugares de los que se extrajo el material arcilloso para la fabricación de los azulejos.

Para la preparación de los azulejos se siguieron dos pasos. Primero, la arcilla fue mezclada con agua y se formaron piezas rectangulares que, posteriormente, fueron secadas al aire. Esta parte fue realizada por el personal del Departamento de Arqueología siguiendo criterios de representatividad. El posterior quemado de estos azulejos se realizó en la Sección Química, siguiendo un perfil de temperatura adecuado, buscando no sobrepasar los 800 °C. Esta parte se realizó en un horno tipo mufla siguiendo el perfil de calentamiento que se muestra en la Figura 13.

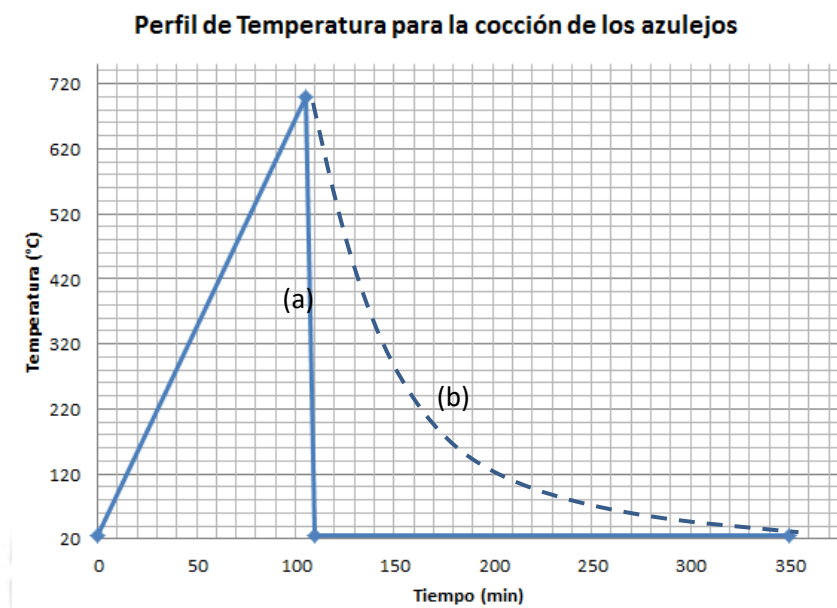


Figura 13. Perfil de temperatura empleado en la cocción de los azulejos. En la línea continua (a), se muestra el perfil programado. Sin embargo, el horno empleado no cuenta con un sistema de refrigeración por lo que el perfil real seguido al enfriar es como el que se observa en (b).

Cada uno de los 119 fragmentos a estudiar, así como los 30 azulejos preparados, presentan una zona de corte que ha sido realizada por una sierra con hoja de diamante con el fin de obtener una lámina delgada para el análisis petrográfico. Esa misma zona, que muestra la pasta interna del fragmento, es la que se ha utilizado para realizar los análisis de XRF. No obstante, se acondicionó antes de su uso. Para ello, tal como se ha reportado en otros trabajos en la bibliografía,^{4,8,29} se limpió primero la superficie con un pincel para, a continuación, realizar el alisado de la superficie utilizando papel lija 800-A, con tamaño de grano de 22 μm . Finalmente, se limpió la superficie de nuevo con un pincel, luego con papel toalla humedecido con agua desionizada y se secaron los fragmentos con aire comprimido. Es importante resaltar que, en esta etapa, se busca eliminar cualquier tipo de contaminación presente en los fragmentos o contaminación cruzada, por lo que la lija y el papel toalla empleado es de un solo uso por fragmento.

4.3. Fluorescencia de rayos X

Se realizó la medición de los espectros XRF de los fragmentos empleando el equipo portátil de XRF. Para el tipo de material que se está analizando se emplearon las condiciones de trabajo recomendadas por el fabricante, es decir, un potencial de 40 kV y una corriente de 10.3 μ A. No se empleó filtro. Estas condiciones son compatibles con las reportadas por trabajos anteriores.^{4,12,27,28} Respecto al tiempo de análisis, se estudió su efecto sobre las mediciones con el fin de obtener un tiempo adecuado para el análisis que se está realizando. Para cada fragmento se plantearon, en función al tamaño de la sección cortada ya alisada, 2, 3 o 4 medidas, con el fin de contar con información de toda la pasta en conjunto.

Al momento de obtener los datos composicionales se debe agregar a la lista de elementos encontrados el pico correspondiente al rodio (producto del efecto Compton entre el ánodo de rodio y el haz de electrones incidente). Este paso es muy importante ya que al ser este pico producto de la naturaleza propia del equipo se espera que no cambie mucho entre fragmentos y, de esta manera, pueda ser usado como referencia para la normalización de las intensidades de los picos del resto de elementos.⁴ Posteriormente, con ayuda del programa ARTAX se determinó el área relativa a cada pico, NPA, expresada en cuentas la que, a su vez, es proporcional al contenido de cada elemento. Estas áreas fueron normalizadas respecto al área del rodio del fragmento en que se encontró un mayor contenido de éste. Los resultados obtenidos para los elementos, luego de retirar al rodio de la composición elemental, constituyen lo que se conoce como composición química relativa expresada como NPA de los elementos (información semicuantitativa).

4.4. Análisis estadístico

Para el tratamiento estadístico se siguió la metodología usual para el análisis de las NPA encontradas mediante XRF, tal como se explica a continuación.^{4,12,26,28,29,38,39} Primero se realizó el PCA, que busca disminuir el número de dimensiones con el fin de distinguir mejor las relaciones entre las composiciones elementales de las piezas. Luego se procedió con el CA para poder construir los grupos composicionales de manera que la diferencia entre miembros de un grupo sea menor que la diferencia entre elementos de grupos diferentes. Finalmente, se realizó el DA con el objetivo de diferenciar mejor los grupos composicionales encontrados. Además, en esta etapa es que se compararon los grupos composicionales encontrados con el grupo de control, constituido por los

azulejos preparados a partir de material arcilloso. A continuación, se detallan los pasos seguidos en cada uno de estos análisis.

4.4.1. Análisis de Componentes Principales

Con las composiciones químicas relativas encontradas para los 119 fragmentos, expresadas como NPA, se procedió a realizar el análisis de componentes principales (PCA). Se han tomado a las composiciones elementales como variables y a los fragmentos como casos. Para evitar que las componentes principales sean controladas solo por algunas de las variables o que solo permitan explicar la anomalía composicional de algún caso, se realizó un análisis de las correlaciones entre cada fragmento. El objetivo de este paso es determinar el grado de similitud entre las composiciones de cada dos fragmentos, a través del coeficiente de correlación, el cual viene dado por la ecuación 7, y adopta valores entre 0 (nula correlación) y 1 (casos iguales):

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(F_i, F_j)}{\sqrt{\text{var}(F_i) \cdot \text{var}(F_j)}} \quad (7)$$

Si alguno de los fragmentos no correlacionara muy bien con el resto de los casos ($r_{ij} < 0.30$), se tendría que estudiar la posibilidad de retirarlo para el cálculo de las componentes principales.⁴² El motivo de esto es que si el caso no correlaciona muy bien con el resto de fragmentos podría ser considerado directamente como atípico, y por tanto, no sería recomendable incluirlo en el PCA ya que éste buscaría explicar la anomalía de este caso antes que buscar relaciones entre fragmentos similares que permitan, luego, construir grupos composicionales. Lo anterior no implica que después del PCA no se puedan encontrar algunos casos atípicos, sino que las componentes principales calculadas de esta manera, expliquen la varianza del total de los casos y no solo la de los atípicos.

Además, previo al cálculo de las componentes principales, se realizan unos ensayos previos, hechos por el mismo programa, que buscan determinar si los datos que se han sometido al PCA son adecuados para un análisis de este tipo. Los ensayos previos son tres: la prueba de KMO, el test de esfericidad de Bartlett y la determinante de la matriz de correlación entre variables. La prueba de KMO mide la correlación entre las variables y se emplea como criterio que el índice KMO debe ser mayor a 0.50. El test de esfericidad de Bartlett compara la matriz de correlaciones con la matriz identidad, y emplea como criterio que el estadístico χ^2 debe ser elevado. Finalmente, la prueba de la determinante de la matriz de correlación entre variables busca determinar si las

variables se encuentran correlacionadas entre sí (este es un presupuesto del PCA). Esto último es cierto solo si la determinante de la matriz de las variables es cero. ^{42,43}

Luego de estos ensayos previos se procedió a realizar el PCA. Como se ha explicado anteriormente, el PCA es una técnica de reducción de dimensiones que busca reemplazar las variables originales por otras, denominadas componentes principales. Estas componentes principales deben ser independientes entre sí, y además explicar una alta proporción de la varianza de las variables originales. El software calculó todas las componentes posibles (iguales en número al total de variables) y fijó por defecto como adecuadas, aquellas componentes que presenten autovalores mayores a 1. Para este número de componentes, se determinó para cada variable su respectiva comunalidad (indicador de la porción de varianza explicada por las componentes). Mientras mayor sea la comunalidad (cuyo máximo valor es 1) se habrá explicado una mayor parte de la varianza de la variable.

Posteriormente, se estableció el número de componentes principales que representasen adecuadamente la variabilidad de la información de los fragmentos. Esta etapa es de suma importancia, ya que esta decisión condicionarará los resultados de los siguientes análisis. Para nuestro caso se empleó el criterio de la varianza, fijándose el número de componentes principales en aquel que explique al menos el límite mínimo de 63.61 % de la varianza. ^{39,42,43} Una vez que se fijó el número de componentes principales, se realizó nuevamente el PCA y se recalcularon las comunalidades. Para distribuir mejor la varianza explicada por las componentes principales calculadas se aplicó el método de rotación de Varimax. Este método es el más empleado para el tipo de análisis que se está realizando, ⁴² ya que permite minimizar el número de variables que explican cada componente principal.

Finalmente, se efectuó la reducción de dimensiones con el número de componentes principales encontrado, y se calcularon las puntuaciones factoriales asociadas a cada fragmento de cerámica.

4.4.2. Análisis de Clúster

Con las puntuaciones factoriales obtenidas en el PCA se realizó la construcción de grupos composicionales. Dado que no se tenía a disposición una clasificación previa, fue necesario explorar primero el número de grupos óptimo en el que podían clasificarse los fragmentos. Una vez conocido este número de grupos óptimo, se procedió a realizar la clasificación de los fragmentos en cada uno de éstos. Para realizar la primera tarea

se empleó el análisis de clúster jerárquico, mientras que para la clasificación de los fragmentos en los grupos se utilizó el análisis de clúster de k-medias.

4.4.2.1. Análisis de clúster jerárquico

Las puntuaciones factoriales obtenidas para los 119 fragmentos de cerámica se sometieron al análisis de clúster jerárquico. Se empleó el método de distancia entre grupos y la distancia euclídea al cuadrado. Se obtuvo como resultado un dendrograma que, como se ha explicado, permite observar las relaciones entre los fragmentos y los posibles grupos en los que se pueden clasificar. Posteriormente, se realizó un análisis de las distancias entre los grupos en función del número de grupos obtenido. A partir de este diagrama, se determinó a partir de qué valor ya no es adecuado aumentar el número de grupos, siendo éste el número de grupos óptimo.

4.4.2.2. Análisis de clúster k-medias

Con el número de grupos óptimo encontrando en la etapa anterior, se realizó la clasificación de los fragmentos en estos grupos. Este análisis se realizó sobre las puntuaciones factoriales calculadas en el PCA empleando el método de k-medias para determinar la pertenencia de cada fragmento a cada grupo.

4.4.3. Análisis Discriminante

Si bien es posible realizar, a partir de los resultados obtenidos con el PCA y el CA, la visualización de los grupos composicionales, no es posible predecir si ésta permitirá diferenciar claramente los grupos. Es por esto que se procedió a realizar el análisis discriminante el cual se realizó sobre las puntuaciones factoriales de los fragmentos.

4.4.4. Análisis del material arcilloso

Los azulejos preparados funcionaron como material de control, y permitieron contrastar las composiciones de los 119 fragmentos con la de éstos. Si las composiciones químicas entre fragmentos y azulejos son similares, se puede entonces concluir que la fuente de materia prima de los fragmentos sería la de la arcilla recogida. La manera de determinar el grado de similitud entre las composiciones de fragmentos y azulejos es a través de variables independientes que permitan establecer relaciones entre ambas. Como se ha mencionado anteriormente, el PCA permite encontrar variables con estas características. Por tanto, se transformó la información composicional, expresada como NPA, de los 30 azulejos de arcilla al espacio de las componentes principales y de las funciones discriminantes encontradas. Esto permitió observar cómo se distribuyen los

30 azulejos de arcilla respecto a los grupos composicionales encontrados para los 119 fragmentos de cerámica.



5. Resultados y Discusión

5.1. Determinación de las condiciones de medida

En primer lugar, se determinó el tiempo adecuado para las mediciones por pXRF. Para esto, se midió una misma pieza (PN13-401-004) a diferentes tiempos, 60, 90, 120 y 200 segundos, empleando un potencial de 40kV y una corriente de 10.30 μ A, condiciones recomendadas por el fabricante. En la Figura 14 se muestran los espectros obtenidos para la pieza PN13-401-004 medidos a los tiempos elegidos.

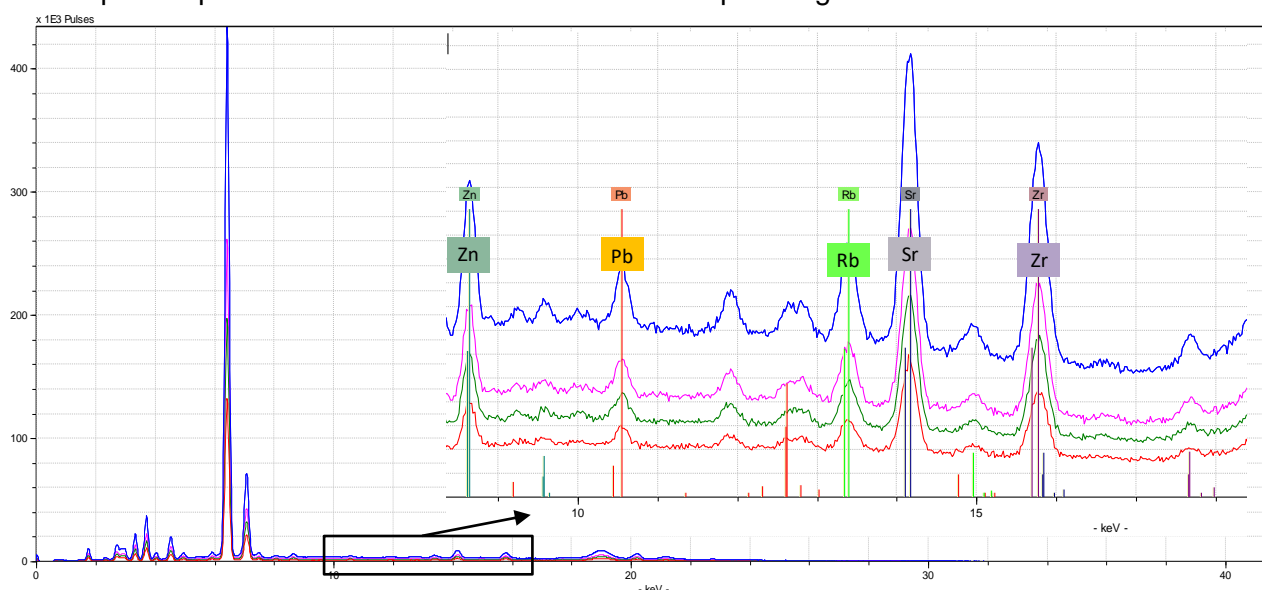


Figura 14. Espectros de XRF, obtenidos por medio del software ARTAX, de la pieza PN13-401-004 a 60 s (rojo), 90 s (verde), 120 s (violeta) y 200 s (azul).

Como se puede observar en la zona ampliada de la figura 14 la relación señal/ruido para los picos de los elementos encontrados es mayor para el tiempo de análisis a 200 s. Además, los picos de Pb, Zn, Rb, Sr y Zr presentan una mejor resolución y diferenciación respecto al fondo. Esto permite una mejor identificación de los elementos y es especialmente importante para el caso de aquellos que se encuentren en baja concentración pues podrían, de otra manera, confundirse con el fondo. Esta mejora de detalle para los espectros medidos a 200 s es de gran utilidad si se está estudiando la procedencia de fragmentos cerámicos debido a que el perfil de elementos presentes (incluidos aquellos que se encuentren a nivel de traza) es determinante para establecer qué elementos se encuentran verdaderamente en el cerámico.

Una vez que se decidió usar 200 s como tiempo de medida, no se consideró aumentar más el tiempo debido a que el área neta de los picos de los elementos presentes, parámetro que es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, se

observó que era prácticamente independiente del tiempo. Estos resultados se encuentran en la Tabla 2, en la que se muestran las intensidades netas de los picos (NPA) para el Fe y el Rh (empleado en la normalización de los espectros), las cuales no cambian significativamente con el tiempo de análisis (coeficiente de variación de 0.81 %).

Tabla 2. Intensidades netas de los picos para el Fe y Rh obtenidas a 60, 90, 120 y 200 s y su cociente de normalización.

	Tiempo (s)			
	60	90	120	200
NPA (Fe), cuentas	1 109 590	1 655 031	2 205 121	3 652 383
NPA (Rh), cuentas	43 821	64 975	88 235	145 016
Fe/Rh	25,32	25,47	24,99	25,19

De este modo, se ha elegido un tiempo de análisis de 200 s para la medición de las 119 piezas cerámicas y los 30 azulejos de arcilla. Este tiempo de medición es consistente con los reportados en trabajos anteriores para estudios de procedencia empleando pXRF. ^{4,12,26,28,29,38,39}

5.2. Interpretación de los espectros pXRF y determinación de la composición química relativa

Los espectros obtenidos fueron analizados empleando el software ARTAX. En la Figura 15 se muestra un espectro XRF típico de una pieza cerámica, en este caso la PN13-012-009. Se observa la presencia de 15 elementos: K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, y Pb. A esta lista se agrega el Rh, cuya presencia esta explicada por la naturaleza del equipo. De igual manera, se han interpretado todos los espectros pXRF correspondientes a las diferentes medidas de los 119 fragmentos de cerámica y los 30 azulejos de arcilla. En todos los casos se han encontrado los mismos 15 elementos que en la pieza PN13-012-009, a los que también se agregó el Rh, con el fin de normalizar los posteriores resultados. Luego, con esta lista de 16 elementos encontrados para todos los casos, se procedió a extraer, mediante el software ARTAX, las correspondientes NPA de los elementos presentes en las piezas. Como se ha mencionado anteriormente, se han realizado 2, 3 o 4 medidas por caso, por lo que, para cada fragmento de cerámica, la NPA correspondiente a un elemento es el promedio de las NPA encontradas en las diferentes mediciones.

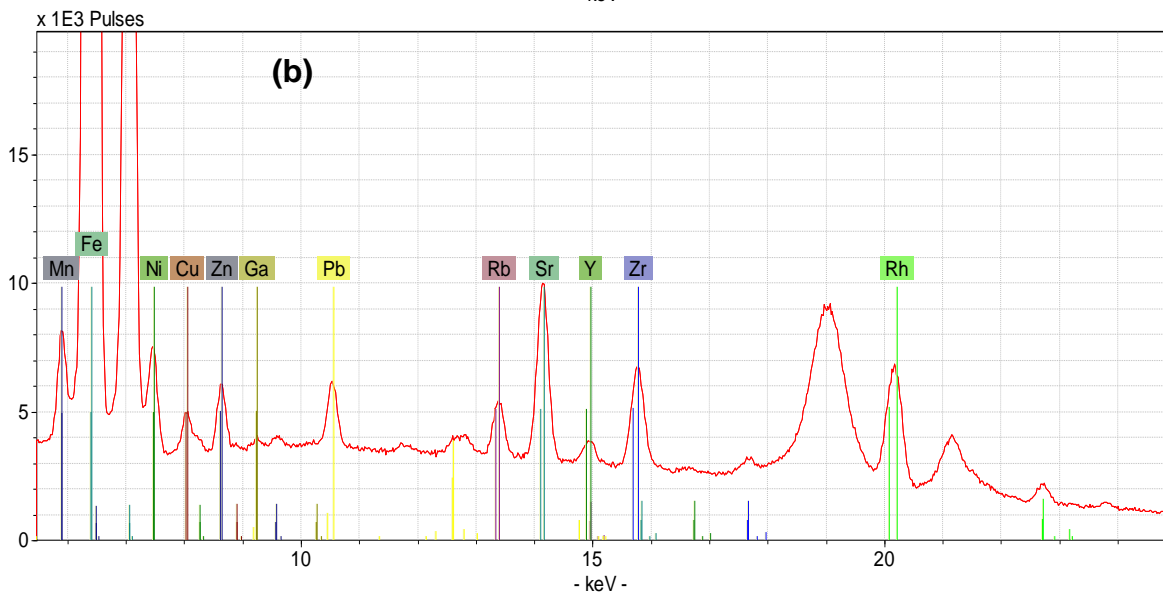
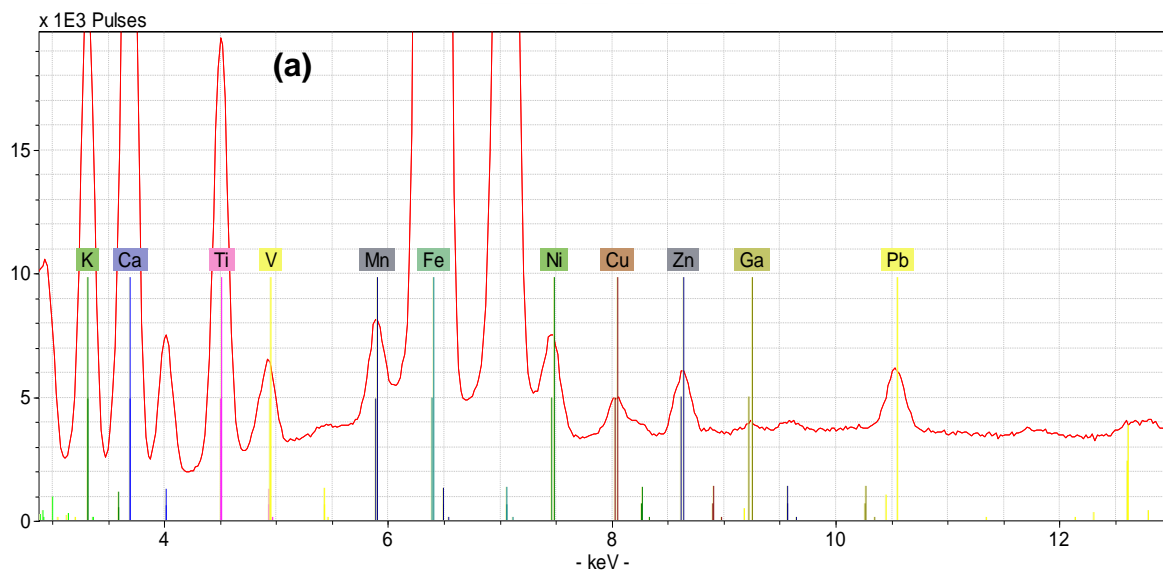
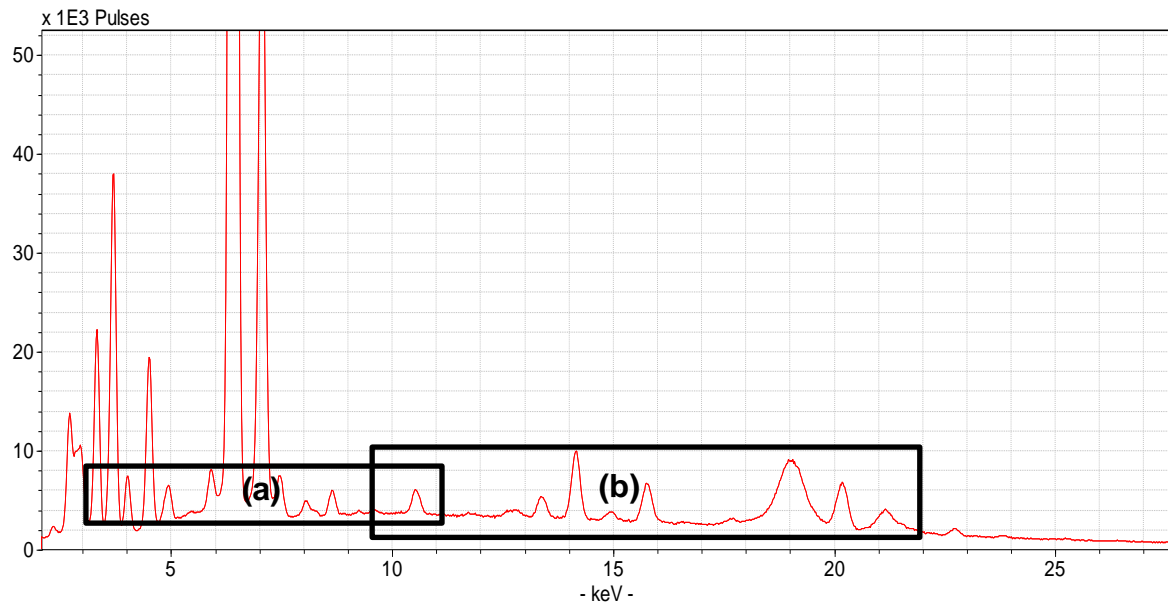


Figura 15. Espectro pXRF de la pieza PN13-012-00, en el que se muestran los 15 elementos encontrados, además del Rh. En la zona (a) se muestran los elementos encontrados a baja energía, mientras en la (b) los encontrados a alta energía.

Una vez determinadas las NPA para cada pieza, se procedió a la normalización con respecto al pico del Rh, tomando como referencia el fragmento de cerámica de mayor NPA para el Rh (pieza PN13-522-005). Luego de esta operación se retira al Rh de la composición de los fragmentos y el resultado viene a ser la composición química elemental expresada como NPA para los 119 fragmentos y para los 30 azulejos. Los resultados numéricos se encuentran en el Anexo 3.

5.3. Análisis de componentes principales

Como se indicó inicialmente, antes de realizar el PCA se analizaron las correlaciones entre las muestras. En el Anexo 4 se muestra la matriz de correlación calculada. Como se puede observar, los coeficientes de correlación encontrados son mayores que 0.99 lo que significa que todos los fragmentos presentan composiciones químicas similares, por lo que no se necesitó retirar ningún caso para realizar los análisis siguientes. Una vez que se determinó que todos los casos tienen una buena correlación entre ellos se procedió a realizar el análisis de componentes principales.

Tal como se explicó en la parte experimental, antes de realizar el PCA se realizaron tres ensayos previos: la prueba de KMO, el test de Bartlett y la prueba de la determinante de la matriz de correlación de variables. En la Tabla 3 se muestran los resultados para estos tres ensayos. El índice de KMO es un valor aceptable, ya que debía ser mayor a 0.50. La prueba de esfericidad de Bartlett presenta un estadístico χ^2 de 1068.162, que es un número elevado, lo que indica que existe correlación entre las variables. Finalmente, la determinante de la matriz de variables es de 7.32×10^{-5} que, aunque no es cero es muy cercano, por lo que se puede concluir que las variables están correlacionadas entre sí. Estos tres resultados indican que nuestros datos son adecuados para un análisis de componentes principales.

Tabla 3. Resultados de los ensayos previos sobre la pertinencia de un PCA sobre los datos composicionales.

Ensayos previos para el PCA		Resultado
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo	KMO	0.686
	χ^2	1 068.162
Prueba de esfericidad de Bartlett	Significancia	0
	Determinante	7.32×10^{-5}

Luego de que se ha determinado que los datos son adecuados para un PCA se procedió a realizar su cálculo. Tal como se explicó en la parte experimental, el programa calcula todas las componentes principales posibles y fija por defecto como adecuadas aquellas con autovalores mayores a 1. De esta manera, se obtuvo como resultado 15 componentes principales (igual en número a las 15 variables que se analizó), de las cuales las 6 primeras tenían autovalores mayores a 1. En la Tabla 4 se muestran las varianzas explicadas por cada una de las componentes principales, así como la varianza acumulada.

Tabla 4. Varianzas explicadas por cada una de las 15 componentes principales calculadas y varianza acumulada.

Componente	Autovalor	% de varianza	% acumulado
1	4,63	30,85	30,85
2	2,57	17,12	47,98
3	1,85	12,34	60,32
4	1,40	9,30	69,61
5	1,05	7,03	76,64
6	1,02	6,80	83,44
7	0,58	3,89	87,33
8	0,51	3,40	90,73
9	0,31	2,06	92,79
10	0,28	1,90	94,69
11	0,22	1,48	96,17
12	0,19	1,24	97,41
13	0,16	1,06	98,46
14	0,13	0,89	99,35
15	0,10	0,65	100,00

Como resultado de este primer PCA se consideraron 6 componentes principales las que explican el 83.44 % de la varianza total. Como se ha explicado anteriormente, en un PCA la porción de varianza que es explicada por las componentes recibe el nombre de comunalidad. En la Tabla 5 se muestran los resultados para las comunalidades encontradas al realizar el PCA para las 6 componentes principales, con autovalores mayores a 1, calculadas por defecto por el programa. Para todos los casos se explica al menos el 72 % de la varianza de cada variable.

Tabla 5. Comunalidades encontradas para las 15 variables cuando el número de componentes principales ha sido fijado en 6 por defecto por el programa.

VARIABLES	COMUNALIDADES
Ca	0,859
Cu	0,854
Fe	0,885
Ga	0,720
K	0,779
Mn	0,840
Ni	0,841
Pb	0,929
Rb	0,853
Sr	0,831
Ti	0,847
V	0,828
Y	0,747
Zn	0,878
Zr	0,824

Luego, se procedió a determinar el número óptimo de componentes principales que representen adecuadamente la variabilidad de la información de los casos. Como se ha explicado anteriormente, al realizar un PCA lo que se busca es explicar la mayor porción de la varianza de las variables empleando el menor número de factores interpretables. Ya que este tipo de análisis es de carácter exploratorio, es decir, que no se tienen parámetros con los que contrastar la información que expliquen los factores, existen solo criterios para determinar el número de factores adecuados, y queda a decisión del investigador elegir un criterio u otro.

El criterio de Kaiser (empleado por defecto por el software), sugiere 6 componentes principales. Sin embargo, es conocido que este método tiende a sobrestimar el número de componentes adecuadas. Por otra parte, el criterio de la varianza explicada (el más ampliamente usado) sugiere 4 componentes, ya que éstas explican el 69.61 % de la varianza, que es más que el límite mínimo necesario de 63.21 % ³⁹ para este tipo de investigación.

De esta forma, se eligieron las 4 primeras componentes principales. Esta decisión puede ser explicada también a partir del análisis de los autovalores (ver Tabla 4), ya que los factores 5 y 6 presentan autovalores muy cercanos a 1 por lo que su implementación sería dudosa.

Además, si se analizan las cargas factoriales calculadas fijando en 6 y 4 componentes principales respectivamente (ver Tabla 6) se observa que no existe diferencia entre las cargas para las 4 primeras componentes principales. Se puede apreciar también, para las componentes 1, 2 y 3, que las cargas de todas las variables, a excepción del Pb y Zn, son altas, por lo que correlacionan bien con las variables y explicarían la mayor parte de su varianza. Dado que estos tres factores solo explican el 60.32 % de la varianza, que es menos que el límite inferior de 63.21 %, se debe elegir algún componente más.

Tabla 6. Cargas factoriales calculadas para 6 y 4 componentes principales.

	Componentes							Componentes			
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4
Ca		0,53		-0,383	-0,525		Ca		0,53		-0,383
Cu		0,711		0,448			Cu		0,711		0,448
Fe		0,892					Fe		0,892		
Ga	0,714			0,39			Ga	0,714			0,39
K	0,681		0,442		0,341		K	0,681		0,442	
Mn	-0,425	0,689			0,307		Mn	-0,425	0,689		
Ni	0,818						Ni	0,818			
Pb				-0,479	0,402	0,693	Pb				-0,479
Rb	0,648		0,588				Rb	0,648		0,588	
Sr	0,771				-0,403		Sr	0,771			
Ti	0,613	0,406	-0,41				Ti	0,613	0,406	-0,41	
V	0,422	0,321	-0,683				V	0,422	0,321	-0,683	
Y	0,487		0,664				Y	0,487		0,664	
Zn	0,362			0,634		0,578	Zn	0,362			0,634
Zr	0,85						Zr	0,85			

Las componentes 4, 5 y 6 presentan menos cargas elevadas con las variables que las componentes 1, 2 y 3, es decir, no correlacionan bien con las variables. Pero, ya que con solo las tres primeras componentes no se tenía una que presentara cargas elevadas para el Zn y el Pb y dado que la componente 4 justamente presenta cargas elevadas en estos elementos, se decidió agregar esta componente. Esto permite también superar el límite inferior, al alcanzar el 69.61 % de la varianza de las variables.

Añadir una quinta, sexta o incluso una séptima componente principal adicional, implicaría explicar más varianza, pero a cambio de agregar factores que no correlacionen bien con las variables. El posible efecto de lo anterior es que, o bien su impacto en el análisis es mínimo o bien impedirían que las relaciones que puedan existir entre las variables puedan ser encontradas.

De lo explicado anteriormente, se ha determinado que 4 componentes principales son adecuadas para representar los datos composicionales. En la Tabla 7 se muestran las nuevas comunalidades encontradas para estos 4 componentes principales. Se puede observar, a partir de las comunalidades encontradas para las 15 variables, que para todas estas se explica, al menos, el 54 % de la varianza, a excepción del Pb.

Tabla 7. Comunalidades encontradas para las 15 variables para los casos sometidos al PCA para los 4 componentes principales fijados.

Variabes	Comunalidades
Ca	0,568
Cu	0,748
Fe	0,864
Ga	0,681
K	0,663
Mn	0,745
Ni	0,815
Pb	0,286
Rb	0,847
Sr	0,665
Ti	0,710
V	0,754
Y	0,730
Zn	0,543
Zr	0,824

Una vez que se decidió fijar en 4 las componentes principales se aplicó el método de rotación de Varimax (el más empleado en la bibliografía) para minimizar el número de variables que expliquen cada componente principal. En la Tabla 8 se muestran las nuevas varianzas encontradas para las componentes principales rotadas. Como se aprecia, se ha distribuido mejor la varianza, esencialmente entre las primeras tres componentes, evitando así que la primera componente principal concentre demasiada información.

Tabla 8. Varianza explicada por los componentes principales antes y después de la rotación por el método de Varimax.

Componente	Sin rotación			Rotación Varimax		
	Autovalor	% de varianza	% acumulado	Autovalor	% de varianza	% acumulado
1	4,63	30,85	30,85	3,11	20,72	20,72
2	2,57	17,12	47,98	3,05	20,35	41,07
3	1,85	12,34	60,32	2,68	17,87	58,94
4	1,40	9,30	69,61	1,60	10,67	69,61

Definido el número de componentes principales, así como el método de rotación, se procedió a determinar los valores de las cargas factoriales para determinar el peso relativo que tiene cada variable en cada componente principal. En la Tabla 9 se muestran las cargas factoriales de cada una de las 4 componentes principales para cada elemento. Como se puede observar, el contenido de Sr, Ti, V está relacionado con el componente principal 1; el contenido de K, Y, Rb con el componente 2; el contenido de Cu, Fe, Mn está vinculado con el componente 3 y la presencia de Zn y Pb es explicada por el componente 4. Esto último podría ser evidencia de la presencia de casos atípicos, ya que el componente 4 existe básicamente para explicar el contenido de Zn y, en menor medida, el contenido de Pb. El contenido del resto de elementos, Ca, Ga, Ni y Zr, son explicados por más de dos componentes principales

Tabla 9. Cargas factoriales de los 4 componentes principales encontrados con el método de rotación de Varimax. Se muestran solo las cargas factoriales mayores a 0.30.⁴²

Elementos	Componente principal			
	1	2	3	4
Ca	0,564			-0,427
Cu			0,816	
Fe			0,82	-0,386
Ga	0,394	0,51		0,513
K		0,769		
Mn			0,849	
Ni	0,492	0,369	-0,514	0,416
Pb				-0,48
Rb		0,908		
Sr	0,697	0,375		
Ti	0,825			
V	0,843			
Y		0,846		
Zn				0,687
Zr	0,529	0,526	-0,516	

Con las 4 componentes principales ya encontradas, se procedió a efectuar la reducción de dimensiones. De este modo, la composición química relativa de cada fragmento de cerámica, un espacio de 15 variables, fue reemplazada por los valores que adoptaron las componentes principales para cada caso con objeto de obtener un espacio de 4 dimensiones. Los diferentes valores que se calcularon para las componentes principales para cada fragmento cerámico reciben el nombre de puntuaciones factoriales. En el Anexo 5 se muestran los valores de éstas para cada uno de los 119 fragmentos. De esta manera, se ha transformado la información composicional de los fragmentos a un espacio representado por las 4 componentes principales, que explican la mayoría de la varianza de los datos originales y que, gracias a que los datos a partir de los cuales se obtuvieron fueron sometidos a un análisis previo, se garantiza la independencia entre ellas, lo que permitirá la identificación de las posibles relaciones que existan entre los fragmentos de cerámica.

5.4. Análisis de clúster

Con la composición de los fragmentos reducida al espacio de las 4 componentes principales se procedió a realizar el análisis de clúster. Primero se realizó el análisis de clúster jerárquico para determinar el número de grupos óptimo. Finalmente, mediante el análisis de clúster k-medias, se obtuvo la clasificación de los fragmentos de cerámica en los grupos composicionales encontrados.

5.4.1. Análisis de clúster jerárquico

Como resultado de este análisis se obtuvo el dendrograma que se muestra en la Figura 16. Si bien es posible identificar en esta figura algunos de los grupos composicionales, al menos los de los fragmentos ubicados en la zona superior del dendrograma, no se puede determinar el número de grupos óptimo solo a partir de este diagrama. Por ejemplo, si los grupos composicionales estuvieran separados 10 unidades entre sí (línea roja trazada en el dendrograma), se obtendría que el número adecuado de grupos a esta distancia sería de 2. Si cambiamos la distancia entre grupos a aproximadamente 8 unidades (línea verde), se formarían ahora 3 grupos, y si la distancia fuera de alrededor de 2.5 unidades (línea azul) tendríamos 15 grupos. De esta manera, se tiene que conforme la distancia entre los grupos disminuye, el número de grupos adecuado aumentará. Es por esto que, para encontrar el número de grupos óptimo, se realizó un análisis de las distancias entre los grupos en función del número de grupos adecuado que origina. Esta información se obtuvo mediante el software SPSS y se muestra en el Anexo 6. Estos datos se encuentran graficados en la Figura 17 y permitieron determinar a partir de qué valor ya no es adecuado aumentar el número de grupos

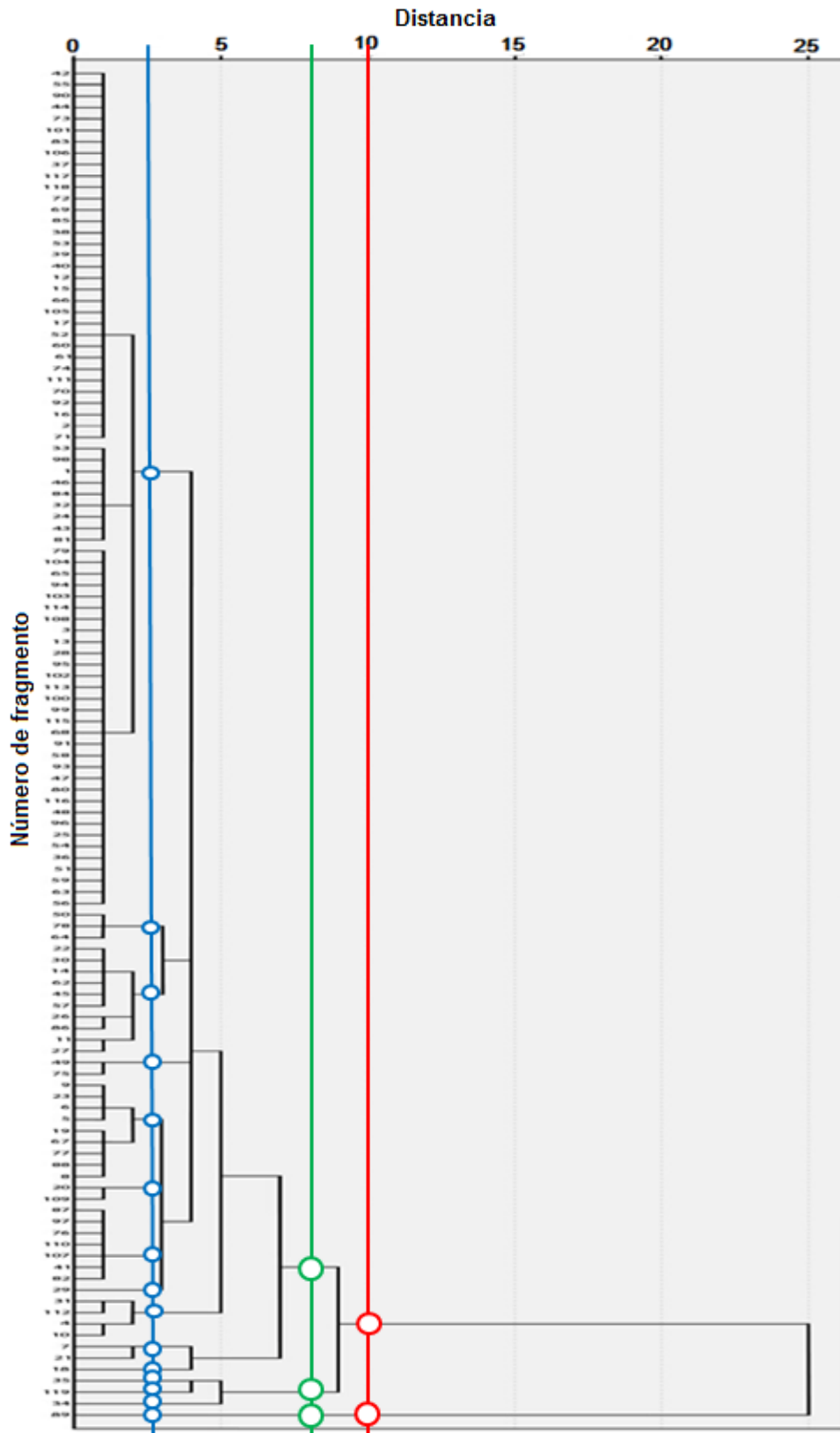


Figura 16. Dendrograma encontrado por el análisis de clúster jerárquico para los 119 fragmentos de cerámica de la zona de Puerto Nuevo. Las líneas rojas, verde y azul corresponden a una separación de grupos de 10, 8 y 2.5 unidades, respectivamente.

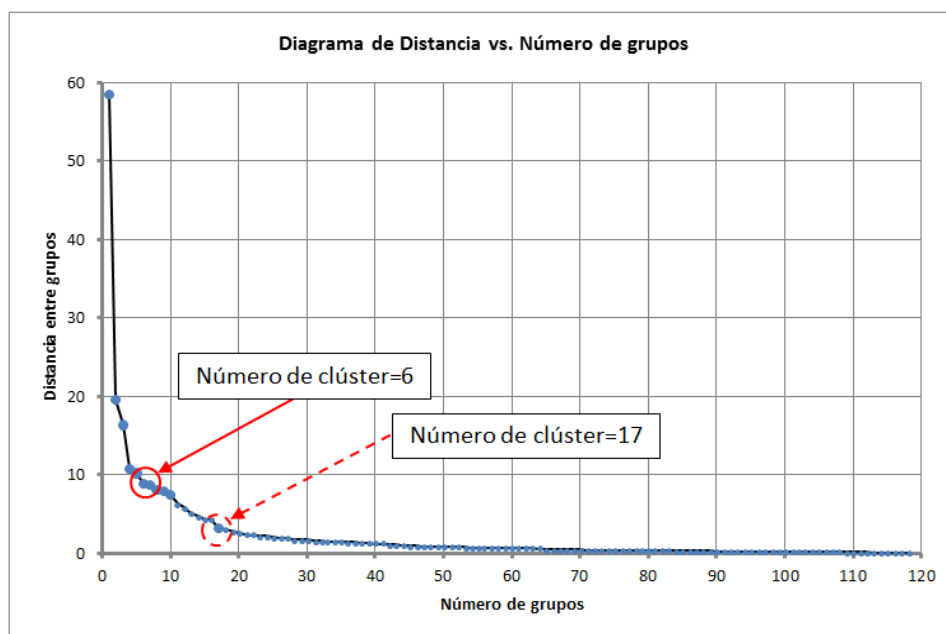


Figura 17. Diagrama de distancia entre grupos respecto al número de grupos encontrado.

Como se muestra en esta figura, a partir de un número de grupos igual a 6, por cada grupo adicional que se incluya, no se estaría disminuyendo significativamente la distancia entre grupos. El otro posible punto de corte para el número de grupos sería en 17, que es prácticamente el último punto en el que la distancia entre grupos cambia drásticamente. Sin embargo, este número de grupos es demasiado elevado para los 119 fragmentos de cerámica que se están analizando, ya que se obtendrían grupos composicionales demasiado pequeños, además de que seguramente se estén subdividiendo grupos composicionales más grandes. De este modo, a partir de este primer análisis de clúster, se ha determinado que el número de grupos óptimo que clasifica adecuadamente los 119 fragmentos de cerámica es de 6 grupos composicionales.

Sin embargo, la identificación de estos 6 grupos composicionales no se puede realizar trazando una distancia que origine 6 grupos directamente sobre el dendrograma de la Figura 16. Como ya se ha explicado, el análisis de clúster jerárquico tiende a ser afectado por los casos extraños y por incorrectos ordenamientos tempranos, por lo que su función es únicamente de proporcionar el número de grupos óptimo. La clasificación de los fragmentos en estos 6 grupos se realizó en la siguiente etapa. A pesar de lo anterior, y ya que el dendrograma refleja las distancias entre los fragmentos, se empleará este diagrama para mostrar en él una comparación de la posterior clasificación de los fragmentos en los grupos composicionales, frente a los que se obtuvieron por medio de otra clasificación (análisis por petrografía).

5.4.2. Análisis de clúster k-medias

Con el número de clúster ya determinado en 6, se procedió a clasificar los 119 fragmentos en estos grupos composicionales por medio del análisis de clúster de k-medias. Para realizar esta clasificación se emplearon las puntuaciones factoriales obtenidas en el PCA, las mismas que se emplearon para el análisis de clúster jerárquico. En el Anexo 7 se puede encontrar para cada uno de los 119 fragmentos de cerámica el clúster al que pertenecen. En la Tabla 10 se muestra un resumen del número de piezas clasificadas en cada uno de estos clúster. Puede observarse, a partir de la clasificación realizada por el método de k-medias que, de los 6 clúster determinados en el análisis de clúster jerárquico, 4 de estos corresponden a grupos composicionales y los 2 restantes constituyen 2 casos extraños. En la Figura 18 se muestran estos grupos composicionales encontrados junto con los dos casos extraños, proyectados en el dendrograma de la Figura 16. Además, en el Anexo 8 se muestran las fotografías de los fragmentos agrupados de acuerdo a la clasificación del análisis de clúster k – medias. Puede observarse que los grupos composicionales 3 y 4 (líneas azules y rojas respectivamente) están muy bien diferenciados del resto de los casos. Sin embargo, los grupos composicionales 1 y 2 (líneas verdes y violeta respectivamente) presentan mayor variabilidad y no están tan bien compactados como los grupos 3 y 4. El caso extraño 2 (línea gris) está claramente diferenciado del resto, mientras el caso extraño 1 (línea naranja) está asociado a dos piezas. Estas dos piezas, pertenecientes a los grupos composicionales 1 y 4, habrían sido clasificadas de manera errónea por el método jerárquico (a partir del cual se construyó el dendrograma), y por tanto, gracias a la clasificación del método de k-medias se habría logrado agruparlas adecuadamente.

Tabla 10. Resumen del número de casos en cada grupo composicional encontrado

Clúster	Clasificación	Casos
1	Grupo Composicional 1	29
2	Caso extraño 1	1
3	Grupo composicional 2	14
4	Grupo Composicional 3	39
5	Grupo Composicional 4	35
6	Caso Extraño 2	1
Total		119

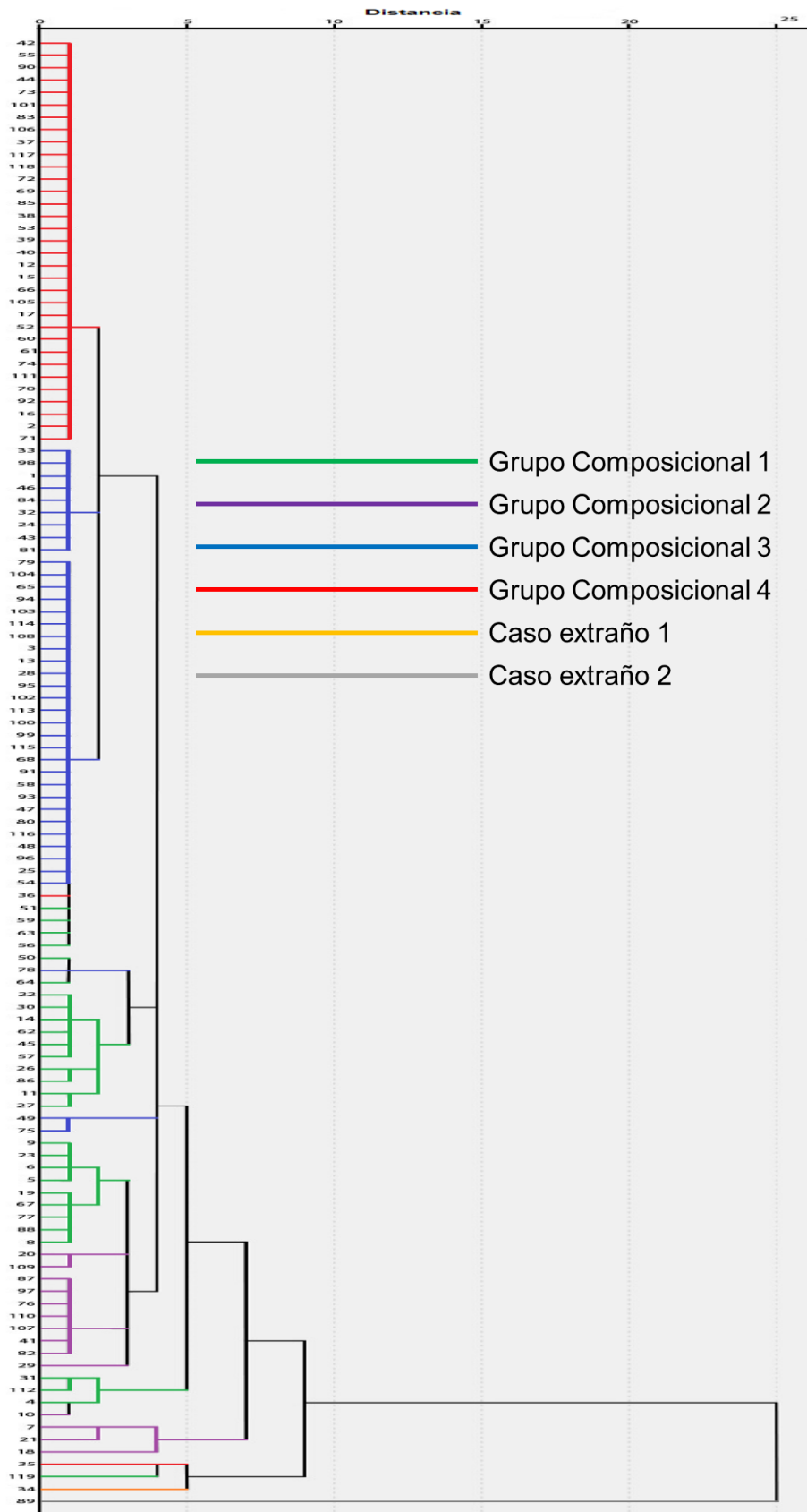


Figura 18. Dendrograma encontrado por medio de análisis de clúster jerárquico en el que se muestran los 4 grupos composicionales y los 2 casos extraños determinados por el análisis de clúster de k-medias.

Los resultados para el contenido de cada elemento, expresado como su NPA, para el total de fragmentos, así como en cada grupo composicional encontrado se muestran en la Tabla 11. Como se ha desarrollado anteriormente, se han determinado cuatro grupos composicionales y dos casos extraños. El caso extraño 1 presenta una composición elemental diferente en todo aspecto al resto de grupos composicionales. Por su parte, el caso extraño 2 presenta un mayor contenido de Cu, Mn, y Zn y un menor contenido de Zr. Respecto a los grupos composicionales encontrados, se tiene que el Grupo Composicional 1 está caracterizado por un alto contenido de Mn y un bajo contenido de Sr, V, Y y Zn. El Grupo composicional 2 se asocia con una elevada presencia de Ca, Fe, Cu y Mn. Estos dos primeros grupos no son tan compactos como los dos grupos restantes, los que presentan menores coeficientes de variación (% C.V.) para las cantidades de los elementos presentes. El Grupo Composicional 3 muestra una menor abundancia de Mn pero una mayor de Zr y Rb, mientras que el Grupo Composicional 4 se caracteriza por un bajo contenido de Mn pero elevado de Zr y V. Debido a que todos los elementos diferenciadores se encuentran en un alto peso en cada una de las componentes, se puede considerar que la selección de las cuatro componentes principales ha sido adecuada.

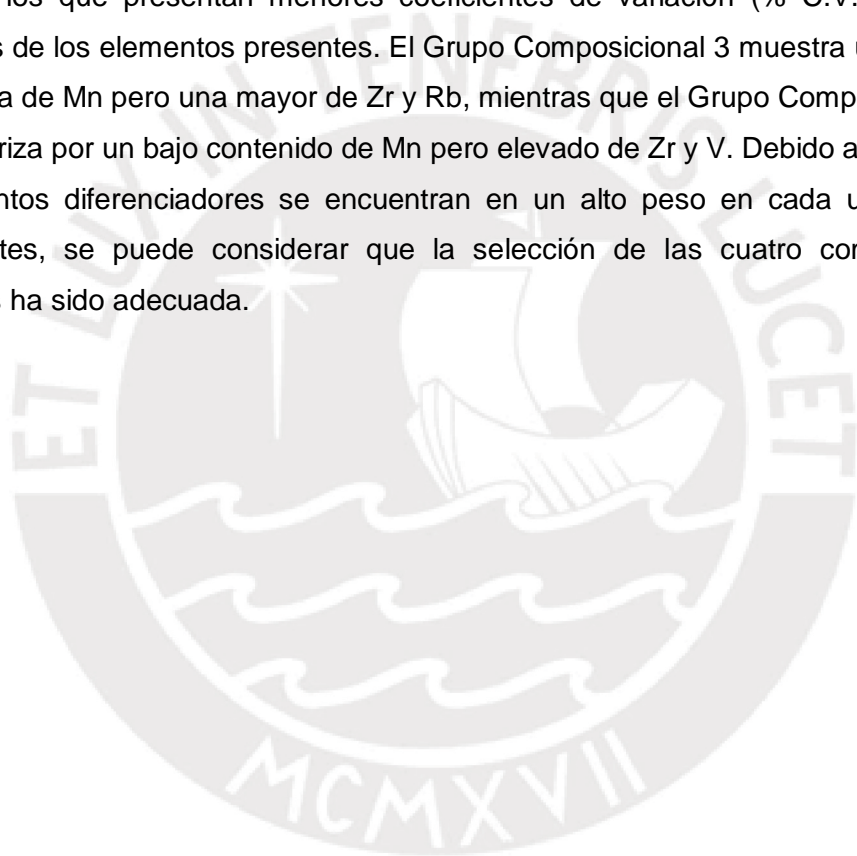


Tabla 11. Composición química (expresada como NPA) de los cuatro grupos composicionales y los dos casos extraños encontrados.*

	Total (n=119)	Grupo 1 (n=29)	Grupo 2 (n=14)	Grupo 3 (n=39)	Grupo 4 (n=35)	Caso extraño 1	Caso extraño 2
	Media (%C.V.)	Media (%C.V.)	Media (%C.V.)	Media (%C.V.)	Media (%C.V.)	Valor	Valor
Ca	279721 (18,3%)	247627 (17,6%)	353772 (16,9%)	274249 (10,9%)	285872 (14,7%)	199013	252555
Cu	18518 (20,7%)	19144 (15,6%)	23277 (19,2%)	16855 (6,6%)	17359 (6,3%)	14061	43617
Fe	3727061 (17,9%)	3999741 (12,4%)	4937809 (9,2%)	3355708 (12,4%)	3472200 (10,2%)	2473241	3525592
Ga	3888 (14,9%)	3642 (18,6%)	3573 (14,7%)	4055 (10,2%)	4074 (9,0%)	1491	4758
K	124528 (15,0%)	118328 (15,1%)	118853 (13,5%)	135749 (12,7%)	121538 (10,6%)	52042	123244
Mn	49459 (29,1%)	62805 (27,0%)	60335 (23,9%)	42378 (14,7%)	41641 (11,4%)	38072	71311
Ni	42575 (4,8%)	40602 (3,4%)	40601 (3,8%)	43879 (2,8%)	43687 (2,5%)	36419	43789
Pb	22029 (17,8%)	20979 (8,1%)	25071 (40,1%)	22644 (7,8%)	21207 (6,9%)	16699	19997
Rb	26599 (17,7%)	24499 (17,6%)	29295 (15,1%)	29391 (14,1%)	24803 (10,7%)	11204	19141
Sr	79869 (16,3%)	66947 (14,2%)	82195 (15,6%)	83309 (13,3%)	86398 (9,7%)	44067	95137
Ti	137933 (12,7%)	126140 (12,7%)	146108 (12,3%)	137104 (7,8%)	148222 (8,7%)	64697	110897
V	15980 (18,7%)	13928 (14,0%)	17303 (14,9%)	14595 (8,4%)	18961 (13,2%)	9212	13419
Y	4786 (25,2%)	4155 (22,6%)	5273 (30,4%)	5808 (12,6%)	4099 (12,9)	1583	3642
Zn	23719 (14,5%)	21930 (15,4%)	21360 (7,1%)	24121 (5,5%)	25230 (6,0%)	15872	47873
Zr	43658 (21,2%)	32828 (16,9%)	42475 (14,3%)	49456 (9,7%)	48180 (11,1%)	11848	21711

* % C.V. es el coeficiente de variación porcentual.

Ya que la información composicional se encuentra representada por las componentes principales, es posible entonces observar los grupos encontrados en el espacio de 4 dimensiones de estas componentes. Dada la imposibilidad de mostrar lo anterior en un solo gráfico, se recurre a emplear proyecciones. En la Figura 19 se muestran los grupos composicionales encontrados en el espacio de las dos primeras componentes principales.

Si bien la clasificación en 6 clúster se ha realizado con el fin de maximizar las diferencias entre los grupos composicionales, no es posible observar claramente estas diferencias

en el espacio de los dos primeros componentes principales. Lo que se observa es que algunos de los grupos composicionales se encuentran superpuestos en esta proyección. En el Anexo 9 se muestran las otras 5 proyecciones posibles, en las que los grupos composicionales también se encuentran superpuestos unos a otros. Dado que a partir de las distintas proyecciones de las 4 componentes principales encontradas no ha sido posible diferenciar adecuadamente los grupos composicionales encontrados, se procedió a realizar el análisis discriminante.

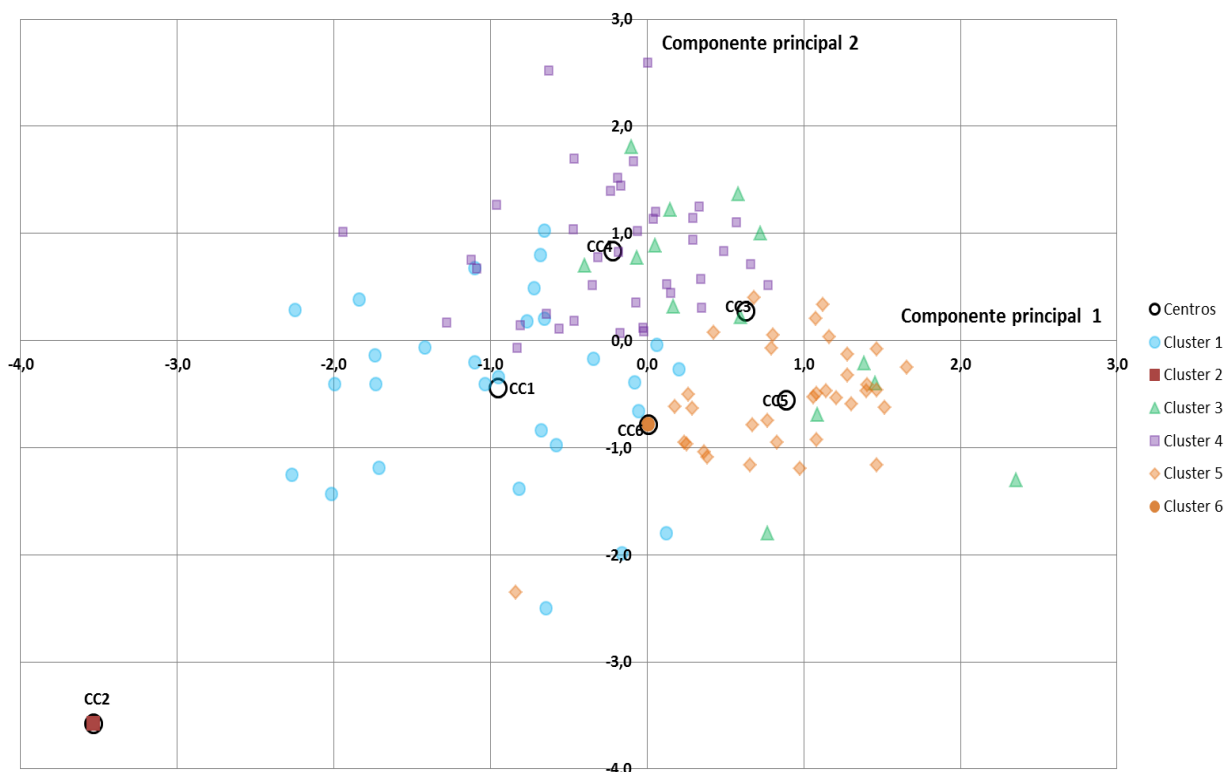


Figura 19. Diagrama del espacio de las componentes principales 1 y 2, en el que se muestran los cuatro grupos composicionales (clúster 1, 3, 4 y 5) y los dos casos extraños (clúster 2 y 6).

5.5. Análisis discriminante

El análisis discriminante se realizó sobre las puntuaciones factoriales calculadas para cada fragmento, lo cual permitió encontrar que las dos primeras funciones discriminantes explicaban el 79.7 % de la varianza. En la Figura 20 se muestra, en el espacio de las funciones discriminantes 1 y 2, los 4 grupos composicionales junto con los dos casos extraños. Como se observa, en el espacio de las funciones discriminantes es posible, ahora sí, diferenciar claramente los 4 grupos composicionales y los 2 casos extraños. Si bien aún existe alguna superposición entre algunos casos, esta es mínima.

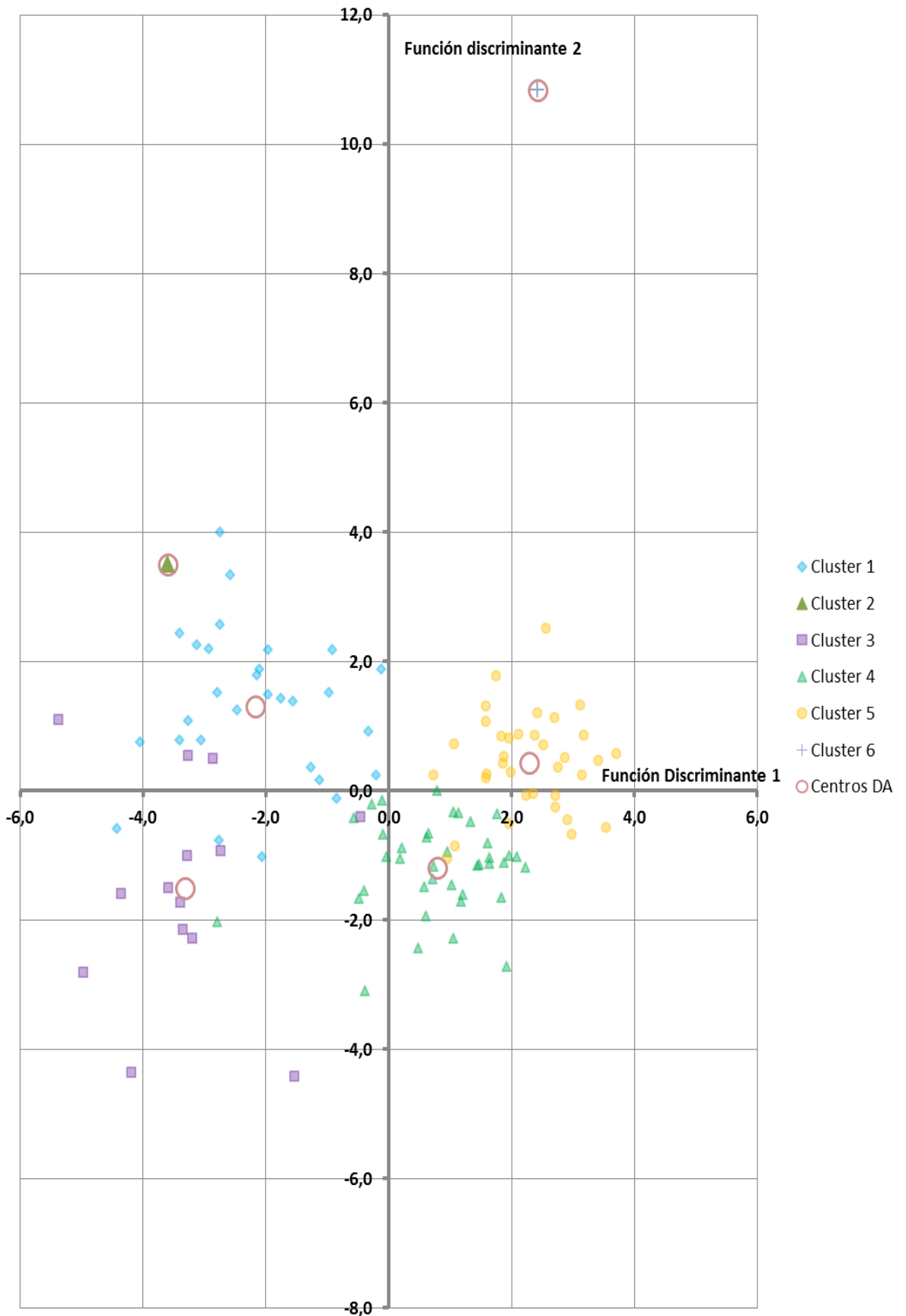


Figura 20. Representación en el espacio de las funciones discriminantes 1 y 2 en la que se muestran los clúster encontrados. Además, marcados como centros DA, se muestran los centros para cada uno de los clúster encontrados.

En resumen, puede decirse que los análisis estadísticos han permitido clasificar los 119 fragmentos de cerámica, empleando 4 componentes principales, en 4 grupos composicionales y 2 casos extraños. Además, es en el espacio de las primeras dos funciones discriminantes que la diferencia entre estos grupos se aprecia claramente.

5.6. Análisis del material arcilloso e interpretación de los grupos composicionales

El material arcilloso, a partir del cual se han fabricado los 30 azulejos, funcionó como material de control, lo que permitió establecer la similitud entre éstos y los fragmentos. Como se ha mencionado anteriormente, el PCA permite encontrar variables independientes, que son las más adecuadas para encontrar las relaciones de similitud. Por tanto, se ha transformado la información composicional, expresada como NPA, de los 30 azulejos de arcilla al espacio de las 4 componentes principales y de las 2 funciones discriminantes encontradas anteriormente, para observar cómo se distribuyen los 30 azulejos de arcilla respecto a los grupos composicionales encontrados en los 119 fragmentos de cerámica. En el Anexo 10 se muestra, para los 30 azulejos de arcilla, las puntuaciones calculadas para los 4 componentes principales y las 2 funciones discriminantes.

Con las componentes principales y las funciones discriminantes encontradas, se procedió a proyectar los datos composicionales de las arcillas en el espacio de las componentes principales 1, 2 y en el de las funciones discriminantes 1, 2. En las Figuras 21 y 22 se muestran, respectivamente, en estos espacios, los 4 grupos composicionales junto con los dos casos extraños. Además, sobrepuestos a éstos, se encuentran los resultados para el material arcilloso del grupo de control. Como ya se explicó, y se puede observar en la Figura 21, el espacio de las componentes principales no es útil para realizar el análisis del material arcilloso ya que no diferencia claramente los grupos composicionales encontrados, y podría más bien llevar a conclusiones erradas.

En la Figura 22, en el espacio de las funciones discriminantes 1 y 2, se puede observar que el Grupo Composicional 2 (Clúster 3) está superpuesto con el material arcilloso de control por lo que podría tratarse de cerámicas de origen local. De igual manera el caso extraño 2 no coincide con ninguno de los resultados para el grupo de control, por lo que sería candidato a ser considerado de posible origen foráneo. El Grupo Composicional 1 (Clúster 1) y el caso extraño 1 podrían ser de origen local ya que, si bien no hay una gran coincidencia con el grupo de control, se encuentran razonablemente cerca de algunos elementos de éste.

El caso de los Grupos Composicionales 3 y 4 (Clúster 4 y 5) y su relación con el grupo de arcillas de control no queda muy claro. Como se muestra en la Figura 22 no se encuentra ninguna coincidencia de estos grupos con el grupo de control, más bien éste parece rodearlo. Sin embargo, solo hay cinco elementos del grupo de control en la zona de los Grupos 3 y 4, lo que podría ser consecuencia de que no se recogió material arcilloso vinculado con la zona de origen de estos fragmentos. Esto último se refuerza con el hecho de que los grupos composicionales encontrados no se logran diferenciar claramente entre sí en ninguno de los espacios de los componentes principales, ya que esto sólo se ha logrado en el análisis discriminante. De esta manera, los grupos composicionales encontrados serían, en última instancia, subgrupos de una misma unidad de posible origen local, a excepción del caso extraño 2 que sí logra diferenciarse del resto de fragmentos desde el primer análisis.



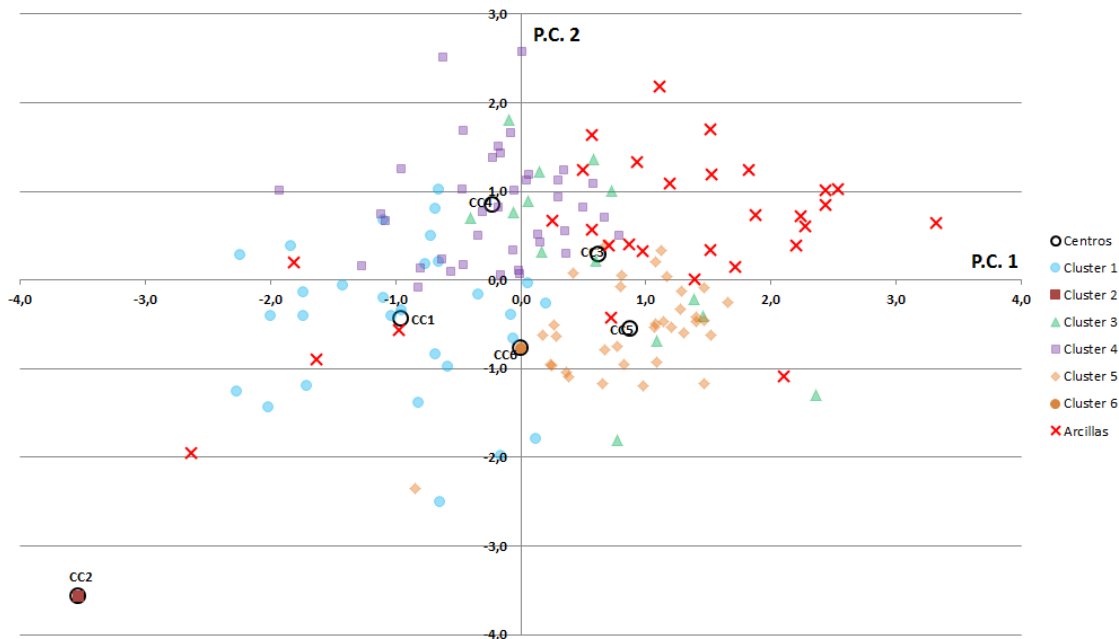


Figura 21. Diagrama del espacio de los componentes principales 1 y 2 en el que se muestran los cuatro grupos composicionales encontrados (clúster 1, 3, 4 y 5), los dos casos extraños (clúster 2 y 6) y el material arcilloso de control. Además, marcados como centros, se muestran para cada clúster sus respectivos centros.

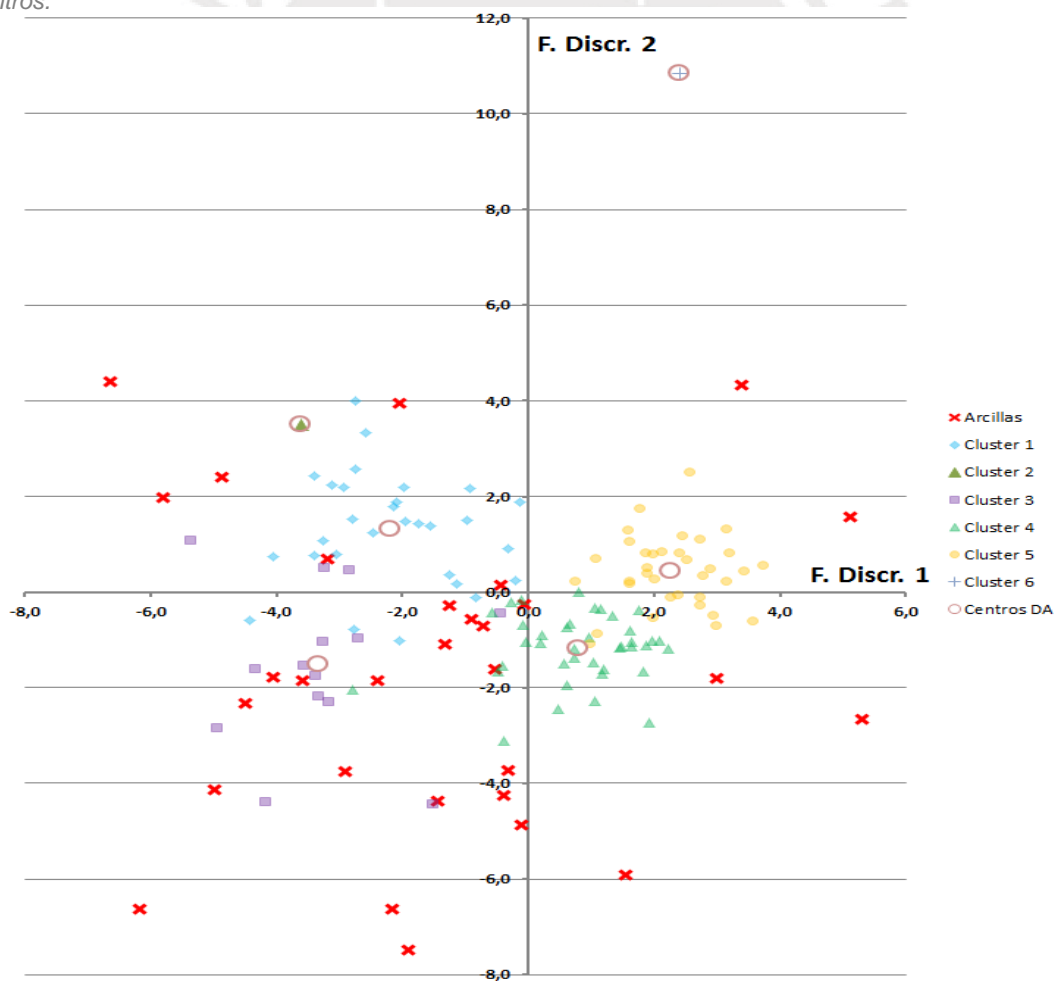


Figura 22. Representación en el espacio de las funciones discriminantes 1 y 2 en la que se muestran los grupos composicionales, casos extraños y el material arcilloso de control. Además, marcados como centros DA, se muestran los centros de cada clúster encontrado.

5.7. Evaluación de los grupos composicionales encontrados por pXRF frente a los encontrados por análisis petrográfico.

Los resultados para la clasificación de los fragmentos de cerámico encontrados mediante pXRF fueron contrastados con los obtenidos por Dulanto y colaboradores por medio de análisis petrográfico. ⁴⁴ Básicamente, lo que encontraron estos autores en su investigación fueron 6 grupos petrográficos, clasificados de la A a la F, que incluyen 106 de los 119 fragmentos. Los 13 fragmentos restantes son clasificados por ellos como atípicos. En la Tabla 12 se muestra un resumen de la distribución de los fragmentos, tanto en los grupos encontrados por pXRF como en el análisis petrográfico.

Tabla 12. Distribución de los 119 fragmentos de cerámica en los grupos composicionales encontrados por pXRF así como por petrografía.

		Grupos pXRF					Total	
		1	Caso Extraño 1	2	3	4		Caso Extraño 2
Grupos Petrográficos	A	8	1	4		2		15
	B	10					1	11
	C				14	14		28
	D	3			8	6		17
	E	3			11	9		23
	F			9	1	2		12
	Atípicos	5		1	5	2		13
	Total	29	1	14	39	35	1	119

Se puede observar que los grupos composicionales encontrados por pXRF incluyen en su mayoría fragmentos de diversos grupos petrográficos. Lo anterior se sustenta en el hecho de que la pXRF no discrimina grupos en base a criterios de, por ejemplo, ausencia o no de materia orgánica, evidencia que sí se aplica al caso del análisis petrográfico. Es por esto que los grupos de la pXRF incluyen fragmentos correspondientes a más de un grupo petrográfico. Por otra parte, los grupos encontrados por petrografía sí se logran diferenciar mejor respecto de los grupos construidos por pXRF. Esto se explica por el hecho de que los grupos encontrados mediante pXRF son realmente diferentes entre sí y no sería esperable que un mismo grupo petrográfico tuviera participación de muchos fragmentos de grupos pXRF diferentes.

A pesar de que se ha mencionado que los grupos composicionales encontrados mediante pXRF incluyen en su interior varios de los grupos petrográficos, es posible diferenciar cada uno de estos grupos petrográficos como subgrupos dentro de una unidad mayor constituida por el grupo encontrado por pXRF. Para realizar esta evaluación se empleará el dendrograma de la Figura 18 (página 51). A partir de ese dendrograma se ha preparado la Figura 23, que contiene la clasificación de los grupos de cerámica encontrados por Dulanto y colaboradores junto con la clasificación encontrada en esta investigación. Como se puede observar, el grupo composicional 1 engloba a los grupos petrográficos A y B, pero a partir del dendrograma de la Figura 23 es posible encontrar estos grupos claramente diferenciados. El grupo composicional 2 incluye básicamente al grupo petrográfico F. El grupo composicional 3 diferencia dos subgrupos, uno que incluye en esencia fragmentos del grupo C, y otro subgrupo constituido por fragmentos de los grupos C y E. Finalmente, el grupo composicional 4 abarca también fragmentos de los grupos C y E.

El hecho de que los fragmentos de los grupos petrográficos C y E no se diferencien en los resultados encontrados mediante pXRF puede ser consecuencia de que tienen composición química muy similar a pesar de que, desde el punto de vista petrográfico, puedan diferenciarse en color, número de inclusiones o composición mineralógica. Respecto al grupo petrográfico D, éste se encuentra distribuido en los grupos composicionales 3 y 4, y esto sería explicado por el hecho de que su composición mineralógica es similar tanto a C como a E, y que uno de los criterios empleados por Dulanto y colaboradores en la diferenciación de los grupos C y E es la ausencia de restos orgánicos. Este contraste entre ambos resultados, petrografía y pXRF, muestra cierta consistencia entre ambas técnicas. El hecho de que los grupos A, B y F se logren diferenciar claramente no dejaría dudas de que se trata de subgrupos. El caso de los grupos C, D y E; y los grupos composicionales 3 y 4, si bien no es del todo clara la diferenciación, sí que guarda consistencia con lo encontrado por petrografía.

Respecto a la procedencia de los fragmentos encontrados en el sitio de Puerto Nuevo ya se ha mencionado que estos se tratarían de fragmentos de origen local y que los grupos encontrados serían subgrupos de una misma unidad, a excepción del fragmento del caso extraño 2. En la Figura 24 se puede observar los grupos composicionales encontrados por pXRF, así como el material arcilloso de control en el espacio de las dos funciones discriminantes. Además, se está mostrando en esta figura, la ubicación geográfica de la zona en que se recogió el material arcilloso.

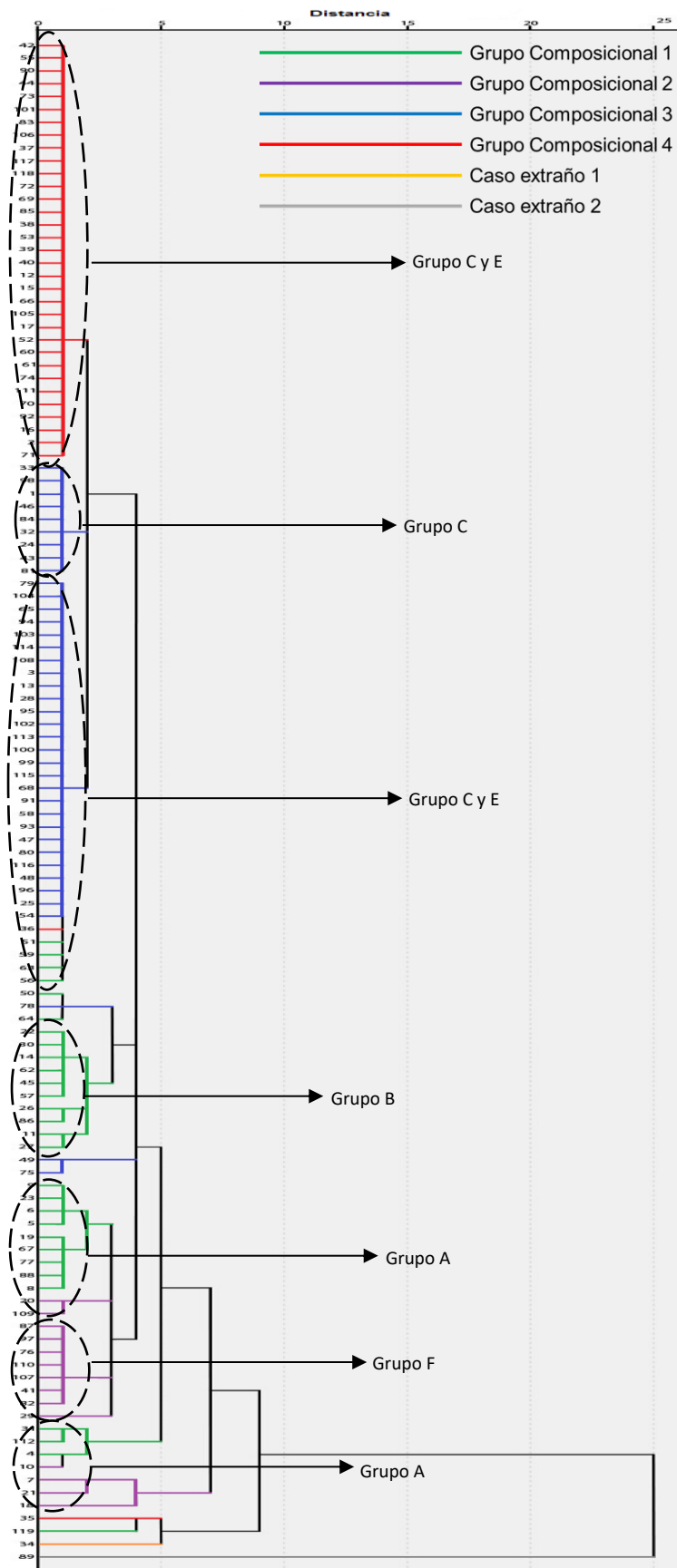
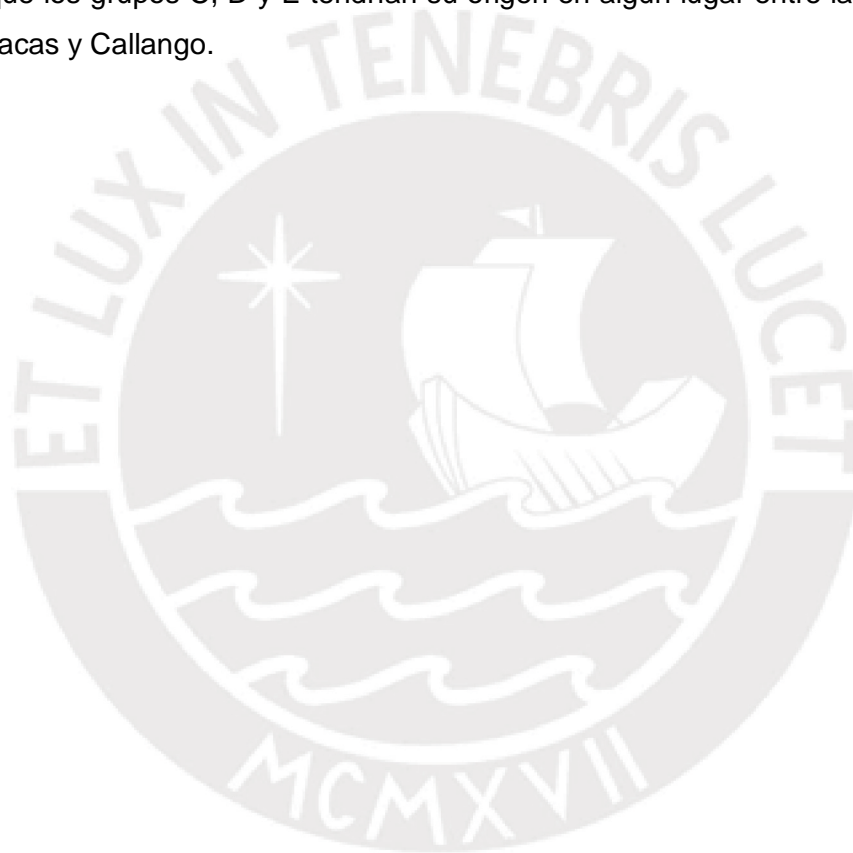


Figura 23. Dendrograma en el que se incluyen los grupos petrográficos encontrados (A-F) junto con la clasificación realizada por medio de pXRF. Los grupos composicionales 1-4 se muestran con líneas de color verde, morado, azul y rojo, respectivamente

A partir de la Figura 24 se puede observar que el grupo composicional 1 podría corresponder a la zona de Callango. El grupo composicional 2, por su parte, parece proceder de las zonas de Ica y Ocucaje (y alguno de Pisco). Sin embargo, los grupos composicionales 3 y 4 no coinciden con ninguna de las zonas de origen del material arcilloso. Probablemente, estos fragmentos tengan su fuente de arcilla en alguna zona ubicada entre las zonas de muestreo de Paracas, Pisco y Callango. En la Figura 25, se muestra el mismo gráfico de la Figura 24, solo que en lugar de los grupos composicionales encontrados por pXRF se muestran los grupos petrográficos. Se puede observar la consistencia entre ambas técnicas, ya que los grupos petrográficos A y B correspondería a la zona de Callango, el grupo F procedería de la zona de Ica y Ocucaje, mientras que los grupos C, D y E tendrían su origen en algún lugar entre las zonas de Pisco, Paracas y Callango.



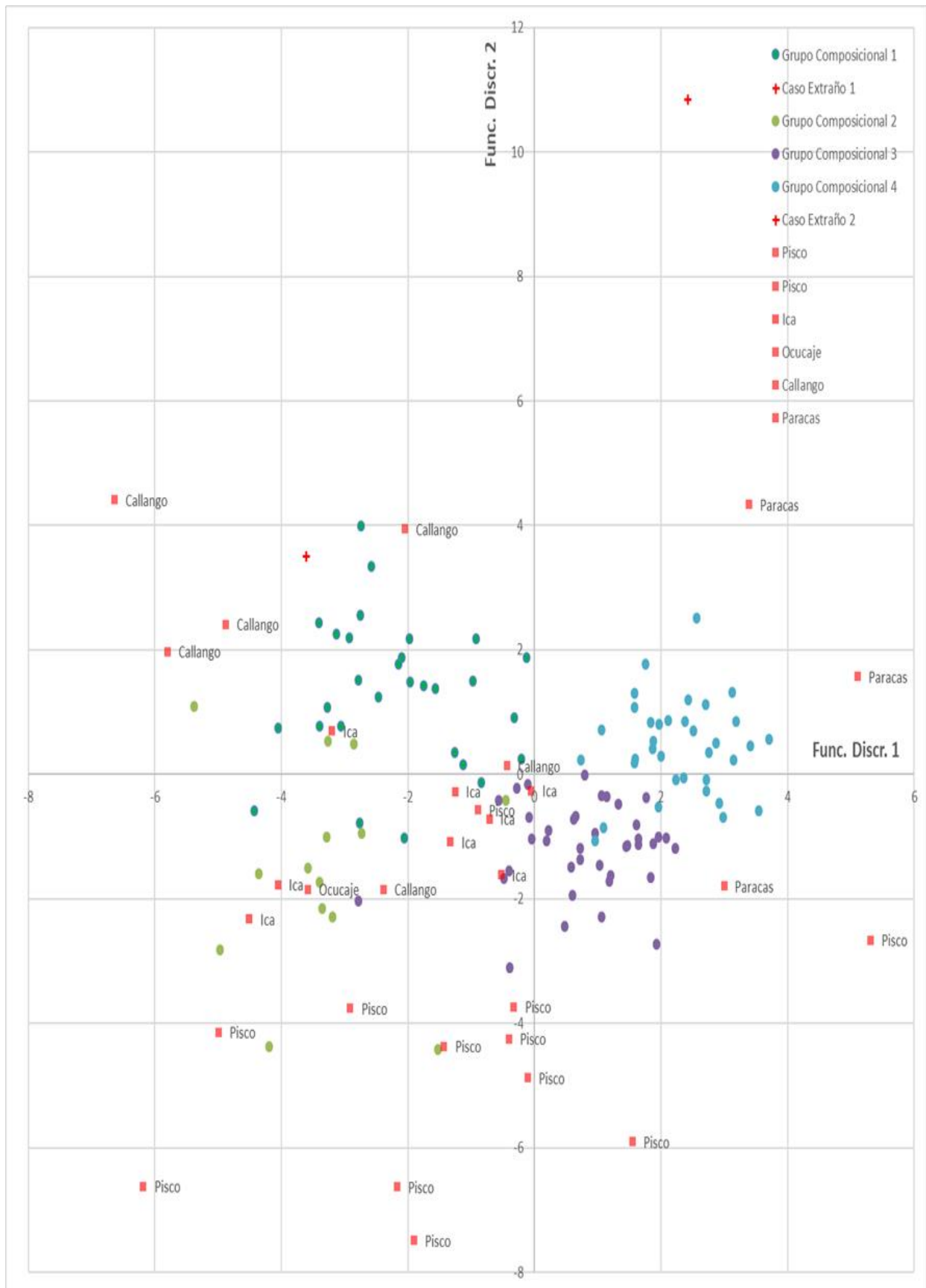


Figura 24. Grupos composicionales encontrados por pXRF respecto de la ubicación del material arcilloso de control en el espacio de las dos funciones discriminantes.

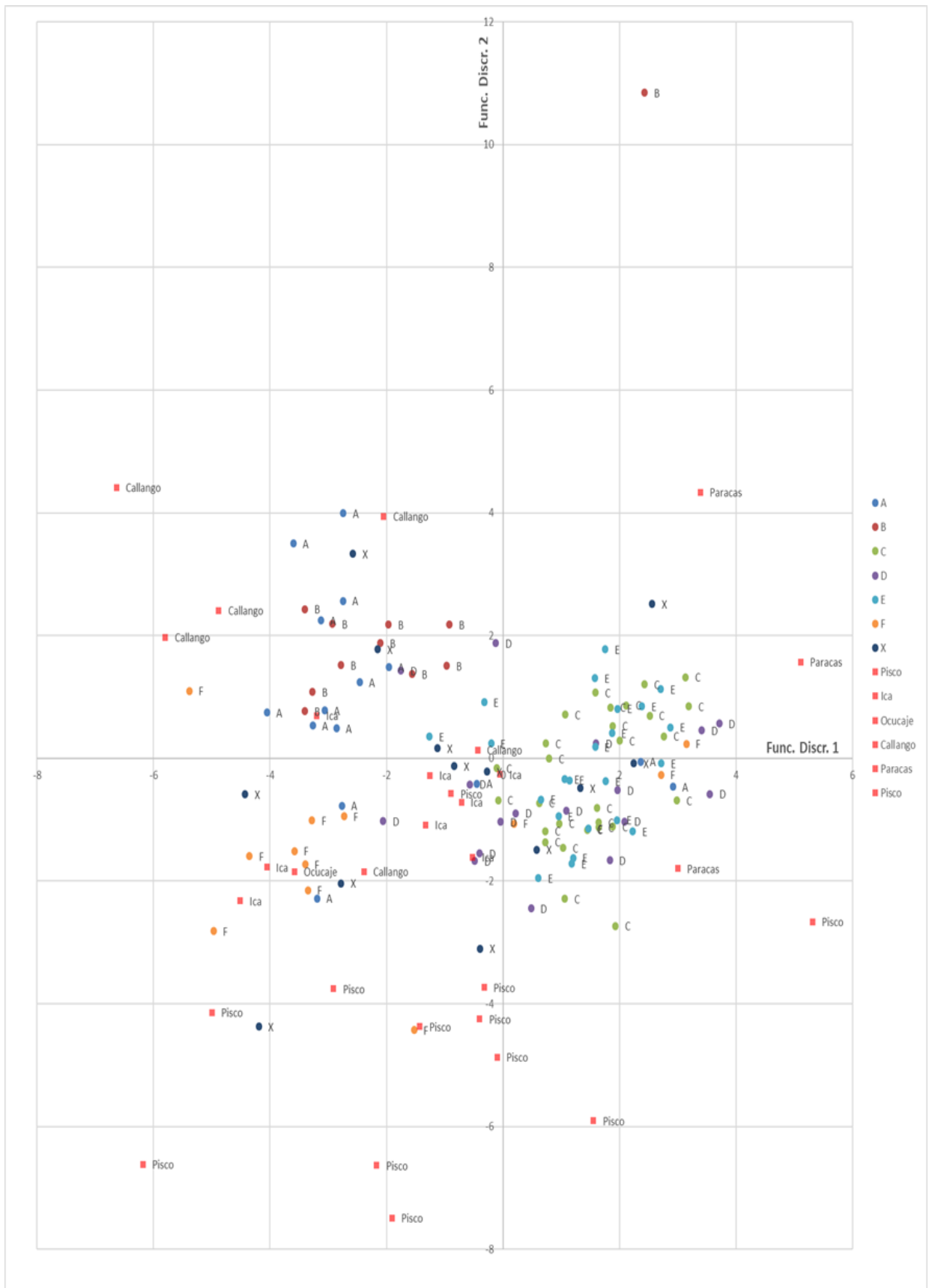


Figura 25. Grupos encontrados por Petrografía respecto de la ubicación del material arcilloso de control en el espacio de las dos funciones discriminantes.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

La fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) combinada con el análisis estadístico secuencial, se han empleado para analizar los 119 fragmentos provenientes de la zona de excavación de Puerto Nuevo. Este uso combinado de análisis ha permitido clasificar los fragmentos en 6 clúster, de los que 4 de ellos serían grupos composicionales y los otros dos constituirían casos extraños.

Mediante la comparación de los grupos composicionales encontrados con el material arcilloso de control, se ha determinado que dos de ellos serían con seguridad de origen local. Sin embargo, el grado de similitud entre los grupos composicionales indicaría que todos los grupos composicionales encontrados serían más bien subgrupos de una única unidad de origen local. Además, se tiene un fragmento (caso extraño 2) que sería posiblemente de origen foráneo.

La clasificación obtenida por medio de pXRF coincide en buena parte con los resultados encontrados mediante análisis petrográfico, lo cual se cree puede estar relacionado con la naturaleza propia de la petrografía, que puede presentar una mayor variabilidad en los resultados debido a que depende en gran medida de la capacidad y experiencia de análisis del petrógrafo.

Teniendo en cuenta los resultados de esta investigación se puede decir que se ha encontrado una metodología adecuada para el estudio de fragmentos de cerámico empleando pXRF. Además, se han establecido las pautas para el tratamiento de la información composicional obtenida. Estas pautas están dentro del análisis estadístico secuencial propuesto, que incluye el análisis de componentes principales (PCA), análisis de clúster (CA) y análisis discriminante (DA).

Si bien aún existe cierto debate respecto al empleo de una técnica como la pXRF en estudios de procedencia, si esta se combina con un análisis estadístico secuencial como el realizado en este trabajo, se han obtenido resultados lo suficientemente buenos como para poder constituir a la pXRF en una opción que no deje dudas de su respuesta.

6.2. Recomendaciones

Como se ha mostrado, los grupos composicionales 3 y 4, en el espacio de las funciones discriminantes, no presentan superpuesto a ellos ninguno de los azulejos de arcilla preparados, sino que estarían rodeados por estos. Debido a esto, se recomienda extender el número de azulejos de control elaborados a partir de material arcilloso recogido de la zona de Puerto Nuevo. Esta recomendación también se sustenta en que, además, solo hay 5 azulejos de control en la zona de los grupos composicionales 3 y 4 por lo que se debería aumentar el número de azulejos, recolectando material arcilloso de zonas cercanas a estos azulejos (0002, 0006, 0047, 0048 y 0051), lo cual resolvería el problema de la asignación.

Debido a que al analizar los 119 fragmentos se han conseguido 4 grupos composicionales, de los que 3 grupos composicionales presentan tamaño similar mientras uno de ellos menor número de elementos, se recomienda aumentar el número de fragmentos a analizar. Es así que un aumento del número de fragmentos permitiría ofrecer una mejor distribución de los mismos o, en su defecto, confirmar que el grupo composicional 2 es uno minoritario.

Como se ha demostrado en el presente trabajo, un estudio de procedencia empleando pXRF conduce a resultados similares a los ofrecidos por el análisis petrográfico. Sin embargo, debería contrastarse los resultados de la pXRF con los de alguna otra técnica de mayor rendimiento analítico, por ejemplo, el LA-ICP-MS. Un estudio de este tipo, permitiría conocer las ventajas y limitaciones de un estudio por pXRF.

7. Bibliografía

- (1) Rice, P. M. *Pottery Analysis: a sourcebook*, 2nd ed.; University of Chicago Press: Chicago, 2005.
- (2) Ghezzi, I. *Bull. I'IFEA* **2011**, *40* (1), 1–29.
- (3) Nigra, B. T.; Faull, K. F.; Barnard, H. *Anal. Chem.* **2014**, *87* (1), 3–18.
- (4) Speakman, R. J.; Little, N. C.; Creel, D.; Miller, M. R.; Iñáñez, J. G. *J. Archaeol. Sci.* **2011**, *38* (12), 3483–3496.
- (5) Bissett, T. G.; Claassen, C. P. *North Am. Archaeol.* **2016**, *37* (3), 143–169.
- (6) De Francesco, A. M.; Crisci, G. M.; Bocci, M. *Archaeometry* **2008**, *50* (2), 337–350.
- (7) Speakman, R. J.; Shackley, M. S. *J. Archaeol. Sci.* **2013**, *40* (2), 1435–1443.
- (8) Shugar, A. N. *ACS Symp. Ser.* **2013**, *1147*, 173–193.
- (9) Frahm, E. *J. Archaeol. Sci.* **2013**, *40* (2), 1080–1092.
- (10) Jamieson, R. W.; Hancock, R. G. V; Beckwith, L. A.; Pidruczny, A. E. *Archaeometry* **2013**, *55* (2), 198–213.
- (11) Attaelmanan, A. G.; Mouton, M. *J. Archaeol. Sci.* **2014**, *42* (1), 519–524.
- (12) Goren, Y.; Mommsen, H.; Klinger, J. *J. Archaeol. Sci.* **2011**, *38* (3), 684–696.
- (13) D'Altroy, T.; Hastorf, C. *Empire and Domestic Economy*; Nueva York: Kluwer Academic., 2001.
- (14) Dulanto, J. *Boletín Arqueol. PUCP* **2013**, *17*, 103–132.
- (15) Kaulicke, P. In *Economía prehispánica*; Instituto de Estudios Andinos: Lima, 2008; pp 127–230.
- (16) Rostworowski, M. *Rev. del Mus. Nac.* **1975**, *31*, 311–351.
- (17) Engel F. A. *Un desierto en tiempos prehispánicos. Río Pisco, Paracas, Río Ica*; Centro de Investigación de Zonas Áridas: Lima, 1991.

- (18) García, R. *Boletín Arqueol. PUCP* **2009**, 13, 187–207.
- (19) Velde, B. *Archaeological ceramic materials: origin and utilization*; Heidelberg: Berlin, 1999.
- (20) Nelson, G. C. *Ceramics*; Holt-Rinehart and Winston: New York, 1960.
- (21) Druc, I.; Chavez, L. *Pastas cerámicas*, Versión 2.; Deep University Press, 2014.
- (22) Hampel, G.; Volker, J.; Scheid, N.; Becker, S.; Du, M.; Watzke, P.; Weis, P.; Zauner, S. *Appl. Radiat. Isot.* **2009**, 67, 2128–2132.
- (23) Neff, H.; Cochrane, E. *J. Archaeol. Sci.* **2006**, 33, 378–390.
- (24) Scarpelli, R.; Clark, R. J. H.; De Francesco, A. M. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2014**, 120, 60–66.
- (25) Aimers, J. J.; Farthing, D. J.; Shugar, A. N. In *Handheld XRF for Art and Archaeology*; Shugar, A. N., Mass, J. L., Eds.; Leuven University Press: Leuven, 2012; pp 423–448.
- (26) Morgenstein, M.; Redmount, C. A. *J. Archaeol. Sci.* **2005**, 32 (11), 1613–1623.
- (27) Tagle, R.; Gross, A. *Lab Rep. XRF* **2010**, 1–4.
- (28) Barone, G.; Crupi, V.; Longo, F.; Majolino, D.; Mazzoleni, P.; Spagnolo, G.; Venuti, V.; Aquilia, E. *X-Ray Spectrom.* **2011**, 40 (5), 333–337.
- (29) Ashkanani, H. J.; Tykot, R. H. *ACS Symp. Ser.* **2013**, 1147, 246–267.
- (30) Tykot, R. H.; White, N. M.; Du Vernay, J. P.; Freeman, J. S.; Hays, C. T.; Koppe, M.; Hunt, C. N.; Weinstein, R. A.; Woodward, D. S. *ACS Symp. Ser.* **2013**, 1147, 233–244.
- (31) Dyrdaahl, E.; Speakman, R. J. *ACS Symp. Ser.* **2013**, 1147, 211–232.
- (32) Jenkins, R. *X-ray fluorescence spectrometry*, 2da ed.; Wiley: New York, 1999.
- (33) Potts, P.; West, M. *Portable X-ray Fluorescence Spectrometry*; RSC Publishing, 2008.
- (34) Rousseau, R. M. *X-Ray Spectrom.* **1984**, 13 (3), 115–120.

- (35) Rousseau, R. M.; Bouchard, M. *X-Ray Spectrom.* **1986**, *15* (November 1984), 207–215.
- (36) Rousseau, R. M. *J. Geosci. Geomatics* **2015**, *1* (1), 1–7.
- (37) Rousseau, R. M. *X-Ray Spectrom.* **1984**, *13* (3), 121–125.
- (38) Vaughn, K. J.; Dussubieux, L.; Williams, P. R. *J. Archaeol. Sci.* **2011**, *38* (12), 3560–3567.
- (39) Bakraji, E. H.; Abboud, R.; Issa, H. *J. Ceram.* **2014**, *2014* (ii), 1–6.
- (40) Dunteman, G. *Principal Components Analysis*; Newbury Park: Sage, 1989.
- (41) Miller, J. N.; Miller, J. M. *Editorial Prentice Hall*,. 2002, p 296.
- (42) Véliz, C. *Análisis multivariante: métodos estadísticos multivariantes para la investigación*, 1ra ed.; Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2016.
- (43) Baxter, M. *Exploratory multivariate analysis in archaeology*; Edinburgh University Press: Edinburgh, 1994.
- (44) Druc, I.; Rey de Castro, A.; Dulanto, J. *Boletín Arqueol. PUCP* **2017**, *Sometido*.

Anexos



Anexo 1. Fotografías de los 119 fragmentos de cerámico estudiados.

			
PN13-008-001	PN13-017-002	PN13-034-001	PN13-037-001
			
PN13-053-002	PN13-053-006	PN13-053-007	PN13-055-001
			
PN13-055-004	PN13-056-001	PN13-061-010	PN13-067-002
			
PN13-067-011	PN13-072-010	PN13-074-004	PN13-074-011
			
PN13-074-018	PN13-092-009	PN13-115-003	PN13-117-004

			
PN13-123-001	PN13-128-008	PN13-138-003	PN13-138-020
			
PN13-156-001	PN13-174-022	PN13-174-029	PN13-177-001
			
PN13-187-005	PN13-187-017	PN13-197-002	PN13-204-001
			
PN13-206-001	PN13-212-001	PN13-215-001	PN13-215-005
			
PN13-220-002	PN13-224-014	PN13-225-009	PN13-225-025

			
PN13-232-004	PN13-232-009	PN13-232-010	PN13-232-017
			
PN13-244-011	PN13-244-022	PN13-244-028	PN13-244-034
			
PN13-244-037	PN13-247-021	PN13-250-015	PN13-252-003
			
PN13-252-014	PN13-254-001	PN13-254-002	PN13-254-003
			
PN13-254-004	PN13-275-005	PN13-277-014	PN13-279-002

			
PN13-284-003	PN13-284-006	PN13-287-006	PN13-288-002
			
PN13-295-006	PN13-295-018	PN13-295-023	PN13-295-024
			
PN13-295-027	PN13-296-001	PN13-309-005	PN13-309-009
			
PN13-309-010	PN13-320-005	PN13-320-009	PN13-322-002
			
PN13-334-006	PN13-334-008	PN13-337-001	PN13-337-002

			
PN13-349-003	PN13-373-002	PN13-374-015	PN13-374-016
			
PN13-374-018	PN13-400-006	PN13-401-001	PN13-401-006
			
PN13-401-017	PN13-401-022	PN13-410-025	PN13-410-032
			
PN13-411-003	PN13-411-004	PN13-411-011	PN13-412-003
			
PN13-412-007	PN13-413-001	PN13-413-003	PN13-413-004

			
PN13-413-009	PN13-413-018	PN13-413-028	PN13-414-005
			
PN13-414-015	PN13-414-018	PN13-414-019	PN13-416-028
			
PN13-463-006	PN13-464-003	PN13-465-002	PN13-467-004
			
PN13-468-001	PN13-470-002	PN13-472-003	PN13-487-004
			
PN13-512-010	PN13-520-005	PN13-522-005	

Anexo 2. Códigos asignados por los arqueólogos y los códigos internos para los 119 fragmentos de cerámico

Piezas	Código SPSS	Piezas	Código SPSS	Piezas	Código SPSS	Piezas	Código SPSS
PN13-008-001	1	PN13-197-002	31	PN13-284-003	61	PN13-410-025	91
PN13-017-002	2	PN13-204-001	32	PN13-284-006	62	PN13-410-032	92
PN13-034-001	3	PN13-206-001	33	PN13-287-006	63	PN13-411-003	93
PN13-037-001	4	PN13-212-001	34	PN13-288-002	64	PN13-411-004	94
PN13-053-002	5	PN13-215-001	35	PN13-295-006	65	PN13-411-011	95
PN13-053-006	6	PN13-215-005	36	PN13-295-018	66	PN13-412-003	96
PN13-053-007	7	PN13-220-002	37	PN13-295-023	67	PN13-412-007	97
PN13-055-001	8	PN13-224-014	38	PN13-295-024	68	PN13-413-001	98
PN13-055-004	9	PN13-225-009	39	PN13-295-027	69	PN13-413-003	99
PN13-056-001	10	PN13-225-025	40	PN13-296-001	70	PN13-413-004	100
PN13-061-010	11	PN13-232-004	41	PN13-309-005	71	PN13-413-009	101
PN13-067-002	12	PN13-232-009	42	PN13-309-009	72	PN13-413-018	102
PN13-067-011	13	PN13-232-010	43	PN13-309-010	73	PN13-413-028	103
PN13-072-010	14	PN13-232-017	44	PN13-320-005	74	PN13-414-005	104
PN13-074-004	15	PN13-244-011	45	PN13-320-009	75	PN13-414-015	105
PN13-074-011	16	PN13-244-022	46	PN13-322-002	76	PN13-414-018	106
PN13-074-018	17	PN13-244-028	47	PN13-334-006	77	PN13-414-019	107
PN13-092-009	18	PN13-244-034	48	PN13-334-008	78	PN13-416-028	108
PN13-115-003	19	PN13-244-037	49	PN13-337-001	79	PN13-463-006	109
PN13-117-004	20	PN13-247-021	50	PN13-337-002	80	PN13-464-003	110
PN13-123-001	21	PN13-250-015	51	PN13-349-003	81	PN13-465-002	111
PN13-128-008	22	PN13-252-003	52	PN13-373-002	82	PN13-467-004	112
PN13-138-003	23	PN13-252-014	53	PN13-374-015	83	PN13-468-001	113
PN13-138-020	24	PN13-254-001	54	PN13-374-016	84	PN13-470-002	114
PN13-156-001	25	PN13-254-002	55	PN13-374-018	85	PN13-472-003	115
PN13-174-022	26	PN13-254-003	56	PN13-400-006	86	PN13-487-004	116
PN13-174-029	27	PN13-254-004	57	PN13-401-001	87	PN13-512-010	117
PN13-177-001	28	PN13-275-005	58	PN13-401-006	88	PN13-520-005	118
PN13-187-005	29	PN13-277-014	59	PN13-401-017	89	PN13-522-005	119
PN13-187-017	30	PN13-279-002	60	PN13-401-022	90		

Anexo 3. NPA para los 119 fragmentos de cerámica y los 30 azulejos de material arcilloso.

Código SPSS	Ca	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Ni	Pb	Rb	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
1	247325,4	16253,9	3694442,7	3348,3	123213,5	45084,9	43003,3	23233,7	21516,7	72318,5	134855,2	13325,1	6666,3	24330,6	40392,8
2	281111,5	17481,2	3834625,8	3612,2	121967,7	47257,5	44197,7	23031,6	26827,9	97169,5	155225,3	17093,7	5289,8	24525,6	47670,3
3	274182,2	14784,7	4178013,2	3504,3	119956,7	46264,3	44000,5	23041,9	22844,5	83397,7	136493,1	15707,8	6355,7	23979,4	44196,5
4	270465,8	22811,0	4519279,4	2445,5	105703,8	73199,0	40214,4	19837,9	20762,9	60940,6	163515,6	17484,4	3103,1	21031,6	25415,4
5	225756,0	20000,7	4177441,8	3372,1	114052,0	71632,3	38992,0	21593,0	21746,4	72955,3	137410,7	14812,0	4043,5	20957,8	33172,0
6	253327,9	19755,2	4694642,9	4365,2	121023,9	90764,0	41980,2	22424,2	27321,6	76485,3	155212,8	16061,8	3570,2	19821,6	33551,2
7	447645,6	17970,9	5252244,3	3154,9	118241,8	63139,8	40002,6	39988,3	26165,6	97961,4	129556,1	15016,6	3567,6	22683,5	47886,0
8	230193,0	21858,0	4252589,9	5298,2	119185,9	66653,7	40511,1	18826,9	26842,1	69930,1	131980,9	15376,1	4716,3	18485,0	29725,2
9	270456,4	19523,5	4418115,8	4057,6	123076,8	79109,7	40026,1	20736,6	26135,1	72757,8	143748,4	15627,9	4375,2	19490,4	32406,9
10	350933,1	18679,9	4649931,1	2336,2	103282,5	77613,0	40022,7	20207,6	22621,6	66186,3	158693,9	19724,6	2950,5	20233,1	32180,3
11	181054,0	13721,4	3677702,1	2850,5	109217,9	36718,1	40592,2	21289,9	19851,5	40645,6	105030,1	11329,6	3504,0	21530,6	31159,8
12	241806,1	18222,4	3481890,7	4111,5	119680,8	36537,1	44548,5	20941,4	26945,3	93633,2	169669,8	19443,8	4574,9	26735,5	52093,1
13	269078,2	16152,3	4027075,7	3497,9	120739,4	49964,0	42358,0	24859,5	25122,1	87889,7	136677,7	13866,8	5786,1	24423,8	54754,5
14	172737,6	17945,6	3797976,2	3991,0	131628,0	56300,1	41481,2	19118,9	24201,7	60025,1	109977,4	13036,4	3862,4	18299,5	38205,7
15	279050,1	18593,6	3313982,5	4526,8	122577,4	37023,3	44879,9	21068,1	24837,5	93080,1	161346,4	20246,0	3632,4	24363,7	52105,6
16	249996,8	16886,6	3366328,4	4440,2	133396,7	46864,3	44712,5	19404,1	27635,5	93021,3	168907,4	14692,5	4550,5	24288,3	57959,2
17	270970,3	19205,7	3667452,7	4444,8	119836,7	43255,6	45295,4	18922,3	26868,3	101826,8	163377,5	19943,0	4854,8	24323,4	53077,5
18	282962,5	16228,6	4180104,0	3712,9	130899,8	50008,2	42940,3	42668,8	29513,7	90525,1	145188,5	17002,8	6988,9	24712,3	47750,9
19	214255,3	21511,7	4816822,3	3941,3	122027,9	87155,2	39601,7	22554,4	24954,7	56456,8	130347,7	14559,9	4660,3	32131,9	28153,5
20	464975,1	23307,3	5164112,6	4264,6	94928,3	72662,7	41663,7	17841,5	23934,5	101089,8	117414,5	17222,5	3751,1	20421,8	34071,4
21	293499,3	21846,6	5137994,8	3019,7	122614,8	79672,4	42046,4	46712,1	26511,5	69775,2	179816,1	23349,4	2331,2	21085,7	39431,3
22	189320,4	21103,1	3637957,2	4449,7	107247,1	72829,5	42380,9	19573,0	25755,1	67832,6	109223,5	11499,2	5773,0	21578,5	34153,0
23	295154,2	21834,3	4596588,5	3978,9	122872,6	82198,7	40684,6	18422,0	24953,5	70057,2	143557,3	13915,1	5522,1	18445,7	29436,4

Código SPSS	Ca	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Ni	Pb	Rb	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
24	291387,5	14927,0	2543555,8	3803,6	124169,1	30128,2	42879,5	19784,8	26000,5	85281,3	117200,4	14368,2	5388,7	21904,9	49905,5
25	280205,3	17796,9	4381679,3	3654,0	138487,4	53142,7	43989,5	25290,5	29101,9	89973,0	149921,1	14834,5	6206,4	25430,4	48750,9
26	338685,8	15565,3	3743896,1	3735,2	100986,6	47227,6	40259,3	20784,5	20402,7	76366,3	119306,1	11992,2	3632,7	22195,9	36632,6
27	197587,3	19856,5	3570071,2	2932,6	104809,3	56348,5	37777,7	20717,5	17683,8	52202,1	119540,0	11586,4	3722,1	19716,0	23724,8
28	306763,9	15967,9	3941482,6	3960,1	136237,9	43906,9	44734,8	21980,0	28510,0	95995,1	147594,2	15580,3	7406,9	23572,8	51085,7
29	292450,9	26972,5	6143992,8	4201,7	96392,1	91777,3	38236,6	17756,2	26811,6	77987,7	173924,3	18397,1	6988,6	21455,3	34055,1
30	184264,4	16521,3	2975906,9	4014,9	137111,7	69040,1	43174,0	20183,9	27327,3	60827,9	96754,2	11458,1	4336,4	22973,6	31015,0
31	309522,9	17919,7	4079249,0	3033,7	88214,1	62324,8	41716,9	22142,5	17757,1	74467,7	121040,1	15964,4	2922,6	19701,0	26358,6
32	260546,0	15984,7	3077521,0	3712,6	127349,3	42346,1	42764,7	22804,3	29907,1	74680,9	121664,1	12628,3	5697,0	24880,1	42638,7
33	245337,2	15365,1	3481020,5	3908,5	118385,5	40285,0	41104,3	21503,1	28314,0	78804,4	134565,5	13850,1	4500,7	22017,8	54854,5
34	199013,4	14060,9	2473240,9	1491,1	52041,7	38072,4	36418,7	16698,6	11203,6	44067,2	64697,0	9212,0	1582,7	15872,1	11848,3
35	203487,6	14459,6	2172829,2	3055,1	78150,7	24653,5	41644,0	21823,1	17655,2	77754,7	111246,7	14678,5	2499,3	25028,3	35255,9
36	324076,5	16453,1	4031612,3	4626,4	130813,1	52154,6	43986,9	21165,1	25960,4	96528,6	139122,0	14079,8	4013,1	24113,1	37615,1
37	263617,8	17549,3	3502022,5	3605,6	124555,2	40707,7	43015,7	23665,3	21235,4	70485,9	135079,8	19774,0	3956,2	26581,4	40322,8
38	291526,1	17044,7	3847067,4	3898,8	121005,5	43036,6	44729,0	19836,7	22939,2	85506,3	154808,9	19042,1	4549,5	27920,8	56604,7
39	309513,6	16352,7	3654649,2	4268,0	122767,0	42125,6	44535,6	20566,2	27109,8	93192,6	157955,8	19279,0	3560,2	24492,0	50183,5
40	328893,3	18079,2	3501958,3	4095,7	127374,4	44147,9	44436,1	24834,6	24163,8	82895,2	144404,3	19161,3	4183,8	26863,9	43960,8
41	349872,3	24865,3	4679763,6	3834,5	151947,0	50523,0	39666,9	19717,1	36730,3	82627,8	142017,3	15342,1	6262,0	22306,8	48513,5
42	293149,2	15773,2	3235852,9	3932,5	111787,7	39412,2	43239,0	21207,9	20700,2	77436,3	130995,4	16455,0	3745,5	23992,5	49143,7
43	197378,5	15941,5	3078327,5	3264,6	151031,6	50733,6	43781,9	22899,3	29561,0	37849,4	117437,0	12006,8	5787,7	27117,4	55817,1
44	256697,9	17195,3	3289130,4	4079,1	124718,6	39451,8	42889,9	21514,1	23333,4	79393,4	135793,3	17999,6	4359,9	26003,2	47995,0
45	233630,6	20733,2	3504746,7	3532,6	114661,7	67506,8	40969,5	20749,9	23788,1	57758,8	106586,7	10651,2	4079,7	21291,0	26641,4
46	235086,3	17034,0	2933908,8	3441,5	106585,5	36372,5	41268,5	21477,0	27310,6	73319,6	120932,3	12413,2	5789,2	24812,4	45273,0
47	278714,7	16929,3	3350468,5	4065,4	127944,1	42138,2	43416,2	23140,1	30694,2	80819,7	136608,4	14541,4	5970,2	26374,6	44386,9
48	258904,9	17226,9	3293164,7	3722,6	128962,3	39492,9	43090,0	22453,7	30542,6	81952,1	136776,3	13806,1	6482,1	25652,2	55012,2
49	315937,5	16139,8	3297922,9	4078,8	194295,4	40260,5	42711,9	19085,2	39322,1	94555,2	128139,7	15090,5	6218,1	21397,9	44291,3

Código SPSS	Ca	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Ni	Pb	Rb	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
50	267157,9	22727,6	3839207,6	3019,1	127392,1	41477,4	40196,9	18521,0	30295,2	72193,4	128151,2	15095,8	6415,5	20412,9	37763,8
51	318856,8	17343,7	4155954,8	3699,7	131263,8	47547,2	41552,7	21313,6	28397,3	77259,0	130674,0	15639,2	4061,5	28161,9	44386,7
52	310229,8	16958,9	3521320,7	4458,1	133529,3	43528,1	44750,4	20994,7	27969,2	86275,0	158006,0	22174,9	3720,1	22646,7	58093,4
53	312986,9	17329,2	3511128,8	4428,8	115146,5	43926,0	44936,3	20637,1	25256,5	91327,0	157263,4	18407,9	3682,5	24258,2	48663,3
54	339732,7	18976,8	4105726,9	4200,5	132824,6	51552,0	43568,1	22394,8	27120,6	92846,1	153721,9	15724,9	5499,3	24948,6	46017,5
55	273710,3	15808,4	3157873,5	4109,2	99790,6	37141,3	41601,1	20910,6	22615,1	80894,6	133324,2	16650,3	3631,6	23643,5	53323,9
56	274559,4	19206,0	3817320,4	3705,9	155325,0	48388,8	40796,3	19692,0	29664,7	78439,3	127155,3	14123,8	4064,2	23432,9	38347,5
57	227251,0	21414,4	3891695,0	3434,0	96345,9	63696,7	39356,2	21146,6	24514,9	71558,8	124214,6	12841,9	6247,6	20929,9	33398,6
58	266715,1	17573,4	3537132,4	4361,1	142449,1	39229,5	46062,0	26125,2	27662,4	80936,9	138128,9	16008,8	4779,4	23633,2	53331,7
59	300578,2	17202,9	3937039,6	3683,1	108097,3	48380,7	41377,0	23005,6	26571,3	72866,4	146096,6	13769,0	4208,0	24382,8	41215,4
60	315689,1	17148,8	3552798,2	4584,4	134832,8	45663,9	43282,2	21629,5	27006,1	86087,9	154763,0	21097,6	4325,1	22761,3	49906,4
61	280137,0	18651,0	4254535,5	3962,4	141149,5	46105,9	43075,2	22081,0	27882,5	77264,1	155734,6	23114,8	3727,0	25808,9	50615,9
62	185820,2	17375,0	3684293,6	4174,1	124729,2	64079,0	43209,2	19954,6	23907,7	67253,4	128632,5	15232,2	4840,2	18584,4	29396,8
63	276551,1	15172,1	4252038,2	4555,2	118025,0	49794,7	41436,0	20452,5	22768,8	75060,4	136412,7	16068,0	3868,6	21766,9	33361,0
64	251675,6	15520,7	4917876,5	2922,3	130958,8	46912,5	38301,1	25631,6	24452,0	45173,5	106909,9	11552,6	3472,9	21449,3	36615,8
65	226785,8	16903,2	3155273,0	4573,6	154294,6	36684,1	45192,4	20235,9	33907,6	78591,6	152321,3	15442,2	5714,4	23040,9	49617,5
66	296516,6	18036,5	3657337,7	4296,5	126132,6	40808,2	44202,5	19960,5	24993,0	95495,8	159812,3	20343,0	4431,3	27789,0	47683,4
67	248944,5	23726,6	3934546,8	3206,2	127564,0	90691,3	41545,0	22298,3	27817,4	67014,2	113785,6	13527,7	3078,9	28032,0	31396,9
68	294280,1	16291,9	3217479,0	3736,7	143285,0	39453,1	45553,3	22038,2	27152,8	87892,6	144598,3	14637,2	5016,8	23632,7	45994,9
69	255573,3	19094,0	3806307,1	3675,3	114659,1	45573,5	42507,8	20925,2	23323,3	75051,4	150489,2	22497,2	4089,3	27060,4	42391,8
70	254633,1	17698,9	3115699,0	4400,5	144591,7	34740,6	45879,7	19583,3	26267,6	98319,8	173481,0	17062,3	4337,7	21265,3	52520,8
71	465313,8	17703,2	3163509,2	3815,8	116248,8	38802,1	42488,1	20899,8	26396,7	81796,9	138007,5	17220,2	3834,5	25709,4	48500,9
72	324303,1	16754,0	3024454,2	3719,7	122970,5	37865,7	43706,7	22587,5	23435,9	92892,2	146388,8	19537,5	3651,5	23580,5	42253,2
73	253651,1	16673,3	3311860,5	3811,3	116916,8	40904,1	43557,8	21069,6	23888,7	79407,1	137090,1	17802,3	4482,7	25232,1	43871,2
74	264087,7	19288,0	3403765,8	4513,1	122310,8	44802,7	42684,6	18903,8	27204,8	93407,6	138861,9	19837,1	4535,6	25557,3	56458,0
75	288999,7	17908,4	2998397,1	4439,3	170881,0	35511,4	46250,0	20523,6	39913,0	101816,6	142155,3	15546,2	7093,7	24241,0	51834,0

Código SPSS	Ca	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Ni	Pb	Rb	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
76	321205,5	24018,1	4954802,5	3192,0	114427,6	49107,9	38692,4	20792,0	32625,8	72048,6	137338,5	15093,7	5921,5	21236,5	44589,3
77	269278,1	22094,9	4164026,1	4381,3	153501,6	83206,4	41778,5	21737,1	32586,2	75731,5	124612,2	14251,8	3964,0	25794,4	32491,2
78	302864,7	14464,0	4064344,5	3615,0	123363,9	64625,8	42369,2	27940,1	24820,4	58517,9	118019,5	11687,4	6713,5	23249,2	48169,4
79	276640,7	17554,5	3323831,3	4795,1	133769,9	43935,5	44525,5	22270,9	30433,1	90607,7	137429,3	13944,7	5591,7	24086,1	56534,3
80	254625,8	18211,1	3268046,0	4095,1	154295,0	40713,3	44490,5	22971,2	26975,0	81031,9	143268,4	15159,1	5827,5	24902,3	45236,6
81	236099,9	16389,3	2589887,5	4173,4	123696,6	29734,9	41696,2	20479,0	33192,9	90061,2	122917,6	14455,6	6924,0	23698,2	49941,8
82	452776,0	34990,6	4612031,1	3340,3	110349,0	50817,4	39147,0	24907,2	32040,6	109022,2	131983,5	13391,0	6808,6	20657,6	50481,1
83	274633,2	17445,7	3469108,1	3723,4	119034,1	42572,8	43094,1	20231,4	22795,4	78605,7	145102,4	19890,1	4511,1	25746,0	47913,9
84	237216,6	16783,7	2951118,6	3533,2	126341,7	36965,3	42734,9	21553,3	23334,2	71968,8	135796,4	12675,7	5046,8	23573,8	46253,7
85	285790,5	16971,8	3514016,2	3837,3	123272,6	43054,1	42630,8	20606,0	22679,5	79148,6	153045,8	25234,1	4455,9	26899,9	45239,5
86	231520,3	17026,3	3541007,4	3038,7	108507,4	42708,9	40497,8	21729,3	20700,1	65424,5	123167,4	13849,1	3037,5	26120,3	38954,8
87	338565,6	24520,4	5065906,8	3975,7	137644,0	49701,4	40697,1	22227,4	34771,0	76786,4	142347,7	16602,9	5777,0	21379,2	42598,0
88	242404,2	24277,4	4402030,1	4297,4	150024,5	86906,1	40345,0	19244,6	32973,6	69451,9	135045,8	16603,5	4983,4	21329,7	39803,6
89	252555,0	43617,0	3525592,3	4758,2	123244,2	71310,9	43788,9	19997,0	19140,8	95137,1	110896,8	13419,0	3641,9	47872,7	21710,9
90	236107,4	15631,6	3149434,8	3872,2	115237,6	36607,3	45158,6	21007,1	22297,9	74793,4	141653,4	18015,1	3605,5	25254,9	45830,8
91	294462,9	16489,8	3245842,5	4003,0	147952,8	42312,2	44675,6	21316,9	26126,6	87372,9	143679,4	14684,7	5106,4	24002,6	48483,7
92	319827,8	16711,7	3487636,6	4259,1	128175,1	39055,2	45028,7	21182,3	25805,9	103480,8	152175,1	16888,7	4686,7	26260,0	51349,8
93	311498,2	18512,9	3283104,9	4228,7	122127,6	43495,5	44329,2	23695,3	28303,4	83562,5	142260,4	16094,2	5129,1	22773,3	46921,2
94	203025,7	16455,4	3448362,6	4652,0	157939,0	39910,6	44584,3	21724,8	35851,1	74568,5	164077,9	15297,6	5911,6	26503,5	56101,1
95	289207,1	16808,4	3635876,7	3979,7	149346,1	43890,3	44482,2	24000,0	29090,9	89815,9	146661,5	14202,5	5622,2	23907,8	60848,2
96	290025,1	16735,6	3491653,8	4455,6	133489,9	41986,1	42856,4	21457,9	30971,0	89731,6	136101,7	14911,5	5815,6	23901,7	51058,9
97	328124,7	23873,3	5075697,2	3951,9	114196,9	51480,7	40176,1	19573,2	32609,7	75230,6	148860,8	15924,1	6417,7	22629,9	42720,7
98	273298,7	15798,2	3002028,7	3708,9	119335,9	41517,1	43291,7	22150,6	26919,3	81939,3	126475,9	13480,7	4864,0	22742,4	45848,7
99	267094,3	16096,3	3005074,3	4544,5	119543,9	40002,4	43995,2	23761,2	27316,1	85859,2	132825,7	15106,8	4579,3	22891,5	46242,7
100	306763,8	16411,1	3484572,9	4762,4	148428,8	44458,7	44736,6	23154,6	27875,4	92342,8	148917,8	15618,0	5930,7	24142,1	55402,9
101	263215,9	16929,1	3605915,2	3965,4	111031,7	44552,6	43135,7	20310,9	23458,8	80449,5	140153,8	17343,1	4566,0	26114,3	44793,2

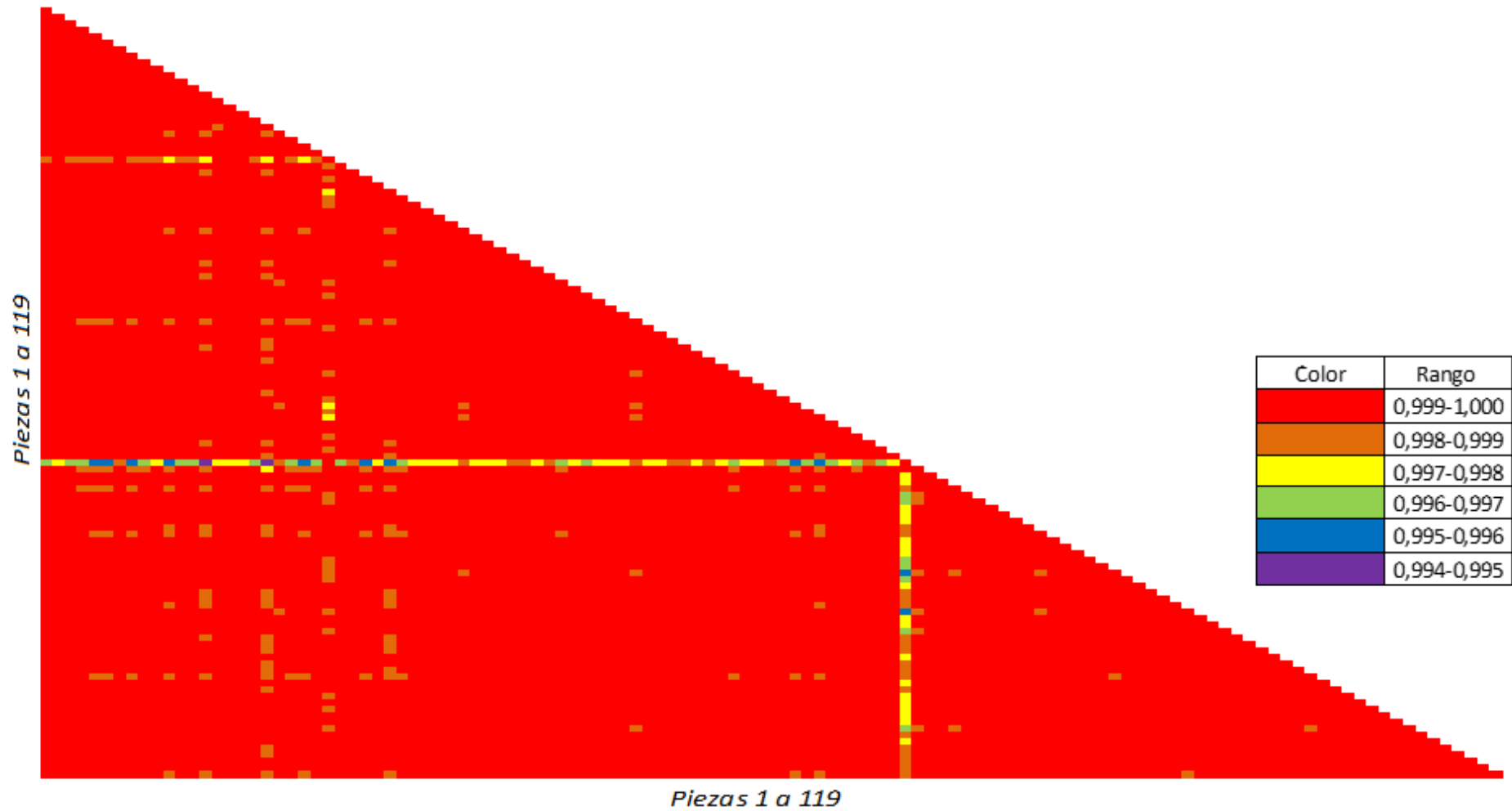
Código SPSS	Ca	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Ni	Pb	Rb	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
102	289388,4	19262,1	3344056,2	4236,1	131921,9	45134,7	44368,6	24230,6	30114,4	87836,4	145554,6	16548,3	5607,9	23140,4	57515,0
103	281175,1	16896,2	3140954,2	3940,3	151345,0	44451,5	44491,3	22129,2	33417,7	89603,7	129591,4	15010,7	7046,4	24614,6	48652,0
104	289129,3	16936,4	2862245,6	4671,5	122034,2	34308,7	44605,9	20430,6	34811,3	96750,5	135453,4	15768,5	6229,8	24998,4	49184,3
105	263997,3	17599,3	3709442,5	3888,2	145547,2	44445,3	43179,2	19463,7	28895,5	84669,9	145246,9	23908,3	3555,6	25776,7	45641,4
106	288367,8	18914,8	3334550,1	3994,2	104013,4	39682,3	43656,8	20127,0	22765,2	86024,1	146916,0	18372,1	4127,4	25867,8	46749,3
107	342534,0	22946,3	4786362,4	3506,9	115671,7	48005,4	41579,2	21046,7	30896,4	70953,4	135477,2	18206,2	5709,6	21979,7	39495,9
108	294966,9	17128,1	3592249,7	4152,0	155758,7	43865,9	44761,1	21737,9	36692,7	85518,6	137204,2	14487,5	5395,9	26620,8	44448,4
109	322661,6	22032,8	4603898,0	3895,0	136045,4	60974,1	43299,4	19489,4	23367,2	82833,2	167562,6	20467,4	4021,4	18216,5	49602,1
110	364606,4	23627,6	4822482,4	3628,8	117304,9	49201,0	40241,2	18062,9	31523,9	77699,5	135328,8	16502,7	6322,8	20037,2	41279,3
111	279911,5	17108,7	3980902,3	4736,9	135810,9	44119,4	44091,4	23685,8	30812,7	89133,0	154017,2	19322,8	4511,2	27642,2	48655,1
112	245919,8	18506,1	4187651,4	2719,0	83478,5	55333,5	38390,7	19897,2	15416,0	63013,5	137591,1	15543,4	2859,4	19698,0	19908,5
113	297706,8	18809,2	3460013,6	4455,7	134766,3	46545,4	45230,6	24181,4	30045,5	89081,8	147978,5	16985,0	5296,2	23435,6	50580,6
114	272996,5	18068,6	3200489,1	4145,8	138413,4	38833,8	44739,7	24335,0	32023,3	83358,5	139265,1	15062,3	7029,9	26180,8	52885,9
115	272855,1	18046,8	3056123,5	4340,8	113495,5	40176,3	43895,1	23997,0	26101,5	77937,6	133180,1	15068,3	5118,6	22396,9	45490,0
116	277303,7	17321,5	3130126,5	4384,0	125740,5	43313,7	44678,0	22715,1	27328,5	82649,2	130591,5	13589,9	5357,3	23560,6	44822,9
117	297277,2	18723,8	3427345,8	3663,0	112243,6	41505,2	41781,5	23452,5	23426,5	81688,7	131557,7	20079,3	3435,6	24275,7	42316,0
118	295676,5	17080,2	3468648,5	4191,0	112542,0	45351,0	42488,2	24025,2	22725,3	85802,7	146759,0	16947,3	3782,7	24664,5	49551,9
119	274266,7	12908,7	2804803,3	2768,0	94491,7	33222,7	38306,3	24808,0	20926,3	71303,7	102363,7	10454,7	3579,3	18236,0	35211,3

Arcilla	Ca	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Ni	Pb	Rb	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
ZPN0002	558781,2	16835,9	1976601,8	3664,8	75592,3	16933,4	54368,5	21229,9	20626,9	182983,8	77343,4	14014,6	2948,3	15061,4	33991,0
ZPN0004	721925,1	17442,4	3615132,8	4136,3	134180,7	85654,4	47408,9	28229,7	29041,7	111141,0	130164,7	16211,0	5350,3	24024,2	41701,7
ZPN0005	710899,7	17111,1	3345129,3	4442,0	139406,0	77775,8	47873,1	31614,4	30011,7	115783,1	121835,7	15959,0	5253,0	26953,9	41067,6
ZPN0006	792845,6	14205,1	2439326,6	4335,1	136699,7	58295,5	48379,5	22057,4	27549,8	135044,2	105463,0	14349,9	4760,8	21605,6	60902,2
ZPN0007	228397,1	13216,4	2674501,9	3184,7	78666,1	37419,7	40136,1	26990,7	21068,9	80152,2	97776,4	11064,8	4940,0	21020,7	38461,9
ZPN0008	676120,7	18139,6	3524157,9	2977,4	122744,2	95127,1	41090,1	43096,5	28139,0	90807,8	109692,2	14500,5	4341,5	28942,6	31154,0
ZPN0018	390764,1	19750,9	4720132,3	3814,1	138205,7	113886,7	42979,3	35561,0	35647,7	70619,8	159204,5	13844,2	6464,7	29134,0	45786,3
ZPN0020	373574,3	19057,4	4122636,7	4772,9	125153,9	81658,7	44336,0	21068,0	28398,4	101728,8	163781,3	20657,7	5018,5	21122,0	38051,9
ZPN0022	384943,9	27618,6	4475611,8	4830,4	150420,4	90742,1	44693,7	22011,7	35760,4	96800,3	163014,9	19300,9	6199,2	25617,3	47317,9
ZPN0024	252114,8	24055,0	5707229,0	4359,5	147978,9	138574,9	46356,6	29381,2	40038,8	65657,7	192341,7	18976,2	7734,3	33327,7	45795,7
ZPN0026	374788,4	21297,9	3997789,9	4509,8	152115,0	86373,7	44905,7	21781,7	33031,2	98241,5	147227,6	17245,3	5539,3	24220,2	45424,7
ZPN0027	424870,5	22497,6	4585409,5	4227,9	148809,8	90680,1	45322,9	21781,0	34938,7	100454,4	170858,5	19711,3	5865,1	24964,9	39698,3
ZPN0028	378574,8	23865,9	4415396,8	3935,3	127792,8	91113,6	40866,6	31174,6	33736,3	93737,5	151586,8	13006,8	5685,6	25249,3	42324,9
ZPN0031	374209,5	18896,0	3795298,1	4519,8	154055,5	82468,2	44540,2	24767,2	32855,6	115830,6	146284,9	17326,5	4681,2	21045,6	40232,1
ZPN0032	532469,3	23600,3	3588402,1	4114,6	139396,8	71559,7	39386,8	29957,5	27534,8	96688,5	118898,5	13354,3	4571,1	24586,7	33946,1
ZPN0033	296930,6	32180,7	6663717,4	3594,3	119418,1	97236,2	39793,0	29703,3	35253,8	60654,8	168867,5	19062,0	4793,9	31661,0	31131,7
ZPN0034	362606,2	23627,5	4753232,2	5060,2	121943,4	85769,5	45191,3	18628,8	32703,3	98461,8	163684,6	19223,0	6595,2	25378,1	47856,9
ZPN0035	274679,8	35323,6	6601333,8	4782,4	132658,5	85090,0	43354,8	22615,0	39497,9	71289,7	181355,4	22595,6	4480,3	35174,4	34321,9
ZPN0036	271222,3	31001,4	6210419,6	3763,8	118531,2	100859,4	40073,2	24380,0	36473,0	67341,5	174880,4	18927,0	4674,8	29809,9	33370,7
ZPN0037	243966,2	37647,1	6493802,9	3842,6	113186,8	126764,7	39633,6	27409,5	37326,3	54744,6	150858,3	18963,2	5295,5	34277,3	31765,5
ZPN0046	480500,0	20284,1	4025871,3	3791,2	100514,6	65758,5	40885,9	18399,5	28912,2	107266,9	138868,6	12820,7	5352,1	22080,4	44868,4
ZPN0047	210722,6	14779,8	1467322,7	2742,3	51836,0	20114,4	46715,5	16605,4	15759,3	76821,6	55572,2	8572,8	4530,6	29756,7	25929,1
ZPN0048	252142,9	11420,4	1097240,1	3577,0	96463,8	16876,4	44768,1	22502,7	24937,6	98159,4	65273,6	11336,5	5792,1	20633,0	55333,2
ZPN0051	243897,4	13347,6	1750252,9	3699,8	100108,0	19306,6	48431,4	24041,0	23946,2	82653,7	81409,0	13919,6	4760,0	31769,8	43543,8
ZPN0054	925829,7	15157,9	3502906,4	3902,6	133790,4	79018,2	45677,9	30469,3	28633,9	114298,6	122741,8	16733,1	4905,3	25380,4	44739,7
ZPN0059	607088,3	15412,2	3603071,0	4561,6	133081,7	79964,9	45633,7	27182,3	30964,4	108791,0	134127,4	17457,2	4475,0	23647,1	50501,4

Arcilla	Ca	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Ni	Pb	Rb	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
ZPN0060	762375,1	14385,8	3025431,2	4117,8	135966,9	64975,8	47184,9	23000,3	30356,1	114558,1	114632,0	15558,9	3892,4	21812,0	46172,4
ZPN0061	684513,7	16765,6	3494998,1	3326,1	129952,8	81113,3	42056,5	30877,0	28852,9	98012,7	117045,4	14305,6	4499,9	28527,4	41876,1
ZPN0064	618682,2	18049,8	2985782,8	2980,8	98157,3	67550,4	38315,4	57036,6	24227,7	86948,6	101253,6	10044,5	3763,7	22727,4	34805,6
ZPN0065	1010353,4	12276,6	2129158,2	3667,8	136940,3	49407,5	42360,1	18248,5	23732,7	147909,5	85327,1	11213,9	3912,2	16665,4	39279,0



Anexo 4. Matriz de correlación entre cada par de los 119 fragmentos de cerámica.



Anexo 5. Puntuaciones factoriales calculadas para los 119 fragmentos de cerámico.

Código SPSS	Comp. Principal 1	Comp. Principal 2	Comp. Principal 3	Comp. Principal 4
1	-0,8070	0,1380	-0,4358	-0,3066
2	0,8067	0,0511	-0,2848	-0,2144
3	-0,0168	0,0797	-0,4228	-0,5678
4	0,1248	-1,7981	1,5851	-0,4782
5	-0,6778	-0,8392	1,0315	-0,2539
6	0,2031	-0,2659	1,6918	0,0329
7	1,3876	-0,2127	0,7830	-3,5926
8	-0,7647	0,1817	1,3691	0,7435
9	-0,3414	-0,1687	1,4179	-0,3210
10	0,7678	-1,8017	1,3171	-1,5079
11	-2,2678	-1,2543	-0,8299	-0,3799
12	1,2786	-0,3231	-0,6055	0,8444
13	-0,0679	0,3478	-0,3884	-0,7867
14	-1,7354	-0,1357	0,0325	0,3414
15	1,5189	-0,6239	-0,6805	0,7922
16	0,6822	0,4019	-0,6573	0,7048
17	1,4672	-0,0819	-0,3219	0,8136
18	0,7228	1,0033	-0,2814	-2,2985
19	-0,9482	-0,3402	2,2187	1,5191
20	1,0855	-0,6876	1,9299	-0,7397
21	2,3573	-1,3021	1,3914	-2,7993
22	-1,8392	0,3814	0,7886	1,0488
23	-0,6548	0,2007	1,8274	-0,3356
24	-0,6406	0,2485	-1,5153	-0,2302
25	0,2938	0,9410	0,1668	-0,4961
26	-0,5788	-0,9770	-0,1972	-0,6938
27	-2,0160	-1,4296	0,4644	-0,2542
28	0,3362	1,2463	-0,4350	-0,5507
29	0,5990	0,2194	3,4957	-0,3759
30	-2,2461	0,2867	-0,0307	1,2070
31	-0,1614	-1,9821	0,4022	-0,7941
32	-1,0873	0,6711	-0,6912	-0,0290
33	-0,4628	0,1769	-0,8065	-0,4850
34	-3,5340	-3,5758	-1,1807	-1,0462
35	-0,8395	-2,3554	-1,8682	0,5481
36	0,4238	0,0725	0,1152	0,3576
37	0,3877	-1,0900	-0,4260	0,4434
38	1,2075	-0,5379	-0,5042	0,6193
39	1,3990	-0,4679	-0,5270	0,2887

Código SPSS	Comp. Principal 1	Comp. Principal 2	Comp. Principal 3	Comp. Principal 4
40	1,0647	-0,5278	-0,3009	0,3022
41	-0,0989	1,8089	1,4341	-0,8722
42	0,2390	-0,9505	-0,9495	0,1334
43	-1,9387	1,0142	-0,8143	0,3997
44	0,2632	-0,5077	-0,6499	0,6596
45	-1,9946	-0,4096	0,6980	0,3489
46	-1,2767	0,1623	-0,8474	-0,0475
47	-0,3109	0,7737	-0,4245	0,1851
48	-0,4702	1,0384	-0,7259	-0,1153
49	-0,6234	2,5146	-0,3463	-0,3580
50	-1,0991	0,6739	0,4813	-0,6659
51	0,0598	-0,0361	0,2253	0,0767
52	1,6584	-0,2493	-0,6243	0,1315
53	1,3064	-0,5967	-0,4785	0,4728
54	0,7766	0,5100	0,3158	-0,1409
55	0,2517	-0,9679	-1,0000	0,0528
56	-0,7212	0,4932	0,3363	0,1392
57	-1,4173	-0,0616	0,8584	-0,3616
58	0,3451	0,5669	-0,8183	0,1170
59	-0,0812	-0,3900	0,0605	-0,5029
60	1,2818	-0,1259	-0,2863	0,0759
61	1,4044	-0,4143	0,1661	0,2682
62	-1,1008	-0,2003	0,2423	0,5240
63	-0,0547	-0,6592	0,1740	0,0535
64	-1,7340	-0,4067	0,2937	-1,6117
65	-0,2309	1,3924	-0,7753	0,6996
66	1,4643	-0,4592	-0,2620	0,9451
67	-1,0343	-0,4023	1,7485	1,1276
68	0,1502	0,4398	-0,8838	0,0221
69	0,9766	-1,1967	0,0720	0,7055
70	1,0779	0,2026	-1,0050	0,5853
71	1,0819	-0,4983	-0,4199	-0,7011
72	1,0830	-0,9272	-0,8209	-0,0687
73	0,1765	-0,6196	-0,6619	0,5096
74	0,7959	-0,0735	-0,2989	0,9340
75	0,0063	2,5869	-0,7441	0,4289
76	-0,3983	0,6988	1,3387	-1,4654
77	-0,6830	0,7987	1,7317	1,0625
78	-1,1204	0,7464	-0,0656	-1,3713
79	0,0403	1,1330	-0,6308	0,4039
80	-0,1823	0,8234	-0,5178	0,5143
81	-0,9579	1,2631	-1,1463	0,1274
82	0,5847	1,3684	2,1191	-1,8741

Código SPSS	Comp. Principal 1	Comp. Principal 2	Comp. Principal 3	Comp. Principal 4
83	0,6716	-0,7869	-0,4665	0,4305
84	-0,8269	-0,0688	-0,9885	0,1063
85	1,4647	-1,1652	-0,2955	0,5628
86	-0,8186	-1,3803	-0,4016	0,1978
87	0,1452	1,2221	1,5073	-0,9927
88	-0,6583	1,0252	2,0598	0,5475
89	0,0058	-0,7779	3,4501	6,4396
90	0,3645	-1,0411	-1,1123	0,8224
91	0,1267	0,5251	-0,7353	0,2048
92	1,1656	0,0374	-0,6907	0,4169
93	0,3518	0,3054	-0,4543	-0,1495
94	-0,0843	1,6660	-0,5911	0,8892
95	0,2922	1,1380	-0,7138	-0,4004
96	-0,0606	1,0191	-0,4550	-0,0118
97	0,0541	0,8882	1,5401	-0,7578
98	-0,5597	0,1040	-0,9470	-0,2021
99	-0,0238	0,1156	-0,9280	0,2382
100	0,5722	1,1020	-0,5993	0,1250
101	0,2878	-0,6376	-0,3656	0,5860
102	0,4899	0,8319	-0,4981	-0,1604
103	-0,4622	1,6978	-0,5931	0,0320
104	0,0588	1,1970	-0,8785	0,5346
105	1,1425	-0,4693	-0,1324	0,7553
106	0,8274	-0,9497	-0,4719	0,6679
107	0,1697	0,3218	1,1008	-0,9473
108	-0,1852	1,5159	-0,1983	0,4033
109	1,4561	-0,4006	0,8390	-0,5555
110	-0,0629	0,7705	1,3040	-1,1942
111	1,1230	0,3332	-0,0800	0,6771
112	-0,6433	-2,4992	0,6354	-0,6661
113	0,6637	0,7127	-0,3402	0,1083
114	-0,1662	1,4427	-0,6721	0,1440
115	-0,1714	0,0644	-0,7244	0,0682
116	-0,3495	0,5112	-0,6620	0,3502
117	0,6577	-1,1632	-0,3095	-0,0582
118	0,7714	-0,7450	-0,4825	0,0107
119	-1,7117	-1,1887	-1,3847	-1,8397

Anexo 6. Distancias entre clúster según el número de grupos construidos.

Nro. Grupo	Distancia entre clúster	Nro. Grupo	Distancia entre clúster
1	58,434	60	0,579
2	19,550	61	0,574
3	16,323	62	0,570
4	10,727	63	0,567
5	10,180	64	0,551
6	8,834	65	0,538
7	8,704	66	0,535
8	8,057	67	0,521
9	7,882	68	0,512
10	7,399	69	0,484
11	6,290	70	0,425
12	5,794	71	0,403
13	5,028	72	0,396
14	4,770	73	0,395
15	4,285	74	0,395
16	4,215	75	0,391
17	3,127	76	0,386
18	3,009	77	0,386
19	2,838	78	0,379
20	2,562	79	0,375
21	2,382	80	0,363
22	2,279	81	0,352
23	2,197	82	0,351
24	2,142	83	0,349
25	2,025	84	0,312
26	1,935	85	0,299
27	1,875	86	0,292
28	1,785	87	0,283
29	1,731	88	0,274
30	1,707	89	0,252
31	1,590	90	0,235
32	1,546	91	0,229
33	1,494	92	0,222
34	1,480	93	0,220
35	1,444	94	0,199
36	1,359	95	0,192
37	1,354	96	0,176
38	1,321	97	0,171
39	1,208	98	0,166
40	1,184	99	0,164
41	1,179	100	0,162

Nro. Grupo	Distancia entre clúster	Nro. Grupo	Distancia entre clúster
42	1,175	101	0,157
43	1,057	102	0,156
44	0,969	103	0,151
45	0,931	104	0,142
46	0,930	105	0,136
47	0,871	106	0,124
48	0,833	107	0,114
49	0,816	108	0,114
50	0,807	109	0,107
51	0,802	110	0,106
52	0,780	111	0,105
53	0,746	112	0,095
54	0,697	113	0,083
55	0,672	114	0,066
56	0,633	115	0,063
57	0,627	116	0,043
58	0,619	117	0,035
59	0,601	118	0,009



Anexo 7. Clúster de pertenencia encontrado por el método de k-medias para los 119 fragmentos de cerámico.

Código SPSS	Clúster al que pertenece	Código SPSS	Clúster al que pertenece	Código SPSS	Clúster al que pertenece	Código SPSS	Clúster al que pertenece
1	4	31	1	61	5	91	4
2	5	32	4	62	1	92	5
3	4	33	4	63	1	93	4
4	1	34	2	64	1	94	4
5	1	35	5	65	4	95	4
6	1	36	5	66	5	96	4
7	3	37	5	67	1	97	3
8	1	38	5	68	4	98	4
9	1	39	5	69	5	99	4
10	3	40	5	70	5	100	4
11	1	41	3	71	5	101	5
12	5	42	5	72	5	102	4
13	4	43	4	73	5	103	4
14	1	44	5	74	5	104	4
15	5	45	1	75	4	105	5
16	5	46	4	76	3	106	5
17	5	47	4	77	1	107	3
18	3	48	4	78	4	108	4
19	1	49	4	79	4	109	3
20	3	50	1	80	4	110	3
21	3	51	1	81	4	111	5
22	1	52	5	82	3	112	1
23	1	53	5	83	5	113	4
24	4	54	4	84	4	114	4
25	4	55	5	85	5	115	4
26	1	56	1	86	1	116	4
27	1	57	1	87	3	117	5
28	4	58	4	88	1	118	5
29	3	59	1	89	6	119	1
30	1	60	5	90	5		

Anexo 8. Fotografías de los fragmentos de cerámica agrupados según la clasificación del análisis de clúster k – medias.

Grupo composicional 1

			
PN13-037-001	PN13-053-002	PN13-053-006	PN13-055-001
			
PN13-055-004	PN13-061-010	PN13-072-010	PN13-115-003
			
PN13-128-008	PN13-138-003	PN13-174-022	PN13-174-029
			
PN13-187-017	PN13-197-002	PN13-244-011	PN13-247-021
			
PN13-250-015	PN13-254-003	PN13-254-004	PN13-277-014

			
PN13-284-006	PN13-287-006	PN13-288-002	PN13-295-023
			
PN13-334-006	PN13-400-006	PN13-401-006	PN13-467-004
			
PN13-522-005			

Grupo composicional 2

			
PN13-053-007	PN13-056-001	PN13-092-009	PN13-117-004
			
PN13-123-001	PN13-187-005	PN13-232-004	PN13-322-002
			
PN13-373-002	PN13-401-001	PN13-412-007	PN13-414-019
			
PN13-463-006	PN13-464-003		

Grupo composicional 3

			
PN13-008-001	PN13-034-001	PN13-067-011	PN13-138-020
			
PN13-156-001	PN13-177-001	PN13-204-001	PN13-206-001
			
PN13-232-010	PN13-244-022	PN13-244-028	PN13-244-034
			
PN13-244-037	PN13-254-001	PN13-275-005	PN13-295-006
			
PN13-295-024	PN13-320-009	PN13-334-008	PN13-337-001

			
PN13-337-002	PN13-349-003	PN13-374-016	PN13-410-025
			
PN13-411-003	PN13-411-004	PN13-411-011	PN13-412-003
			
PN13-413-001	PN13-413-003	PN13-413-004	PN13-413-018
			
PN13-413-028	PN13-414-005	PN13-416-028	PN13-468-001
			
PN13-470-002	PN13-472-003	PN13-487-004	

Grupo composicional 4

			
PN13-017-002	PN13-067-002	PN13-074-004	PN13-074-011
			
PN13-074-018	PN13-215-001	PN13-215-005	PN13-220-002
			
PN13-224-014	PN13-225-009	PN13-225-025	PN13-232-009
			
PN13-232-017	PN13-252-003	PN13-252-014	PN13-254-002
			
PN13-279-002	PN13-284-003	PN13-295-018	PN13-295-027

			
PN13-296-001	PN13-309-005	PN13-309-009	PN13-309-010
			
PN13-320-005	PN13-374-015	PN13-374-018	PN13-401-022
			
PN13-410-032	PN13-413-009	PN13-414-015	PN13-414-018
			
PN13-465-002	PN13-512-010	PN13-520-005	

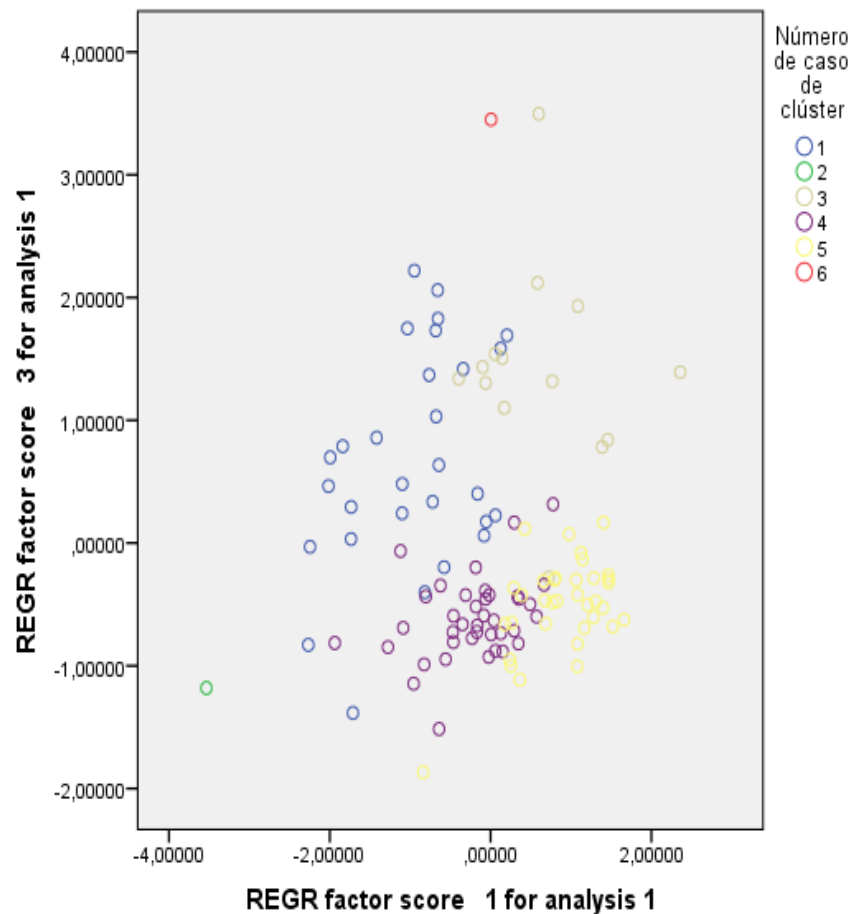
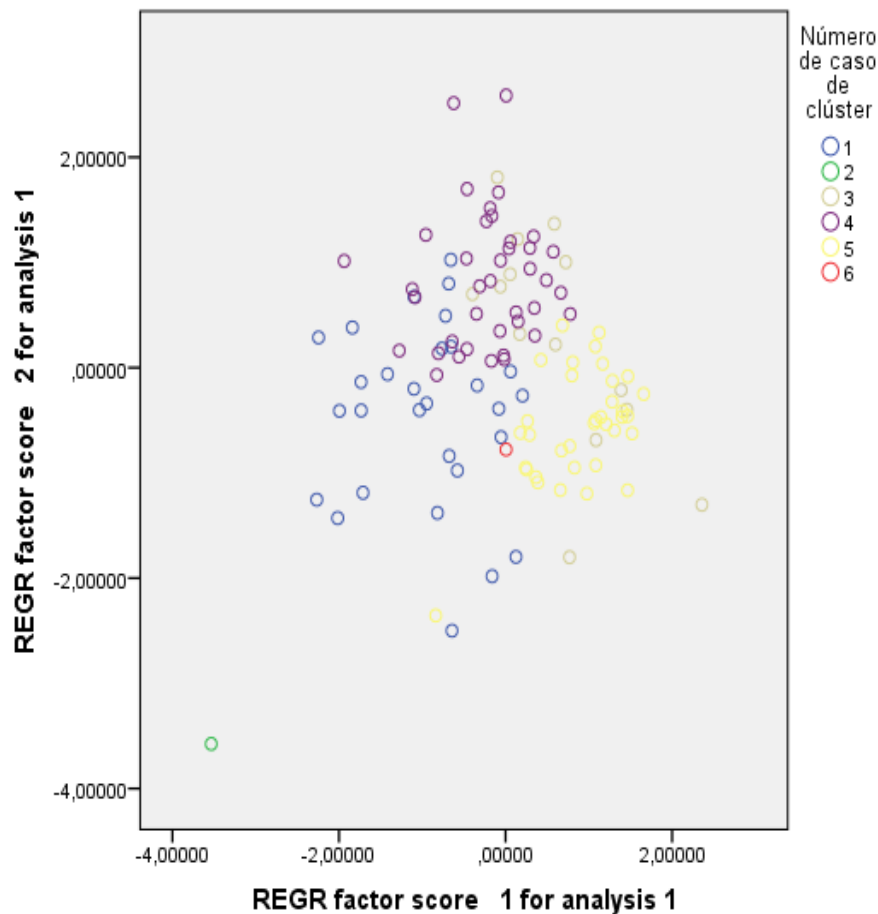
Caso extraño 1

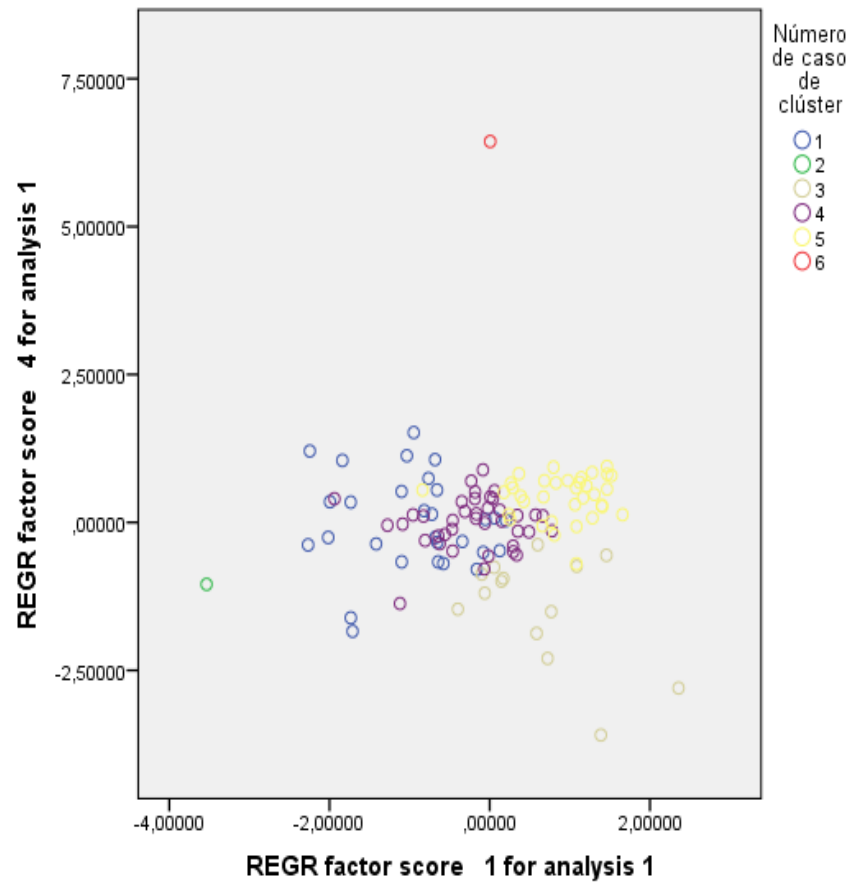
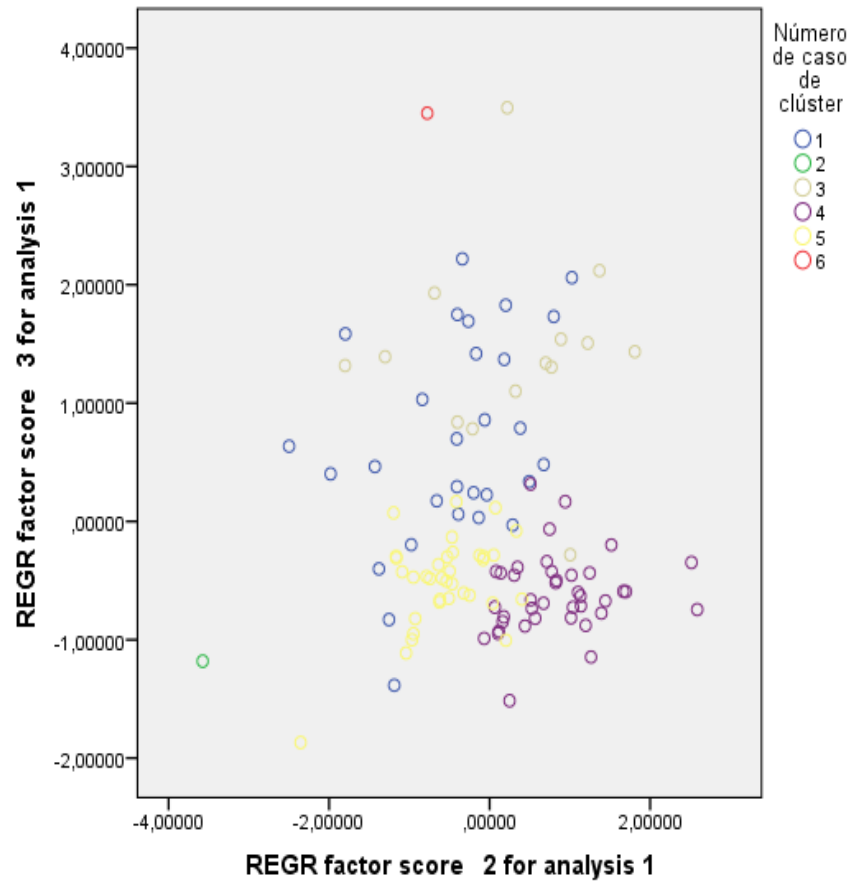


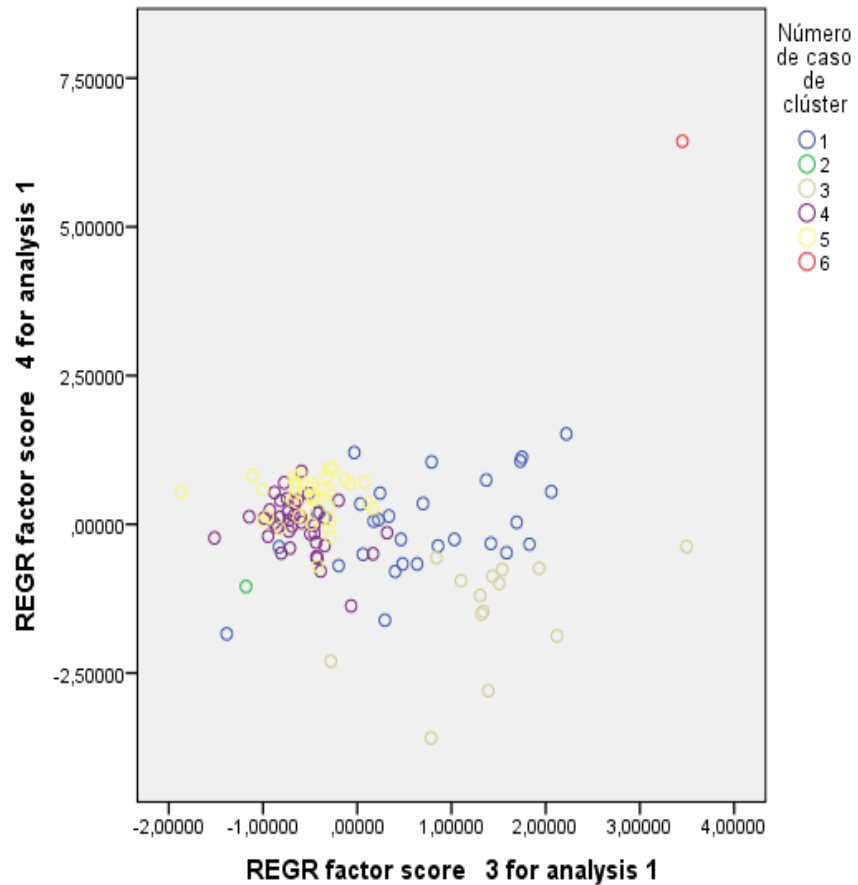
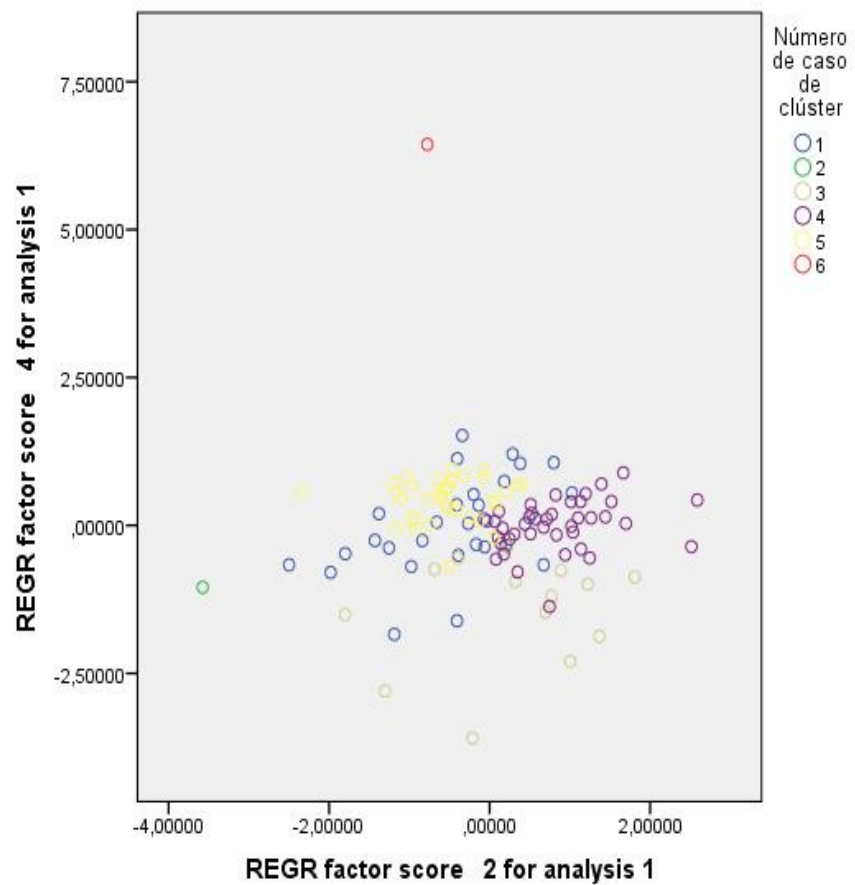
Caso extraño 2



Anexo 9. Proyecciones de las puntuaciones factoriales de los 119 fragmentos de cerámico en cada uno de los posibles espacios de las 4 componentes principales encontradas.







Anexo 10. Valores calculados, para los 30 azulejos de material arcilloso, de las 4 componentes principales y 2 funciones discriminantes.

Arcilla	Comp. Principal 1	Comp. Principal 2	Comp. Principal 3	Comp. Principal 4	Func. Discriminante 1	Func. Discriminante 2
ZPN0002	2,1053	-1,0945	-2,7203	-1,0425	5,3121	-2,6635
ZPN0004	2,4448	0,8425	0,8398	-2,3025	-1,4289	-4,3697
ZPN0005	2,4366	1,0071	0,5095	-1,9023	-0,3997	-4,2466
ZPN0006	2,5422	1,0141	-1,0584	-2,4476	1,5509	-5,9054
ZPN0007	-1,6278	-0,9047	-1,4968	-1,1387	-0,8919	-0,5722
ZPN0008	1,3956	-0,0045	1,3695	-3,5024	-4,9951	-4,1407
ZPN0018	0,5707	1,6272	2,2609	-1,3247	-4,5084	-2,3243
ZPN0020	1,7146	0,1447	1,2009	-0,0331	-0,0512	-0,2629
ZPN0022	1,5198	1,6929	2,4253	0,6574	-1,2524	-0,2802
ZPN0024	1,1182	2,1828	3,7319	1,1041	-3,1975	0,6951
ZPN0026	0,9323	1,3303	1,3685	0,2767	-0,7122	-0,7164
ZPN0027	1,8238	1,2334	2,0639	-0,1121	-1,3272	-1,0827
ZPN0028	0,5022	1,2311	2,0461	-1,1492	-4,0526	-1,7730
ZPN0031	1,1922	1,0848	0,9279	-0,3585	-0,5263	-1,6128
ZPN0032	0,5744	0,5588	1,4892	-1,5079	-3,5775	-1,8473
ZPN0033	0,9770	0,3188	4,4058	0,1207	-5,7961	1,9723
ZPN0034	1,5335	1,1831	1,9821	0,7646	-0,4331	0,1378
ZPN0035	1,8779	0,7234	4,4595	2,3783	-2,0482	3,9440
ZPN0036	0,8712	0,3946	4,1531	0,6234	-4,8787	2,4087
ZPN0037	0,2528	0,6610	5,5711	1,5737	-6,6341	4,4135
ZPN0046	0,7072	0,3824	0,9481	-1,3535	-2,3857	-1,8457
ZPN0047	-2,6289	-1,9536	-2,4698	2,0117	3,3888	4,3362
ZPN0048	-1,8075	0,1970	-3,3694	-0,3271	2,9986	-1,7976
ZPN0051	-0,9701	-0,5663	-2,6003	1,6652	5,1123	1,5701
ZPN0054	3,3240	0,6405	0,6598	-3,9017	-2,1672	-6,6300
ZPN0059	2,2402	0,7132	0,4132	-1,7731	-0,3252	-3,7355
ZPN0060	2,2781	0,5985	-0,2422	-2,4652	-0,1021	-4,8713
ZPN0061	1,5179	0,3354	0,8651	-2,6040	-2,9103	-3,7555
ZPN0064	0,7251	-0,4275	0,0739	-5,5035	-6,1820	-6,6165
ZPN0065	2,2047	0,3793	-0,7873	-4,5418	-1,9066	-7,4874