



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Caracterización espectroscópica de fragmentos de pintura
mural Teotihuacana de estilo Maya**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A:

Paulina Guzmán García Lascurain



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. José Luis Ruvalcaba Sil
2019**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del alumno:

- Paulina Guzmán García Lascrain
- paulina.guzman.gl@gmail.com

Datos del tutor:

- Dr. José Luis Ruvalcaba Sil
- sil@fisica.unam.mx

Datos del sinodal 1 (presidente):

- Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga
- beatriz.fuentes@ciencias.unam.mx

Datos del sinodal 2 (vocal):

- Dr. Lauro Bucio Galindo
- bucio@fisica.unam.mx

Datos del sinodal 3 (suplente 1):

- Dr. Jesús Ángel Arenas Alatorre
- jarenas@fisica.unam.mx

Datos del sinodal 4 (suplente 2):

- M. en C. Ricardo Martín Hernández Flores
- saurio99@ciencias.unam.mx

Sitio donde se desarrolló el trabajo:

- Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural, sede: Instituto de Física, UNAM (LANCIC-IF)

Agradecimientos académicos:

A mi tutor, el Dr. José Luis Ruvalcaba Sil, por permitirme trabajar en este maravilloso proyecto. Por todo su apoyo y enseñanzas, muchas gracias.

Al jurado, conformado por la Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga, Dr. Lauro Bucio Galindo, Dr. José Luis Ruvalcaba Sil, Dr. Jesús Ángel Arenas Alatorre y M. en C. Ricardo Martín Hernández Flores. Gracias por sus comentarios y correcciones. Quiero darles además un agradecimiento especial por su tiempo y dedicación, así como el compromiso y apoyo a mi futuro.

Al Proyecto Complejo Plaza de las Columnas, Teotihuacan. También a los arqueólogos responsables de los hallazgos que dieron vida a esta investigación, al Dr. Saburo Sugiyama y la Dra. Nawa Sugiyama.

Al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural, sede Instituto de Física, UNAM (LANCIC-IF), lugar donde se realizó esta investigación. Así mismo, quiero agradecer a los proyectos CONACYT LN279740, LN293904, CB239609 y PAPIIT UNAM IN112018, por el financiamiento otorgado.

Agradezco el apoyo técnico y de investigación del Dr. Edgar Casanova González, Dr. Miguel Ángel Maynez Rojas, Lic. Isaac Rangel Chávez y M. en C. Jaqueline Cañetas Ortega, Dr. Alejandro Mitrani, colaboradores de esta investigación.

A la Mtra. Hilda Lozano Bravo, Q. Griselda Pérez Ireta, M. en C. Valentina Aguilar Melo, Mtro. Luis Ricardo Nathael Cano Baca, Lic. Francisca Cecilia Pérez Grovas Sariñana, M. en C. Mayra Dafne Manrique Ortega, Dr. Óscar de Lucio, Mtra. Soledad Ortiz Ruíz, M. en C. Ma. Angélica García Bucio, Mtra. Ángela Ejarque Gallardo y el Mtro. Carlos López Puértolas. Gracias a todos.

Agradecimientos personales:

Quiero agradecer a mis padres, Luz García Lascurain Leon y Xavier Guzmán Urbiola, por ser el sustento de todo lo que, orgullosamente, soy el día de hoy. Gracias por darme las herramientas necesarias para construir y seguir construyendo. Gracias por la confianza, el amor y la solidaridad que me han dado toda la vida. Ustedes me llevaron por primera vez a Teotihuacan, sitio que hoy alberga los materiales que dieron vida a este trabajo. Finalmente, gracias por ayudarme a llegar hasta aquí. Esta tesis la dedico a ustedes.

A mis abuelos, María, Javier y Carmen. Para ustedes, todo mi amor.

Un agradecimiento especial a Ceci por toda la dedicación y tiempo. Gracias a ti por el inmenso apoyo, en este trabajo, en toda mi carrera y en mi vida.

A mis tres familias, gracias por su cercanía y cariño.

Gracias a Aurelia Álvarez Urbajtel por darme un espacio para poder realizar esta tesis. Gracias por la confianza y el cariño.

De nuevo quiero agradecer a mi tutor, el Dr. José Luis Ruvalcaba Sil. Por la confianza y la paciencia. Gracias por abrirme las puertas a un mundo en el que me he encontrado.

Un agradecimiento especial al Dr. Edgar Casanova González, por todo el apoyo.

A todos mis amigos, Vilchis, Isaura, Vale, Brenda, Sofía, Chino, Marisa, Bubu, Dalia, Randi, Olmo, Ilya, Luis, Clem, Blas, Aldo, Anthony, Jero, Lalo, Regina, Shary, Sabine, Malanche, Mariana, Juanjo, Arturo, Javier, Dario, Carolina, Ana, Diana, Verena, Eline y Zoe. Gracias por hacer mi paso por la universidad uno memorable y lleno de risas.

Quiero además agradecer especialmente a Jerónimo, Diego y Luis por ayudarme a

encontrar mi camino en esta noble profesión.

A mis profesores, Paty Goldstein, Ricardo Méndez Fragoso, Emma Lam, Ángeles Sandoval, Marcos Ley Koo, Mirna Villavicencio, Catalina Stern y Laura Serkovic, muchas gracias.

También quiero agradecer especialmente a Gris y Vale por apoyarme con este trabajo aún cuando ustedes también tenían los tiempos justos. Gracias por su solidaridad.

Finalmente quiero agradecer a Hilda por todas las conversaciones enriquecedoras, las comidas con comino y los cafés diluidos que me apoyaron a llegar hasta aquí. Gracias por ser compañera y compañía. _____

Resumen:

Las excavaciones realizadas por el Dr. Saburo Sugiyama y la Dra. Nawa Sugiyama en el complejo Plaza de las Columnas, Teotihuacan, han revelado una amplia cantidad de fragmentos de pintura mural, algunos de los cuales muestran iconografía Maya.

Mediante esta investigación, se busca caracterizar los materiales constituyentes de los fragmentos, con el fin de apoyar a la investigación e interpretación desarrollada por los arqueólogos.

Para lograr esto, se empleó una metodología que parte del análisis global mediante técnicas de imagen y tiene su sustento en la caracterización espectroscópica tanto elemental como molecular y estructural. Se emplearon las técnicas de imagen infrarroja de falso color, microscopía óptica, fluorescencia de rayos-X, colorimetría, espectroscopía de reflectancia por fibra óptica y microscopía electrónica de barrido. Los análisis fueron realizados tanto en el Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural, como en las instalaciones de Teotihuacan Mapping Project.

Los resultados obtenidos muestran que tanto los soportes como los pigmentos empleados, corresponden a lo descrito por las fases técnicas II y III de la Dra. D. Magaloni para la pintura mural Teotihuacana. Se encontraron enlucidos finos y argamasas gruesas de tierra. También se logró identificar una paleta compuesta por los colores rojo, amarillo, negro, blanco, verde y azul. Además, se identificó el uso de cinabrio como pigmento rojo en los fondos, así como el empleo de diferentes tipos de moliendas para los pigmentos verdes y una posible mezcla diferente en los pigmentos negros.

La evidencia material recabada hasta ahora, apunta a que se emplearon materiales y mezclas locales independientemente de la estética empleada en el diseño de los fragmentos. Este trabajo aporta información valiosa para la investigación e interpretación de los fragmentos de pintura mural Teotihuacana de estilo Maya.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	8
2	ANTECEDENTES	14
3	FUNDAMENTOS FÍSICOS	36
3.1	ESTRUCTURA DE LA MATERIA.....	36
3.2	INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA MATERIA.....	41
3.3	TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS	43
3.3.1	<i>Fluorescencia de Rayos X (XRF)</i>	44
3.3.2	<i>Espectroscopía de reflectancia con fibra óptica (FORS)</i>	51
3.3.3	<i>Colorimetría</i>	58
3.4	TÉCNICAS DE IMAGEN Y MICROSCOPIA	64
4	METODOLOGÍA	71
4.1	CONTEXTO Y MATERIALES DE ESTUDIO.....	71
4.1.1	<i>Complejo Plaza de las Columnas, Teotihuacan</i>	72
4.2	FRAGMENTOS ANALIZADOS.....	74
4.3	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	76
5	RESULTADOS	81
5.1	SOPORTES	81
5.1.1	<i>Argamasas</i>	83
5.1.2	<i>Enlucidos</i>	95
5.2	PIGMENTOS.....	115
5.2.1	<i>Blancos</i>	119
5.2.2	<i>Negros</i>	133
5.2.3	<i>Ocres y amarillos</i>	144
5.2.4	<i>Rojos</i>	152
5.2.5	<i>Verdes</i>	164
5.2.6	<i>Azules</i>	173
6	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	184
7	REFERENCIAS	191

1 Introducción

La arqueología busca entender el pasado humano por medio de restos físicos. Esclarecer el pasado requiere extraer toda la información necesaria, aquí es donde la ciencia juega un papel fundamental (Tite, 1991). El trabajo multidisciplinario en este tipo de áreas de intersección resulta fundamental para poder entender los materiales arqueológicos. Así, la ciencia busca proporcionar información que después será contextualizada, para poder ser interpretada por los arqueólogos.

Como físico es importante tener en cuenta que la labor fundamental de una tesis de esta naturaleza, es obtener resultados que están rodeados por un contexto histórico. Con lo anterior en mente, es importante destacar que en el análisis de estos resultados tiene que tomar en cuenta el contexto en el que se encuentran. Para ello se hace uso de técnicas espectroscópicas no invasivas, o de ser necesario invasivas, que permitan conocer las características de las muestras arqueológicas. Estas técnicas espectroscópicas estudian la composición atómica y estructura molecular de las muestras arqueológicas con el objetivo de lograr la caracterización de los materiales que componen a los restos materiales. Como ya se dijo, la interpretación de estos datos va de la mano con un contexto histórico estudiado y establecido.

Los restos arqueológicos son objetos únicos con un alto valor histórico, es por esto que se favorecen los métodos de análisis no invasivos. Sin embargo, todas las técnicas de análisis tienen limitantes y por lo tanto algunas veces es necesario recurrir a los análisis invasivos mediante la toma de muestra. Para ello es indispensable ponderar la importancia de los resultados frente al daño que se provocará sobre la muestra arqueológica. A la hora de trabajar con patrimonio cultural, es fundamental reconocer los límites de las técnicas de análisis y asumir que existen situaciones en la que no se podrá obtener una respuesta.

Parte fundamental de esta disciplina es el estudio de los materiales para su conservación.

Michael Tite se refiere a la conservación de los objetos como uno de los tres ejes fundamentales de la investigación en las ciencias arqueológicas. No es trivial que la conservación tenga un gran impacto, para empezar, es necesario conservar los objetos arqueológicos para permitir a futuras generaciones conocer y adueñarse de su historia. Además, conservar para permitir que la tecnología avance y pueda continuar respondiendo preguntas que hoy en día parecen no tener solución.

Sin embargo, la conservación del patrimonio no puede ser el único motor de las ciencias arqueológicas. En su artículo “La réconciliation des arts et des sciences”, Changeux señala que:

Estudiar las obras de arte no sólo sirve para apoyar al cuidado y preservación del patrimonio, sino para poder enriquecer la lectura que se tiene del mismo

En este sentido, la labor de las ciencias arqueológicas no es solo conservar el patrimonio cultural, sino ampliar el conocimiento para obtener aproximaciones más acertadas sobre la vida del hombre.

Dentro de los tantos vestigios arqueológicos se encuentra la pintura mural, o fragmentos de ésta. La pintura mural es una de las representaciones artísticas más comunes en Mesoamérica. Muchos autores convergen en que, las grandes ciudades mesoamericanas, así como los centros ceremoniales y palacios, estaban repletos de color. La pintura mural en Mesoamérica tenía la labor de embellecer, así como de plasmar eventos importantes para la historia y transmitir mensajes políticos, económicos y religiosos. Como bien lo destaca Beatriz de la Fuente, las raíces etimológicas del término Pintura son tanto latinas como griegas. La latina, Pingere, está relacionada con la palabra “engaño”, mientras que la raíz griega considera a la pintura y a la escritura como la representación gráfica de las ideas. La evidencia arqueológica nos muestra que los exteriores de los edificios estaban coloreados por tonos monocromáticos y planos, mientras que las grandes representaciones de pintura mural se encontraban dentro de los muros.

Hoy se sabe, gracias a diversos estudios, que la elaboración de una pintura mural era un proceso delicado. Todo un taller artesanal se encargaba de preparar el muro, crear los pigmentos, diseñar los dibujos previos y aplicar la pintura. El artesano no era un creador independiente, sino miembro de un colectivo que preponderaba las ideas a transmitir, sobre la fama y el individualismo (Uriarte & Zabé, 1998). Esta estructura habla de la complejidad de un mural y de todo el trabajo que había detrás.

Teotihuacan no es la excepción: en este sitio arqueológico se pueden encontrar una gran cantidad de conjuntos palaciegos que tienen pintura mural, así como manifestaciones a lo largo de la Calzada de los Muertos. Incluso pisos pintados, como es el caso de La Ventilla o en la plaza de la Pirámide del Sol (Lozano Bravo, 2018). Además, existen vestigios de color aplicados sobre altares, como en el caso de Atetelco y recubrimientos pictóricos en las pirámides, como se puede apreciar en La Ciudadela. Consistentemente se hace referencia a El Estilo Teotihuacano como aquel que utiliza enlucidos finos y con incrustaciones de material volcánico (Barca et al., 2013). Además, de acuerdo con D. Magaloni, también es característico el uso de colores saturados y homogéneos, así como un trazo de figuras geométricas y estáticas que buscan una naturaleza idealizada de las figuras.

Por otro lado, en el área Maya también hay diversas evidencias de pintura mural. Entre las más famosas destacan Bonampak, Chichen Itzá, Ek-Balam, Calakmul, entre otros. Los Mayas, al enfrentarse a un terreno pobre en minerales y a un ambiente extremo, tuvieron que desarrollar la paleta cromática por medio de pigmentos laca producidos por una arcilla y una colorante orgánico. Este es el caso del “Azul Maya”, que está hecho con paligorskita e índigo. D. Magaloni hace referencia a las características de la pintura Maya, entre las que destaca el trazo fino delimitado por contornos negros, representaciones antropomorfas comparables con el mundo terrenal y figuras con movimiento. Además, los mayas jerarquizaban a las figuras dependiendo de su posición espacial en el mural (Lombardo de Ruiz, 1998).

Esta investigación se trabajará con los fragmentos de pintura mural encontrados en complejo Plaza de las Columnas. Esto se llevará a cabo por medio de técnicas espectroscópicas no invasivas. Además, se analizarán fragmentos en el laboratorio, así como en la zona arqueológica. Esto último es posible gracias a la portabilidad de los equipos.

La aproximación científica para el apoyo de la investigación arqueológica es conocido como arqueometría. Esta es una rama, tanto de la ciencia de materiales como de la arqueología, bien establecida hoy en día. En otras palabras, el trabajo en este campo busca valerse de los resultados y técnicas que proveen las ciencias naturales, para la resolución de interrogantes de carácter humanístico y antropológico.

Afortunadamente para este trabajo, el trecho ha sido trazado desde hace varios años. En el caso específico de la pintura mural en Teotihuacan, de los primeros trabajos realizados fueron los de D. Magaloni (1996). En su extensa investigación ella permite aproximarse a las evidencias materiales por medio de la ciencia, en búsqueda de tener un conocimiento más extenso de la pintura mural.

Muchos más estudios de esta naturaleza se han realizado en Teotihuacan para diferentes contextos. Entre los más destacados se encuentran los trabajos realizados por J. Gazzola (Gazzola, 2000), la compilación de estudios arqueométricos para el centro de barrio de Teopancazco (2012). También hay trabajos relacionados con el estudio de cerámica (Fletcher, 2002; Ontalba Salamanca, Ruvalcaba-Sil, Bucio, Manzanilla, & Miranda, 2000). Hasta llegar a trabajos más recientes como los realizados para pigmentos por A. Ejarque (2017) y C. López (2017) o la propuesta cronológica para las fases constructivas de la plaza Pirámide del Sol (Lozano Bravo, 2018).

Este tipo de estudios no se han realizado únicamente en la zona de Teotihuacan. La versatilidad de la ciencia para adaptarse a las preguntas de investigación permite aplicar metodologías arqueométricas a diferentes objetos de estudio. Este es el caso de trabajos

como el de caracterización de piedra verde del ajuar funerario del rey Pakal (Manrique Ortega, 2012), o la caracterización de códices (Jose Luis Ruvalcaba et al., 2007; S. Zetina et al., 2011; Sandra Zetina et al., 2008). También se encuentran trabajos sobre pintura mural en otras regiones de Mesoamérica (Alonso et al., 2014; Magaloni, 1998; M^a Luisa Vázquez de Ágredos Pascual, Lorenzo, & Cosme, 2014); así como caracterización cerámica de diferentes regiones (Pérez Ireta, 2016). Se han realizado estudios en joyería y materiales de alto valor como el oro (Demortier & Ruvalcaba-Sil, 1996; Peñuelas, Ruvalcaba, Contreras, Hernández, & Ortiz, 2011; J. L. Ruvalcaba & Demortier, 1995). Hasta la investigación en materiales constructivos (Pérez, Bucio, Lima, Soto, & Cedillo, 2016).

Los materiales arqueológicos no son los únicos en analizados mediante este tipo de estudios arqueométricos. Se han empleado técnicas a la investigación de obra de arte como pintura de caballete (Cano Baca, 2018), pintura mural (Torres Flores, 2017), pintura flamenca (Alfeld et al., 2013) y arte contemporáneo (Dik et al., 2008).

Finalmente hay trabajo realizado desde el campo de la ciencia para desarrollar metodología que permita seguir aproximándose de mejor manera a los materiales patrimoniales. Este es uno de los objetivos del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC). Aquí se realizan trabajos tan diversos como el de M.A Bucio (2015) para la caracterización de pigmentos y colorantes; el estudio de una metodología para la investigación de vidrios arqueológicos (Cadena Irizar, 2018). La aplicación de la difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X en el estudio de diversos materiales por V. Aguilar (2014), así como la aplicación de técnicas de aceleradores y técnicas nucleares realizada por A. Mitrani (2017). Hasta investigaciones más recientes como la metodología para la datación y caracterización de pisos antiguos desarrollada por H. Lozano (2018).

El trabajo a continuación presentado es una confirmación más de que, en las palabras de Isaac Newton: si he visto más lejos, es porque estoy sentado en hombros de gigantes.

Al ser fragmentos de mural que se encontraron Teotihuacan, pero algunos de los cuales tienen un *estilo maya*, se tiene como **hipótesis** de este trabajo, que independientemente del estilo que presenten, los fragmentos de pintura mural están hechos con materiales y mezclas de pigmentos que permiten inferir las técnicas y materiales propias de una tradición de pintura mural específica con elecciones culturales propias, incluyendo la del área maya.

Por lo tanto, el **objetivo principal** de esta investigación es buscar caracterizar los materiales que se encuentran en los fragmentos de pintura mural encontrados en Plaza de las Columnas, Teotihuacan, de forma no invasiva, principalmente con técnicas espectroscópicas. Así mismo, con la evidencia material, se buscará comparar e interpretar los resultados con estudios previos realizados en Teotihuacan como en el área Maya, lo cual constituye el **objetivo secundario** de esta investigación.

2 Antecedentes

En el trabajo los materiales analizados son ***pintura mural Teotihuacana de estilo Maya***. Es por ello que resulta importante recapitular los trabajos previos, aunque no son los únicos, hechos alrededor de los aspectos formal y material de las pinturas murales prehispánicas, a cargo de la Dra D. Magaloni, Dra. S. Lombardo y la Dra. M.L. Vázquez de Agredos. Además, por la naturaleza de los materiales analizados, este capítulo presenta información tanto de pintura mural Teotihuacana, como del área Maya. Se busca hacer esta recapitulación con la intención de adentrar al lector a los trabajos previos en este campo.

La pintura mural prehispánica:

Rita Eder (De la Fuente, 1995a, sec. VII) describe con puntualidad la inmensa riqueza arqueológica de México, “es difícil viajar por el país y no encontrar vestigios de aquel pasado”. Esta herencia cultural, no solo merece, sino debe ser estudiada desde todas las disciplinas posibles, buscando siempre la ampliación del conocimiento.

Entender a una sociedad a través de sus vestigios materiales es la labor fundamental de la arqueología. Desde las grandes metrópolis, hasta pequeños fragmentos de cerámica, permiten a los arqueólogos entender procesos de producción, organización social, dietas, ritos, etc. La pintura mural, no se queda atrás, siendo tal vez uno de los vestigios más ilustrativos, ya que es una evidencia irrefutable del entendimiento del mundo desde los ojos del hombre prehispánico (De la Fuente, 1995a). De acuerdo con la definición de la Dra. B. de la Fuente, *Pintura Mural*, se entiende como “la representación de imágenes en una superficie arquitectónica bidimensional” (De la Fuente, 1995b).

Si bien, el estudio de la pintura mural permite conocer las creencias, costumbres, rituales, organizaciones gubernamentales, etc. El estudio de los materiales da información no sólo sobre el hombre de élite, sino de los artesanos encargados de su creación. Estudiar los materiales y la técnica constructiva, es entonces, otra perspectiva que aporta información

para seguir armando el rompecabezas del pasado prehispánico.

En la pintura mural prehispánica se encuentra plasmada, en el plano bidimensional, la realidad vista desde los ojos de una civilización. Para el caso de México, *una civilización* no es un término que unifique a la vasta diversidad que existe en la hoy República Mexicana. Entonces, no es de extrañarse que, igual que el lenguaje, la forma de narrar y pintar al mundo variara entre regiones, cada una de estas manteniendo su *estilo*.

En este contexto, el *estilo*, definido por Meyer Schapiro es el sistema de formas con una cualidad y expresión significativas que permiten ver la personalidad de su creador, así como su visión del mundo rodeado de la realidad de un grupo social con un sistema de valores (Lombardo de Ruiz, 1996 citando a Schapiro, 1962). Para el caso de la pintura mural, esto se traduce en el código de colores, líneas y formas, así como texturas, acabados de superficie y materiales empleados en su creación, todo esto para obtener un producto final que responda a ciertas necesidades de la sociedad de acuerdo con su contexto arquitectónico.

Puesto que la definición de estilo permite acotar el término en la escala deseada, es necesario delimitar las fronteras para así poder diferenciar estilos y encontrar comunes denominadores. Por ejemplo, el estilo de pintura mural mesoamericana permitirá englobar a todas las culturas del espacio geográfico: Mesoamérica, y así poder diferenciarlas de las otras culturas del continente. Si se restringen más estas condiciones, se podría hablar de los diferentes estilos por regiones culturales en Mesoamérica, el Golfo, el Altiplano, la zona Maya, etc. Por la naturaleza de los objetos de estudio caracterizados este trabajo, se contrastará únicamente dos estilos: el Teotihuacano y el Maya. De la misma manera, se trabajará con más énfasis en las fronteras temporales de los periodos Tlamimilolpa (200-350 d.C) y Xolalpan (350-550 d.C) (Manzanilla, 2014, p. 988)¹ así como sus contemporáneos

A ¹ Se incluye la cronología presentada por la Dra. Manzanilla en la sección A:

en el área Maya.

Pintura mural Teotihuacana

La arquitectura es el compañero inseparable de la pintura mural, ya que sin la arquitectura no existirían muros donde pintar. En el caso teotihuacano, la pintura mural se encontraba tanto en espacios exteriores como en interiores. Los restos de pintura mural exterior son pocos ya que la naturaleza de su ubicación los hace susceptibles al rápido deterioro ambiental. Las evidencias de muros exteriores que aún conservan color indican que existía una tendencia por decorar los taludes y tableros de los basamentos piramidales (Lombardo de Ruiz, 1996). En el caso de los muros interiores, las pinturas murales se encuentran en pórticos, cuartos y corredores. Existe una jerarquía en la composición de los muros interiores, que también responde a un estilo.

En Teotihuacan, el espacio pictórico se estructura como una sucesión de unidades autónomas, que no se interconectan entre sí de manera fluida, sino drásticamente diferenciadas por medio de cambios de nivel o de ejes ortogonales” (Lombardo de Ruiz, 1996, p. 15). En el caso de algunos ejemplos como Tetitla, Zacuala, Tepantitla o Atetelco, se ha encontrado una secuencia en las pinturas, indicada por la direccionalidad de las imágenes representadas de perfil (Lombardo de Ruiz, 1996). Sin embargo, este tipo de análisis permanecen como la descripción característica de cada espacio, sin poderse generalizar como parte del estilo teotihuacano debido a la poca densidad de pintura mural completa en el sitio. Una de las características técnicas comunes a la pintura mural teotihuacana, es la apariencia cristalina y brillante del color, así como la saturación cromática (Magaloni, 1995). Sin embargo, estas generalidades, entre otras, fueron el producto de un desarrollo estilístico a lo largo de la tradición pictórica teotihuacana.

De acuerdo con la división de S. Lombardo, la pintura mural Teotihuacana tiene cinco fases

Cronología de Teotihuacan

estilísticas. La primera fase estilística comprende el periodo entre el 500 a.C y la era actual, las pinturas murales de este periodo están integradas a los elementos arquitectónicos de los basamentos. Tienen figuras son simbólicas con tipos geométricos o bien grecas o volutas entrelazadas. Cada uno de los diseños y figuras están auto contenidos², están delimitadas por líneas negras de contorno o bien una cinta de color que contrasta y define las figuras. La paleta de color en este periodo no es extensa, consta de dos colores principales: el rojo-naranja (identificado como óxido de hierro), tres tonos de verde: brillante, seco y olivo (identificado como carbonato de cobre), negro y ocre en menor proporción (Magaloni, 1996). Los enlucidos son blancos que en algunas partes también funcionan como un color, dejándolos sin pintar intencionalmente. Además, los enlucidos están compuestos de carbonato de calcio, así como cargas de sílice o cuarzo volcánico (Magaloni, 1996).

La segunda fase estilística, comienza alrededor del 200 d.C y se caracteriza por la aparición de figuras zoomorfas y representaciones alegóricas de la naturaleza. Esta segunda fase no rompe con el estilo anterior completamente. Aunque la paleta de color continúa siendo la misma pero la aplicación de pintura en los elementos arquitectónicos cambia de intensidad. En el caso de los enlucidos, la matriz principal sigue siendo de carbonato de calcio, pero las cargas pasan a ser arenas sílico-alumínicas con tamaños aproximados de $300\mu m$ a $400\mu m$ (Magaloni, 1996). La decoración de las cenefas deja de ser abstracta y es remplazada por elementos como estrellas de mar, plumas, gotas de agua y animales, estos últimos representados de perfil. En esta etapa es la primera vez que se representa un híbrido ave-reptil (Lombardo de Ruiz, 1996) como se puede apreciar en la Figura 2-1. Esta representación se encuentra en un basamento, pero a diferencia del estilo anterior, aquí se está representando una escena: el felino con plumas en los ojos y en el hocico, en la parte central. Este personaje tiene dos garras que apresan a las serpientes emplumadas que lo rodean. Además, George Kubler menciona como “característica invariante de la pintura teotihuacana, que las figuras frontales tienen una jerarquía privilegiada respecto a las que están de perfil (...)” (Lombardo de Ruiz, 1996). De la misma forma, S. Lombardo evalúa la

² Auto contenido aquí significa que cada figura es un elemento autónomo.

posibilidad de jerarquización del espacio pictórico entre las figuras que se encuentran en un plano elevado, frente a las que están en planos inferiores. Puede ser esto efectivamente una forma de jerarquización, o bien una forma de representar el espacio tridimensional en el plano pictórico.

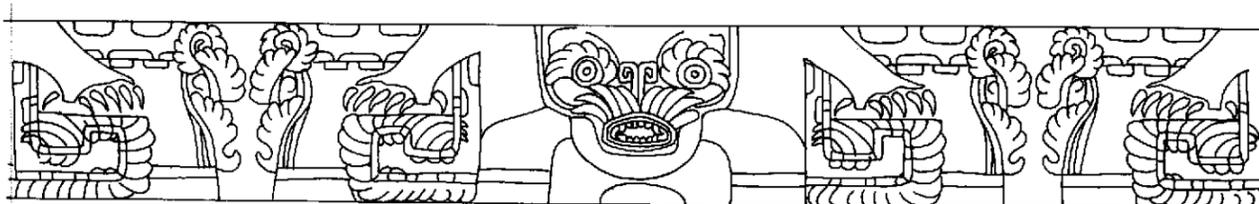


Figura 2-1: Conjunto Plaza Oeste. Basamento 40F, mural 1 (felino con serpiente) (De la Fuente, 1995a, p. 45)

Hay dos representantes más de la segunda fase estilística, el mural de los *animales mitológicos* (Figura 2-2) y el de las *guacamayas portadoras de lluvia* (Figura 2-3). En ambas se comienza a utilizar un color verde oscuro, sin dejar de utilizar el rojo-naranja y verde olivo. Se utiliza una línea negra muy delgada que sirve de contorno y además dibuja detalles como plumas, manchas o escamas (Lombardo de Ruiz, 1996). Hay una mezcla entre las figuras zoomorfas y fitomorfas³ con los ideogramas. En ambos, los personajes están representados de perfil y realizando acciones.

³ Con forma de planta o vegetal.

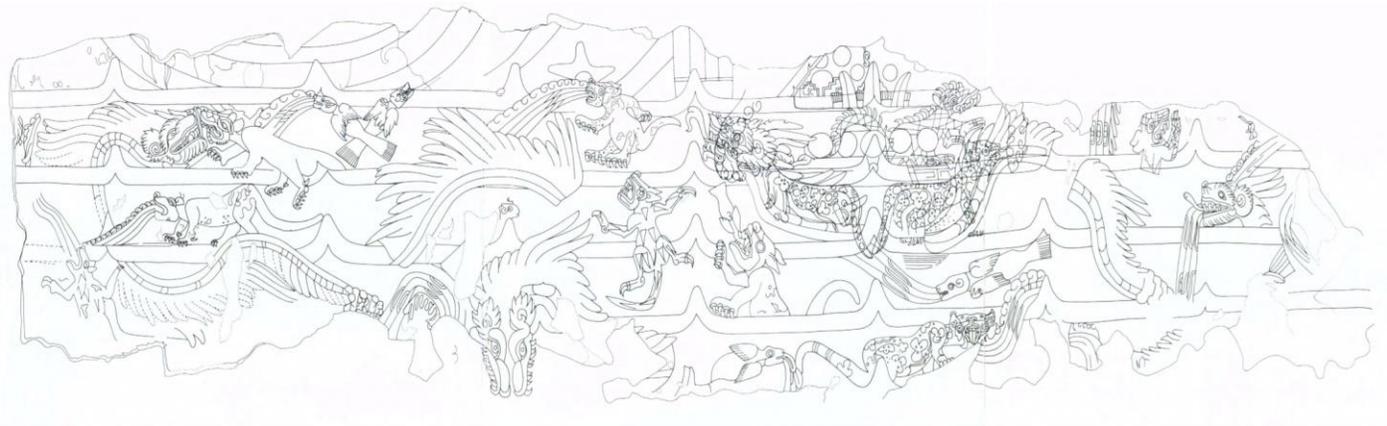


Figura 2-2: Lámina 4. Zona 4. Animales Mitológicos. Plataforma 1. Cuarto 1. Vista general (De la Fuente, 1995a, p. 96b)

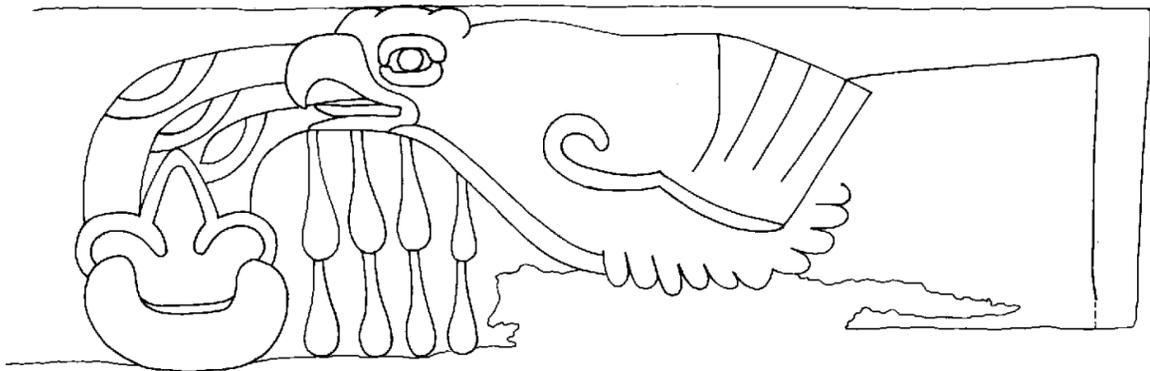


Figura 2-3: Zona 2. Templo de los Caracoles Emplumados. Subestructura 2, mural 4 (tablero con aves) (De la Fuente, 1995a, p. 109)

A partir de la segunda fase estilística, S. Lombardo (1996) y D. Magaloni (1996), establece n algunas convenciones que se mantendrán como constantes en el estilo de pintura teotihuacano, en el aspecto formal:

- 1) Los espacios pictóricos tienen formatos rectangulares, horizontales y autónomos. Están bordeados por cenefas, pintadas o como elementos arquitectónicos, que enmarcan el espacio pictórico.
- 2) El uso de la línea de borde continua que delimita las superficies de color. Estas

pueden ser rectas, curvas o ambas.

- 3) Cintas de borde de color contrastado para delimitar figuras o partes de ellas.
- 4) Yuxtaposición de colores complementarios para generar efectos de mayor intensidad.
- 5) Superficies de formas geométricas u orgánicas y de textura liza.
- 6) Las imágenes siempre representadas sin efectos de volumen o profundidad. Buscar siempre tener una representación bidimensional sin importar que se distorsione la imagen o se necesite recurrir a representaciones simultáneas de las partes frontales y laterales de un mismo objeto.
- 7) Jerarquización de los elementos a partir de los ejes centrales de las composiciones geométricas, así como por su disposición frontal o lateral.
- 8) Dos sistemas pictóricos⁴ utilizados indistintamente: la sucesión de figuras y la escena.
- 9) Enlucidos finos y con cargas areniscas.

Mientras que en el aspecto iconográfico son características las figuras zoomorfas, fitomorfas, híbridas o ideográficas. El uso de ideogramas como grecas: símbolos calendáricos, *chalchihuites*, plumas como calificativo de lo precioso, chorros de agua, gotas, ondas, estrellas de mar y otros símbolos de agua, además de ideogramas locativos. Se conforma el símbolo de la *bigotera de Tláloc* que incorpora elementos del hocico de jaguar. También se representan alegorías de la naturaleza y las deidades simbolizadas por ellos. Se instaure la serpiente emplumada como forma iconográfica de la deidad de la fertilidad y el agua de lluvia y por último se establece la iconografía del Dios I teotihuacano como deidad de la fertilidad y del agua que brota de la tierra.

La tercera fase estilística se desarrolla en el periodo Tlamimilolpa. En ella el cambio es más bien técnico, aunque las quince convenciones estilísticas permanezcan constantes. El uso de la línea de borde cambia de ser negro (como en la primera y segunda fase estilística) y

⁴ Sistema pictórico es la forma en la que se ordenan las figuras y formas en un mismo espacio pictórico.

pasa a ser roja, sin embargo, el uso de la línea de borde responde al mismo cometido, delimitar las superficies de color. La tercera fase estilística se caracteriza por la introducción y utilización de los fondos rojos de matiz guinda, conocido también como *Rojo Teotihuacano*, que además quedará establecido en las siguientes fases estilísticas. Este pigmento fue identificado por D. Magaloni (1996) como hematita, aplicado en varias capas de repinte. Además, la paleta se vuelve más oscura, predominando la utilización del color rojo y diferentes tonalidades del mismo para obtener rosas y ocre. Se incorpora también el uso del azul y la utilización de este, así como verdes, ocre y negros, queda limitada a espacios pequeños y detalles. Para el color azul, también se presentan diferentes tonalidades a partir de mezclas de varios materiales⁵, el componente principal de estos era la azurita, aunque también se identifican combinaciones de pirolusita con yeso y carbonato de calcio (Magaloni, 1996) (Tabla 2-1). El tipo de molienda de los pigmentos verdes se hace más refinada con cristales de malaquita menores a los $20\mu m$ (Magaloni, 1996), teniendo estratos pictóricos de menor espesor, lo cual permite que los verdes se conserven en mejor estado. Se introducen tres convenciones nuevas del aspecto formal que se fijan para las siguientes dos etapas (Lombardo de Ruiz, 1996):

10) Línea roja y fina de contorno.

11) Línea gruesa para delimitar los cuerpos de felinos.

12) Fondo rojo oscuro.

Los aspectos iconográficos incluidos en esta fase son la incorporación de nuevos elementos ideográficos como la voluta para representar al símbolo de la palabra o el canto, la voluta con gotas de sangre como símbolo de sacrificio o las ondas de agua en los fondos. Los zoomorfos se representan en mayor escala, como es el ejemplo del *Gran Puma* de la Calzada de los muertos (Figura 2-4). También se les representa utilizando objetos de uso humano. Las figuras antropomorfas son incluidas en las representaciones pictóricas, como es el caso de las pinturas en el conjunto palaciego de Tetitla (Figura 2-5). Hay algunas que representan

⁵ Ver Tabla 2-1.

actividades cotidianas y otras en representaciones sacerdotales o deidades. Existe una predominancia de las deidades felinas y la serpiente emplumada no se representa en este periodo. Además, se establece la iconografía del Dios de las tormentas con las características del Tláloc Mexica.

Para poder desarrollar pinturas murales de manera progresiva en un conjunto arquitectónico, la elaboración de las mismas también está estandarizada. D. Magaloni (1995) establece que la elaboración de una pintura mural consta de siete fases: primero se realizaba un estudio pictórico que permitía determinar la relación entre el espacio y las imágenes que se podían incluir en el mismo. Posteriormente se aplicaba a los enlucidos una capa de arcilla blanca que bruñía la superficie lo cual permitía que ésta permaneciera húmeda, para ello se utilizaban llanas de basalto. El siguiente paso era contornear todas las figuras a trazar con un dibujo preparatorio de color rojo. Después se aplicaba el color rojo de fondo el cual era bruñido repetidas veces (después de cada mano de color) para compactar la superficie. Los siguientes colores que se agregaban eran los amarillos, ocres, naranjas y rojos claros, por último, verdes y azules. En seguida de ser aplicados, los colores eran pulidos para quedar homogéneos. Finalmente, los contornos de las figuras se retocaban con rojo oscuro.

Durante la cuarta fase estilística, el auge de la pintura mural Teotihuacana, que está comprendida en el periodo Xolalpan, el desarrollo estilístico aumenta considerablemente. La paleta de colores se amplía, los colores contrastantes incrementan su aparición, así como la inclusión de pequeños detalles en las pinturas. Persisten las líneas para dividir los elementos, de color rojo, curvas o rectas. Las cenefas aumentan de tamaño y comienzan a incluir ideogramas que las convierten también en un elemento discursivo por sí solas, representando locaciones o bien atributos propios de la escena.

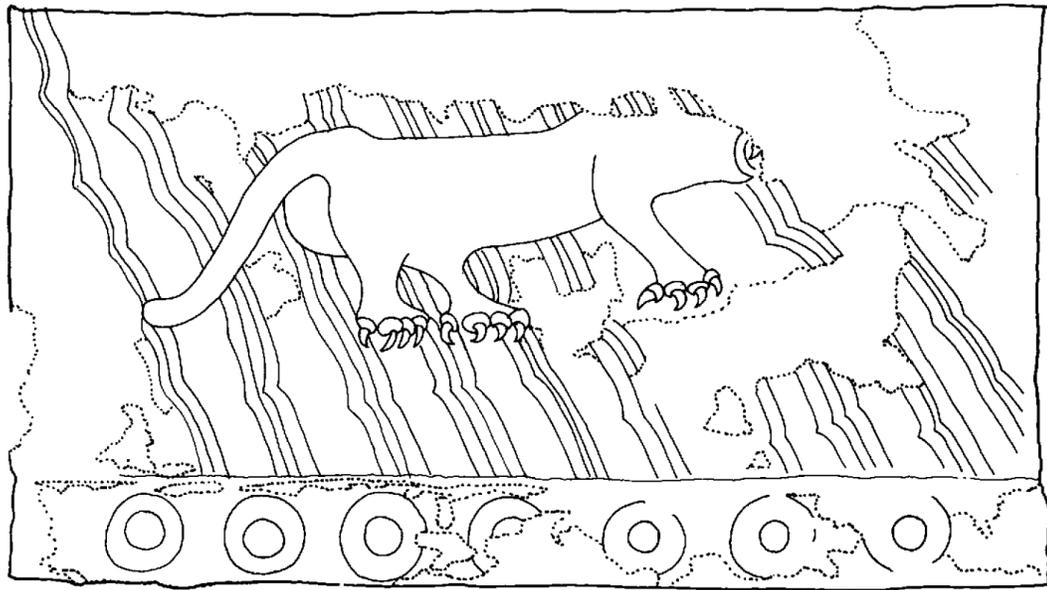
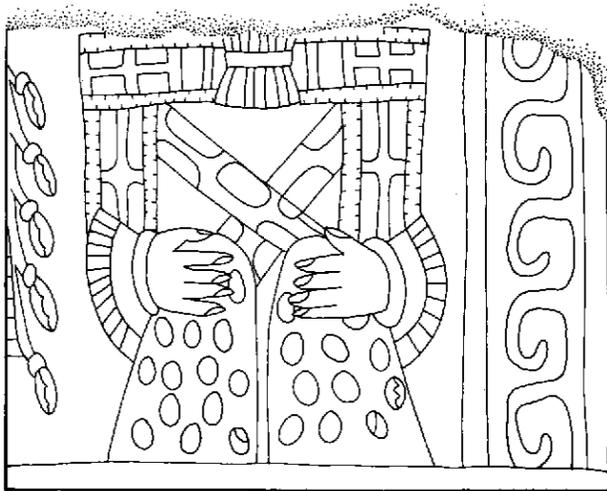
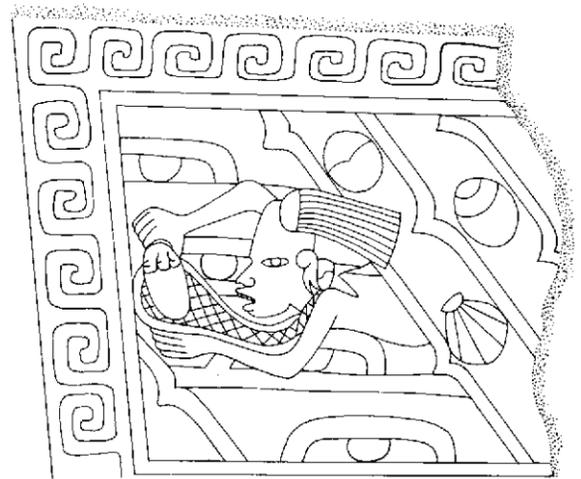


Figura 2-4: Zona 3. Gran Puma. Plataforma 16, mural 2 (De la Fuente, 1995a, p. 83)



(a)



(b)

Figura 2-5: Tetitla (a) Pórtico 1, mural 1 (De la Fuente, 1995a, p. 259) (b) Pórtico 26, mural 3 (De la Fuente, 1995a, p. 288)

En cuanto a la paleta de colores, éstos llegan al máximo de la policromía (Lombardo de Ruiz, 1996). Se consigue tener varios tipos de rojos, ocre, cafés, este efecto también se logra con los verdes y azules, obteniendo diferentes concentraciones. Aún así, se utiliza la policromía aprovechando la rica gama de tonos que se pueden obtener de un mismo color

para generar murales con los mismos rasgos de esta etapa estilística, pero *monocromáticos*. Este último es el caso de Atetelco y sus pinturas en tonos rojos y rosas. De la misma manera se emplea el color en Tetitla, donde se identificaron tres mezclas de pigmentos para obtener el color rosa, estos son la mezcla de tres óxidos de hierro: hematita, óxido de hierro y lepidocrosita, con sulfato de calcio y carbonato de calcio (Magaloni, 1996) (Tabla 2-1).

Los espacios pictóricos siguen siendo rectangulares y con proporción horizontal, pero en esta fase estilística existen elementos que se encuentran rodeados de diferentes elementos en la escena. La disposición del espacio se vuelve más dinámica, se juega con los ordenamientos de las figuras pudiendo tener dos elementos opuestos a uno central, o bien un elemento central con muchos elementos asociados (Lombardo de Ruiz, 1996). Éste último es el caso del *Tlalolcan*, en el cual se encuentra una figura dominante a la que rodean demás elementos, de menor escala, en convivencia con la primera.

En un mismo espacio pictórico, todas las figuras de la misma clase, conservan la misma escala. Por ejemplo, en el *Tlalolcan* todos los hombres son del mismo tamaño, de la misma forma, los sacerdotes en Tepantitla tienen las mismas dimensiones. No obstante, la dimensión de las figuras varía dependiendo el contexto en el que se encuentre la pintura, no habiendo un común denominador para el tamaño de los zoomorfos, antropomorfos, fitomorfos y demás elementos en las pinturas.

La densidad de ideogramas aumenta, surgen nuevas representaciones para diferentes deidades, ideogramas de locación y elementos naturales, así como posibles topónimos. Para el caso de los zoomorfos, las representaciones recuperan rasgos de las anteriores fases estilísticas, se incluye en esta cuarta fase la representación del jaguar reticulado (Figura 2-6), que se representa ampliamente en diferentes sitios. Los sacerdotes, en esta fase, se representan como figuras humanas con subelementos asociados a la deidad de culto (Lombardo de Ruiz, 1996). Es característica también la representación de los dioses a base de cabezas y brazos, que incluyen atributos de la deidad y están representados de manera

frontal.

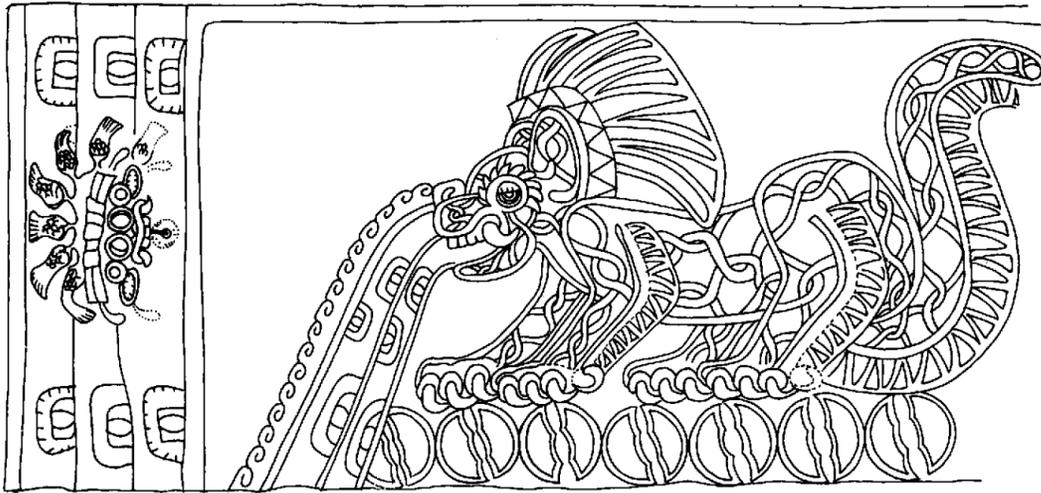


Figura 2-6: Zona 11. Gran Conjunto. Cuarto 5, murales 1-7. Pórtico 5, mural 1 (De la Fuente, 1995a, p. 25)

Por último, la quinta fase corresponde al final de la fase Xolalpan y Metepec. Las imágenes son más pobres que la fase anterior, hay una continua representación de los temas bélicos de manera directa, como los *chimallis rojos* (Figura 2-7) que se encuentran en conjunto plaza oeste. La crisis que vivía el estado teotihuacano en este periodo se ve reflejada en el decaimiento de la tradición pictórica teotihuacana y en el completo rompimiento de la próspera fase anterior. La tendencia de esta última fase es una geometrizar, con representaciones casi siempre bicromas y con líneas gruesas, que parecieran pertenecer a otro estilo. En el aspecto técnico, los enlucidos tienen cargas de arenas cuársicas y feldespáticas distribuidas en igual proporción a la de la matriz de cal (Magaloni, 1996).

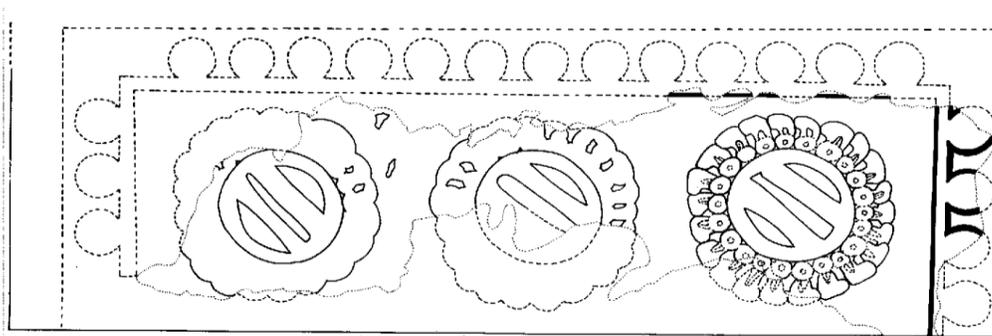


Figura 2-7: Conjunto Plaza Oeste. Pórtico 2, murales 1-4 (chimallis rojos) (De la Fuente, 1995a, p. 47)

Tabla 2-1: Pigmentos y colores de la pintura Teotihuacana (Magaloni, 1995) [sic.]

Color	Pigmentos
<i>Verde clarito</i>	Malaquita y yeso
<i>Verde brillante</i>	Malaquita
<i>Verde seco (olivo)</i>	Malaquita (verde), lepidocrocita (ocre) y óxidos de hierro y manganeso (rojo y café)
<i>Verde-azul</i>	Malaquita, hematita (rojo), azurita (azul) y pirolusita (negro)
<i>Rojo-naranja</i>	Óxido de hierro
<i>Rojo Teotihuacano</i>	Hematita
<i>Rojo oscuro</i>	Hematita

<i>Rosa medio</i>	Hematita, óxido de hierro (naranja) y lepidocrocita (ocre)
<i>Rosa claro</i>	Hematita y cal (blanco)
<i>Ocre</i>	Lepidocrocita (ocre)
<i>Amarillo</i>	Lepidocrocita y cal
<i>Negro</i>	Negro de carbón
<i>Negro-azulado</i>	Pirolusita
<i>Azul marino</i>	Pirolusita y yeso (parece tener una sustancia orgánica no identificada)
<i>Azul Tetitla (mar Caribe)</i>	Sulfato básico de cobre
<i>Azul Clarito</i>	Pirolusita y yeso (parece tener una sustancia orgánica no identificada)

Pintura mural maya

Analizar el estilo de la pintura mural maya representa un reto mayor, en comparación con el análisis en Teotihuacan. El área maya abarca una extensión territorial más grande y consta de muchos sitios ubicados en ella, que no necesariamente están relacionados y además que además pertenecen a periodos diferentes en la historia. Sin embargo, agrupada por temporalidad y contexto, la pintura mural maya comparte características comunes a toda la región.

De la misma forma que la teotihuacana, la pintura mural maya se encuentra tanto en exteriores como en interiores. Sin embargo, tanto la pintura mural interior como exterior, comparte características que S. Lombardo (1998) clasifica en cuatro estilos para el periodo clásico temprano (250-550 d.C). Estos son: el estilo bícromo naturalista, el policromo naturalista, el estilo Río Azul y el estilo de tradición teotihuacana.

Para el periodo clásico temprano, sólo hay un representante del estilo bícromo naturalista que se distingue de los representantes del preclásico tardío por las variaciones iconográficas que presenta. El mural de El Señor Descendente⁶ está dibujado con líneas redondeadas de inflexiones suaves con colores negro y rojo (Lombardo de Ruiz, 1998), representando a las figuras de manera naturalista. De acuerdo con la iconografía, en este mural se representa al llamado dios Bufón. Si bien el estilo bícromo naturalista del clásico temprano sigue teniendo las mismas características formales que en el preclásico tardío, en esta segunda fase se comienza a representar a deidades plenamente identificadas.

El estilo policromo naturalista se caracteriza por el uso de colores rojo oscuro, rojo naranja, negro, ocre y blanco, esparcidos de manera homogénea en las superficies y con líneas gruesas y continuas que definen a los contornos (Lombardo de Ruiz, 1998). El carácter naturalista se ve presente en las dimensiones de la figura humana, que siempre está

⁶ Grupo 6C, edificio XVI-sub, Tikal, Guatemala.

representada de perfil. La jerarquización de los elementos se da por el tamaño de los mismos así como el espacio que exista entre una figura y otra, ya que entre más espacio haya, más individualizada se percibe la figura (Lombardo de Ruiz, 1998). En algunos casos, las figuras humanas representadas en los basamentos, tienen una disposición en el espacio que busca la convergencia al centro de la estructura, es decir, las escalinatas. Esto último indica que el orden de la composición para los basamentos es de carácter simétrico y bilateral, tomando como centro las escalinatas del edificio. Además, los bordes están delimitados por cenefas y elementos ideográficos como los glifos.

En los muros interiores, las representaciones tienen formatos horizontales con escenas agrupadas y el mismo código de jerarquización de figuras. Sin embargo, en los murales interiores se también representan a las figuras humanas de frente y en el eje central del grupo en el que se representan. Las líneas de contorno son similares a las que se encuentran en los muros exteriores, excepto que en los interiores son más finas. La paleta de colores es un poco más rica y consta de tonos rojos oscuros, rojos claros, rojo naranja, blanco, gris y negro sobre un fondo rosa amarillento (Lombardo de Ruiz, 1998). A diferencia del estilo bícromo, el estilo polícromo del clásico temprano tiene una continuidad con su antecesor, tanto en iconografía como en el aspecto formal.

El estilo Río Azul se define a partir de cuatro tumbas encontradas en el sitio que lleva el mismo nombre. Éste se encuentra en la región del Petén, al norte de Tikal. De estas cuatro tumbas (1, 12, 19 y 23) la tumba 19 es ligeramente diferente a las demás y que comparte características con el estilo bícromo naturalista del preclásico en Tikal (Lombardo de Ruiz, 1998), por ejemplo: las figuras bien distribuidas en una composición simétrica que tiene como eje el muro opuesto a la puerta de la tumba y con líneas curvadas que terminan en punta. En el caso de las tumbas 1, 12 y 23, las líneas son continuas y redondeadas con grosores variables. La paleta cromática muestra tonos rojos y negros que para los trazos mientras que el fondo permanece blanco-amarillento. El espacio está dividido para poder representar diferentes elementos agrupados. Se representan dioses así como seres

fantásticos y alegóricos, glifos e ideogramas que representan inscripciones conmemorativas (tumbas 1,12), puntos cardinales (tumba 12) y de rango, como la estela en la antecámara de la tumba 1 (Lombardo de Ruiz, 1998). Es importante destacar que en Río Azul una característica fundamental es la exclusión de la figura humana, sin embargo, esto puede deberse a muchos factores y no necesariamente a una intención directa por sólo representar deidades e ideogramas.

Finalmente, el estilo de tradición teotihuacana sólo tiene dos representantes ubicados en la estructura 86 de Xel-Há, mejor conocida como *Casa de los Pájaros*. Los murales 1 y 2 presentan estilos similares al teotihuacano, tanto en el aspecto formal como en el iconográfico. En el mural 1 *Los Pájaros* tiene un diseño de tres paneles delimitados por anchas franjas de color rojo oscuro y un fondo blanco amarillento. Las figuras fueron pintadas con un dibujo previo de color rojo y posteriormente delimitadas por una línea negra. Este mural representa aves acomodadas en diferentes posiciones. En el mural 2 *del Personaje Teotihuacano*, se representa a una figura humana diferente a las representadas en el área maya. Sólo se representa el torso de la figura, adornado con un pectoral de cascabeles y un tocado típicamente teotihuacanos, además de diferentes rasgos iconográficos que evocan al estilo de la metrópoli. En el aspecto formal, las líneas de contorno son negras y gruesas con inflexiones más rígidas que las comúnmente encontradas en el área maya. La paleta de colores incluye rojos claros y oscuros, negro, gris y blanco. En los morteros de esta pintura mural D. Magaloni (1998) identificó mediante difracción de rayos-X partículas de carga color gris oscuro que corresponden a piroxenos que pueden tener un origen volcánico.

El periodo de auge en la pintura mural maya, o por lo menos del que se tienen más representantes, es el que se desarrolla en el clásico tardío (600-900 d.C). Aquí aparecen pinturas murales como las de Bonampak, Mulchic, Cobá, Palenque, Yaxilán, Toniná, Ek-Balám, entre otros. Además de las pinturas de Chichén-Itzá, Tulúm y Mayapán que corresponden al postclásico (900-1200 d.C).

Respecto a los materiales empleados, los estudios realizados por D. Magaloni (1998) se centran principalmente en las pinturas murales de la época de esplendor en el área Maya. Si bien estos murales no son contemporáneos a los de Teotihuacan, es lógico pensar que la tradición muralista en el área maya llegó a su momento cúspide como una consecuencia de un desarrollo natural a lo largo del tiempo. Por lo anterior, se explicarán brevemente a continuación las técnicas y materiales que corresponden al 600-1500 d.C.⁷ tomando en cuenta que posiblemente se emplearon de una forma similar en periodos anteriores.

La pintura mural maya estaba estructurada por un *mortero* que era aplicado directamente sobre la piedra caliza, después se aplicaba una capa más fina llamada *enlucido* y finalmente se aplicaba la capa pictórica (Magaloni, 1998). Los soportes empleados en el área maya son a base de cal. Uno de los grandes desarrollos tecnológicos fue constituir una pasta que fungía como recubrimiento de interiores, exteriores y cementante. Para generar esta pasta los mayas empleaban una combinación de cal y agregados. El material cementante era la cal y estaba combinado con gomas vegetales. Los agregados, que daban consistencia y rigidez a la matriz, eran usualmente *sascab*, estucos re utilizados, trozos de calcitas clásicas y en casos especiales como en la estructura 86 de Xel-Há arenas duras (Magaloni, 1998).

Además, D. Magaloni (1998) caracteriza cuatro tipos de acabados de superficie: (a) superficie lisa de consistencia compacta y resistente; (b) superficie lisa de consistencia deleznable; (c) superficie irregular de consistencia compacta y (d) superficie irregular de consistencia deleznable. La principal diferencia entre las superficies es la técnica con la que se aplican, en los primeros casos hay un proceso de bruñido y pulido de la superficie, mientras que en los últimos dos la aplicación es aparentemente hecha con una brocha. Además, la división por la consistencia se refiere directamente a la resistencia mecánica de los soportes que está relacionada con los materiales de la región.

⁷ Aunque existen un par de ejemplos que corresponden al clásico temprano (300-600 d.C).

La paleta cromática de los mayas constaba de más de 30 colores diferentes (Magaloni, 1998), sin embargo la geología del área no es tan rica en minerales como para permitir el desarrollo de una gama así de amplia, es por ello que los Mayas desarrollaron colorantes a base de la combinación de arcillas con materia orgánica. Lo anterior permitió generar la amplia gama de pigmentos, ya que la coloración dependería no sólo de las materias primas, sino de las combinaciones entre ellas, así como las proporciones de materiales en la mezcla. Entre los colores destacan el negro, gris, café, amarillo, rojo, vermellón, y una extensa gama de verdes y azules. La evidencia arqueológica indica que durante el clásico existía una fuerte tradición de producción local de pigmentos, misma que fue compartida e intercambiada hasta llegar a la homogenización del color que caracteriza al periodo postclásico (Magaloni, 1998). Además, los mayas utilizaron mezclas de pigmentos para obtener el color *piel* característico de la pintura.

Los pigmentos blancos han sido identificados como calcita aragonita, este último mineral se encuentra comúnmente en la concha de los moluscos, por lo cual es sensato pensar que se empleaban conchas quemadas y pulverizadas para la creación de los blancos. En las investigaciones posteriores de M.L Vázquez de Agredos (2010), se confirma la combinación calcita aragonita para los pigmentos del área maya. El color negro era empleado para delimitar figuras y trazar detalles, así como para dar color a pisos y paredes como es el caso de Palenque y Bonampak. Se ha encontrado que los pigmentos negros pueden ser de carbón como resultado de la quema de maderas, de humo hecho con *chapotote* o *bitumen*, estos negros se utilizaron para pintar paredes y finalmente existen ejemplos de magnesita o magnesita con óxidos de hierro como en el caso del Templo de los Guerreros en Chichén Itzá (Magaloni, 1998; Vázquez de Agredos Pascual, 2010). Además, el color gris se conseguía mediante la combinación de negros y blancos obteniendo la pigmentación deseada a partir de las proporciones empleadas.

En el caso de los rojos, los mayas emplearon principalmente tres: hematita, hematita especular y ocres rojos. La hematita en el área maya se utilizó principalmente para los

dibujos preparatorios, mientras que la hematita especular era reservada para secciones especiales de los murales ya que era posiblemente un mineral exportado y además el proceso de molienda del mismo requería de tiempo para prepararlo. Finalmente, el ocre rojo tiene la misma composición de la hematita (Fe_2O_3) pero está combinado con otros minerales como la calcita, cuarzos y arcillas provocando un cambio en la tonalidad. En la tonalidad de los rojos, destacan otros dos pigmentos, estos son el cinabrio y los rojos de origen orgánico. El cinabrio es un sulfuro de mercurio y su uso está comúnmente asociado con contextos funerarios (Tabla 2-2). Siendo el cinabrio un mineral de importación, traído desde los yacimientos de mercurio de la Sierra Gorda de Querétaro (Vázquez de Agredos Pascual, 2010), se volvió un pigmento cotizado y de uso restringido a las clases gobernantes y de alta jerarquía. Los rojos de origen orgánico podían ser vegetales o animales, los vegetales eran comúnmente cortezas que dejando en agua caliente liberaban un color rojo, como el palo de Campeche. Los orgánicos animales estaban hechos por grana cochinilla proveniente de las zonas de Oaxaca o el altiplano central (Vázquez de Agredos Pascual, 2010). El pigmento rosa como el resultado de la combinación entre blanco y rojo se daba de manera natural en canteras de cal ricas en óxidos de hierro o de manera artificial mezclado por el maestro artesano.

Los amarillos en el área maya son de dos tipos, el primero son los pigmentos provenientes de óxidos de hierro hidratados como la limonita, goethita y lepidocrosita identificados en los murales mayas por D.Magaloni (1998) y M.L Vázquez de Agredos (2010), entre otros. Por otro lado, los pigmentos amarillos también pueden ser la combinación de un colorante orgánico con una arcilla. En sus trabajos, D.Magaloni y M.L Vázquez de Agredos (1998; 2010) identificaron a la arcilla como montmorillonita, mientras que los orgánicos podrían haber sido *zacatlaxcalli*, *kanté* o la raíz del palo de mora (Tabla 2-2).

Los amarillos no son los únicos colores que se formaban por la combinación de un orgánico y una arcilla. Posiblemente los casos más conocidos de este tipo de pigmentos son el *azul maya* y el *verde maya*. Ambos son pigmentos artificiales que son producto de la

combinación de una arcilla, atapulguita y sepiolita, con un orgánico, índigo. Una vez extraído el colorante orgánico, es mezclado con la arcilla a temperaturas altas y durante varios días (Magaloni, 1998). Estos pigmentos son altamente estables lo cual permite que se conserven bien a través del tiempo, además, son muy resistentes a los ácidos. La variedad en las tonalidades de estos *colores mayas* se debe a la mezcla entre los orgánicos, como el caso del verde que resulta de la combinación del índigo con algún otro colorante amarillo de origen orgánico, después la mezcla era adherida a la arcilla para obtener las propiedades características de estos pigmentos. De la misma forma, los estudios realizados por M.L Vázquez de Agredos (2010) destacan un pigmento morado hecho de la misma forma que el azul y verde mayas. El orgánico en este caso era de origen animal y provenía del molusco *Purpura patula pansa*. También se podía obtener un color morado mediante la combinación del azul maya con diferentes mordientes o bien la combinación del azul maya con colores rojos (Tabla 2-2).

A pesar de la extensión geográfica y temporal, la pintura mural maya presenta características comunes que fueron refinadas a lo largo de la historia. Aunque los materiales y técnicas se adaptaban a los recursos disponibles, el estilo tiene una serie de ejes rectores definidos por S. Lombardo, D. Magaloni y M.L Vázquez de Agredos (1998; 1998; 2010):

- 1) Uso de figuras orgánicas y abiertas que evitan la geometrización
- 2) Líneas de contorno con curvas suaves y flexibles
- 3) Estilos bícromos y polícromos bien definidos
- 4) Representación de la figura humana como el elemento principal de la composición
- 5) La representación de temas históricos y religiosos, con representantes de la élite o deidades en formas antropomorfas
- 6) Soportes de cal con aglutinantes orgánicos
- 7) Pigmentos obtenidos por la combinación de orgánicos con arcillas

En particular, en la tradición clásica maya, los discursos buscan el naturalismo de las figuras representadas. La narrativa de los murales se encuentra en un entorno social y busca plasmar eventos trascendentales. Las pinturas en este periodo se utilizan como propaganda para legitimar el poder político (Lombardo de Ruiz, 1998).

Tabla 2-2: Pigmentos identificados en área maya (Magaloni, 1998; Vázquez de Agredos Pascual, 2010) [sic.]

Color	Pigmento
<i>Blanco</i>	Calcita aragonita
<i>Negro</i>	Carbón, humo (<i>chapopote</i>), magnetita o magnetita + óxidos de hierro
<i>Gris</i>	Pigmento negro (carbón o manganeso) + cal
<i>Rojo</i>	Hematita, hematita especular ⁸ , óxidos de hierro, cinabrio, palo de Campeche (<i>Haematoxylum campechianum</i>), grana cochinilla (<i>Dactylopius coccus Costa</i>)
<i>Rosa</i>	Óxidos de hierro + cal
<i>Amarillo</i>	Lepidocrosita, limonita, goethita Zacatlaxcalli (<i>Cuscuta tinctoria</i>) o Kante' (<i>Gliciridia sepium</i>) + montmorillonita (amarillo maya)
<i>Azul</i>	Azurita Índigo (<i>Indigófera suffruticosa</i>) + atapulguita y sepiolita (azul maya)
<i>Verde</i>	Malaquita Índigo y amarillo orgánico + atapulguita y sepiolita (verde maya)
<i>Morado</i>	Azul maya + óxidos de hierro Índigo con mordientes + atapulguita y sepiolita <i>Purpura patula pansa</i> [sic.]+ arcilla

⁸ Tiene la misma composición que la hematita pero al cristalizar a temperaturas más altas, tiene una dureza y luminosidad mayores que la hematita (Vázquez de Agredos Pascual, 2010).

3 Fundamentos físicos

3.1 Estructura de la materia

Toda substancia que tenga masa y ocupe un lugar en el espacio es considerada materia (Penrose, 1991). La materia está conformada por átomos que a su vez son producto de la combinación de partículas elementales descritas actualmente por el modelo estándar de partículas. Dicho modelo explica, de manera unificada, tanto a las partículas elementales como a las fuerzas de interacción entre ellas.

Los átomos, descritos dentro del modelo estándar de partículas, están conformados por electrones (e^-) negativamente cargados que orbitan alrededor de un núcleo formado por protones (p) cargados positivamente y neutrones (n) eléctricamente neutros. Las partículas constituyentes del núcleo atómico no son partículas fundamentales, ya que están formadas por tres quarks. Todas aquellas partículas formadas por quarks reciben el nombre de hadrones y ya que los protones y neutrones tienen espín semi-entero son identificados dentro del grupo de los Bariones (Shaw & Williard, 1996).

Siguiendo con la descripción del modelo estándar, los electrones se mantienen atados al núcleo por medio de la fuerza electrostática debido a que son eléctricamente opuestos. En el núcleo, protones y neutrones están atados por medio de la fuerza fuerte. La fuerza fuerte no tiene largo alcance ($\approx 10^{-15}m$) (Shaw & Williard, 1996) y es la fuerza de atracción entre los quarks que conforman a los nucleones.

La variedad de elementos existentes en la tabla periódica es producto de las diferentes configuraciones de electrones y núcleos que se pueden formar en la naturaleza. Dichas configuraciones están regidas por las leyes de la mecánica cuántica.

Si bien la mecánica cuántica surge por la necesidad de explicar fenómenos como la radiación de cuerpo negro o el efecto fotoeléctrico, que no encontraban respuesta en la física clásica, fue hasta mediados de 1920 que se comenzó a formular como una teoría fundamental de la física que busca explicar a la naturaleza a escalas atómicas.

Erwin Schrödinger postuló en 1925 la ecuación que lleva su nombre. Esta ecuación explica la dinámica de las partículas a través de funciones de onda. En un sistema de muchas partículas la función de onda describe la distribución de las mismas en el espacio, así como la probabilidad de que se encuentren en un punto dado. Por lo tanto, si se analizan a los átomos como cuerpos bajo un potencial utilizando la ecuación de Schrödinger obtendremos la misma información sobre la cuantización de las órbitas obtenida por su predecesor: Niels Bohr, el cual introdujo el concepto de cuantización de los orbitales electrónicos en los átomos. Además, también resultó ser consistente con las mediciones experimentales. El modelo atómico de Schrödinger considera un núcleo formado con protones y neutrones rodeado de “nubes de probabilidad”, llamadas “orbitales” en los cuales hay más probabilidades de encontrar a un electrón.

Aunque el modelo de Schrödinger es el más cercano a la realidad, las ideas de Bohr no fueron desechadas por completo. Estas ayudaron a la visualización conceptual de la estructura atómica y dieron pie al uso de los números cuánticos. Los números cuánticos son una serie de valores enteros que describen la dinámica de un sistema cuántico. Para el caso atómico, los números cuánticos están asociados a los electrones y se pueden definir como la serie de valores que generan soluciones viables a la ecuación de Schrödinger. El primer número cuántico es n , llamado el número cuántico principal. A este le siguen l y m_l , el número cuántico orbital y el número cuántico magnético, respectivamente. El número cuántico de espín, determinado por la letra s . Cada uno de estos números describe una propiedad intrínseca de los electrones en un átomo.

Teniendo los cuatro números cuánticos es posible describir a un electrón dentro de un

átomo. Los primeros tres, n, l, m_l , describen al orbital atómico, mismo que puede tener máximo dos electrones, mientras que el número cuántico s describe al espín de un electrón, que puede tomar sólo dos valores $\pm \frac{1}{2}$. El número cuántico principal está asociado al nivel de energía en el que se encuentra el electrón dentro del átomo, es decir, a la energía del orbital atómico. El número cuántico principal también está relacionado con la energía de enlace del electrón con el núcleo que es proporcional a $\frac{1}{n^2}$. El número cuántico orbital (l) se refiere momento angular de un orbital (n). El número cuántico m_l describe a la componente vectorial del momento angular l y es el responsable de describir la forma de la nube electrónica, describe también los orbitales en un subnivel energético (Verma, 2007). Por lo tanto, solamente teniendo los cuatro números cuánticos es posible caracterizar a un solo electrón. Por último, el número cuántico de momento angular total (j) es el número que caracteriza el momento angular de una partícula dada y está dado por $j = l + s$; para el caso del electrón es $j = l \pm 1/2$.

Sabemos por el modelo de Bohr que los electrones en los átomos se encuentran organizados en orbitales que, a su vez, están cuantizados por su energía. Para poder entender qué sucede cuando un electrón cambia de un orbital a otro, Bohr determinó que es necesario que el electrón experimente un cambio en su energía igual a la diferencia energética entre orbitales. Es decir, que, si el electrón decae a un orbital de menor energía, debe liberar el remanente energético en forma de radiación. De la misma forma, si un electrón pasa a un nivel con mayor energía, debe recibir el faltante energético por medio de radiación. De modo tal que la frecuencia de radiación que un electrón emitiría después de cambiar de un estado inicial (E_n) a un estado final de menor energía (E_m) estaría dado por la relación:

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} \quad (3-1)$$

Además, esta relación se puede obtener a través de buscar el valor esperado para la

posición del electrón en la ecuación de Schrödinger. También se puede comprobar de manera experimental.

Ya sabemos que los electrones hacen transiciones de acuerdo al salto de energía deducido por Bohr. Sin embargo, algunas transiciones pueden ocurrir con mayor probabilidad que otras. Para que un átomo en un estado excitado pueda decaer a uno de menor energía, se tiene que cumplir que el resultado de la integral:

$$\int_{-\infty}^{\infty} u \Psi_m \Psi_n^* dV \quad (3-2)$$

sea diferente de cero, ya que la intensidad de la radiación será proporcional a ella (Beiser, 2003). Si la integral tiene un resultado finito, la transición será permitida. Si la integral es cero, la transición será prohibida. Esto da pie a las reglas de selección para transiciones atómicas. El número atómico principal puede variar sin restricciones. El número atómico orbital debe de variar de acuerdo con $\Delta l = \pm 1$. El número atómico magnético debe de variar de acuerdo con $\Delta m_l = 0, \pm 1$.

Los átomos pueden combinarse entre sí por medio de los enlaces químicos para formar compuestos moleculares. Estos enlaces se forman gracias a la fuerza de atracción entre los electrones de los átomos y se pueden clasificar a *grosso modo* en dos tipos: iónicos y covalentes. Aquí definiremos a un enlace químico entre dos átomos cuando las fuerzas de atracción que mantienen a los átomos juntos sean tales que el producto formado se pueda considerar como una especie molecular independiente (Pauling, 1960).

Los enlaces iónicos son aquellos en los que involucran la transferencia de electrones de un átomo a otro. Estos enlaces se dan cuando los átomos que tienen energías de ionización bajas interactúan con un átomo que tiende a atraer electrones fácilmente. Entonces el primer átomo cede electrones al segundo produciendo que ambos átomos se ionicen, es decir, adquieran carga positiva y negativa respectivamente. A los átomos ionizados se les

conoce como catión al átomo con carga positiva y anión al átomo con carga negativa.

Una vez que se lleva a cabo el intercambio de electrones, los átomos con cargas opuestas se atraen formando un enlace. Por lo general, este enlace genera un compuesto iónico, que en la fase sólida genera una red cristalina, dando así una configuración de equilibrio. Por lo general, en un cristal iónico⁹ cada ion está rodeado por la mayor cantidad de iones opuestos que puedan acomodarse en su vecindad, para así lograr el estado de mayor estabilidad posible.

Por lo general los metales tienen una energía de ionización baja, por lo que tienden a ceder electrones. De manera contraria, los no metales son buenos receptores de electrones. Es por esto que el enlace iónico se da comúnmente entre un metal y un no metal. La mayoría de los cristales iónicos son duros gracias a la fuerza que existe entre sus enlaces. También son frágiles puesto que el arreglo cristalino no permite que sean materiales dúctiles. Son solubles en líquidos polares. Son buenos aislantes eléctricos y también transparentes ante la luz visible, pero absorben en el infrarrojo cuando las energías de sus estados de vibración coinciden con la frecuencia de la luz (Beiser, 2003, p. 342).

Los enlaces covalentes son aquellos en los que cada átomo comparte sus electrones de la capa de valencia. Se dan principalmente entre no metales y son comunes en la química orgánica. Sin embargo, existen algunos casos de cristales covalentes en los que se enlazan metaloides con un no metal, un ejemplo de esto es el Carburo de Silicio (SiC).

Hay dos tipos de enlaces covalentes: enlace- σ y enlace- π , los enlaces- σ son aquellos en los que se traslapan directamente las nubes electrónicas de los dos átomos. En los enlaces- π las nubes electrónicas se traslapan de manera parcial. Cuando hay un enlace sencillo, lo más común es que el enlace generado sea uno σ . Si el enlace es doble o triple entonces los enlaces serán una combinación entre σ y π para lograr el estado de menor energía.

⁹ Estructura cristalina formada por enlaces iónicos.

3.2 Interacción de la radiación electromagnética con la materia

Cuando un sistema cuántico cuando es sometido a una fuente de radiación electromagnética con frecuencia ν , éste sufrirá un cambio de estado que está relacionado únicamente con el cuanto de energía proporcionado, es decir, el valor absoluto de la diferencia energética: $|\Delta E| = h\nu$. Así, los procesos de interacción que tienen lugar en un átomo o molécula dependerán de la región del espectro electromagnético con el que sean excitados (Castellan, 1998).

Es decir, para poder generar transiciones electrónicas en las capas internas de un átomo, se requiere excitar al mismo con rayos X ($\sim 100 \text{ keV} - 1 \text{ keV}$) y esto permitirá conocer la estructura electrónica del mismo. Cuando se excita a una muestra de materia con energías menores, luz ultravioleta ($\sim 100 \text{ eV} - 10 \text{ eV}$) o visible ($\sim 3 \text{ eV} - 1 \text{ eV}$), se pueden observar los procesos de absorción y emisión de las capas externas de un átomo y así obtener información de la estructura electrónica de la capa de valencia, así como las cualidades conductivas de los átomos. Por último, las interacciones con luz infrarroja ($\sim 1 \text{ eV} - 10 \text{ meV}$) excita estados vibracionales y rotacionales en las moléculas, lo cual proporciona información de la naturaleza de enlace entre átomos.

Existen tres posibles mecanismos de respuesta del sistema: absorción inducida, emisión espontánea y emisión estimulada. Siguiendo la descripción de J. Hollas, la fuente de radiación tendrá una energía dada por la Ec. (3-1): $\Delta E = h\nu$, y el sistema cuántico, que puede ser un átomo o una molécula, se encuentra en un estado inicial M o en un estado excitado M^* .

La absorción inducida es un proceso en el cual un átomo o molécula absorbe el cuanto de energía ($h\nu$) y pasa de un estado con menor energía a un estado excitado, es decir:



El proceso de emisión espontánea es el proceso contrario, un átomo o molécula que se encuentra en un estado excitado baja de nivel liberando un cuanto de energía



La emisión espontánea es un proceso muy común en la naturaleza y lo vemos siempre en los focos con filamentos de tungsteno o en la bioluminiscencia de las luciérnagas.

Por último, tenemos el proceso de emisión estimulada, para este proceso es necesario introducir energía a un sistema que ya se encuentra en estado excitado y con esto producir una emisión energética que permita al átomo o molécula regresar al estado de menor energía. La emisión estimulada está representada por:



Como consecuencia de el mecanismo de interacción de un átomo o molécula ante un tipo específico de energía de radiación, se obtendrá una respuesta característica del objeto de estudio. Dicha respuesta característica permitirá conocer algún rasgo del objeto de estudio. Éste es el principio fundamental de la espectroscopía.

3.3 Técnicas espectroscópicas

La espectroscopía es una rama de estudio de la física y la química que se enfoca en estudiar cómo la radiación electromagnética interactúa con la materia. Tiene como fundamento el principio de que un átomo o molécula reaccionará con una firma característica, llamada espectro, ante un tipo energía electromagnética suministrada.

Esto permite poder caracterizar materiales a partir de su espectro. Hay diferentes tipos de espectroscopias, cada una centrada en un rango de energía, la información que cada una de ellas puede aportar dependerá de la forma en la que la energía interactúe con el átomo o molécula de estudio. Es decir, una molécula será sometida a procesos vibracionales, rotacionales, de ionización, dependiendo de la energía de radiación a la que sea sometida. De forma análoga, un átomo puede someterse a procesos de ionización o transición electrónica, ya que no tiene grados de libertad vibracionales o rotacionales (Hollas, 2004).

En este trabajo se hablará de dos tipos de espectroscopias en términos de la información que proveen, estas son aquellas que dan información elemental y las que dan información molecular.

Espectroscopías que aportan información elemental:

Para el estudio de la composición elemental de una muestra se requiere de altas energías que permitan excitar los electrones de capas interiores en los átomos presentes en una muestra. Esto dejará un hueco en la capa interior que buscará llenarse por un electrón de una capa superior buscando regresar a un estado menos energético. Como ya sabemos, cada capa acepta una cantidad cuantizada de energía, es por ello que al regresar al hueco el electrón liberará el remanente energético. El proceso de ionización y relajación del sistema dura alrededor de un femtosegundo (10^{-15} s) (Verma, 2007).

Puesto que la diferencia entre energías de cada una de las capas en un átomo es

característica del mismo y de su estructura, es posible determinar el tipo de átomo a partir del remanente energético liberado en este proceso.

3.3.1 Fluorescencia de Rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X es un método no destructivo de identificación elemental en sólidos o líquidos. Permite detectar varios elementos de manera simultánea por medio del efecto de fluorescencia de rayos X. Los fotones liberados de la muestra son colectados en un detector de estado sólido que transforma la señal electromagnética en una eléctrica para poder ser procesados como datos en una computadora. La identificación de los elementos se hace mediante la energía del fotón liberado, mientras que la razón de las concentraciones entre los elementos presentes se caracteriza usando de la razón entre las intensidades de los picos. Esto hace que el análisis sea tanto cualitativo como cuantitativo¹⁰. Los equipos de XRF pueden ser utilizados al vacío o no, permitiendo que los equipos puedan ser portátiles. Sin embargo, la eficiencia para detectar elementos ligeros disminuye cuando se opera fuera de una cámara de vacío.

Para que se lleve a cabo el proceso de emisión, primero los rayos X quitarán un electrón de la capa **K**. Esto producirá que un electrón de una capa superior (**L** o **M**) baje al nivel **K** para llenar la vacancia, liberando un fotón (rayos X característicos). Tras esto, dicho electrón dejará un hueco, dando pie a que suceda el mismo proceso de llenado, pero en un nivel superior. Así, la generación de vacancias y llenado de las mismas sucederá en forma de cascada, generada por la primera ionización del átomo en la capa **K** por medio de los rayos X.

Cuando un fotón liberado en el proceso de llenado de vacancias interacciona con otro electrón en el átomo, la energía del fotón es transmitida al electrón produciendo que éste suba de nivel energético. A este proceso se le conoce como efecto Auger. La energía cinética

¹⁰ Siempre y cuando se procesaran referencias para poder obtener las concentraciones elementales.

de un electrón de Auger será entonces la diferencia entre la energía de la transición electrónica inicial¹¹ y la energía de ionización de la capa que contenía al electrón de Auger.

La energía de radiación ($h\nu$) necesaria para que se ionice el átomo deberá ser mayor que la energía de amarre entre el electrón en la capa **K** (E_k) y el núcleo.

Las transiciones atómicas más comunes en la técnica de fluorescencia son aquellas que se llevan a cabo en los orbitales **K**, **L** y **M**. Las transiciones están gobernadas por las reglas de transición:

$$\Delta n \geq 1; \Delta l = \pm 1; \Delta j = 0, \pm 1 \quad (3-6)$$

Aquellas transiciones que llenen el primer nivel de energía, ie. la capa **K**, serán llamadas “transiciones **K**”. De la misma forma, aquellas que llenen las capas **L** y **M** se llamarán de acuerdo a la capa que llenan.

Las transiciones están clasificadas entre transiciones α , β , γ , etc. Cada una de éstas corresponde a la energía de la transición, siendo las α las menos energética y por tanto la más probable. Además, existen dos posibles transiciones por energía que corresponden a los posibles estados de espín presentes en cada subcapa. A la notación utilizada para este tipo de transiciones se le conoce como Siegbahn.

Existen también transiciones prohibidas, estas ocurren cuando una regla de selección no se cumple, pero está permitida si la aproximación asociada a esa regla no se toma en cuenta.

En el caso de la fluorescencia las más comunes son:

- Dipolo magnético: transiciones para las cuales $\Delta l = 0; \Delta j = 0, \pm 1$
- Cuádruplo eléctrico: transiciones para las cuales $\Delta l = 0, \pm 2; \Delta j = 0, \pm 1, \pm 2$

(Verma, 2007, p. 7).

¹¹ La que produjo la vacancia.

Al grupo de transiciones homólogas, es decir todas las transiciones $K_{\alpha 1}$, $L_{\alpha 1}$, etc, de todos los elementos en la tabla periódica se les conoce como series. Para poder determinar la energía de los rayos X característicos de una serie para cierto elemento, es necesario considerar la ley de Moseley, que relaciona la frecuencia de emisión de rayos X únicamente con el número atómico del elemento.

Para obtener la ley de Moseley es necesario partir de la fórmula de Rydberg para cualquier átomo hidrogenoide:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (3-7)$$

Con n_i, n_f los niveles de energía de los orbitales donde $n_i < n_f$; R la constante de Rydberg y Z el número atómico.

Considerando la corrección al número atómico por el efecto de apantallamiento, que toma al número atómico efectivo como $Z_{eff} = Z - \sigma$ donde σ es una constante de apantallamiento que depende del número de electrones entre el núcleo y el electrón considerado para la transición.

Entonces, la ecuación (3-7) se transforma en:

$$\frac{1}{\lambda} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (3-8)$$

Entonces la frecuencia (c/λ) de los rayos X emitidos está dada por:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = Rc(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (3-9)$$

Con c la velocidad de la luz. Además, $Rc \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$ son valores constantes, de modo tal que se pueden agrupar como: $Q = Rc \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$. Así, la ley de Moseley (Verma, 2007) queda resumida como:

$$\nu = Q(Z - \sigma)^2 \quad (3-10)$$

Ya considerando la ley de Moseley, la energía de los rayos X característicos se puede determinar sustituyendo la ley de Moseley en la ecuación (3-1):

$$E_n = h\nu_n = Qh(Z - \sigma)^2 \quad (3-11)$$

Con n la serie a la que pertenezca la emisión determinada.

Si se consideran las emisiones K_α ¹² se tiene que $Q = \frac{3}{4}Rc$ y por lo tanto la ecuación anterior se transforma en:

$$E_{K\alpha} = h\nu_{K\alpha} = \frac{3}{4}Rch(Z - \sigma)^2 \quad (3-12)$$

Pero $Rch = Ry$ es la energía de Rydberg donde $1Ry \approx 13.6eV$, que además es la energía de ionización del Hidrógeno.

De forma análoga se pueden obtener los valores de Q para las diferentes series ($K_\beta, L_\alpha, L_\beta$, etc) sabiendo los valores de n_i, n_f .

Lo anterior permite definir picos característicos para cada elemento en una serie de transiciones. Estos picos se van a encontrar acotados por debajo de los $20KeV$ puesto que en esta región se pueden observar los picos de la serie **K** para elementos con $Z < 45$ y de

¹² Con $n_i = 1$ y $n_f = 2$

la serie L para elementos más pesados (Verma, 2007, p. 48). El análisis cualitativo del XRF consiste en identificar la energía de los rayos X característicos con el átomo del cuál fueron generados. Puesto que cada capa atómica tiene una diferencia de energía característica, esta identificación es única. Sin embargo, cuando dos rayos X característicos tienen una energía similar (con una diferencia menor a 125 eV), la resolución del detector no permite diferenciarlos y los picos se superponen. Además, las transiciones de un mismo elemento provenientes de niveles vecinos van a separarse por efecto del acoplamiento espín-órbita (el acoplamiento del espín del electrón con el momento angular del orbital), dicho acoplamiento incrementa con el número atómico, haciéndolo más evidente en ciertos elementos que en otros. Por ejemplo, en el Calcio ($Z = 20$), la diferencia entre los picos $K_{\alpha 1}$ y $K_{\alpha 2}$ es de tan solo 3 eV , haciendo difícil diferenciarlos (Hollas, 2004). Sin embargo, en un mismo elemento, el acoplamiento espín-órbita, es menos intenso a medida que el momento angular orbital (l) incrementa. Por lo tanto, hay transiciones cercanas en energía, que no se pueden diferenciar. Este es el caso de las líneas $K_{\beta 1}$ y $K_{\beta 3}$ para ciertos elementos como el Titanio ($Z = 22$).

En el caso donde dos picos se superpongan, se puede recurrir a la identificación de líneas secundarias en cualquiera de las series de emisión, que permitan distinguir las contribuciones de cada uno de los elementos en cuestión. Es decir, en el caso de la superposición de picos, los elementos serán reconocidos por los picos de emisión que no se estén traslapando, ya que la proporción de las intensidades entre los picos de emisión secundarios y los principales se mantiene constante.

La intensidad de los picos dependerá de varios factores: a) la probabilidad de que la fuente de radiación ionice al átomo en cierta capa; b) la probabilidad de que la vacante generada por cierto electrón sea llenada por otro electrón específico; y c) la probabilidad de que el electrón emitido ya que se llenó la vacancia no sea un electrón de Auger (Verma, 2007).

Según Verma, la manera de calcular las intensidades relativas entre dos series de líneas

espectrales es partiendo de la regla de la suma para probabilidades. Es decir, que la intensidad total de todas las líneas provenientes de un mismo nivel inicial o que desciendan a el mismo nivel energético, será proporcional al peso estadístico de dicho nivel. Para el caso de los niveles energéticos, el peso estadístico está dado en términos de la cantidad de electrones que se pueden almacenar en cada subnivel $(2j + 1)$.

Además de los picos característicos para cada elemento, también pueden generarse picos adicionales: picos del efecto Compton, picos de escape y picos suma.

- El efecto Compton corresponde al aumento de longitud de onda (pérdida de energía) de un fotón que es dispersado cuando choca con un electrón libre. Es un efecto que depende únicamente del ángulo de dispersión. El cambio en la longitud de onda está dado por: $\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$ con m_e la masa del electrón y θ es el ángulo entre el electrón incidente y el electrón dispersado.
- Pico de escape: Cuando uno de los electrones fluorescentes llega al detector y es absorbido por la capa de silicio de la que está hecho el detector, este, producto del efecto fotoeléctrico, re emitirá un fotón con la energía característica del material. Gracias a esto, la energía captada por el detector será la resultante de restar la energía original de la señal menos la de emisión del material. De forma gráfica, un pico de escape estará $1.75KeV^{13}$ a la izquierda del pico original
- Pico suma: cuando dos electrones fluorescentes emitidos por la muestra tienen un desfase de tiempo menor al tiempo de detección del equipo, éste no es capaz de resolver la diferencia y detecta a ambos fotones como uno solo. Esto se expresa como el doble de la energía original y forma un pico que no corresponde a un elemento.

Cuando se están colectando los rayos X emitidos en el detector, puede suceder que éste se sature y la electrónica no pueda seguirle el paso a la frecuencia de emisión. Esto se conoce

¹³ Para el caso en el que el detector es de silicio.

también como “tiempo muerto”. El tiempo muerto es el tiempo que pasa después de cada evento en el cual el detector no es capaz de detectar ningún otro evento. Usualmente para los detectores de fluorescencia de rayos X, el tiempo muerto debe mantenerse por debajo del 20% – 30% (Verma, 2007), ya que una cantidad excesiva del tiempo muerto puede resultar en el corrimiento de algunos picos.

Es importante definir el estilo de muestra que se tiene, fina o gruesa. Un objetivo grueso es aquel en el que la energía incidente es absorbida por el material o retrodispersada por el mismo. Por otro lado, un objetivo fino es tan delgada que la pérdida de energía de los fotones incidentes será despreciable (Verma, 2007). Por supuesto, el grueso de una muestra estará relacionado directamente con la distancia lineal a la que pueden penetrar los fotones incidentes.

Para un objetivo grueso, la interacción de los rayos X incidentes será atenuada. Si se piensa en un modelo donde se tiene un objetivo de grosor conocido y que permite la transmisión de los rayos X incidentes, la descripción de los rayos X que transmitidos está dada por la ley de Beer-Lambert:

$$I = I_0 \exp(-\mu\rho x) \quad (3-13)$$

Donde I_0 es la intensidad incidente, μ es el coeficiente de atenuación de masa que es función de la energía, ρ la densidad del material y x el grosor del material. Cuando se extrapola este modelo a un material con grosor desconocido, es posible calcular la profundidad de penetración del haz de rayos X de la siguiente forma:

$$x = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) / -\mu\rho \quad (3-14)$$

Considerando a μ a partir de los valores generados por el NIST (C.T. Chantler; K. Olsen; R.A. Dragoset & NIST, 2005) para elementos o componentes. Es importante destacar que el valor

de μ dado por el NIST está normalizado a la densidad del material, por lo que es necesario a la hora de realizar las operaciones considerar dicha normalización.

Espectroscopías que aportan información molecular y estructural:

3.3.2 Espectroscopía de reflectancia con fibra óptica (FORS)

La espectroscopía de reflectancia con fibra óptica es una técnica que opera en el rango del visible (400 – 800 nm) y el infrarrojo cercano (800 – 3000 nm). Cuando un haz de luz interactúa con la materia, una parte de la radiación incidente será reflejada de dos posibles maneras: especular y difusa. La reflexión especular es aquella en donde el ángulo de incidencia es el mismo que el reflejado. Este es un efecto de superficie ya que sólo sucederá si existe un grado de lustre en ella. En superficies rugosas, se dará el efecto de reflexión difusa, en el cual la luz es reflejada de manera dispersiva. Este efecto se logra apreciar en el acabado *mate* de las pinturas cuando son vistas con cierto ángulo.

La fracción de radiación incidente que no fue parte de la reflexión especular o difusa, es absorbida por el objeto, o bien, transmitida. La energía de la radiación absorbida, puede transformarse en calor o ser re-emitida como fluorescencia. Mientras que la fracción de la luz transmitida simplemente seguirá la ley de Snell en el trayecto dentro del material (Nassau, 1983). El efecto de transmisión está directamente ligado con el grosor del material y la cantidad de interacciones que se tengan con el material. Por lo tanto, en un material opaco el efecto de transmisión será despreciable. De la misma forma, en objetos opacos el efecto de reflexión de la luz es predominante y por lo tanto será el mecanismo estudiado en esta sección.

El mecanismo de reflexión difusa de la luz está explicado con el modelo de Kubelka-Munk y descrito por H.G Hetch, considera primero un modelo de capas planas, superpuestas con valores de reflectancia y transmitancia indexadas por R_iR_j y T_iT_j respectivamente como se muestra en la Figura 3-1. Considerando que el proceso de reflexión y transmisión de la luz

puede suceder de manera continua en el modelo de capas superpuestas, donde fracciones del haz incidente van siendo reflejadas y transmitidas, la reflectancia total y la transmitancia total estarán dadas por dos series de sumas geométricas (H. G. Hecht, 1976):

$$R_{i+j} = R_i + \frac{T_i T_l R_j}{1 - R_l R_j} \quad (3-15)$$

$$T_{i+j} = \frac{T_i T_j}{1 - R_l R_j} \quad (3-16)$$

Haciendo la suposición de que la reflectancia y la transmitancia de una capa no dependerán de la dirección de incidencia del haz de luz tal que $R_i = R_l$ y $T_i = T_l$, las ecuaciones (3-15) y (3-16) se pueden simplificar como

$$R_{i+j} = R_i + \frac{T_i^2 R_j}{1 - R_i R_j} \quad (3-17)$$

$$T_{i+j} = \frac{T_i T_j}{1 - R_i R_j} \quad (3-18)$$

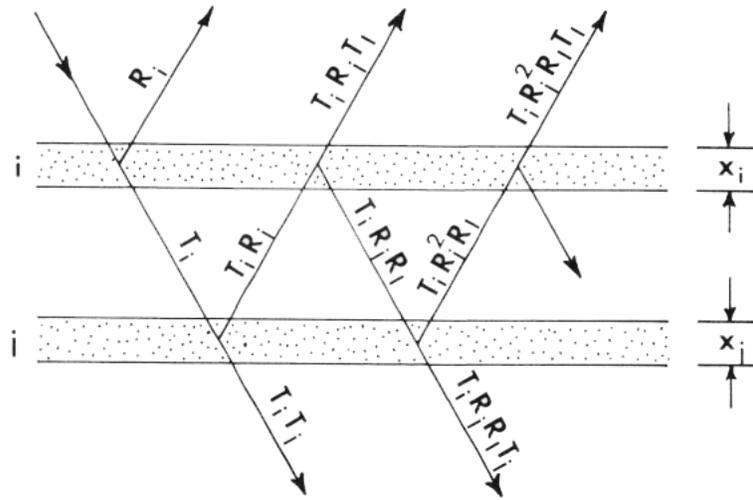


Figura 3-1: Diagrama de reflectancia y transmitancia en capas inhomogéneas (H. G. Hecht, 1976)

Si se asume que las capas son homogéneas gruesas en comparación con el tamaño de las partículas que las conforman, se pueden re-definir la reflectancia y la transmitancia en

términos del grosor de las capas:

$$R(dx) = K_1 dx \quad (3-19)$$

$$T(dx) = 1 - K_2 dx \quad (3-20)$$

Donde K_1, K_2 son constantes que caracterizan al medio. Donde $K_2 \geq K_1$ tal que la igualdad se cumple cuando el medio es no-absorbente (es decir, que refleja toda la luz incidente).

Sustituyendo las ecuaciones (3-19) y (3-20) en (3-17) y (3-18) se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales acopladas.

$$dR = K_1 T^2 dx \quad (3-21)$$

$$dT = -T(K_2 - K_1 R) dx \quad (3-22)$$

Aplicando las condiciones de frontera en el punto $x = 0$, tal que $R(0) = 0$ y $T(0) = 1$ y resolviendo las ecuaciones diferenciales se obtiene la reflectancia y transmitancia serán:

$$R = R_\infty \frac{1 - e^{-2Lx}}{1 - R_\infty^2 e^{-2Lx}} \quad (3-23)$$

$$T = (1 - R_\infty^2) \frac{e^{-Lx}}{1 - R_\infty^2 e^{-2Lx}} \quad (3-24)$$

Tal que $L = \sqrt{K_2^2 - K_1^2}$. La reflectancia para una capa infinitamente gruesa definida sólo en términos de los parámetros del sistema.

$$R_\infty = \frac{K_2 - \sqrt{K_2^2 - K_1^2}}{K_1} \quad (3-25)$$

La anterior una primera aproximación del modelo de Kubelka-Munk y se le conoce como el modelo de Gurevič. Siguiendo con la descripción, se consideran dos flujos en interacción

con una superficie reflejante: el incidente y el reflejado. La relación entre estos dos flujos, así como su interacción con los parámetros del sistema: el grosor de la capa¹⁴, la dispersión del haz de luz (S) y la absorción de la luz (K), permiten aproximar el comportamiento de la reflexión en el límite donde la capa es infinitamente gruesa.

$$F(R_{\infty}) \equiv \frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} = \frac{K}{S} \quad (3-26)$$

La anterior ecuación es conocida como la función de Kubelka-Munk y se puede derivar del límite $x \rightarrow \infty$ en la ec. (3-23).

Durante el proceso de reflexión difusa, la radiación incidente interactúa con la materia. A manera de absorción del cuanto de energía dado por la ecuación (3-3). En el caso de radiación con luz visible, los electrones excitados serán los electrones de enlace y es por esto que las bandas de absorción se pueden relacionar con el tipo de enlace en el material de estudio (Skoog, Holler, & Nieman, 2001). Este tipo de excitación tiene una duración aproximada de $10^{-8}s$ a $10^{-9}s$.

En el caso de las moléculas orgánicas la absorción de energía electromagnética está dada por la excitación de los electrones de valencia que conforman los enlaces. Esto requerirá de la transición de los electrones a estados excitados de los enlaces σ y π . Dada la naturaleza de estos enlaces, la energía que se requiere para excitar estos estados está en la región del UV-Vis. Estos serán en su mayoría los compuestos orgánicos. Para el caso de los compuestos inorgánicos de iones metálicos de transición, la absorción de energía involucra transiciones de los orbitales d llenos y no llenos. Esto generará bandas amplias en la región del visible, donde la posición del máximo de absorción, así como su forma dependerán del elemento, así como el estado de oxidación y el ligando unido a él. En el caso de los espectros de absorción de las tierras raras, es más difícil desprender electrones para generar una

¹⁴ Previamente descrito en los párrafos anteriores.

transición y por lo tanto los espectros de absorción tendrán bandas más angostas (Skoog et al., 2001).

Además, existe otro tipo de absorción llamada: *Absorción por transferencia de carga*. Este mecanismo se presenta en moléculas orgánicas como inorgánicas. Los complejos de transferencia de carga consisten en un grupo donador de electrones enlazado a uno que recibe electrones (Skoog et al., 2001). Por lo tanto, cuando la molécula absorbe un cuanto de energía, el electrón excitado proveniente del *donador* será transferido a un orbital relacionado con el *receptor*.

Los compuestos semiconductores son compuestos formados por dos o más átomos tal que existe una separación, conocida como *band gap*, entre la banda de valencia y de conducción. Esta separación es menor que la energía térmica de un electrón. Por lo general están en el orden de magnitud de $1eV$. Es por esto que algunos semiconductores como el *CdS* o *HgS* tienen *band gaps* que permiten la absorción en el visible. Por ejemplo, el cinabrio (*HgS*) tiene un *band gap* de $2eV$, lo cual resulta en la absorción de todas las energías en el visible, menos las que corresponden a los rojos, que tienen una energía menor a los $2eV$, por lo tanto, resultando en un color rojo. Además, la separación energética de los semiconductores depende de la temperatura, es por eso que hay pigmentos semiconductores que cuando son calentados cambian ligeramente de color. Tal es el caso del blanco de zinc (*ZnO*) que al ser calentado cambia de color a un amarillo brillante (Nassau, 1983). La reflexión difusa de la luz permite medir con bastante precisión el *band gap* de los semiconductores (Morales, A Escobedo and Mora, E Sanchez and Pal, 2007; Tandon, SP and Gupta, 1970) ya que mide el salto de energía de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, mostrando una función *escalón* en el espectro de absorción.

La espectroscopia IR, proporciona un espectro característico de cada molécula a partir de la frecuencia, intensidad y forma de sus bandas. Cada una de estas características responde

a un rasgo especial de los enlaces involucrados; es decir, la frecuencia de las bandas está relacionada con la energía, la intensidad con la polarizabilidad¹⁵ y la forma de las bandas está relacionada con la naturaleza de los enlaces.

La respuesta característica de una molécula ante la excitación electromagnética dependerá de los grados de libertad internos de la misma. Todas las moléculas, presentan grados de libertad de traslación, rotación y vibración. En el caso de una molécula diatómica, estos serán 6 grados de libertad: 3 de traslación, 2 de rotación y 1 de vibración. Para el caso de una molécula poliatómica (con N átomos), tendrá $3N$ grados de libertad, sin embargo, se debe de considerar la geometría de la molécula, ya que esto afecta la cantidad de grados de libertad de cada tipo, como se muestra en Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Grados de libertad para moléculas poliatómicas (Stuart, 2004)

Tipo de grado de libertad	Lineal	No-Lineal
Traslacional	3	3
Rotacional	2	3
Vibracional	$3N - 5$	$3N - 6$
Total	$3N$	$3N$

Los modos vibracionales son aquellos que se refieren a los movimientos de tensión y flexión de los enlaces moleculares. En el caso de la molécula diatómica, que tiene un grado de libertad vibracional, se refiere al movimiento de tensión y contracción del enlace. Para poder caracterizar la frecuencia de vibración de un enlace, se utiliza la aproximación del oscilador armónico definiendo la *rigidez* del enlace, dada por k la constante de Hooke y la masa reducida de los átomos (μ) en cada uno de los extremos del enlace. La masa reducida se puede definir como $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ y por lo tanto, la frecuencia de vibración del enlace estará dada por:

¹⁵ Se refiere a la susceptibilidad de un sistema a ser polarizado.

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/\mu} \quad (3-27)$$

Una molécula sólo podrá absorber radiación cuando la frecuencia de dicha radiación sea la misma que alguno de los modos fundamentales de vibración de la molécula.

Existen varios tipos de vibraciones diferentes. Las primeras son aquellas que involucran tensión o flexión. Existen tensión dentro de fase, a los que se conoce como *simétrica*, y tensión fuera de fase, conocidos como *asimétrica*, como se muestra en la Figura 3-2.

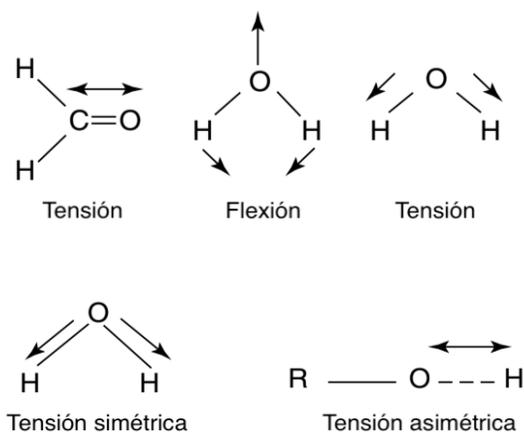


Figura 3-2: Diagrama de modos vibracionales (Stuart, 2004)

Además, existen variaciones de los movimientos de tensión y flexión que dan lugar a otro tipo de vibraciones como lo son el *scissoring* y *rocking*, ambas flexiones simétricas y asimétricas en el plano. Por otro lado, están las flexiones simétricas y asimétricas fuera del plano, que dan lugar a movimientos como el *wagging* y la *twisting* respectivamente.

La espectroscopía infrarroja opera comúnmente en los intervalos del infrarrojo cercano ($14,000 - 4000 \text{ cm}^{-1}$), el infrarrojo medio ($4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$), y el infrarrojo lejano ($400 - 10 \text{ cm}^{-1}$). Las dos componentes principales de la absorción IR son: la frecuencia de radiación y el momento dipolar. Como ya se mencionó anteriormente, para excitar un estado vibracional de una molécula, es necesario que la frecuencia de la radiación incidente

sea la misma que alguno de los modos vibracionales de la molécula. Es decir, que para que la radiación incidente transfiera su energía vía absorción a la molécula, es necesario que la vibración provoque un cambio en el momento dipolar de la molécula. A lo anterior se le conoce como la regla de selección de la espectroscopía infrarroja (Larkin, 2011).

El momento dipolar de una molécula (μ) está definido como la intensidad de la fuerza de atracción entre dos átomos y está definido como el producto de las cargas de los átomos y la distancia entre ellos:

$$\mu = \sum_i \mathbf{r}_i \cdot q_i \quad (3-28)$$

En el caso de la espectroscopía infrarroja, las bandas de absorción están asociadas a un tipo especial de enlaces, por lo que se pueden generar grupos de frecuencias en los que se presentarán los espectros característicos de diferentes partes de la molécula. Las tres regiones de interés son: IR cercano, IR medio e IR lejano.

En la región del infrarrojo cercano (IRC) se presentan los sobretonos y combinaciones de las vibraciones de flexión fundamentales. Finalmente, en la sección del infrarrojo lejano contiene información principalmente de las vibraciones de moléculas con átomos pesados, vibraciones esqueléticas, torsiones y vibraciones en arreglos cristalinos.

Si bien para caracterizar una molécula es importante también observar las bandas en el IR medio y lejano, la espectroscopía por reflectancia de fibra óptica, únicamente trabaja en el intervalo Vis-IRC

3.3.3 Colorimetría

Existen tres atributos que permiten describir un color específico a) el matiz, b) saturación y c) brillo (Nassau, 1997). El matiz, también conocido como *longitud de onda dominante*, *color*

cromático, es el atributo que especifica un valor característico de una longitud de onda (o una región en el espectro visible) y define un color. El espectro visible está dividido convencionalmente en ocho intervalos, cada uno designado a un color como se muestra en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Delimitaciones de los colores en términos de su longitud de onda, frecuencia, número de onda y energía (Nassau, 1997)

Color	Longitud de onda λ (nm)	Frecuencia ν (Hz)	Número de onda $\bar{\nu}$ (cm^{-1})	Energía (eV)
<i>Rojo (límite*)</i>	700	4.28 $\times 10^{14}$	14286	1.77
<i>Rojo</i>	650	4.61 $\times 10^{14}$	15385	1.91
<i>Naranja</i>	600	5.00 $\times 10^{14}$	16667	2.07
<i>Amarillo</i>	580	5.17 $\times 10^{14}$	17241	2.14
<i>Verde/Amarillo</i>	550	5.45 $\times 10^{14}$	18182	2.25
<i>Cyan</i>	500	6.00 $\times 10^{14}$	20000	2.48
<i>Azul</i>	450	6.66 $\times 10^{14}$	22222	2.76
<i>Violeta (límite*)</i>	400	7.50 $\times 10^{14}$	25000	3.10

*Los límites se pueden extender dependiendo del detector hasta 380 nm y 780 nm

El segundo atributo del color es la saturación, este pondera la presencia o ausencia de la escala de grises. La escala de grises tiene como límites al blanco y al negro, mientras que los tonos grises están en la región intermedia. Por lo tanto, agregar blanco, negro o gris a algún

color específico resultará en la saturación de dicho color. Por ejemplo, agregar blanco a un rojo resultará en un rojo menos saturado, o bien, rosa. La saturación también se puede definir como el grado de pureza de un matiz específico.

Por último, el brillo es el atributo del color que mide la luminosidad de un color independientemente de su saturación. El brillo está comúnmente asociado con la percepción que se tiene de la cantidad de luz de un color dado.

Por lo tanto, la definición del color requiere de una definición tres dimensional que recupere los tres atributos del color anteriormente explicados. Con esto, cada color tiene una única forma de ser representado en un espacio cartesiano, o bien, un espacio tres dimensional más conveniente.

La apreciación del color por el ojo humano está supeditada a la capacidad biológica de cada persona para poder determinar un valor específico. Además, el lenguaje únicamente permite hacer diferencias entre colores que de una u otra forma caerían en la ambigüedad. Además de las limitaciones humanas para nombrar un color con precisión, la definición de los colores dependió durante mucho tiempo de las condiciones en las que fueran observados. En la industria textil, la iluminación preferida para la medición del color era la luz solar proveniente del norte (Marcus, 1997), que aunque se buscara establecer como el estándar de iluminación para la industria textil, nunca podría ser exactamente el mismo en diferentes lugares. El mismo problema lo enfrentaron los artistas, la industria automotriz, los productores de pigmentos, entre otros.

La colorimetría da las herramientas necesarias para poder hacer mediciones cuantitativas del color a través de aparatos estandarizados que funcionan en cualquier parte del mundo y sin importar la hora del día. Éste avance es fundamental para los controles de calidad en la industria, así como para los estudios científicos que involucren el estudio del color.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés) es un organismo creado en 1931 en Viena, que se encarga de crear estándares colorimétricos, regular, investigar y divulgar todos los temas relacionados con luz, color e iluminación para el uso de la comunidad artística, científica y tecnológica. El sistema colorimétrico CIE pretende simular matemáticamente la percepción del color y generar un método para estandarizar dicha percepción (Marcus, 1997).

La CIE establece cinco tipos diferentes de fuentes de iluminación estándar para poder medir un objeto. Las primeras tres fuentes A, B y C fueron introducidas en 1931 y buscan reproducir la luz incandescente, luz del sol directa y la luz promedio del día, respectivamente. Se establece que el estándar A de iluminación es aquella luz que corresponda a los 2854 K (Marcus, 1997), mientras que los estándares B y C se consiguen filtrando al estándar A. Los estándares de la serie D son un grupo de estándares que busca reproducir fielmente la luz de día como una reproducción de diferentes valores de la temperatura para acercarse matemáticamente a la percepción de la luz del día. El estándar E es la fuente de iluminación de *misma energía*, que busca dar el mismo peso a todas las longitudes de onda. Finalmente, el estándar F es una serie que busca reproducir diferentes tipos de luz fluorescente.

Debido a que los conos en el ojo son sensibles a uno de tres estímulos: onda corta, onda mediana y onda larga, cualquier color puede ser simulado en términos de la percepción de los conos con un tri-estímulo rojo, verde, azul (RGB). Gracias a la distribución de los conos en la fóvea del ojo, donde los conos están más concentrados en el centro y mayormente distribuidos entre los bastones a medida que el ángulo crece ($\sim 4^\circ$), la percepción del color se ve afectada dependiendo del ángulo con el que se mire un objeto. Existen dos tipos de observadores: el observador CIE 1931 2° y el observador CIE 1964 10° , siendo el segundo el más común para los cálculos y aplicaciones colorimétricas.

Espacio de color RGB

El modelo de color RGB (Red, Green, Blue) busca estandarizar la percepción de los tres colores primarios desde el ojo humano. Es un modelo aditivo, ya que explica la creación de colores a partir de la suma de los tres colores primarios, rojo, verde y azul.

El modelo de color usa un espacio euclidiano tres dimensional con valores positivos en el intervalo (0,1). El color negro está representado por el origen (0,0,0) y el blanco es el vértice opuesto (1,1,1). Cada uno de los ejes representa a la terna de coordenadas RGB. Cuando se considera al espacio normalizado en términos de tres vectores unitarios:

$$r = \frac{R}{R+G+B}; \quad g = \frac{G}{R+G+B}; \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (3-29)$$

Los colores rojo, verde y azul se encuentran en los extremos valores unitarios de los vectores, el negro en el origen del espacio cartesiano y el blanco estará en la coordenada $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ en el plano unitario. Además, cualquier color [F] se podrá considerar como aquel de coordenadas (R,G,B) . Comúnmente los colores modelo RGB se definen a partir de la intersección del vector [F] con el plano unitario (Marcus, 1997).

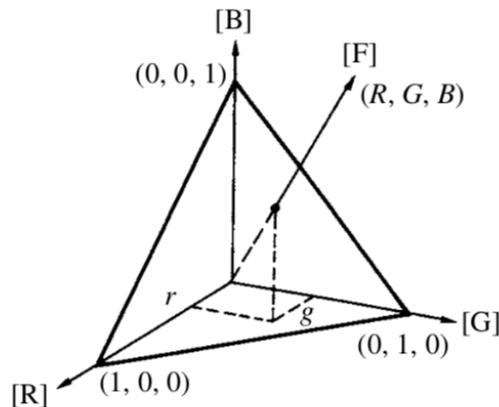


Figura 3-3: Diagrama cromático en tres dimensiones (Marcus, 1997)

Espacio de color CIE-Lab

Es un espacio de color diseñado en 1976 que busca responder a la manera perceptual y uniforme en la que los humanos perciben el color. Es comúnmente utilizado en las industrias del color y textiles, así como para los procesos de control de calidad. El modelo LAB está definido por una terna coordenada (L,a,b) la primera coordenada corresponde a la luminosidad (L) que se encuentra en el intervalo de (0,100) donde $L = 0$ es un negro perfecto y $L = 100$ será un blanco perfecto. Esta coordenada se grafica en el eje Z del plano cartesiano.

Las coordenadas (a,b), graficadas en el plano (XY) cartesiano, se definen a partir de la teoría de los opuestos de Ewald Hering, en donde dos parejas de colores *opuestos* generan a todos los colores, de la misma forma que la coordenada (L): blanco y negro, las parejas opuestas para las coordenadas (a,b) son: la coordenada (a) rojo-verde y la coordenada (b) con amarillo-azul. El espacio Lab se muestra en la Figura 3-4.

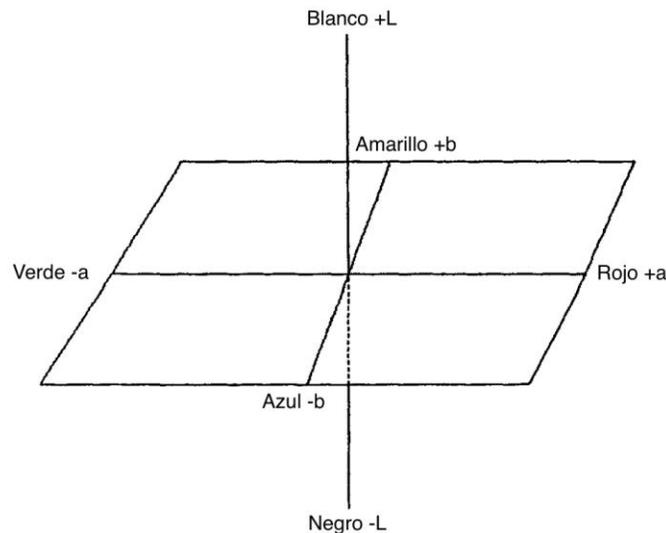


Figura 3-4: Diagrama del espacio CIE-Lab (Marcus, 1997)

Además, la CIE definió para el espacio de color CIE-Lab valores para un modelo afín al Lab pero definido en coordenadas cilíndricas en lugar de cartesianas, este es el espacio de color CIELCh. En este espacio de color, la luminosidad se mantiene de la misma manera, pero las coordenadas (a,b) son transformadas en las coordenadas de *chroma* (C) y *matiz* (H) bajo las siguientes transformaciones:

$$C_{ab}^* = [a^2 + b^2]^{1/2} ; h_{ab} = \arctan[b/a] \quad (3-30)$$

Donde el valor del matiz se mide en ángulos de 0° a 360° tomando como cero al eje +a. Gracias a esto se puede hacer una equivalencia entre el modelo CIE Lab y el círculo cromático (Marcus, 1997).

3.4 Técnicas de imagen y microscopía

Si bien las técnicas espectroscópicas permiten conocer las características y componentes de los materiales, el análisis es *puntual* cuando se considera un objeto de dimensiones en el orden de magnitud de centímetros. Es por esto que es importante poder hacer extensivo el análisis de los objetos de estudio, así como poder tener una técnica que permita planificar el estudio material mediante la delimitación de áreas de estudio y secciones de interés.

En el análisis de bienes patrimoniales, los objetos de estudio por lo general no tienen dimensiones menores a los centímetros y pueden alcanzar hasta varios metros¹⁶. Además, no siempre se cuenta con una cantidad extensa de tiempo para poder realizar los estudios. Es por esto que las técnicas de imagen y microscopía son fundamentales en el estudio preliminar de los bienes patrimoniales, así como en la cualidad de hacer extensivos los resultados a toda un área que comparte las mismas propiedades materiales.

¹⁶ Considerando que se pueden analizar desde fragmentos pequeños hasta pinturas murales o esculturas.

Imagen infrarroja de falso color

La imagen de falso color es una técnica que consiste en intercambiar los canales de color del espectro visible de una fotografía para poder incorporar la información obtenida en una fotografía infrarroja (Rangel Chávez, 2018).

Cuando se toma una fotografía digital, el color en el espectro visible puede ser procesado con el modelo RGB. El modelo RGB establece que los valores de las longitudes de onda para los colores rojo, verde y azul están dados de la siguiente manera: $\lambda_R = 700.00 \text{ nm}$, $\lambda_G = 546.1 \text{ nm}$ y $\lambda_B = 435.8 \text{ nm}$ (Ohta & Robertson, 2006). Siendo estos los valores centrales, ya que la distribución de los colores en el modelo RGB divide al espectro visible en tres regiones acotadas como: rojo (450 – 490)nm, verde (490 – 580)nm y azul (620 – 780)nm.

Además, el modelo RGB establece que para poder generar el color blanco (el *cero*) se necesita combinar las longitudes de onda RGB en las proporciones 1.0000: 4.5907: 0.0601 respectivamente (Ohta & Robertson, 2006).

Dentro de las tres cualidades del color: matiz, brillo y saturación, la metodología de imagen infrarroja de falso color mide el cambio en el matiz entre una imagen visible y la imagen de falso color. Esto es porque el matiz es la cualidad del color directamente asociada con la longitud de onda.

La imagen infrarroja de falso color se genera corriendo los canales rojo y verde hacia los canales verde y azul respectivamente, permitiendo así dejar libre el canal rojo de la *imagen de falso color* como se muestra en la Figura 3-5. El canal rojo de la imagen de falso color será ocupado por el canal rojo de la imagen infrarroja.

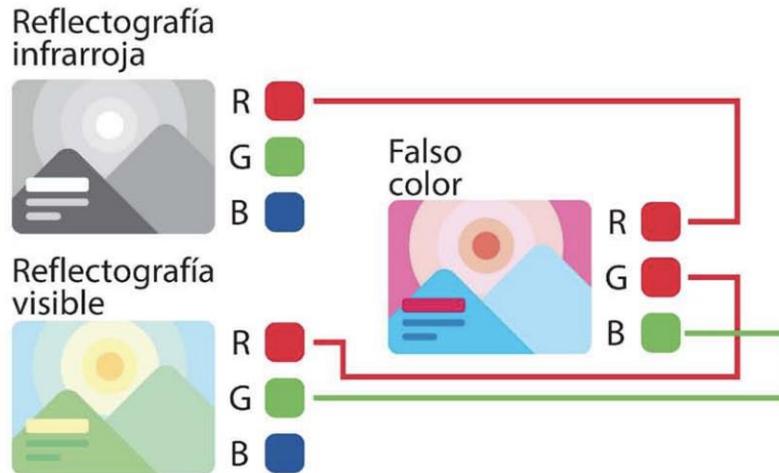


Figura 3-5: Diagrama de construcción de la imagen infrarroja de falso color (Rangel Chávez, 2018)

El resultado será, una imagen que contenga información tanto del visible como del infrarrojo. Como ya se ha mencionado, la luz infrarroja permite excitar modos vibracionales de la materia, por lo tanto, la imagen infrarroja tiene consigo información intrínseca del material que se está fotografiando. Es por eso que la información obtenida mediante la imagen infrarroja de falso color, no solo tiene información sobre la respuesta en el visible de los materiales estudiados, sino que contiene información sobre la naturaleza de los materiales. Gracias a esto, la imagen infrarroja de falso color permite contrastar, o hacer más evidentes, las diferencias materiales que, en el espectro visible, no serían fáciles de detectar.

Microscopía óptica

El microscopio óptico es un instrumento que permite magnificar objetos que se encuentren cercanos mediante un arreglo de lentes. Los primeros registros del microscopio óptico se remontan a 1590, en las manos de un inventor holandés, Zacharias Jansen, aunque la invención del microscopio sigue siendo un tema controvertido. A él le siguen nombres como Galileo Galilei, Robert Hooke, entre otros.

El arreglo óptico para un microscopio óptico consta de dos lentes principales: el *objetivo* y el *ocular*. El lente objetivo es aquel que se encuentra más cerca del objeto de estudio y forma una imagen real, invertida y magnificada del objeto de estudio. Posteriormente, esta imagen es formada en la distancia focal del lente ocular, el cual generará rayos paralelos que llegarán al receptor (en el caso general el ojo, aunque puede ser también un detector digital) y formarán una imagen recta y magnificada en el infinito.

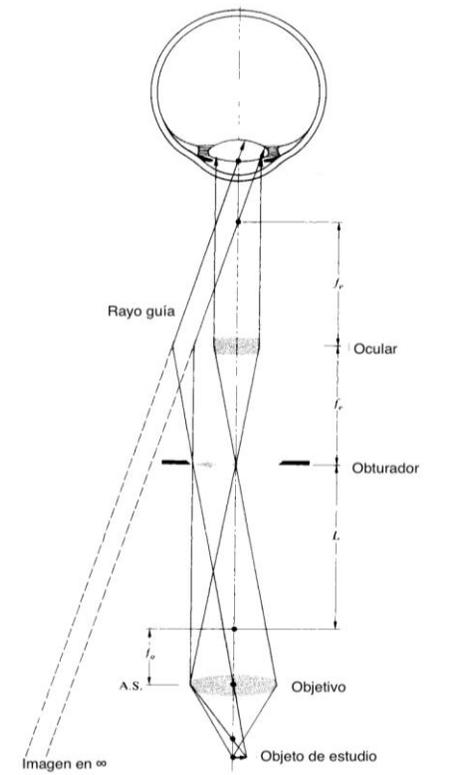


Figura 3-6: Diagrama de un microscopio óptico (E. Hecht, 2002).

El poder de magnificación del arreglo estará dado por el producto del poder de magnificación del objetivo M_o y el poder de magnificación del ocular M_e : $MA = M_o \times M_e$. La magnificación del objetivo dependerá de la distancia focal y la distancia al objeto de estudio $M_o = \frac{d}{f_o}$. Para el caso del lente ocular, la magnificación está dada por la distancia del detector al lente ocular y la distancia focal del mismo, por lo tanto $M_e = \frac{d_{detector}}{f_e}$.

Existen tres formas de analizar un objeto de estudio en un microscopio óptico: bajo un portaobjetos de vidrio, sin un portaobjetos e inmerso en aceite. La diferencia en el medio de inmersión del objeto de estudio afectará la cantidad de luz que entra al microscopio. Por lo tanto, existe un término llamado *apertura numérica (NA)* que define la cantidad de luz que entra al microscopio y está dado por $NA = n_i \sin \theta_{max}$ donde n_i es el índice de refracción del medio de inmersión y θ_{max} es el valor máximo del ángulo medio del cono de luz que entra al microscopio (E. Hecht, 2002).

El microscopio óptico digital es un arreglo que tiene como detector una cámara y que utiliza iluminación directa. Este tipo de dispositivos se pueden conectar a una computadora permitiendo la captura inmediata de imágenes. Puesto que la iluminación es directa, requiere de poca luz para obtener las imágenes, por lo que permite trabajar cerca de la muestra de estudio sin dañarla.

Otro arreglo de microscopio es el microscopio estereoscópico. Como su nombre lo dice, el microscopio estereoscópico permite obtener una imagen con la ilusión de profundidad. Esto se logra con dos objetivos que observan el mismo objeto de estudio con ángulos ligeramente diferentes, pero enfocando la misma imagen. Cuando ambas imágenes son unidas por el cerebro, se logrará la ilusión de profundidad. Existen microscopios estereoscópicos acoplados a una cámara que permite la captura digital de las imágenes.

Microscopía electrónica de barrido acoplada a fluorescencia de rayos-X por energía dispersiva (SEM-EDS)

El principio operativo de la microscopía electrónica de barrido (SEM¹⁷) es la creación de un haz de electrones que posteriormente es enfocado y acelerado con electroimanes y lentes electrostáticas¹⁸ para reducir el diámetro del haz y poder generar un barrido discreto del

¹⁷ Scanning electron microscopy.

¹⁸ Las lentes electrostáticas son dispositivos que ayudan en el transporte de partículas cargadas.

objeto de estudio. El enfoque de un microscopio electrónico de barrido dependerá de la finura del cono de emisión del haz de electrones. Puesto que la lente que enfoca al haz lo hace mediante la modificación de la corriente, de modo tal que entre más corriente sea suministrada al lente, mayor será el campo magnético producido y por lo tanto los electrones se desviarán, produciendo que estén más enfocados. Por supuesto, esto también afecta la distancia focal del lente, ya que entre mayor corriente menor será la distancia focal del mismo.

Cuando el haz de electrones se encuentra con el objeto de estudio, se producirán dos productos: a) electrones retrodispersados (BSEs¹⁹) son electrones de altas energías que son reflejados por medio de la dispersión elástica con los átomos del objeto de estudio; y b) electrones secundarios (SEs²⁰) que son aquellos electrones que logran escapar de la superficie del objeto de estudio producto de la colisión de los electrones del haz incidente con los átomos de la muestra. Ambos electrones resultantes de la interacción están ponderados por la tasa de cambio entre los electrones en el haz incidente y los electrones producto: retrodispersados o secundarios, según sea el caso. Finalmente, los electrones llegan a un detector que permite mapear la procedencia de la señal asignando un valor en escala de grises para cada punto en el plano cartesiano (XY).

Los microscopios electrónicos de barrido operan en condiciones de vacío, lo cual aumenta el camino libre medio entre el objeto de estudio y los detectores. Así, se minimiza la dispersión de los electrones producida por partículas que no pertenecen a la muestra.

El SEM permite estudiar diferentes características de un objeto de estudio, a) composición de la microestructura, ya que los detectores de electrones retrodispersados permiten observar variaciones en diferencias del orden de la unidad para los valores promedio del número atómico. Gracias al mapeo de las superficies, es posible estudiar los bordes,

¹⁹ Backscattered electrons.

²⁰ Secondary electrons.

inclinaciones y variaciones locales de la b) topografía del objeto de estudio. Además, el SEM permite ajustar la profundidad de campo para obtener un estudio de c) profundidad y visualización 3D, aunque la imagen obtenida usualmente sufre de cierto grado de distorsión ya que la información se guarda en una imagen dos-dimensional. Por último, se pueden estudiar las características de la d) estructura cristalina, fronteras de grano y defectos cristalinos y e) dominios magnéticos e interfaces (Goldstein et al., 2017).

Además, cuando los electrones del haz incidente tienen una energía mayor a la energía de enlace de los electrones, o energía de ionización, el haz incidente podrá arrancar un electrón de las capas **K, L, M**, etc y como consecuencia se producirá un fotón característico. Como se mencionó en la sección 3.3.1, este proceso se le conoce como fluorescencia de rayos-X. Esto permite la identificación elemental, así como la cuantificación porcentual de los componentes del objeto de estudio.

Goldstein et.al., definen tres diferentes tipos de constituyentes en un objeto de estudio para el análisis SEM-EDS. Los tres grupos están divididos en términos de la concentración (C^{21}) de un elemento de la siguiente manera:

- Principal: $C > 0.1 \omega_i$ (mayor que el 10 wt%²²)
- Secundario: $0.01 \omega_i \leq C \leq 0.1 \omega_i$ (1 wt% a 10wt%)
- Traza: $C < 0.01 \omega_i$ (menor al 1 wt%)

²¹ Con unidades de fracción de masa $\omega_i = m_i/M_{Tot}$

²² El porcentaje masa/masa es la proporción porcentual de la masa del elemento en la masa del total.

4 Metodología

4.1 Contexto y materiales de estudio

Teotihuacan es una de las zonas arqueológicas más importantes de México y Mesoamérica. Se encuentra en la región del altiplano central mexicano. Floreció entre el periodo del 200-550 d.C (Linda Rosa Manzanilla Naim, 2017). Se caracteriza por sus grandes edificaciones piramidales, así como por la planificación urbana y ha sido el lugar de diversos estudios e investigaciones. De acuerdo con L. Manzanilla, Teotihuacan se desarrolló como una ciudad de alrededor de 20km cuadrados de extensión y más de 100 mil habitantes (Linda Rosa Manzanilla Naim, 2017).

Es de las zonas arqueológicas más estudiadas de México. Los primeros trabajos de excavación se realizaron en la época porfiriana a cargo de Leopoldo Batres. Posteriormente Manuel Gamio realizó investigaciones en la zona. Después continuaron las investigaciones de R. Millon, R. Chadwick, S. Sugiyama, L. Manzanilla, E. Matos, R. Cabrera, entre muchos otros investigadores destacados.

Esta gran urbe se caracteriza por el extenso uso de los colores. En ella destacan algunos de los murales más representativos de la región. También se ha encontrado una gran cantidad de restos cerámicos policromados. Pigmentos en contextos funerarios, rituales, habitacionales, entre otros. Por lo tanto, Teotihuacan se distingue por ser una metrópolis polícroma.

Teotihuacan continúa siendo un punto importante en la historia mexicana. Aún se siguen realizando investigaciones que aportan piezas del rompecabezas para lograr entender la dinámica de la gran metrópoli.

4.1.1 Complejo Plaza de las Columnas, Teotihuacan

Plaza de las Columnas es el cuarto conjunto con edificaciones más altas en Teotihuacan, después de la ciudadela, la pirámide del Sol y la pirámide de la Luna. Se encuentra a un costado de la calzada de los muertos, un poco recorrida al sur respecto al eje de la pirámide del Sol.

De acuerdo con las investigaciones del proyecto Complejo Plaza de las Columnas (PCPC), la zona fue ampliada y ocupada de manera continua (“Complejo Plaza de las Columnas – Proyecto Complejo Plaza de las Columnas,” n.d.).

Durante las excavaciones de las temporadas 2016 y 2017 en el frente D, se encontraron varios fragmentos de pintura mural, como relleno entre una capa de piso y otra superior. De acuerdo con lo reportado por el PCPC, los fragmentos de pintura mural destacan por aparentar haber sido pintados por artistas mayas. Estos fragmentos presentan similitudes con los murales encontrados en San Bartolo y Bonampak. Se cree que este mural estaba en un edificio desde el cual se coordinaban las relaciones con las élites mayas (Sugiyama, Sugiyama, Ortega, & Fash, 2016).

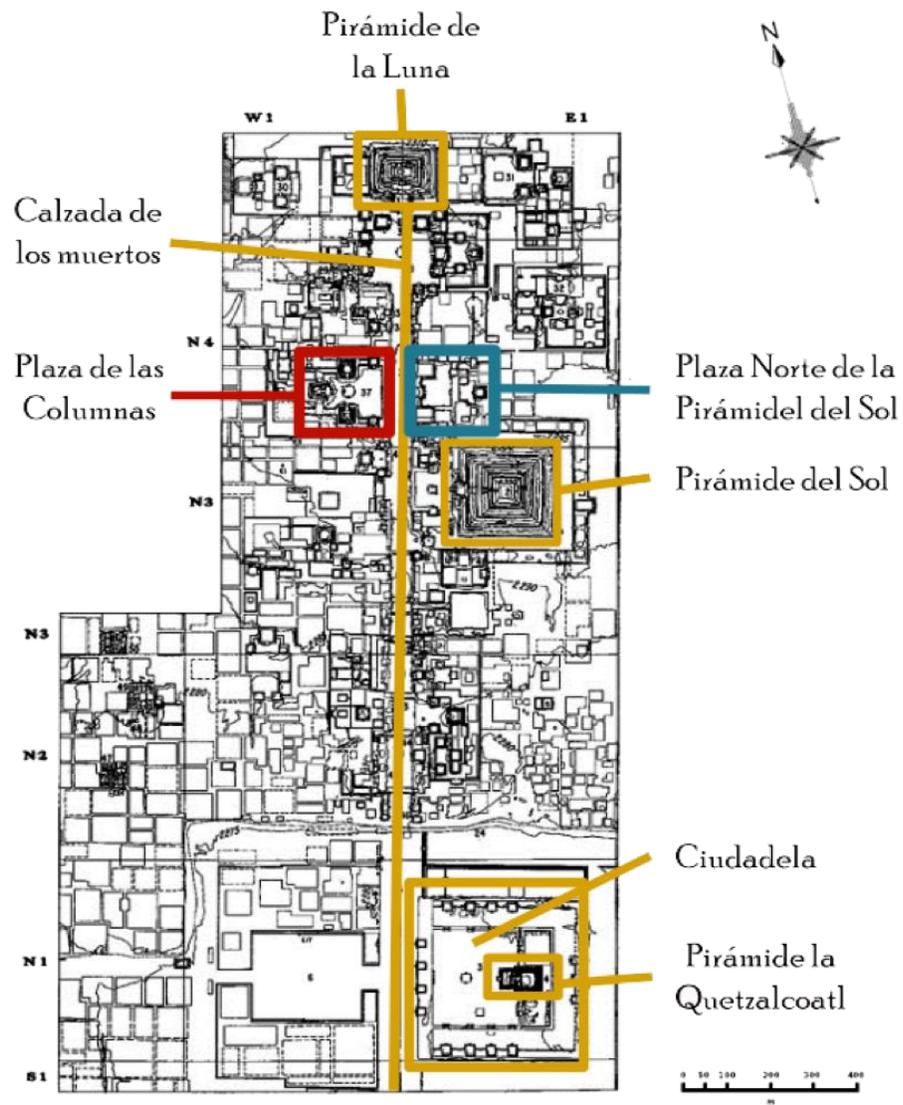


Figura 4-1: Mapa de Teotihuacan modificado del mapa de R. Millon ("Complejo Plaza de las Columnas – Proyecto Complejo Plaza de las Columnas," n.d.)

4.2 Fragmentos analizados

En este trabajo se caracterizaron fragmentos de pintura mural del proyecto Complejo Plaza de las Columnas, a cargo de el Dr. Saburo Sugiyama y la Dra. Nawa Sugiyama. Los fragmentos analizados pertenecen a tres temporadas de excavación consecutivas, 2016, 2017 y 2018. La mayoría fueron excavados en el frente D del Complejo y una menor cantidad del frente A y C, del mismo sitio.

Se caracterizaron un total de **57 fragmentos** de la temporada 2016 y **23 fragmentos** de la temporada 2017. Estos fueron analizados en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC) en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IF-UNAM). Por otro lado, se analizaron un total de **70 fragmentos** de las excavaciones de la temporada 2018, en las instalaciones de Teotihuacan Mapping Project, San Juan Teotihuacan, Estado de México. Los fragmentos analizados de esta última temporada incluyen un fragmento de la temporada 2016. El total de fragmentos analizados consta de **150 fragmentos** que varían en tamaño de $\sim 2\text{cm}$ hasta $\sim 35\text{cm}$ por la diagonal más larga. Es importante recalcar que los fragmentos analizados no estaban consolidados al momento de la caracterización.

Los fragmentos de pintura mural constan de tres principales elementos: el mortero y el enlucido, que son los materiales de soporte y por último la capa pictórica. A través de las diversas técnicas de análisis, se busca identificar los materiales constituyentes tanto de los pigmentos como de los materiales del soporte y como consecuencia conocer las técnicas empleadas para la construcción de el mural.

Los fragmentos de la temporada 2016 son los de menores dimensiones mientras que los de las temporadas 2017 y 2018 son de mayor tamaño. Además, como consecuencia de sus dimensiones, los fragmentos 2016 por lo general son monocromáticos y con mínimos diseños o prácticamente inexistentes. De la misma forma, los fragmentos de las temporadas 2017 y 2018 son principalmente polícromos, aunque también se encuentran fragmentos

monocromáticos, y tienen diseños que van de lo simple hasta lo muy especializado. Por lo mismo, éstos últimos son piezas más frágiles, lo cual limita los análisis a aquellos sin contacto.



Figura 4-2: Fragmentos y excavación del frente D del Complejo Plaza de las Columnas (Sugiyama et al., 2016)

4.3 Desarrollo experimental

Se adaptó la metodología de trabajo diseñada en el LANCIC-IF, para poder caracterizar la totalidad de los fragmentos y adaptarse de la mejor manera a las condiciones de trabajo. Los grupos de fragmentos fueron analizados en la secuencia de las temporadas de excavación, es decir: 2016 fue el primer grupo en analizarse, posteriormente 2017 y por último 2018. Dadas las características de los fragmentos de la temporada 2016 y que el proyecto Plaza de las Columnas permitió que estuvieran en el LANCIC-IF durante el proceso de este trabajo, se realizó en ellos la mayor cantidad de análisis. Mientras que en los fragmentos 2017, también resguardados en el LANCIC-IF, por ser mas delicados y de mayores dimensiones únicamente fueron objeto de los análisis sin contacto. En la temporada 2018, el análisis se realizó *in situ* lo cual únicamente permitió el trabajo con XRF y microscopía óptica. Este proceso de trabajo se explica de manera esquemática en la Figura 4-3.

La metodología de trabajo consta de tres categorías de análisis: las técnicas de imagen, el análisis elemental y el análisis molecular y de estructural. Cada una proporciona información complementaria que permite la caracterización de los materiales. Los detalles del proceso de trabajo para cada una de las temporadas de trabajo son explicados a continuación.

Técnicas de imagen

El análisis por técnicas de imagen es un análisis global que busca diferenciar pigmentos, delimitar zonas de análisis, así como inspeccionar detalles importantes que sean relevantes para la investigación. En este grupo de análisis se emplean las técnicas de imagen infrarroja de falso color y microscopía óptica. Primero todas las muestras de las temporadas 2016 y 2017 fueron analizadas con imagen infrarroja de falso color. Posteriormente las muestras de las temporadas 2016, 2017 y 2018 se inspeccionaron con el microscopio óptico.

La **imagen infrarroja de falso color** (Rangel Chávez, 2018) se ejecutó con una cámara Sony Handycam HDR-P J260, usando filtros de 760 nm, 850 nm y 950 nm, y luces de halógeno Lowe total lamp Halogene con bulbos de 750W y luz de 3200K. Finalmente las imágenes fueron procesadas con los programas i1 Profiler, Adobe Photoshop CC, Adobe Bridge CC, Adobe Camera Raw 8.3 y Spyder Checkr 1.2.2 de acuerdo con la metodología empleada por I. Rangel (2018). Finalmente, la **microscopía óptica** se ejecutó con el microscopio óptico portátil y digital, Dino Lite Edge, con aumentos de 20X, 50X y 100X, iluminación LED directa y programa de captura Dinocapture 2.0. También se tomaron imágenes con el microscopio estereoscópico Zeiss Stemi 305.

Análisis elemental

El análisis elemental se llevó a cabo por medio de la **fluorescencia de rayos-X**. En este proceso se utilizó el equipo portátil SANDRA (Ruvalcaba Sil, Ramírez Miranda, Aguilar Melo, & Picazo, 2010). El equipo SANDRA tiene un tubo de rayos-X es de Mo y un detector de Si (Amptek XR-100-CR), además, el área de análisis es de $\sim 1\text{mm}$, permitiendo realizar mediciones casi puntuales²³. Las condiciones de análisis fueron: $I = 0.2\text{ mA}$, 0.3mA ²⁴, $V = 30\text{kV}$ y $t = 120\text{s}$. Además, se emplearon las referencias del NIST: Vidrio SRM 1412, Dolomite limestone 88b, Limestone Argillaceous 1d, Bufalo 2704, Montana 2710 y Basalt Rock 688, para el análisis semi-cuantitativo. El procesamiento de los datos de fluorescencia se realizó con el programa Axil. El total de 150 fragmentos fue analizado por medio de fluorescencia de rayos-X con el equipo SANDRA.

Las condiciones del equipo SANDRA no permiten detectar elementos más ligeros que el Mg, por lo cual se utilizó el microscopio electrónico de barrido acoplado a **fluorescencia de rayos-X por energía dispersiva (SEM-EDS)** para el análisis de elementos ligeros. El equipo SEM TM 3030 Plus, Tabletop Microscope Hitachi tiene un detector que permite hacer

²³ Para las dimensiones de los fragmentos.

²⁴ En laboratorio se emplearon 0.2mA mientras que en campo se utilizaron 0.3mA.

mapeos elementales con un detector de Si (SDD²⁵) (Hitachi, 2014). Por el tamaño de los fragmentos, únicamente fueron analizados algunos fragmentos de la temporada 2016.

Análisis molecular y estructural

Primero se realizó el análisis de **espectroscopía por reflectancia de fibra óptica (FORS)**. Al tratarse de un análisis en el visible y el infrarrojo cercano permite tener información sobre la materialidad y color del pigmento, así como los materiales que conforman el soporte. Gracias a que el equipo opera por medio de la reflectancia difusa, se puede considerar que, por las dimensiones de la capa pictórica, el análisis FORS es prácticamente superficial. Se utilizó el equipo portátil FieldSpect4 de ASD inc, en el intervalo espectral de 350 – 2500 *nm*. El equipo trabaja con tres detectores en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo cercano de onda corta. La fuente de luz externa es un iluminante estándar CIE de la serie D con temperatura de color media en 6500 *K* (Maynez Rojas, 2017). El equipo fue utilizado en la modalidad sin contacto a una distancia de 8 *cm* y tiene un área de análisis de aproximadamente 3 *mm*. Con este análisis se caracterizaron la totalidad de los fragmentos de las temporadas 2016 y 2017.

Los análisis puntuales se hicieron con el **microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS)**, que como ya se mencionó anteriormente, está acoplada a un detector de fluorescencia de rayos-X (EDS) que permite hacer mapeos elementales. Este análisis proporcionó información sobre la superficie de análisis: rugosidad, porosidad, tamaño de partículas, así como la caracterización de impurezas depositadas en los enlucidos de los fragmentos por medio del mapeo elemental. Se empleó el equipo SEM TM 3030 Plus, Tabletop Microscope Hitachi con aumentos hasta 500X con 15 *kV*. Únicamente fueron analizadas ciertos fragmentos de la temporada 2016

²⁵ Silicon Drift Detector, por sus siglas en inglés.

Finalmente, para poder caracterizar los pigmentos por color de manera sistemática y objetiva, se realizó el análisis de **colorimetría**. Si bien el FORS permite obtener información colorimétrica por medio del detector en el visible, el colorímetro tiene una mayor versatilidad en la adquisición de datos, así como una mejora en la definición del equipo. Todos los fragmentos de las temporadas 2016 y 2017 fueron analizados con esta técnica. Para este análisis se empleó el espectrocolorímetro de alta definición RUBY con fibras ópticas que permite obtener simultáneamente información colorimétrica, así como el espectro en el visible (300 – 800 *nm*). Los datos fueron adquiridos en el modelo de color CIE Lab con un iluminante D65 y observador CIE 1964. Se realizó el análisis sin contacto a 8*cm* de distancia.

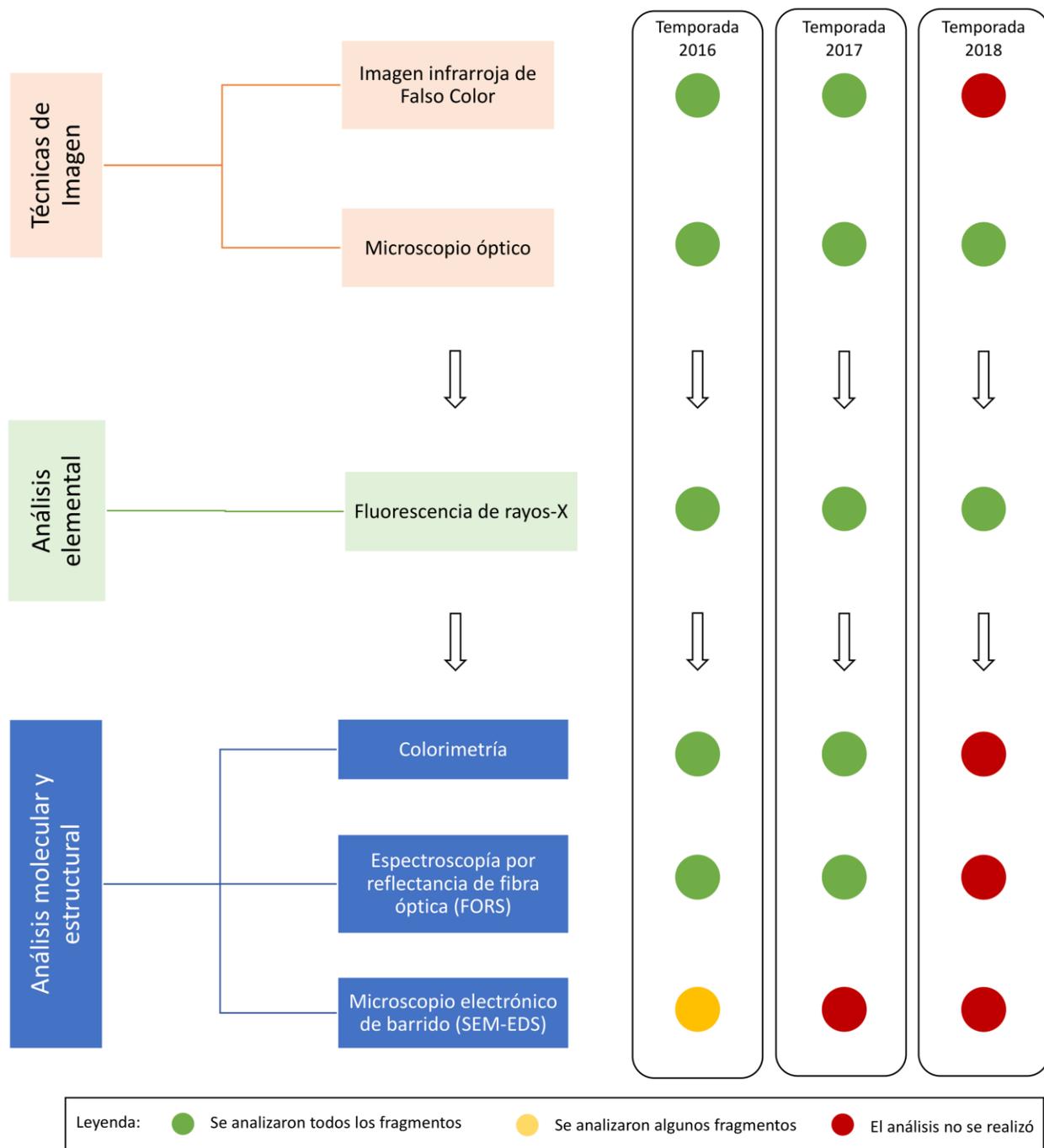


Figura 4-3: Diagrama de la secuencia metodológica

5 Resultados

Los resultados a presentados a continuación serán discutidos de acuerdo con el tipo de material que se está analizando. Es por esto que la primera división será entre materiales de soporte y pigmentos. Los materiales de soporte (5.1) incluyen argamasas y enlucidos. Los pigmentos son todos aquellos materiales con una cualidad colorante.

Los pigmentos fueron divididos en grupos generales de color, estos son: blancos (5.2.1), negros (5.2.2), ocre y amarillos (5.2.3), rojos (5.2.4), verdes (5.2.5) y azules (5.2.6).

Estos resultados han sido presentados previamente en congresos tanto nacionales como internacionales. Estos son la 6ª Mesa Redonda de Teotihuacan (Nov 2017), la 83ª reunión anual del SAA (Abr 2018), el International Symposium on Archaeometry (May 2018) y la Primera reunión Nacional de Ciencias Aplicadas al Patrimonio (Oct 2018).

5.1 Soportes

De acuerdo con el glosario definido por L.Barba e I. Alonso, el término argamasa se define como “Mezcla de cementante (cal) y agregados. En algunos ámbitos se conoce también como ‘mortero’” (L. Barba Pingarrón & Alonso Villaseñor, 2013). Además, en el trabajo de L. Bravo se amplía esta definición y se agrega que una argamasa se utiliza tanto en aplanados como pisos y que “éste (argamasa) es el nombre que se le da a la mezcla utilizada para unir bloques o piedras en una construcción” (Lozano Bravo, 2018). En este caso, la argamasa se refiere a la mezcla cementante que une al mural con el muro. En los fragmentos analizados, esta es la sección más grande, ya que mide en el orden de $10^0 - 10^1$ cm de grosor.

Por otro lado, en su trabajo, H. Lozano define a los enlucidos como “capa de yeso, estuco u otra mezcla con tamaño de partícula muy fino, que se da a una superficie arquitectónica con objeto de obtener una textura tersa” (Lozano Bravo, 2018). Para los fragmentos de pintura mural de Plaza de las Columnas, el enlucido se encuentra después de la argamasa y

es aquel sobre el cual se aplica el pigmento. Los enlucidos presentes en las muestras son de $\sim 100 \mu m - 2.5 mm$ como se puede apreciar en la Figura 5-1.

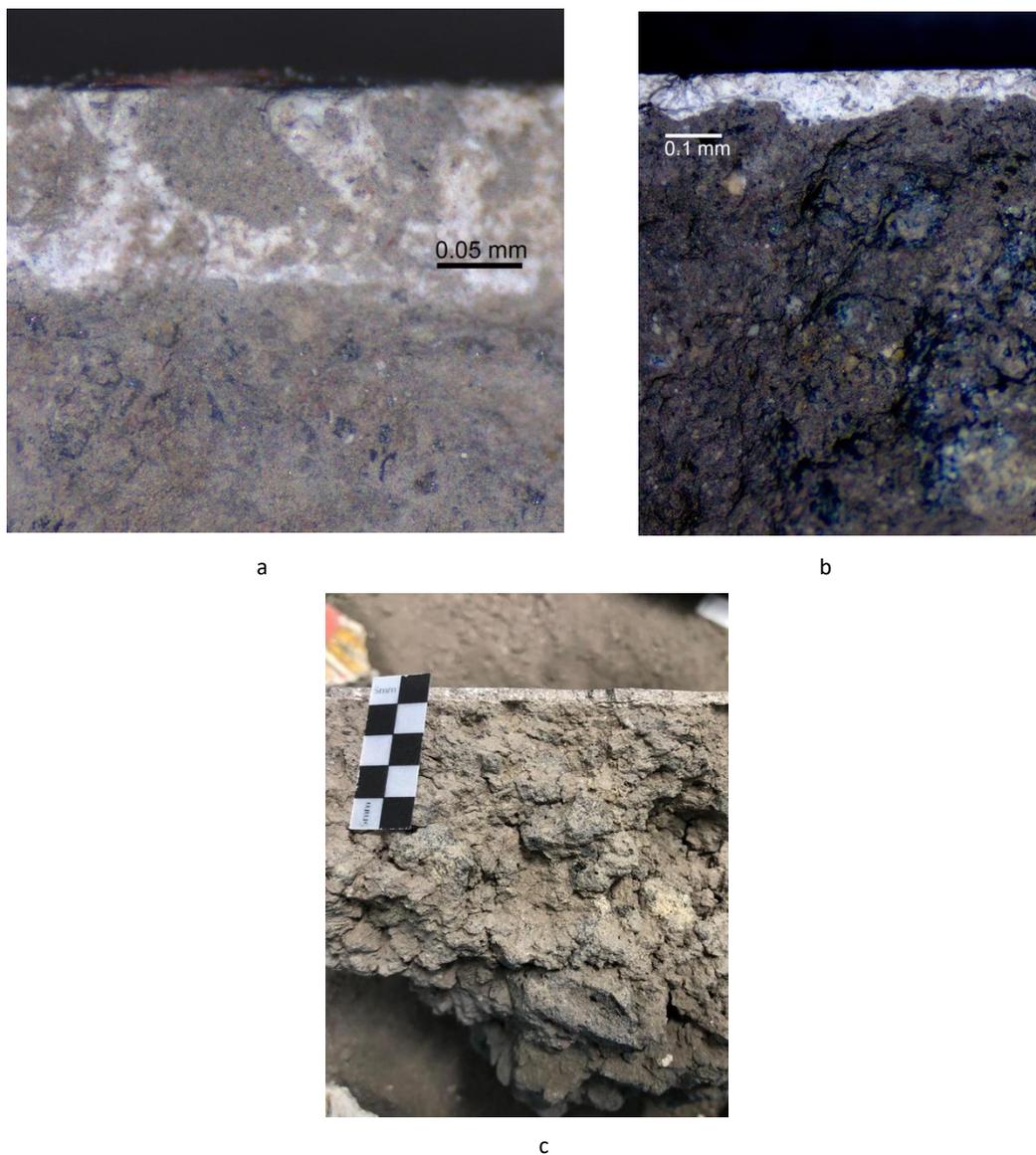


Figura 5-1: Fotografía lateral de argamasas y enlucidos de tres fragmentos representativos (a) 5_D16-0869 (b) 20_D16-0608-A y (c) 53_D17-0951-EL-249-015. Fotografías Paulina Guzmán (a,b), Mtra. Hilda Lozano Bravo (c)

5.1.1 Argamasas

Las argamasas de los fragmentos de Plaza de las Columnas fueron analizadas mediante fluorescencia de rayos-X y FORS en sólo un caso. Además, se realizó también una inspección con microscopía óptica para los fragmentos de todas las temporadas. El FORS únicamente fue utilizado en el fragmento 36_S_N, de la temporada 2016, ya que este presenta una argamasa aplanada, lo cual favorece la medición. Como no presentan pigmento, las técnicas de falso color y colorimetría no fueron empleadas.

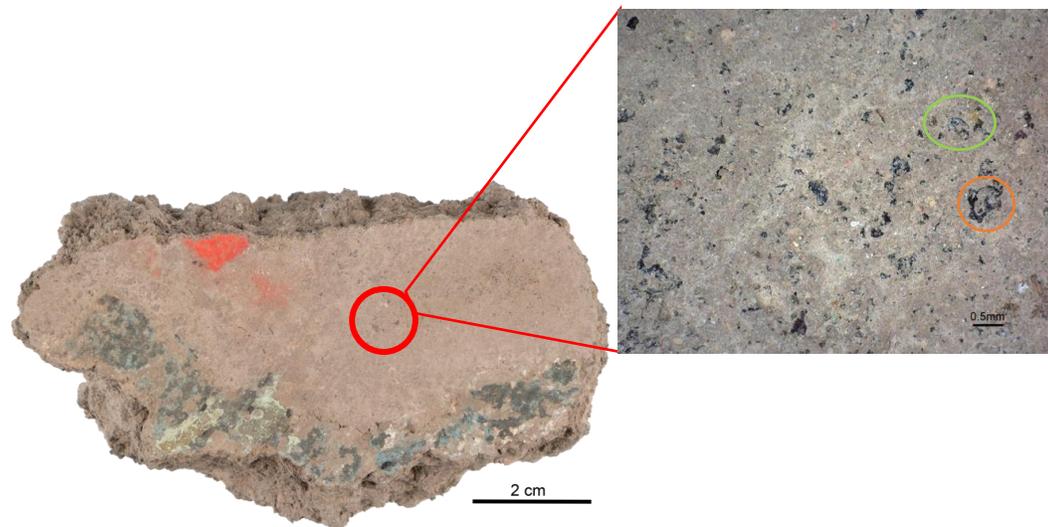


Figura 5-2: Fragmento 36_S_N, temporada de excavación 2016. Se muestra el fragmento con un detalle de microscopio a 50X. Fotografía Lic. Isaac Rangel Chávez.

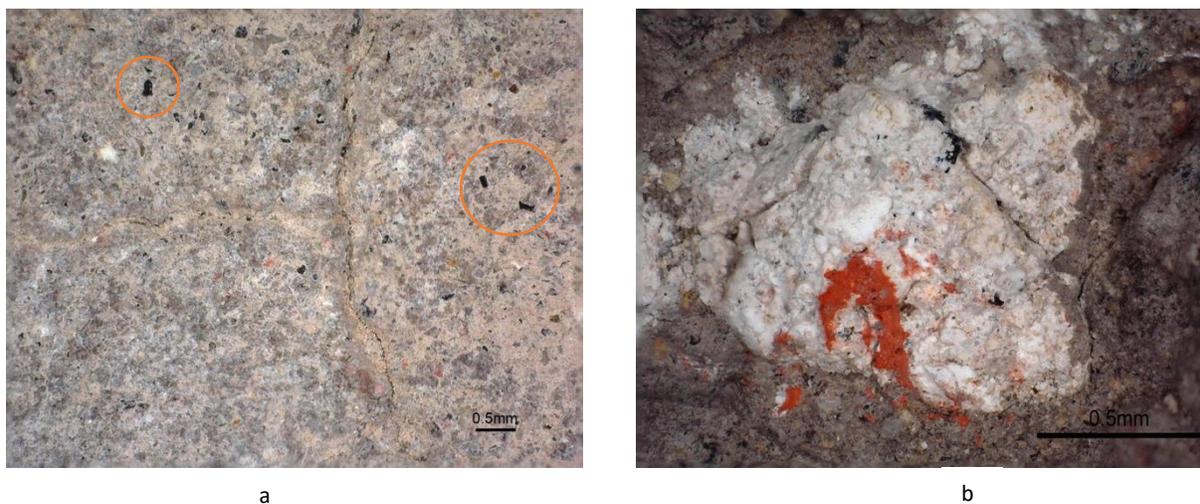


Figura 5-3: Microscopía de dos fragmentos de la temporada de excavación 2018 (a) EL-D387-032 a 50X y (b) EL-D387-032 a 100X. Fotografías Paulina Guzmán

Las argamasas de los fragmentos están compuestas por una mezcla color café con inclusiones negras, *verdosas* o blancas. Incluso algunas de ellas tienen pigmento. Esto último puede ser debido a la reutilización de material para generar los soportes. Las inclusiones negras en los fragmentos miden entre $\sim 0.7 - 0.1 \text{ mm}$ por el lado más ancho. Las inclusiones *verdosas* (enmarcadas en verde en la Figura 5-2) aparentan tener un grado de translucidez, aunque son opacas. Las inclusiones blancas tienen tamaños variables que van de $\sim 0.5 - 1 \text{ mm}$ y se encuentran en la mayoría de los fragmentos. Algunas de ellas presentan pigmento, como la señalada en la Figura 5-3b, sin embargo, se pueden apreciar algunas en el enlucido del fragmento EL-D837-032 que se muestra en la Figura 5-3a.

Resultados XRF:

El análisis de fluorescencia de rayos-X muestra que el comportamiento de las argamasas del frente D tienen un comportamiento homogéneo, mostrando una proporción relativamente constante de Fe/tierras. En este caso se consideraron como elementos de las tierras el Al, Si, K, Mn, Zn, Ti, Sr y Rb. Las argamasas se pueden dividir en dos grandes grupos: aquellas con presencia de Cu y las que no tienen Cu.

En el caso del grupo de argamasas que no tienen cobre, lo más posible es que estén conformadas por una mezcla de tierra y algún cementante. De acuerdo con el estudio de D. Magaloni (Magaloni, 1996), por lo general el material cementante es la cal mientras que los materiales de carga son diversos tipos de arenas feldespáticas, cuársicas o cálcicas. Estas últimas tres representan una gran parte de la composición de la corteza terrestre (Rudnick & Gao, 2003).

Si bien no es posible caracterizar por completo a las argamasas a partir únicamente de los resultados de fluorescencia y el análisis de las microscopías, sí se pueden comparar los resultados con el estudio previo de H. Lozano (2018) en el cual se caracteriza por diversas técnicas (incluidos XRF y microscopía) a las argamasas de un tipo de piso en la plaza de Pirámide del Sol. En el estudio de H. Lozano los materiales analizados son pisos, sin embargo, en el caso de las argamasas, tanto en pisos como en pintura mural, cumplen la función de soportar a un enlucido de cal y por lo tanto es posible hacer la analogía entre ambos estudios. Además, gracias a la cercanía temporal²⁶ y geográfica, el estudio de H. Lozano representa un antecedente importante para los resultados de este trabajo.

H. Lozano indica que la composición de las argamasas (firmes para el caso de los pisos) del *piso negro* tienen una matriz compuesta posiblemente por un suelo volcánico arcilloso (Lozano Bravo, 2018). Son ricos en Ca. Además, tienen una composición de Fe, Sr, K, Ti, Si. También en el análisis microscópico se pueden apreciar los tres tipos de agregados que se encuentran en las argamasas de plaza de las columnas.

Procesando el análisis de fluorescencia con la normalización de los elementos a la suma total de cada fragmento, es posible apreciar el Ca como parte de los elementos constituyentes de las argamasas. En la Figura 5-7, Figura 5-8, Figura 5-9 se puede apreciar este análisis. Inmediatamente destacan algunos de los fragmentos en los cuales la composición

²⁶ El fechamiento para el piso negro reportado por H. Lozano es de [353-456] d.C (Lozano Bravo, 2018)

de calcio aumenta respecto a la media del conjunto. Puesto que el análisis XRF se efectuó tomando mediciones por lo menos en dos puntos diferentes de los fragmentos y después se promediaron los resultados, las posibilidades de analizar una sección rica en Ca para la argamasa que fuera poco representativa son mínimos.

En algunos de los casos los fragmentos que contienen mayor cantidad de calcio en la argamasa son aquellos que también tienen un mayor diseño en la pintura, como se puede apreciar en la Figura 5-10(d,e,f). Puede ser que en estos casos se buscara emplear una mayor proporción de material cementante o bien, que hubiera una mayor cantidad de agregados ricos en cal que le dieran mayor rigidez a la argamasa. El único caso en el cual la gran cantidad de calcio es debido a una combinación con el enlucido es en el fragmento 27_D16-0983-A (Figura 5-10b), ya que, por su tamaño, la argamasa que presenta es únicamente la que se encuentra adherida al enlucido.

Se nota también que la proporción Ca/Fe se mantiene relativamente constante para todos los fragmentos, salvo los fragmentos discutidos en el párrafo anterior. Esto nos puede indicar una manera de producción de las argamasas similar para el mural. Puesto que se propone que las argamasas son de tierras usando como material cementante el carbonato de calcio, tendría lógica pensar que la mezcla debe de tener mayor cantidad de tierras que de carbonatos de calcio. Además, las proporciones entre el Fe y los demás agregados también son constantes, haciendo una analogía con el pensamiento anterior, puede ser que esto se deba a una proporción constante de agregados en las argamasas.

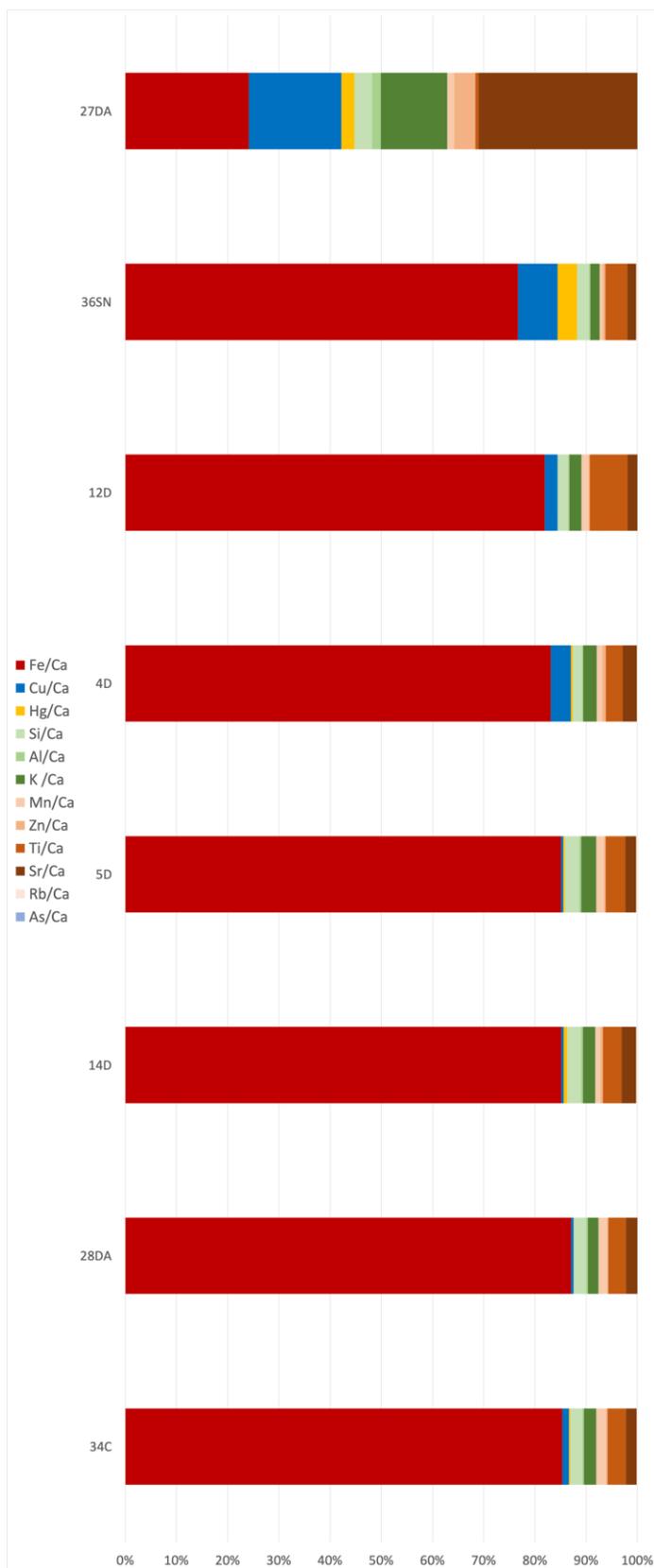


Figura 5-4: Resultados XRF para las argamasas de la temporada 2016, normalizado al Ca

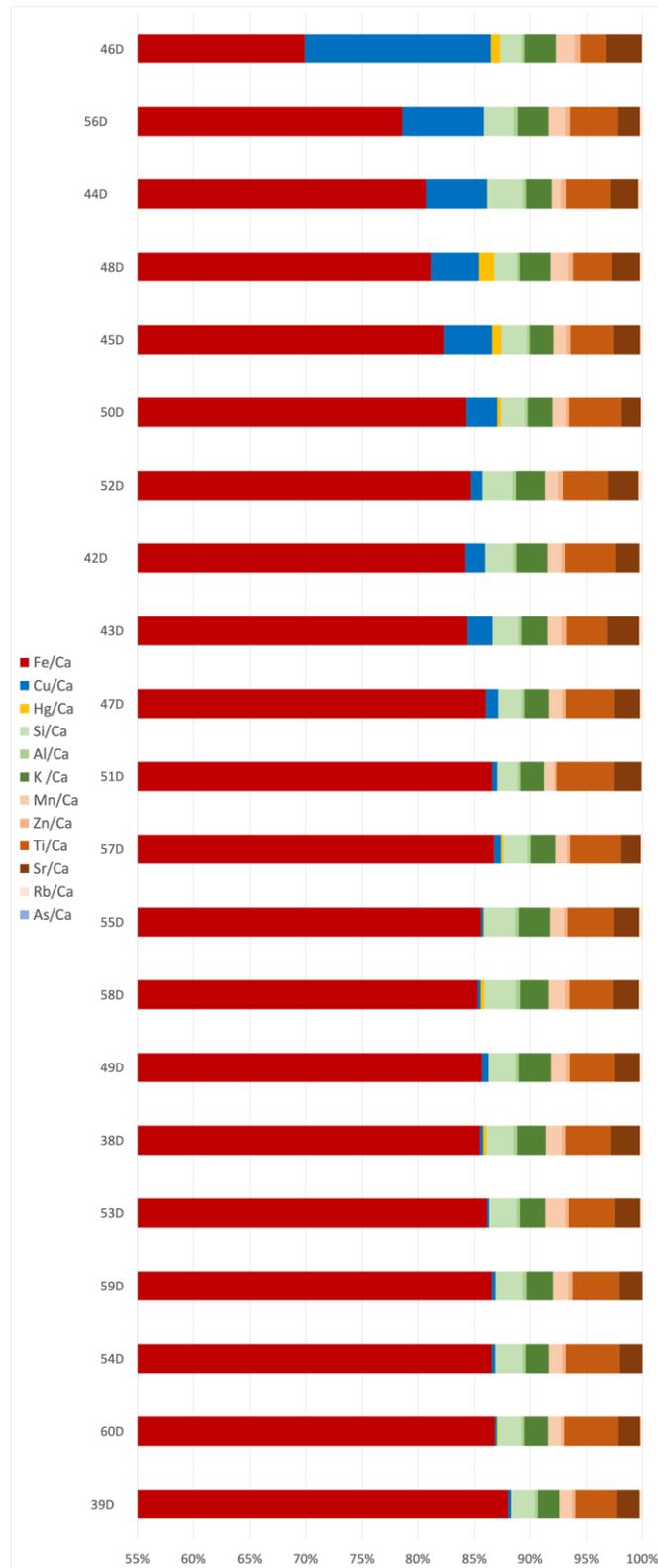


Figura 5-5: Resultados XRF para las argamasas de la temporada 2017, normalizado al Ca

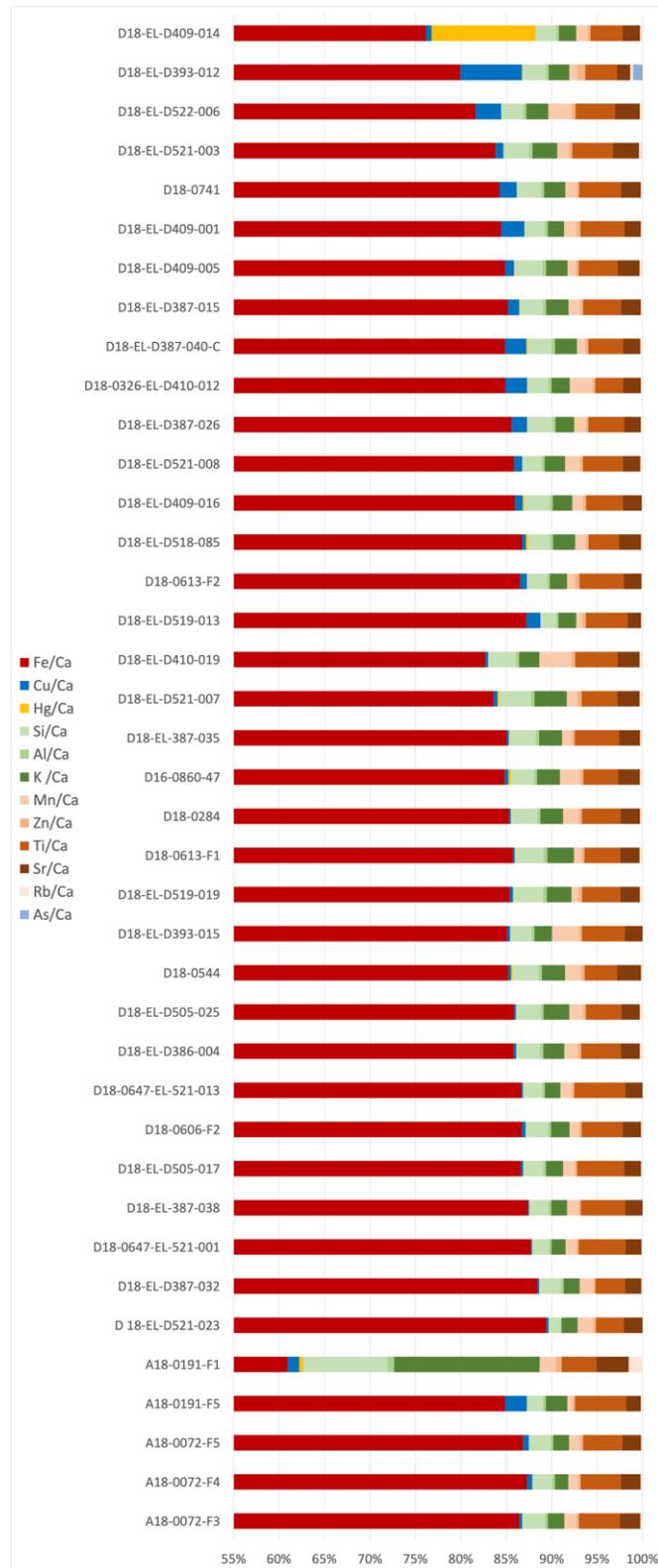


Figura 5-6: Resultados XRF para las argamasas de la temporada 2018, normalizado al Ca

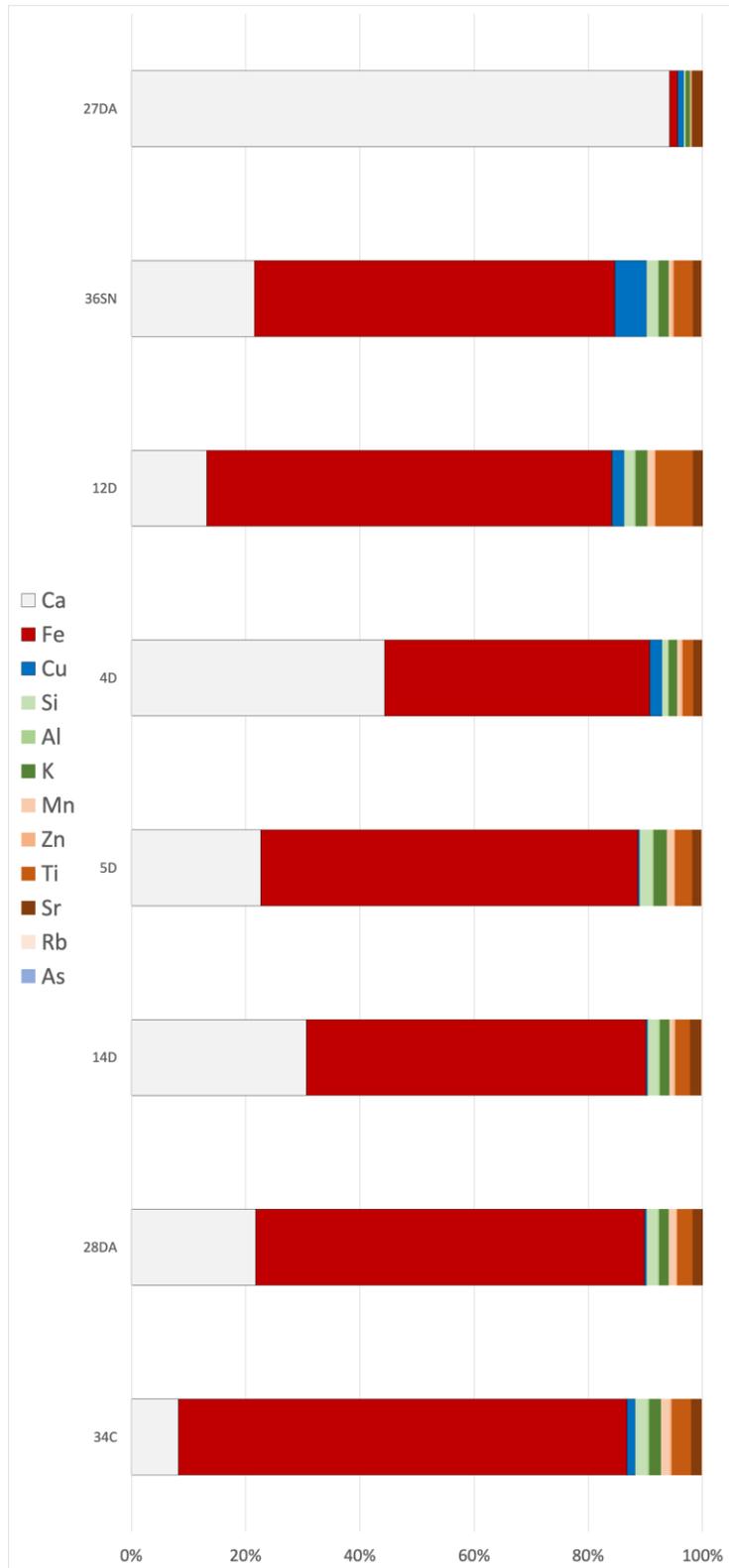


Figura 5-7: Resultados XRF para las argamasas de la temporada 2016, normalizado al total

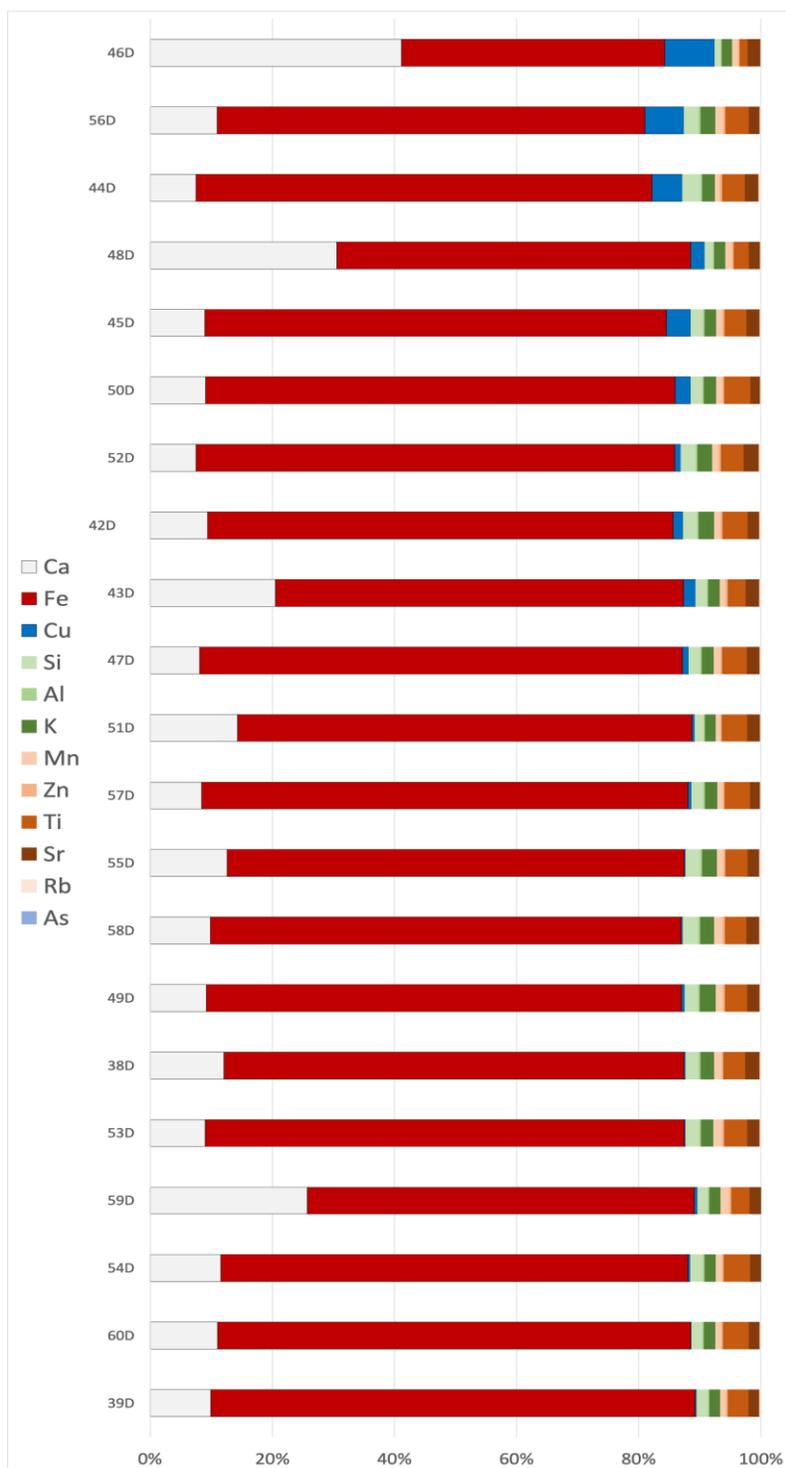


Figura 5-8: Resultados XRF para las argamasas de la temporada 2017, normalizado al total

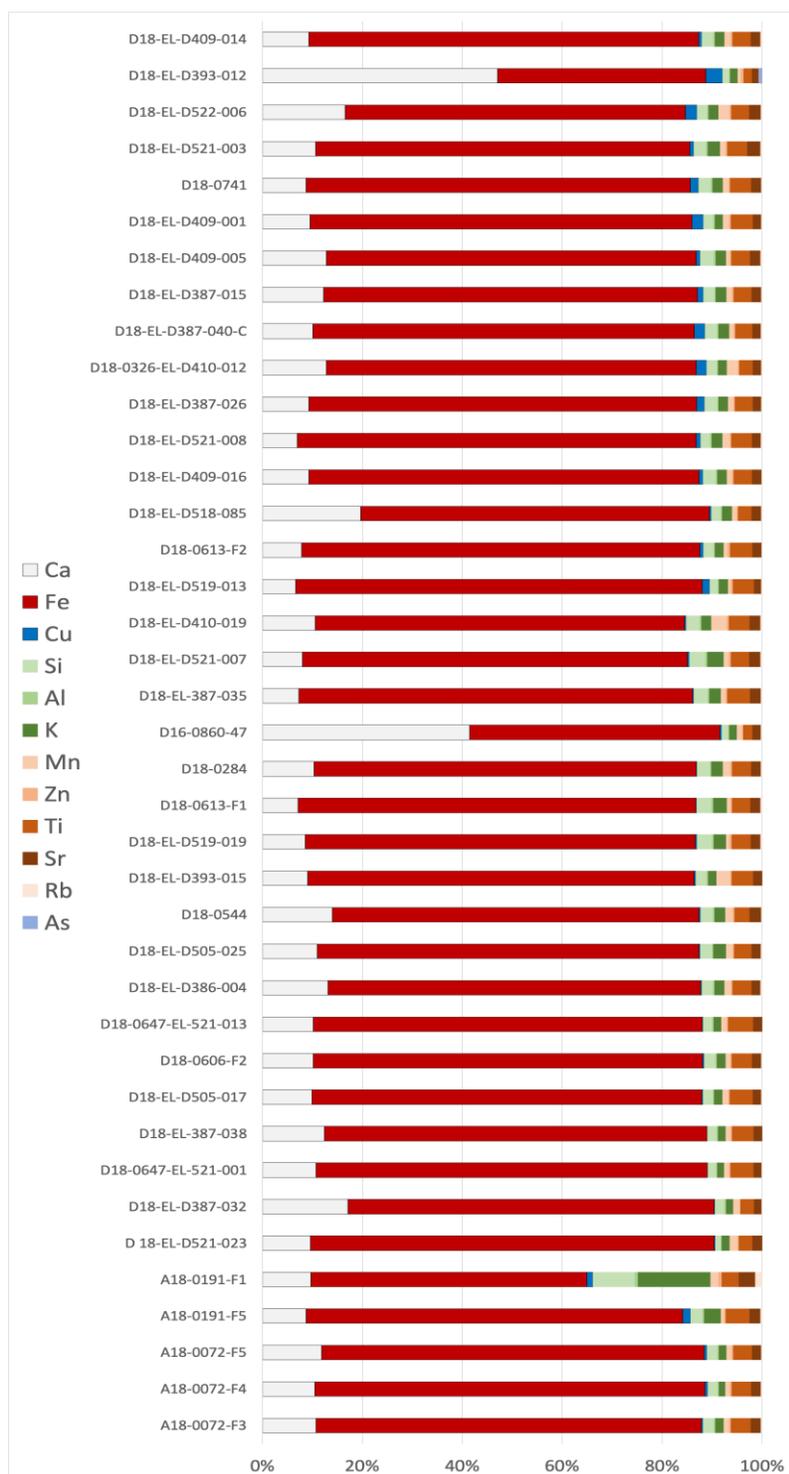


Figura 5-9: Resultados XRF para las argamasas de la temporada 2018, normalizado al total

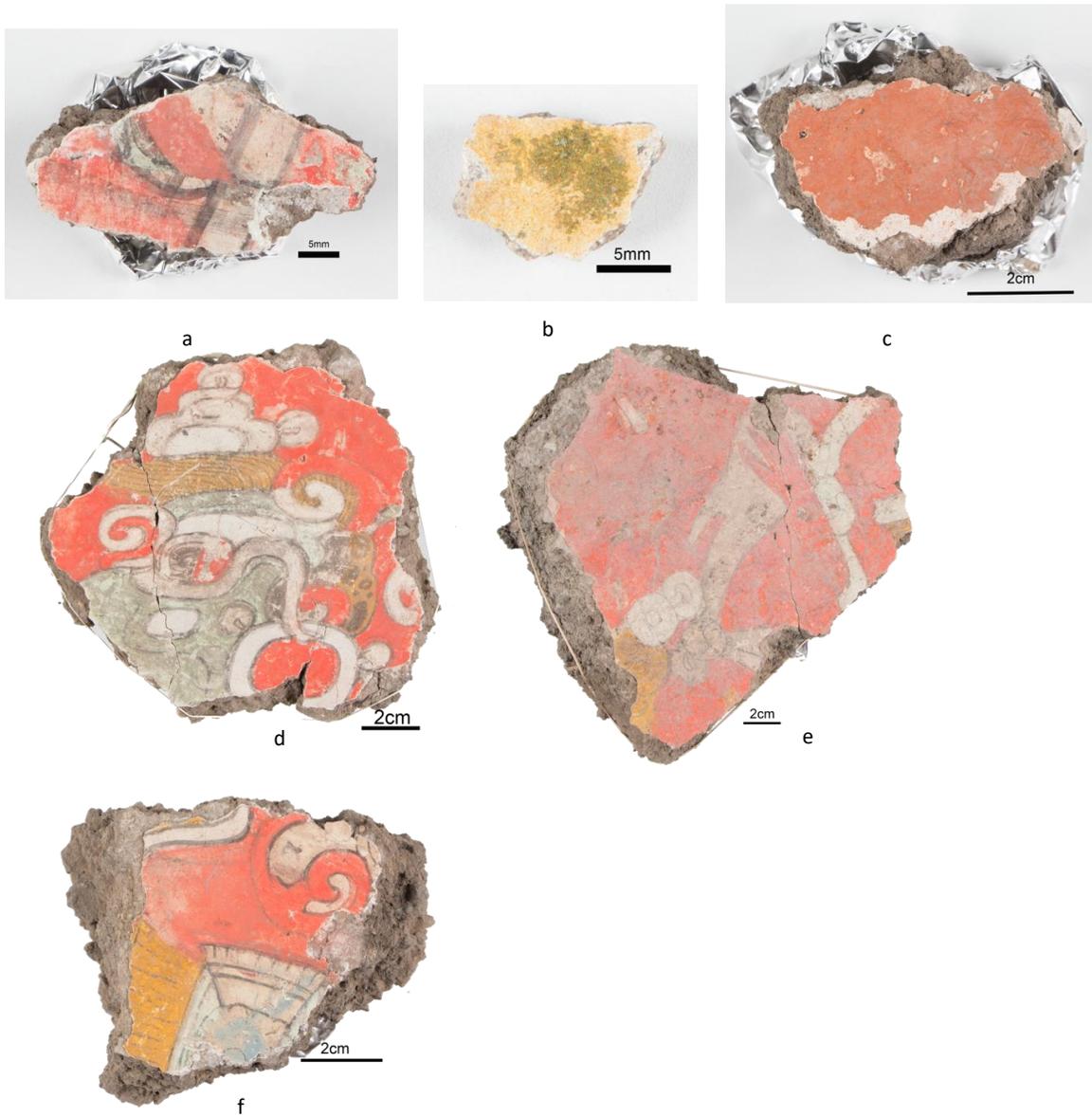


Figura 5-10: Fragmentos con argamasas ricas en Ca. Temporada 2016: (a) 4_D16-0983, (b) 27_D16-0983-A. Temporada 2017 (c) 43_D17-1019, (d) 48_D17-0699-EL-216-006, (e) 59_D17-0383-EL-152-012, (f) 46_D17-0685-EL-209-003. Fotografías Lic. Isaac Rangel Chávez.

Resultados FORS:

Debido a la rugosidad de las argamasas, la única que fue posible analizar con FORS fue el fragmento 36_S_N (Figura 5-2). Se caracterizó la superficie de el fragmento que no tuviera pigmento para evitar información no relevante a la argamasa. El estudio de las argamasas con FORS se centró únicamente en la región de 1000 – 2500 nm ya que esta es la sección de IRC. En el infrarrojo cercano se pueden observar los sobre tonos vibracionales (Maynez Rojas, 2017).

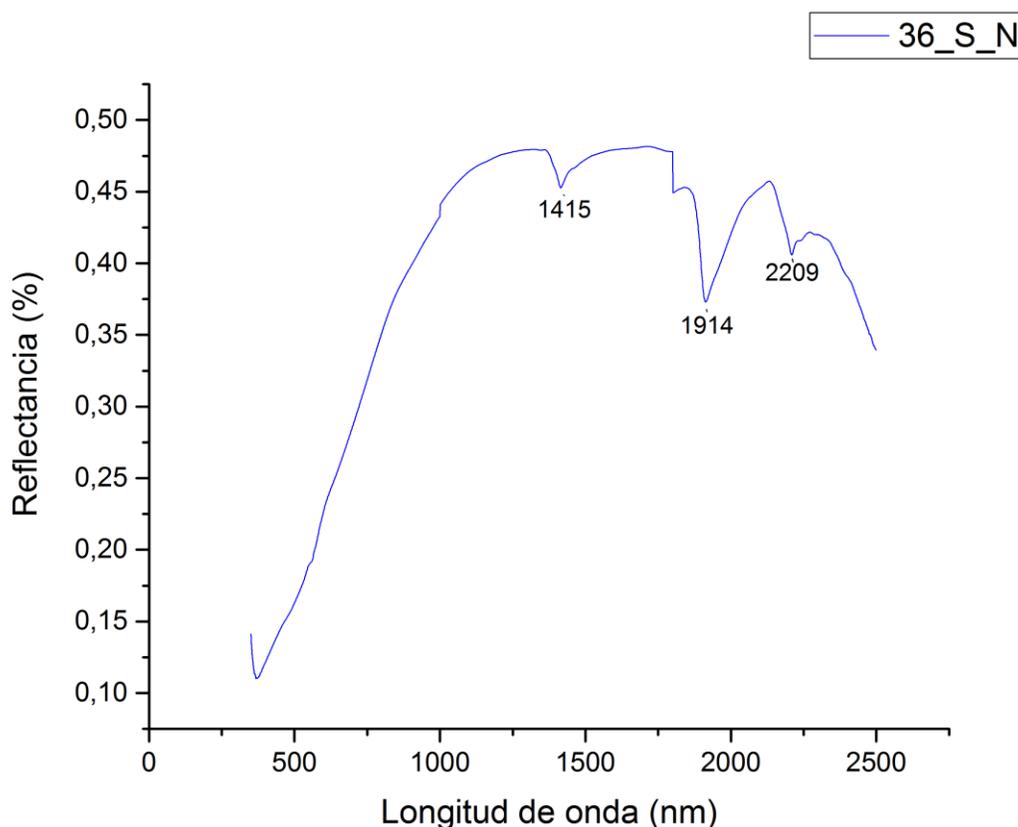


Figura 5-11: Espectro FORS-IRC de la argamasa en el fragmento 36_S_N

En la Figura 5-11 se puede apreciar el espectro de reflectancia del fragmento 36_S_N. Este muestra bandas en 1415 nm, 1914 nm y 2209 nm. Las primeras dos bandas (1415 nm, 1914 nm) están relacionadas con los sobre tonos vibracionales de la molécula de agua

(Socrates, 2007). En el estudio sobre espectroscopía de reflectancia aplicado a suelos (Bowers & Hanks, 1965) en el cual se estudian suelos arcillosos que presentan las mismas bandas que el espectro de la argamasa. En otros trabajos como los de Chang, C.W. et.al (2001) y Viscarra Rossel, R.A. et.al (2006), por mencionar algunos, se reportan las bandas de 1400 nm , 1900 nm y 2200 nm como bandas características de las tierras arcillosas. Esto no implica que las argamasas de plaza de las columnas estén compuestas de suelos arcillosos, pero sí ayuda a corroborar la hipótesis de que las argamasas están compuestas de tierra, posiblemente rica en arcillas, junto con cal como material cementante y algunos agregados que pueden ser parte de los suelos, así como material de reúso.

5.1.2 Enlucidos

Los enlucidos de los fragmentos de Plaza de las Columnas son capas finas de entre $\sim 100\ \mu\text{m} - 2.5\ \text{mm}$. En la mayoría de los casos estos se encuentran como soporte de la capa pictórica. Sin embargo, existen algunos fragmentos en los que la capa pictórica se ha deteriorado al grado de desaparecer casi por completo, dejando al enlucido libre. Los enlucidos son todos blancos, algunos más *limpios* que otros, pero esto se puede atribuir a una capa pictórica deteriorada o bien polvo del contexto arqueológico.

Es importante destacar que la distinción entre *enlucido* y color blanco fue hecha a partir de la función que cumple en el fragmento. Es decir que, si la zona blanca de interés se encuentra claramente por debajo de una capa de color, muestra señales de una capa de color deteriorada que se encuentra por encima, o es analizada por una sección lateral, la zona blanca es determinada enlucido. Por el otro lado, serán considerados *colores blancos* todas aquellas zonas blancas en superficie que cumplan una función estética en los fragmentos. Por ejemplo, todas aquellas zonas blancas delimitadas por líneas negras o en la vecindad de otros colores, son consideradas como *color blanco*.

Los enlucidos que se encuentran en superficie aparecen de dos formas: deteriorados o en capas subyacentes a alguna capa de pigmento desgastado. Los primeros se pueden

distinguir por la rugosidad en superficie y gracias a ellos es posible observar la gran cantidad de cargas presentes. En los enlucidos que se encuentran debajo de una capa de pigmento se pueden apreciar cargas, así como el trabajo para alisar la superficie y así obtener un acabado menos rugoso. Este tipo de evidencias se pueden apreciar en la Figura 5-13.

Como se puede observar en la Figura 5-12, existen varios agregados a la mezcla del enlucido. Entre ellos destacan tres tipos: (a) fragmentos de tono gris claro con apariencia traslúcida y que forman una especie de curvatura; (b) los fragmentos blanquecinos brillantes, opacos y que tienen formas irregulares; (c) fragmentos negros de estructura irregular y apariencia plana. Se han encontrado similitudes entre los agregados mencionados y algunos agregados reportados para pisos y enlucidos en Teotihuacan.

Los fragmentos del grupo (a) aparentan ser una especie de vidrio volcánico similares en forma a los que reportan D. Barca y H. Lozano (Barca et al., 2013; Lozano Bravo, 2018). Además, es importante destacar que este tipo de agregados son reportados por H. Lozano a partir de la etapa Tlamimilolpa (Lozano Bravo, 2018), aunque estos datos se encuentran únicamente reportados en dicho trabajo para la plaza de Pirámide del Sol. Lo anterior no contradice la existencia de los agregados en los enlucidos de Plaza de las Columnas ya que es consistente cronológicamente. Magaloni reporta este mismo tipo de agregados para la fase técnica II, que corresponde al periodo Tlamimilolpa (Magaloni, 1996), lo cual apoya la teoría del uso de vidrio volcánico en los fragmentos de Plaza de las Columnas.

El segundo grupo de agregados, los fragmentos blanquecinos (b), parecen similares a los cuarzos empleados como cargas en los pisos de Teopancazco (Barca et al., 2013), así como los fragmentos que identifica D. Magaloni en la segunda y tercera fase técnica (Magaloni, 1996). Por último, los fragmentos negros de estructura irregular, son identificados como posibles micas, de la misma forma que los fragmentos de piso blanco en el trabajo de H. Lozano (Lozano Bravo, 2018).

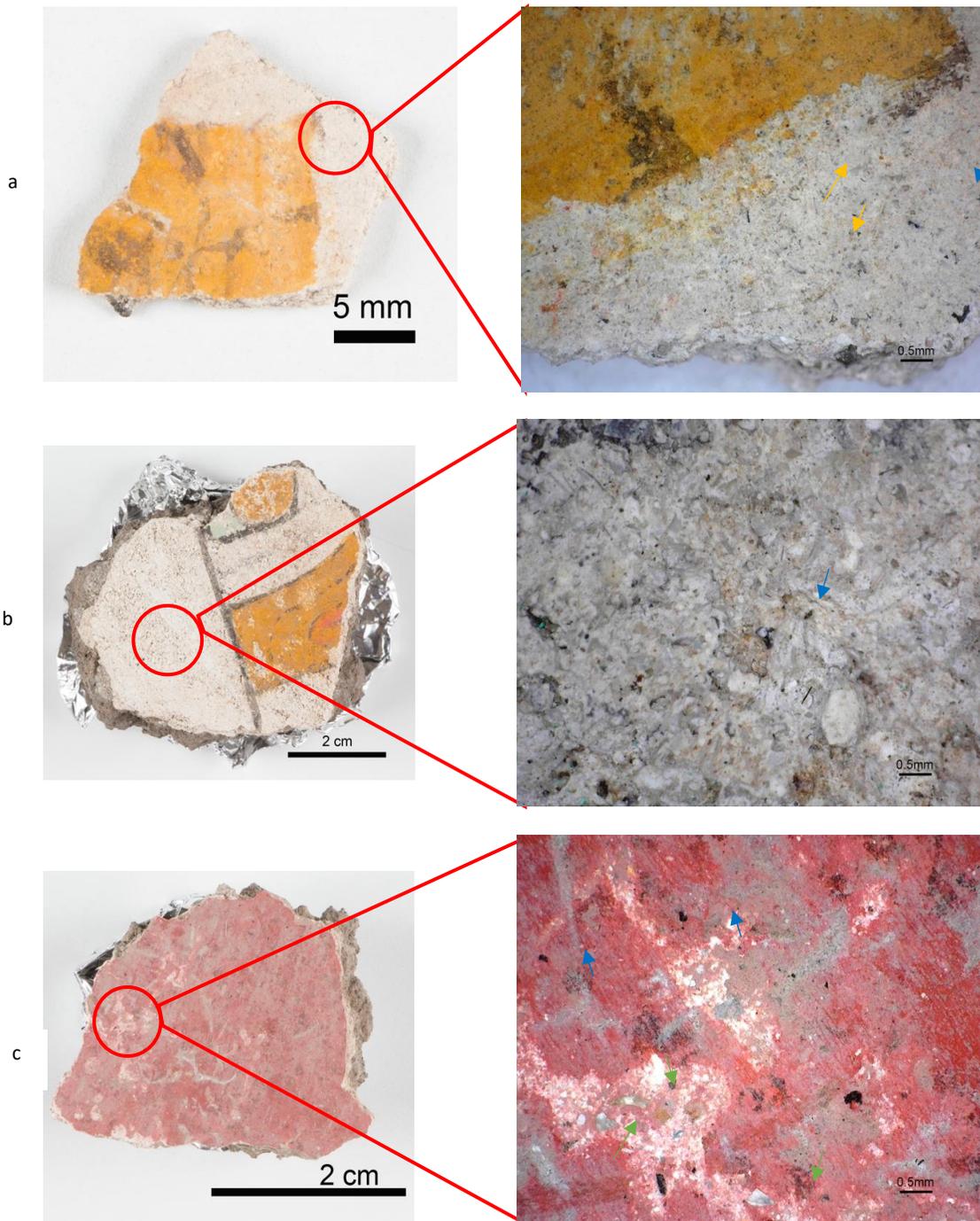


Figura 5-12: Imágenes de microscopio óptico a 50X para enlucidos en superficie. Se muestran los fragmentos (a) 26_D16-0860-A, (b) 54_D17-0951-EL-249-025 y (c) 15_D16-0242. Fotografías tamaño real: Lic Isaac Rangel

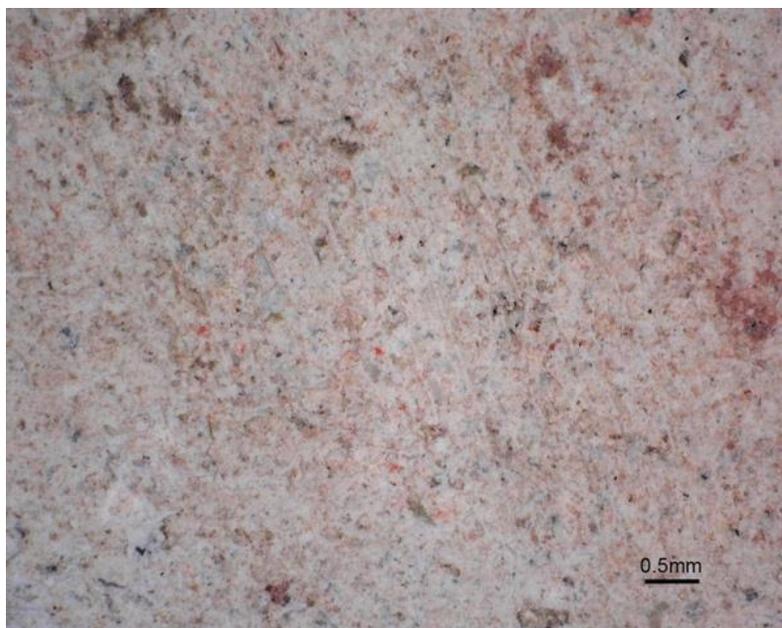


Figura 5-13: Evidencia de estrías producto del alisado de superficie. Fotografía Proyecto Complejo Plaza de las Columnas. Microscopía Paulina Guzmán

Los enlucidos analizados de forma lateral presentan información importante sobre la técnica de manufactura. Se puede observar como los enlucidos, además de los agregados observados en superficie, también presentan posible evidencia de material orgánico quemado. Esto ha sido reportado varias veces para los enlucidos Teotihuacanos (Lozano Bravo, 2018; Pecci et al., 2018). Estos residuos se caracterizan por ser de color negro y tener una estructura alargada con estrías que corren por la sección más larga. Como se puede apreciar en la Figura 5-15.

Por último, resulta interesante destacar la superposición de un enlucido en otro para repintar una sección. Esto se aprecia claramente en la Figura 5-14 en donde se observan dos enlucidos, el primero con pigmento verde y el segundo con una combinación de amarillo y verde (ya en superficie). El primer enlucido (aquel más cercano a la argamasa) tiene un grosor de aproximadamente $\sim 0.1 \text{ mm}$ mientras que la segunda capa de enlucido es de $\sim 0.5 \text{ mm}$. Este tipo de evidencias aportan información valiosa para la reconstrucción del mural, ya que una segunda capa de enlucido es un buen indicio para poder diferenciar secciones de un mural o bien ¿murales?



a

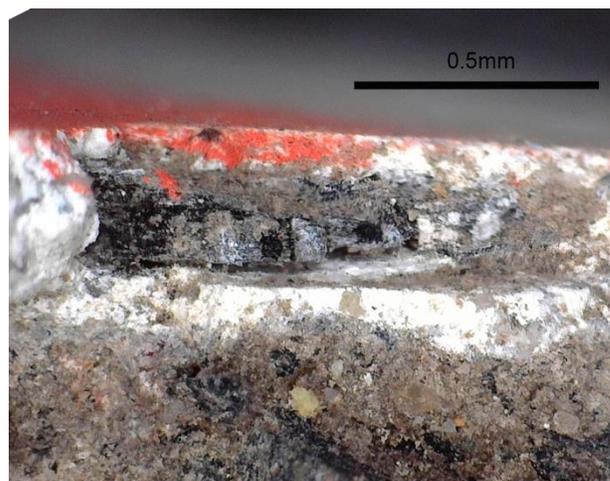


b

Figura 5-14: Evidencia de superposición de enlucidos en el fragmento D18-0613-02 en dos secciones distintas (a) y (b). Microscopía a 100X. Microscopía Paulina Guzmán



a



b

Figura 5-15: microscopías de la cara lateral de los fragmentos (a) 21_D16-0860-A (50X) y (b) EL-D387-036 (100X). Microscopía Paulina Guzmán

Resultados XRF:

De la misma manera que para las argamasas, la composición elemental en los enlucidos fue analizada primero con la normalización al calcio (Figura 5-16, Figura 5-17, Figura 5-18), ya que este era el elemento principal y constante a todos los fragmentos. Posteriormente se analizaron todos los elementos respecto a la suma del total para poder incluir al calcio en la ponderación (Figura 5-19, Figura 5-20, Figura 5-21).

De acuerdo con la literatura, los enlucidos empleados en Teotihuacan están compuestos principalmente por carbonatos de calcio (Barba et al., 2009; L. A. Barba Pingarrón & Córdova Frunz, 2010; Lozano Bravo, 2018; Magaloni, 1996; Murakami, 2016). De manera consistente con lo anterior, es natural que el elemento principal encontrado en los estucos de Plaza de las Columnas sea el Ca.

Aunque el calcio es el elemento más abundante en los enlucidos, en la Figura 5-16, la Figura 5-17, y la Figura 5-18, se puede apreciar que hay una gran contribución de hierro, cobre, mercurio y estroncio. El primero puede estar asociado a las tierras que son comúnmente utilizadas como agregados en la manufactura de los enlucidos. Además, el contenido de hierro para los diferentes grupos, mantiene una proporción con el contenido en Al, Si, K, Mn, Zn y Ti, lo cual posiblemente indicaría la utilización de tierras y aluminosilicatos como agregados. Esto es de esperarse, ya que en la literatura se han reportado (Barba et al., 2009; Barca et al., 2013; Magaloni et al., 1992).

La presencia de cobre en los enlucidos pareciera no estar relacionada al color. Sin embargo, después de un análisis de microscopía únicamente los fragmentos 17_D16-0680-B, 11_D16-0983, 29_D16-0860-A, 26_D16-0860-A, 34_C16-0698, D18-0647-EL-521-013, EL-D522-008 y EL-D521-020 no muestran rastros de pigmento verde o azul, anulando la posible explicación de la presencia del cobre producto de dichos pigmentos. Todos los demás fragmentos que presentan cantidades considerables de cobre, tienen pigmentos verdes o

azules, lo cual podría explicar la presencia de este elemento en los enlucidos.

El caso del mercurio se debe a la presencia de pigmentos rojos de mercurio, discutidos a detalle en la sección 5.2.4. Por otro lado, la alta presencia de estroncio es posiblemente debido la sustitución de Sr por Ca como es común para el aragonito y la estroncianita, ya que ambos son miembros del grupo del aragonito, que a su vez es polimorfo de la calcita (“Mindat.org - Mines, Minerals and More,” 2019).

Cuando se analizan los mismos fragmentos, pero incluyendo al Ca, se puede notar que únicamente un par de fragmentos contienen alto contenido en cobre (indicados con flechas verdes en la Figura 5-19 y la Figura 5-20). Ambos dos fragmentos tienen pigmento verde en la zona del enlucido. Además, destacan tres fragmentos con alto contenido en hierro (indicados con flechas rojas en la Figura 5-19 y la Figura 5-21), por encima del 30%, estos fragmentos todos tenían una capa de enlucido expuesto en superficie, pero muy desgastada, entonces posiblemente esta contribución de hierro se deba a una alta contribución de la argamasa.

Los demás enlucidos de Plaza de las Columnas tienen un alto contenido en calcio y por lo general permanece homogéneo en todos los fragmentos. Además, salvo los casos ya mencionados anteriormente, las proporciones Fe/Ca se mantienen siempre entre el 5-20%, como se puede apreciar en la Figura 5-19, Figura 5-20 y Figura 5-21. De manera análoga a la discusión hecha en la sección 5.1.1, este tipo de indicadores pueden presentarse debido a una técnica común en la creación de los enlucidos ya que se utilizan los materiales en proporciones similares.

Las variaciones en la cantidad de Fe pueden deberse también al grosor de la capa de enlucido, ya que como podemos observar en la Figura 3a el Fe puede penetrar hasta 0.2 mm en una matriz de $CaCO_3$.

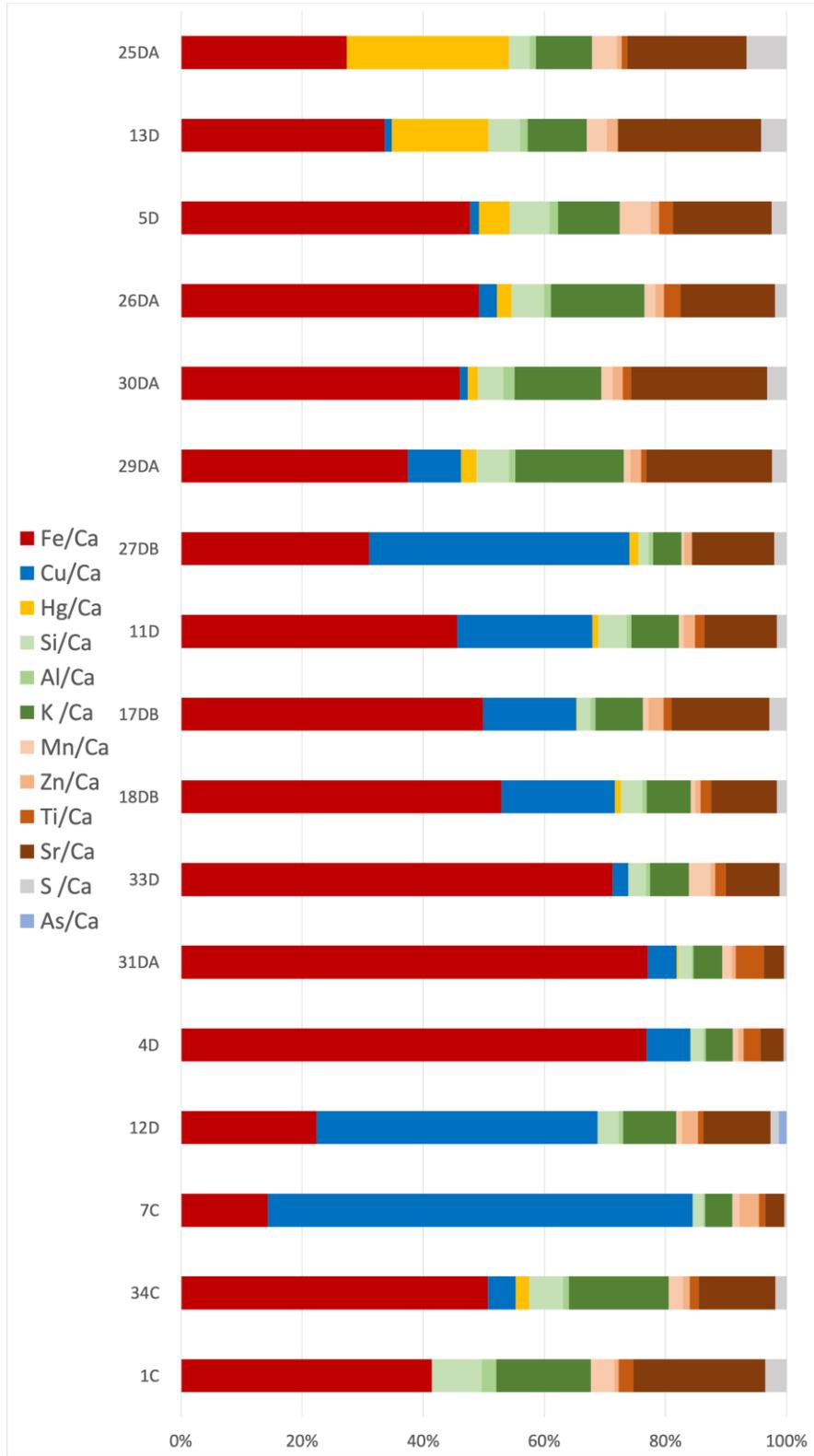


Figura 5-16: Resultados XRF para los enlucidos de la temporada 2016, normalizados al Ca

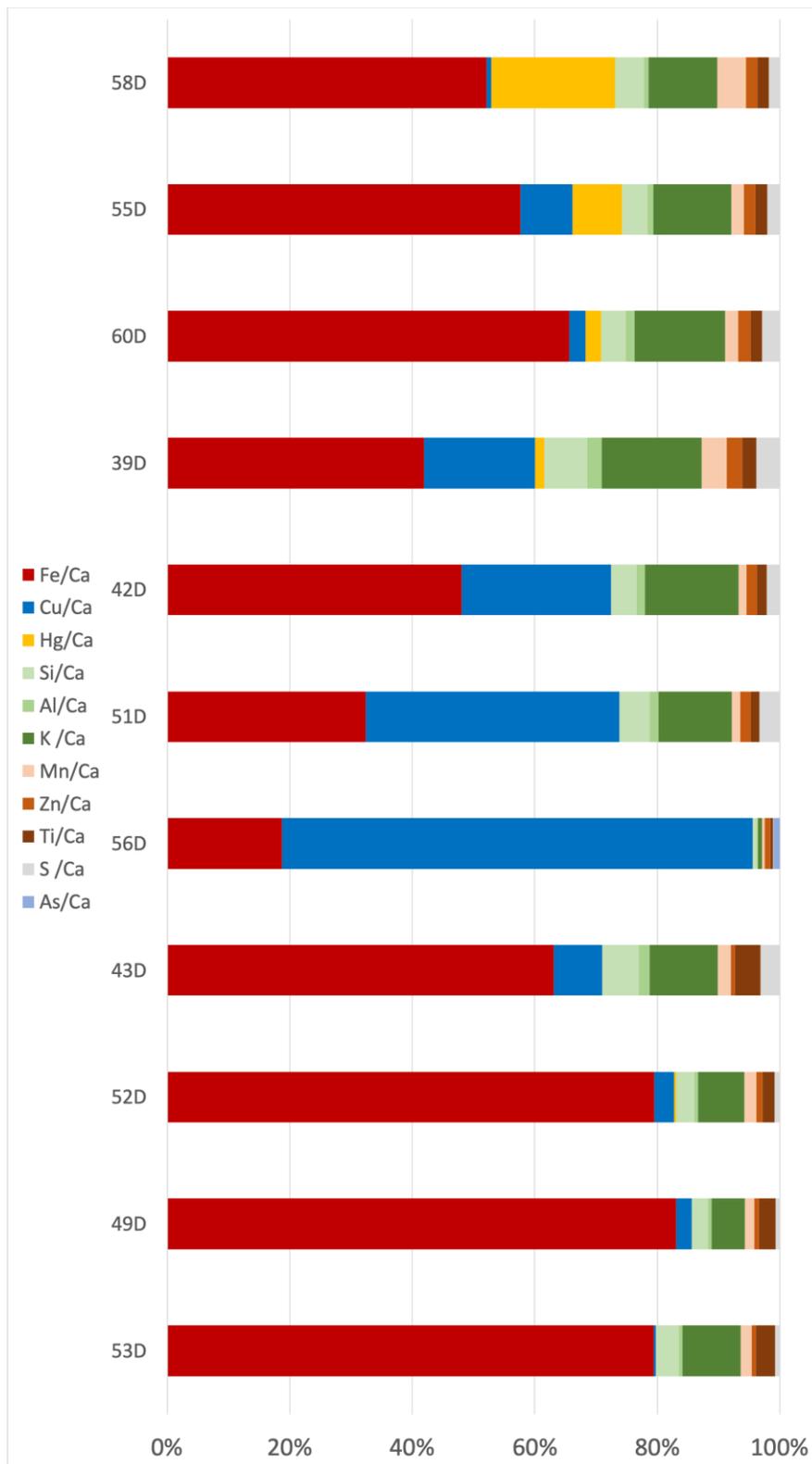


Figura 5-17: Resultados XRF para los enlucidos de la temporada 2017, normalizados al Ca

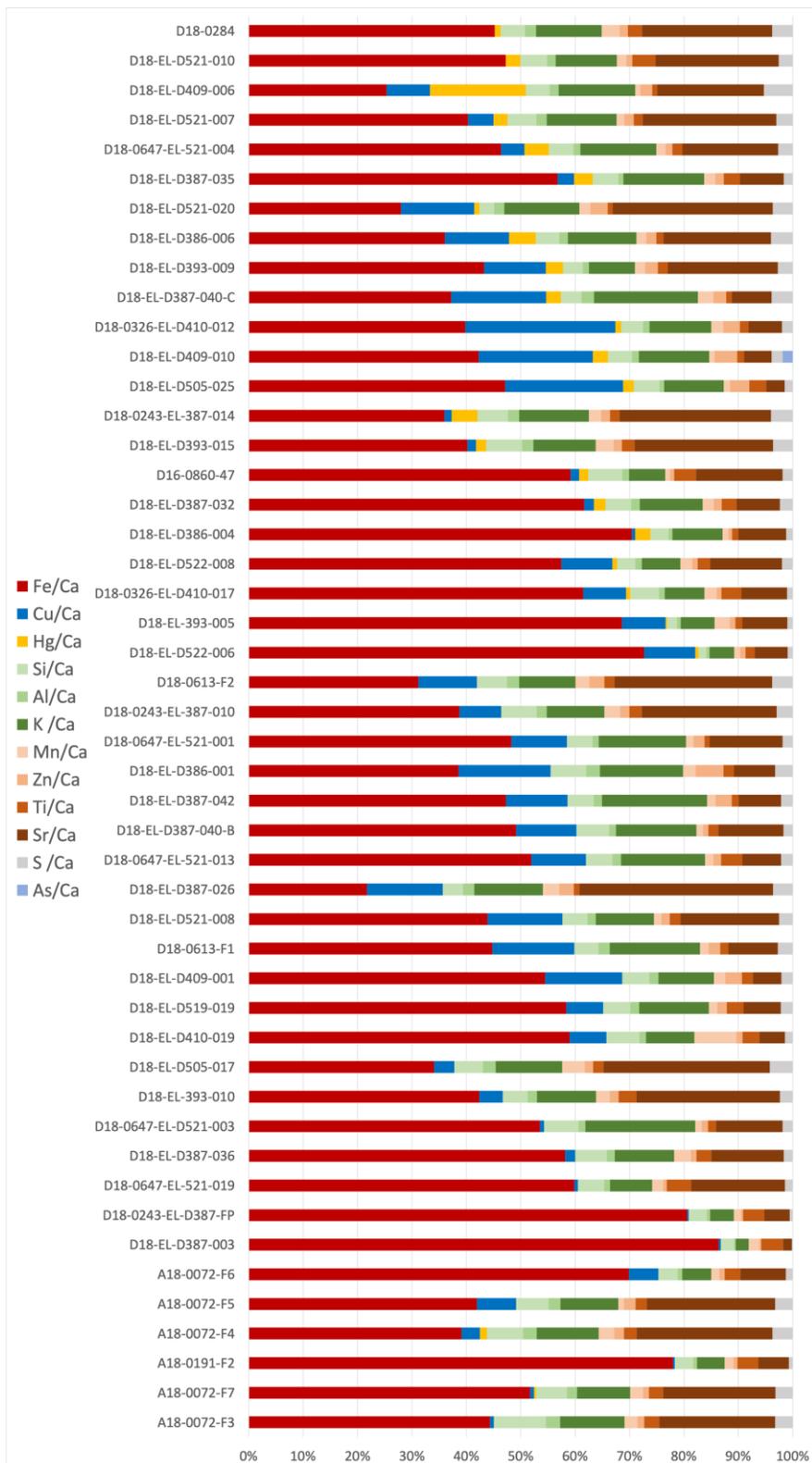


Figura 5-18: Resultados XRF para los enlucidos de la temporada 2018, normalizados al Ca

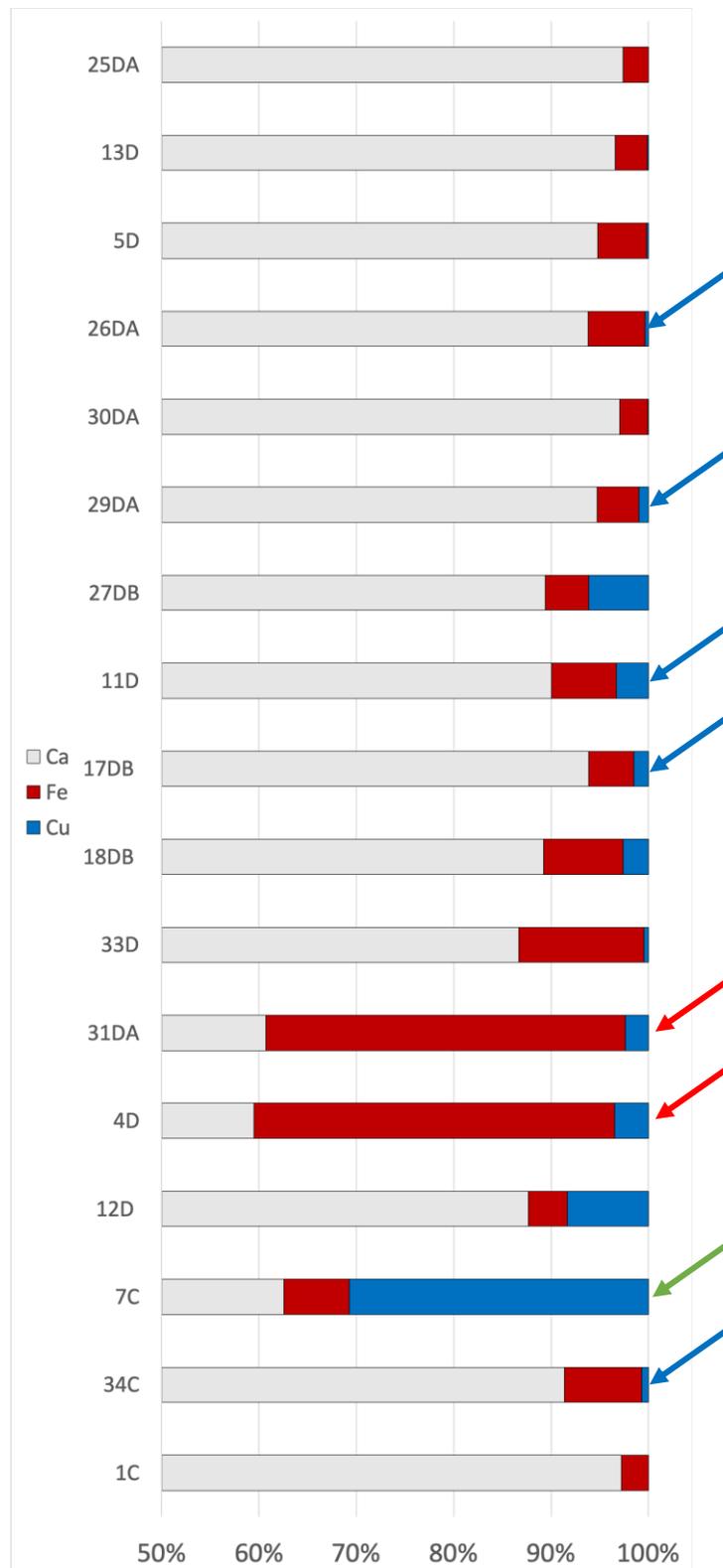


Figura 5-19: Resultados XRF para los enlucidos de la temporada 2016, normalizados al total

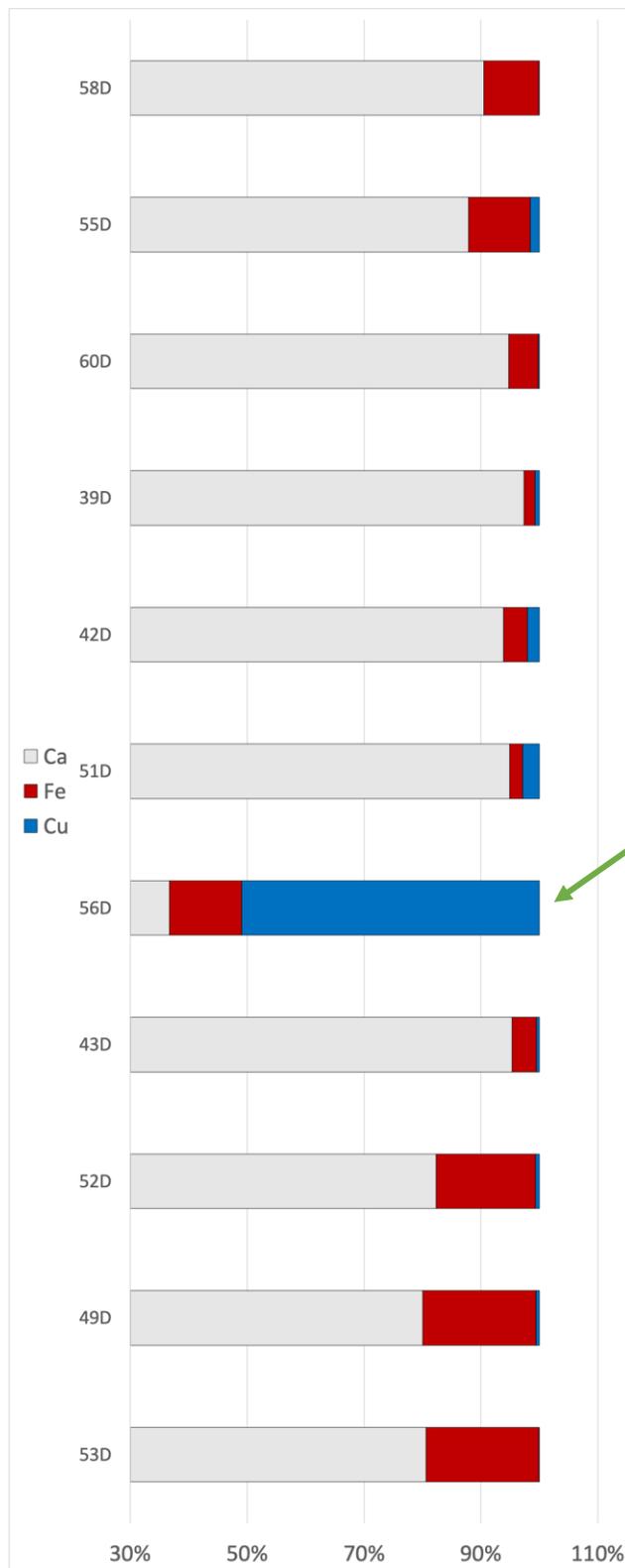


Figura 5-20: Resultados XRF para los enlucidos de la temporada 2017, normalizados al total

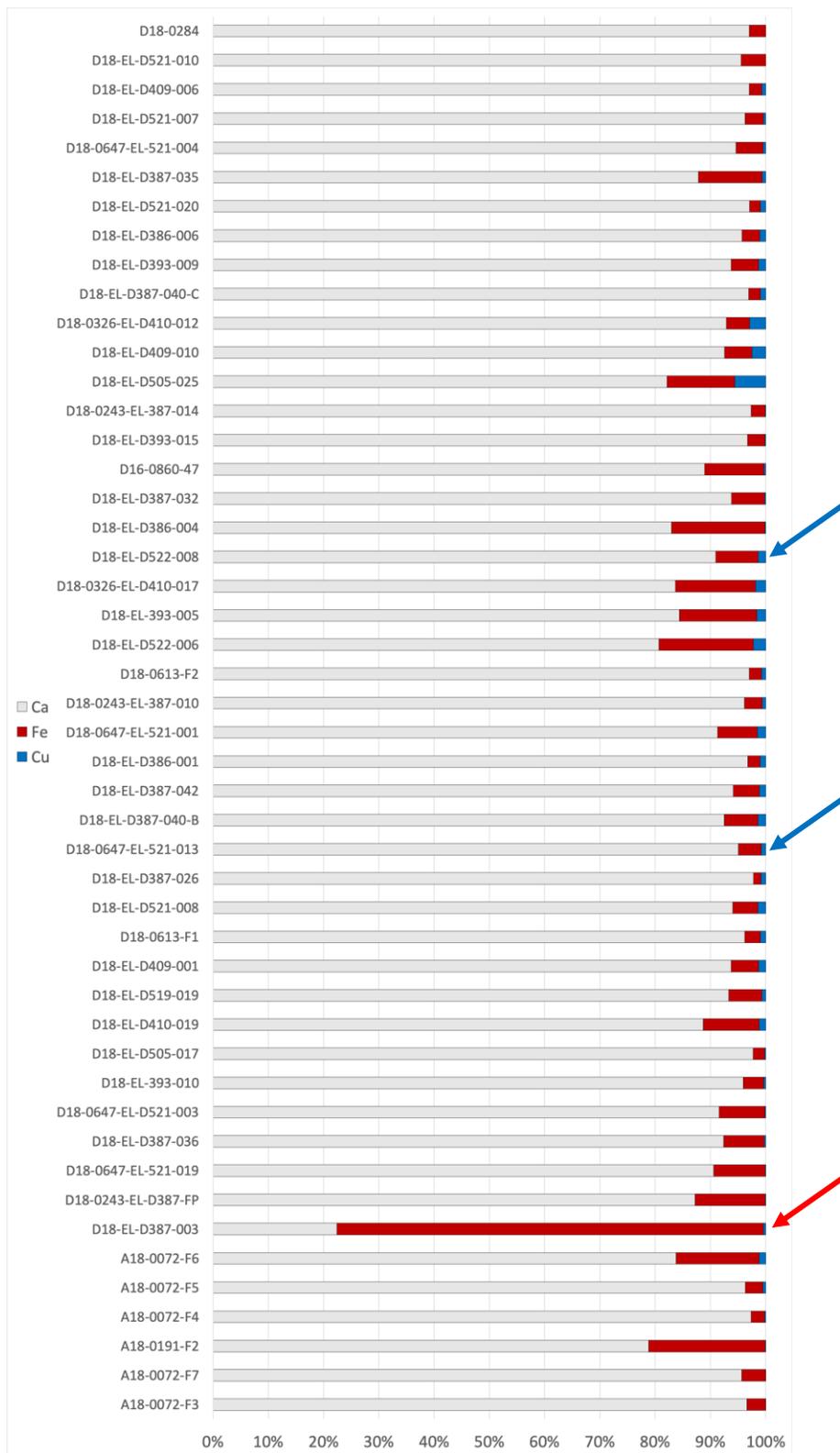


Figura 5-21: Resultados XRF para los enlucidos de la temporada 2018, normalizados al total

Resultados SEM:

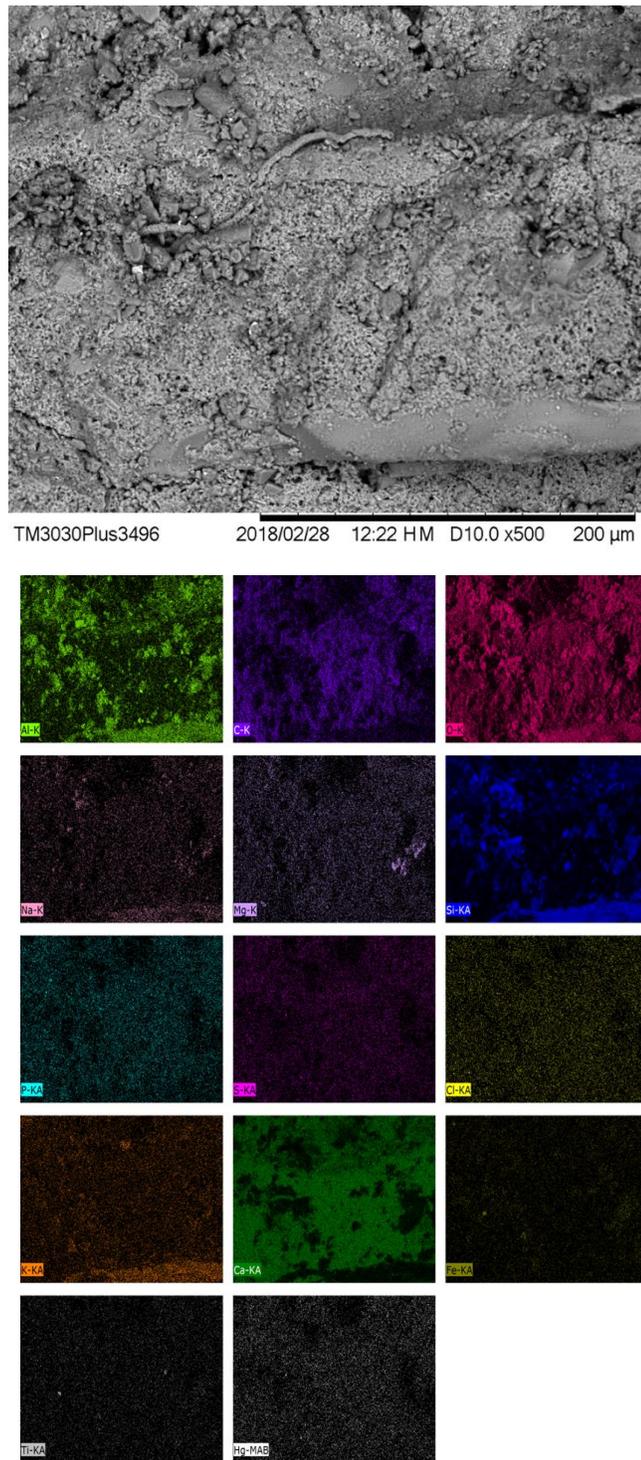


Figura 5-22: Enlucido analizado con SEM-EDS en el que se muestra la matriz del enlucido. Fotografías SEM: M. en C. Jaqueline Cañetas

En la Figura 5-22 se logra apreciar que en el enlucido analizado la región de análisis tiene distribuidos de manera homogénea al Ca, O, C y en menor medida al P, Cl, Na, Fe, Ti, Mg y Hg. También se puede observar que el Si, Al y K están distribuidos en las mismas regiones, que además coinciden con ser regiones donde no hay Ca. El análisis puntual a una de estas regiones, aparentemente agregados, muestra que su composición es, en efecto, principalmente de Si, Al y K (Figura 5-23). De la misma manera en la Figura 5-24 se puede observar como estas inclusiones están compuestas por aluminosilicatos. Lo anterior no resulta extraño ya que se ha reportado el uso de cuarzos y feldespatos como agregados en las mezclas de enlucido para la región de Teotihuacan (L. A. Barba Pingarrón & Córdova Frunz, 2010; Lozano Bravo, 2018; Pecci et al., 2018). Por el contenido en K y Na, podría ser que estos agregados se trataran de feldespatos potásicos y sódicos, aunque es necesario corroborar esta hipótesis mediante difracción de rayos-X.

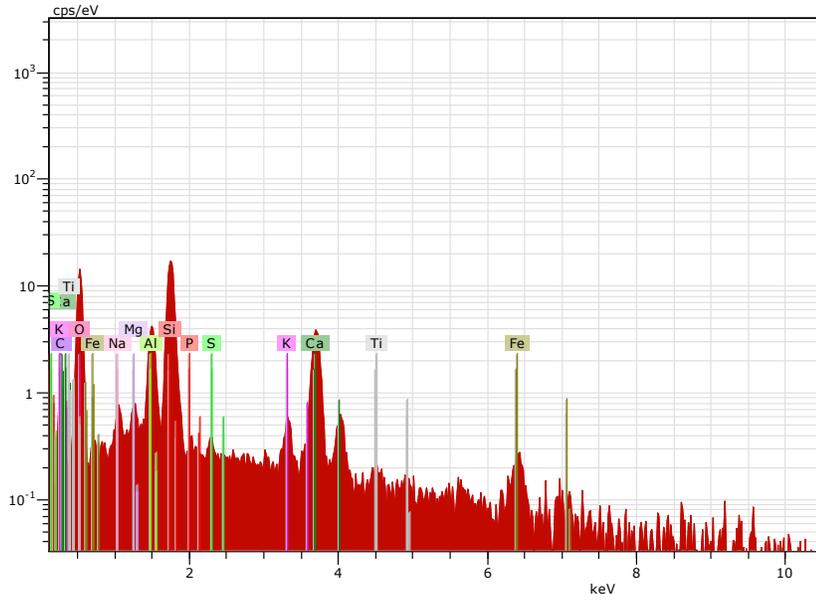
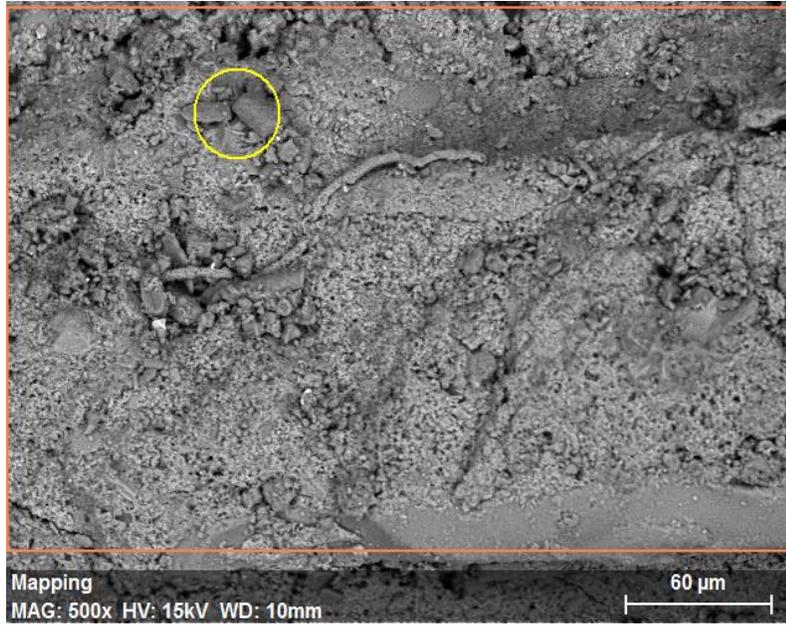


Figura 5-23: Análisis puntual de una inclusión en el enlucido. Imagen SEM: M. en C. Jaqueline Cañetas

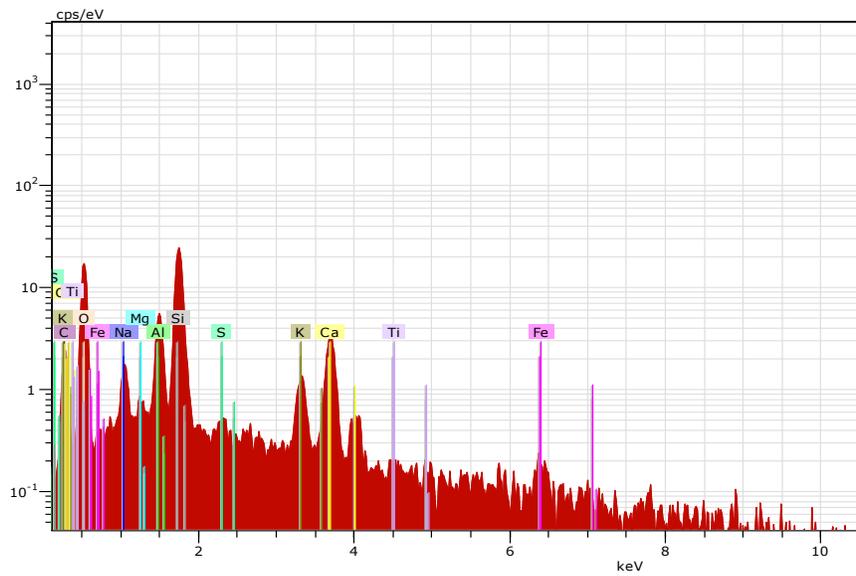


Figura 5-24: Análisis puntual de una inclusión en el enlucido. Imagen SEM: M. en C. Jaqueline Cañetas

Resultados FORS:

Para el análisis con FORS se midieron únicamente los enlucidos de superficie, ya que el área de análisis del equipo es de alrededor de 3mm en diámetro y medirlos enlucidos por el lateral no es posible. Aquellos enlucidos superficiales tienen una superficie rugosa ya que se encuentran desgastados. También, como ya se mencionó, los enlucidos de superficie muchas veces tienen rastros pequeños de pigmento.

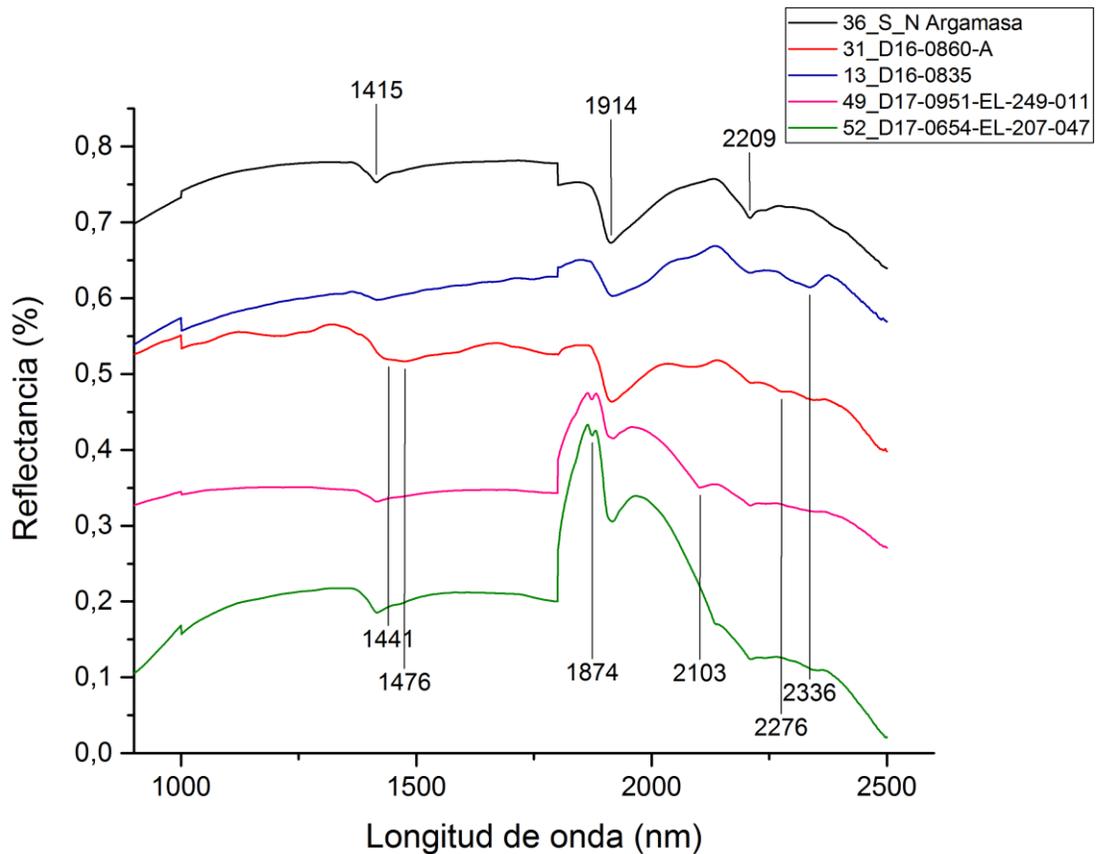


Figura 5-25: Espectros de FORS-IRC para los enlucidos de superficie. En la región de 1000 nm y 1800 nm se puede notar un artefacto debido al cambio de detector en las diferentes regiones del espectro.

Se puede apreciar en los resultados mostrados en la Figura 5-25 cuatro espectros característicos de enlucidos de superficie, así como el espectro de la argamasa (Figura 5-11) como referencia. De acuerdo con el trabajo de M.A Maynez (2017), la región característica para detectar las bandas de los soportes en el espectro de reflectancia es la del IRC, que

abarca de 1000 – 2500 *nm*.

En todos los espectros se pueden apreciar claramente las bandas de 1415 *nm*, 1914 *nm* y 2209 *nm*, todas ellas previamente asociadas con las tierras arcillosas que conforman la argamasa 5.1.1. Sin embargo, se logran apreciar otras bandas que no corresponden a la argamasa.

En el espectro del fragmento 31_D16-0860-A se observan dos bandas en la región de 1440 – 1480 *nm*, posiblemente relacionadas con movimientos simétricos del grupo O-H de los carbonatos de calcio (Maynez Rojas, 2017).

Los fragmentos 49_D17-0951-EL-249-011 y 52_D17-0654-EL-207-047, tienen un comportamiento similar en la región de 1800 *nm* que aún no ha podido ser identificada. Esta tiene una intensidad baja y al estar cercano a la región de cambio de detector, hay un salto que no permite que el espectro se defina con precisión en esa zona.

Por último, se muestran un par de bandas muy tenues en 2276 *nm* y 2336 *nm*. Estas dos podrían ser bandas características del enlace C=O de acuerdo con lo reportado en M.A. Maynez (2017).

Si bien estas tres bandas no dan evidencia suficiente para asegurar que la composición principal de los enlucidos sea de carbonato de calcio, sí es un buen indicio que puede buscar corroborarse por medio de otras técnicas como lo son FTIR y DRX, con las cuales es posible identificar con más facilidad este compuesto. Además, a partir de la evidencia recolectada en este trabajo se puede decir que FORS no es la técnica apropiada para la identificación de este tipo de materiales, ya que no se consigue identificar al material, sino dar un indicio de su composición.

Soportes:

Con toda la evidencia recabada hasta este momento, es loable decir que la composición de las argamasas está hecha de suelos arcillosos con un material cementante, posiblemente a basa de calcio. Además, presentan agregados como micas, vidrios volcánicos y fragmentos de material reutilizado. Los enlucidos posiblemente sean de carbonato de calcio con agregados de cuarzos, vidrios volcánicos, micas, feldespatos y materia orgánica quemada.

Todo esto corresponde a las fases técnicas II y III de D. Magaloni (Magaloni, 1996), que abarcan los periodos Tlamimilolpa-Xolalpan. Los fragmentos de Plaza de las Columnas (PC) fueron datados para esos mismos periodos. De ser esto cierto, los fragmentos de pintura mural de PC tienen una técnica teotihuacana en el aspecto formal de la manufactura del soporte.

Lo anterior resulta interesante ya que, incluso al ser un mural que tienen una estética y elementos estilísticos mayas, la evidencia material hasta ahora indica que la manufactura del soporte es la contemporánea²⁷ teotihuacana. Sin embargo, queda la interrogante de una posible combinación de técnicas de manufactura de soportes, entre la teotihuacana y la Maya.

La técnica de manufactura de los soportes en el área Maya, también tiene una argamasa que se aplica directamente sobre el muro y un enlucido sobre de ella, el cual soportará a la capa pictórica. Sin embargo, tanto las argamasas como los enlucidos están hechos principalmente de cal, con agregados como la arena de cal (*sascab*) (Vázquez de Agredos Pascual, 2010), material reutilizado, arenas, cal fraguada, calcitas clásticas y raras veces cuarzos y feldespatos (Magaloni, 1998). Con esto último es posible soportar la hipótesis de que los materiales empleados en el soporte, así como la forma de utilizarlos responde a una tradición técnica teotihuacana y no una combinación de ambas.

²⁷ A la datación de los fragmentos.

5.2 Pigmentos

Para el estudio de los pigmentos fue necesario hacer primero un agrupamiento por color. Este fue realizado a partir de dos técnicas: la imagen infrarroja de falso color (IRFC) y la espectrocolorimetría.

El primer agrupamiento se hizo mediante la IRFC, la cual dividió a los fragmentos en 18 grupos de color a partir de la respuesta del matiz de intervalo en la imagen visible. Este divide al círculo cromático en regiones de color. Posteriormente, cada uno de los 18 grupos de IRFC se dividió en sub-grupos a partir del cambio de matiz de intervalo en la imagen de falso color. Es decir, los subgrupos están formados por pigmentos que responden de la misma manera tanto en el visible como en el infrarrojo.

Los grupos identificados son: rojo, rojo/naranja, naranja, naranja/amarillo, amarillo, amarillo/verde, verde/amarillo, verde, verde/cian, cian, celeste/cian, celeste, azul/morado, morado, magenta, magenta/rosa, rosa y rosa/rojo. Como se puede apreciar, hay una gran variedad de grupos que responden a tonalidades cálidas, mientras que los grupos en las tonalidades frías²⁸ son menos. A continuación, se discutirá de manera breve la agrupación por colores ya que en cada sección se abordará con mayor detalle.

Para entender el agrupamiento de IRFC de los fragmentos de pintura mural de Plaza de las Columnas, es importante considerar la división entre tonalidades cálidas y tonalidades frías. Esto es porque debido a la gran variedad de fragmentos analizados y a la policromía de estos, resulta complicado y poco didáctico tratar a cada uno de los grupos por separado.

Las tonalidades cálidas son aquellas en las que hay más variedad de grupos. Esto para empezar habla de una posible tendencia estilística a emplear una mayor cantidad de colores en la gama de los rojos, naranjas y ocre. Los rojos, naranjas y amarillos son los grupos con

²⁸ Las tonalidades cálidas abarcan desde el Morado/Magenta hasta el Amarillo/verde, mientras que las tonalidades frías se encuentran en el intervalo de Verde/Amarillo a Morado.

mayor cantidad de subgrupos (cada uno con siete sub grupos), entonces no sólo hay una aparente tendencia a las tonalidades cálidas, sino también hay una mayor variación en los posibles materiales usados.

Los grupos magenta/rosa, rosa/rojo, amarillo y amarillo verde, únicamente tienen dos subgrupos. Los grupos rosa y magenta no tienen subgrupos.

A partir de esta división se puede hablar principalmente de pigmentos rojos, naranjas y ocre (ocres aquellos que están en el matiz de intervalo de los naranjas/amarillos), así como de pigmentos que representan casos especiales del grupo de las tonalidades cálidas.

Para las tonalidades frías hay una paleta principalmente compuesta por verdes y celestes. En el caso de los verdes se encuentran los grupos de verde/amarillo, verde y verde/cian, cada uno con dos, dos y tres subgrupos respectivamente. El otro tipo de pigmentos son los agrupados en los celestes: celeste con tres subgrupos y celeste/cian con tres subgrupos. Este tipo de pigmentos están representados en menor cantidad respecto a los pigmentos de tonalidad cálida. Además, el grupo de tonalidades frías tiene casos particulares ya que únicamente contienen un fragmento cada uno, estos son: cian, azul/morado y morado.

Puesto que la IRFC trabaja con un modelo triestímulo (HSV), es adecuada para la medición del color, mientras que para la identificación de tonalidades blancas y negras no presenta resultados acertados. Es por esto que además del agrupamiento por IRFC, también se realizó un agrupamiento por medio de las mediciones colorimétricas en el modelo de color CIE $L^*a^*b^*$. En este modelo se agruparon los pigmentos por color en el plano a^*b^* mientras que los pigmentos con tonalidades blancas, beige y negras fueron agrupados tanto por sus coordenadas a^*b^* como por la coordenada L^* . Los resultados de este agrupamiento se encuentran graficados en la Figura 5-26.

Se puede apreciar de nuevo la variedad en la paleta cromática, donde hay una mayoría de

pigmentos en tonalidades cálidas repartidas en el primer cuadrante, mientras que las tonalidades frías, que se encuentran repartidas en el segundo cuadrante, tienen menos representantes.

Se puede apreciar una tendencia de los pigmentos rojos y naranjas con una pendiente más cercana a los $\sim 30^\circ$, mientras que los pigmentos ocre (en la gráfica *amarillos*) tienen una pendiente más pronunciada $\sim 60^\circ$, sin llegar a ser por completo amarillos, reafirmando los grupos de IRFC. Además, existen algunos cafés dispersados por la región cercana al origen y entre los grupos rojos/naranjas y amarillos.

El caso de las tonalidades frías, se encuentran los colores verdes y azules. Estos se encuentran aglutinados en un radio de 20 unidades alrededor del origen y tienen una tendencia al encontrarse en el segundo cuadrante. Los fragmentos azules tienen pocos representantes y se encuentran todos en la región más cercana al origen (radio de 10 unidades). Destacan algunos fragmentos verdes que se presentan cercanos al grupo de los ocre, y dos ejemplares que se encuentran alejados del grupo, uno en el segundo cuadrante y otro en el cuarto cuadrante.

A partir de la información de IRFC y colorimetría, es posible dividir los resultados de esta investigación en seis principales grupos: blancos (que incluye blancos y beige), negros, ocre, rojos, verdes y azules. A continuación, se discutirán en detalle cada uno de estos grupos buscando caracterizar los materiales que los componen a partir de la evidencia recabada. Se presentarán los resultados de IRFC, colorimetría, microscopía, XRF y FORS.

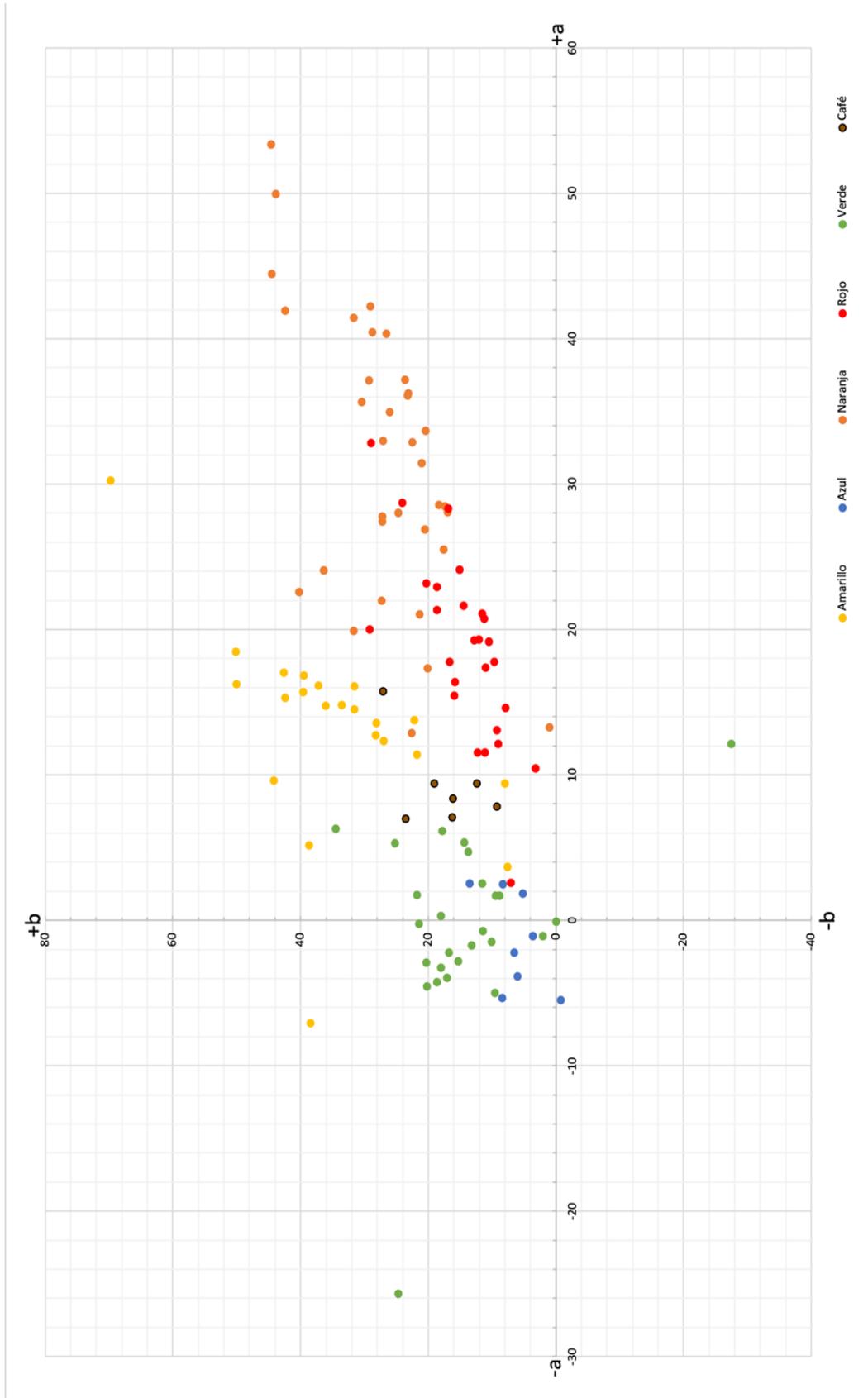


Figura 5-26: Gráfica en el plano a^*b^* de los pigmentos de las temporadas 2016 y 2017

5.2.1 Blancos

El grupo de los blancos se diferenci6 de los enlucidos a partir de los criterios ya mencionados en la secci6n 5.1.2. Todos los pigmentos blancos son aquellos encontrados en superficie y que parecen cumplir la funci6n de pigmento. Sin embargo, entre el grupo de los blancos tambi6n se analizaron un tipo de pigmentos con tonalidad beige. Los pigmentos blancos no se analizaron por IRFC ya que no aportan informaci6n, pero los beige s6.

Los fragmentos beige caracterizados por IRFC est6n clasificados en el grupo de los naranjas y pertenecen a dos subgrupos:

- Naranja a Verde/amarillo: 2_C16-0649 y 21_D16-0860-C
- Naranja a Verde: 20_D16-0680-A y 34_C16-0698

Los matices de intervalo en la imagen infrarroja son consecutivos lo cual indica que posiblemente se trate de un mismo tipo de pigmentos beige con ligeras variaciones que generan esta separaci6n.

De acuerdo con el modelo de color CIE $L^*a^*b^*$, el blanco puro se encuentra en la coordenada $(L_{max}, 0, 0)$. Por lo tanto, los pigmentos blancos se encontrar6n tanto en un radio de tolerancia cercano al origen y un alto valor en la coordenada L. Los resultados de colorimetr6a muestran que los blancos y beige Figura 5-27 se agrupan en el primer cuadrante, con una tendencia de crecimiento en +b (hacia los amarillos) y no superan un radio de 35 unidades alrededor del origen.

Los pigmentos blancos est6n agrupados en su mayor6a, en el radio de tolerancia de 15 unidades, mientras que menos del 40% de los pigmentos blancos se encuentran en radios de tolerancia mayores. Adem6s, los pigmentos blancos nunca se encuentran por debajo de $L = 60$. El caso del fragmento 41_D17-0571-EL-186-022 es especial, ya que se encuentra cercano a la regi6n azul, pero tiene una coordenada $L = 130$. Al analizar la microscop6a de este fragmento Figura 5-28b se observan part6culas de pigmento verde y azul que posiblemente expliquen este comportamiento.

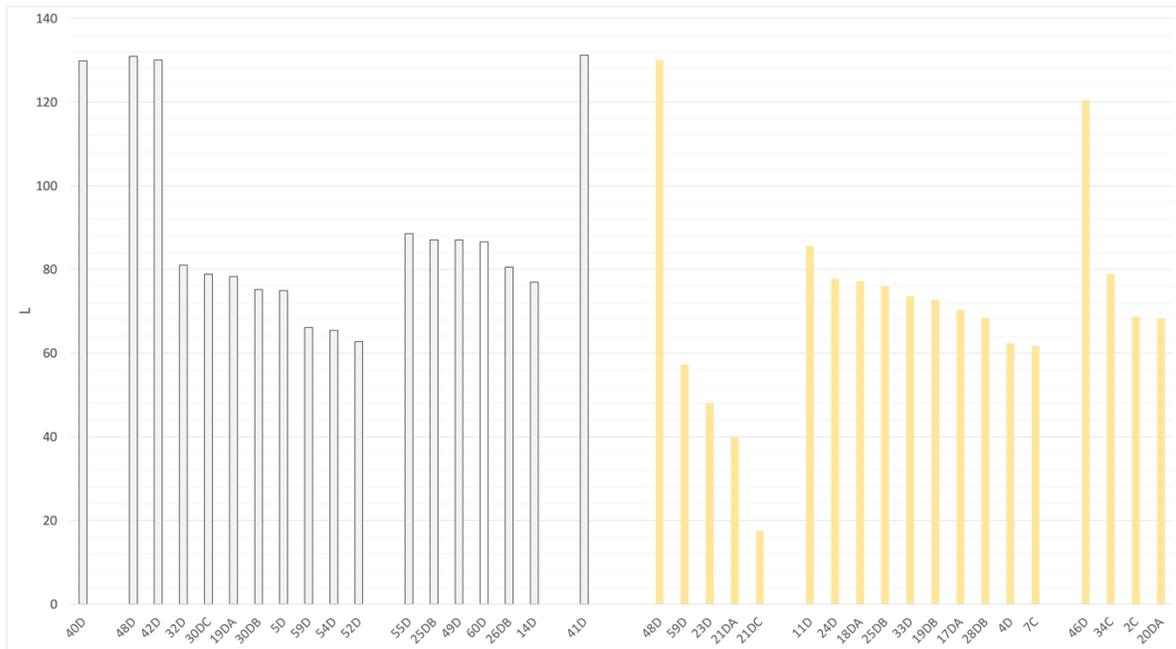


Figura 5-29: Datos colorimétricos L* para los blancos

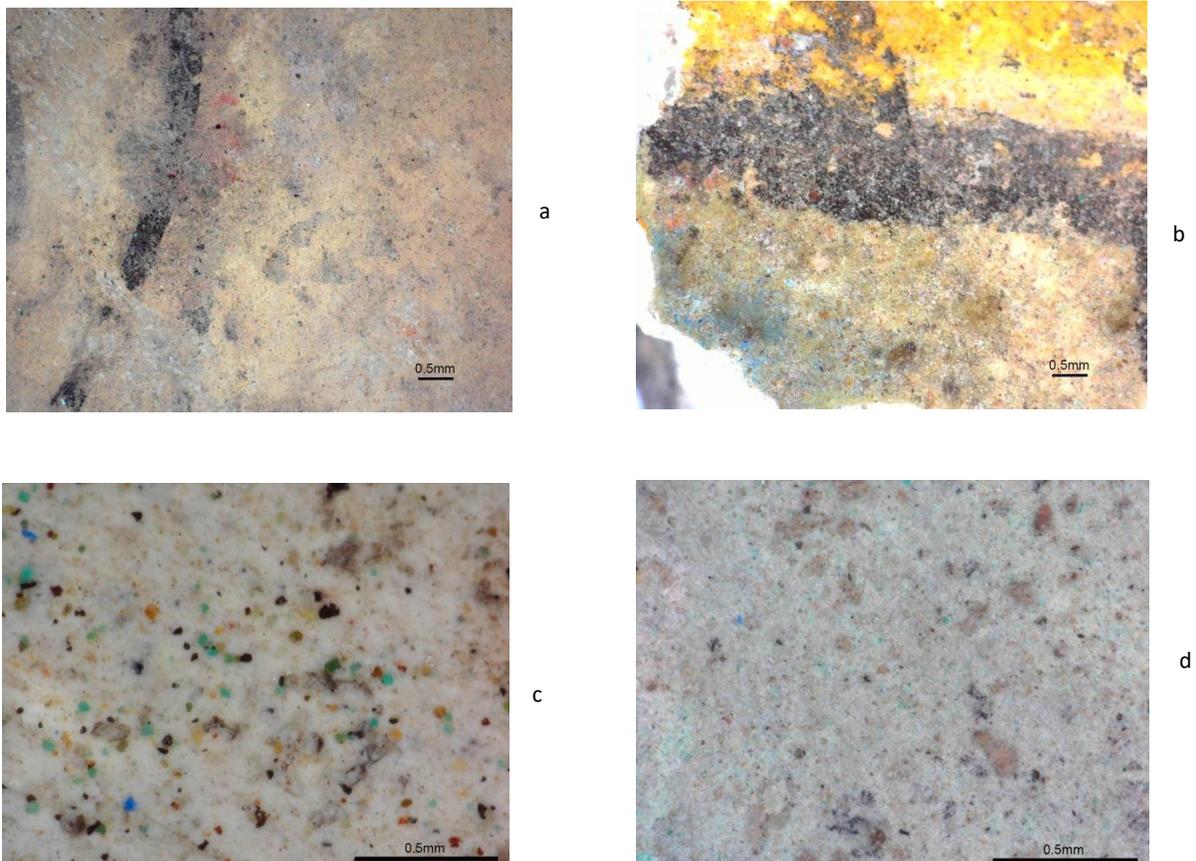


Figura 5-28: Microscopías a 50X y 100X de los fragmentos (a) 34_C16-0698, (b) 21_D16-0860-A, (c) EL-D519-019 y (d) 41_D17-0571-EL-186-022. Microscopías Paulina Guzmán

Resultados XRF:

De la misma forma que en el análisis de los enlucidos, a continuación, se presentan los resultados de XRF para los blancos con la normalización al Ca (Figura 5-30, Figura 5-31, Figura 5-32) y normalizados al total de los elementos (Figura 5-33, Figura 5-34, Figura 5-35).

Los blancos están compuestos principalmente por Ca y en menor medida Fe y Cu. Tienen una composición elemental similar a la del enlucido. Esto puede ser un indicador de que, en los fragmentos de pintura mural de Plaza de las Columnas los enlucidos están siendo empleados en las regiones blancas. También se puede observar un comportamiento similar en las proporciones de Fe y elementos secundarios, sugiriendo un empleo de agregados de la misma forma que en el enlucido. Lo anterior sugiere una *receta* para las proporciones de materiales empleados en los blancos, común a todos los fragmentos de pintura mural. Es importante destacar que la cantidad de S en las regiones blancas no es representativa, por lo que los blancos empleados no son de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

En los blancos destacan los casos del fragmento 9_D16-1002 por su alto contenido en Fe, así como el fragmento EL-D519-019 de la temporada 2018, por su contenido notorio en Cu. El primero tiene una alta concentración de Fe porque se encuentra en frontera con una región roja, la cual posiblemente contamina la región blanca. Para el caso del fragmento EL-D519-019, se puede observar en Figura 5-28c que hay partículas verdes y azules repartidas en el enlucido, dando así explicación al Cu.

Para el caso de los beige, la composición elemental es principalmente Ca y en menor medida Fe, Cu y agregados. Los beige presentan una distribución mayoritariamente homogénea en la cantidad de calcio, aunque hay más fragmentos que se salen de la tendencia. Como ya se discutió previamente, los beige posiblemente sean la evidencia de pigmento desgastado. La evidencia XRF da más argumentos para apoyar esta hipótesis. Además de que los fragmentos con alto contenido en Fe y Cu fueron analizados bajo el microscopio y se

encontraron restos de pigmento rojo y azul respectivamente (Figura 5-28)

En los estudios analizados para pigmentos en Teotihuacan para distintos soportes, no se ha reportado un pigmento *beige*. Además, la forma de utilizar este color no responde a alguna necesidad estética o discursiva, aparentemente. Por lo general se encuentra cercano al blanco o bien en regiones donde se podrían utilizar los blancos. Si se explora la posibilidad de que hubiera una intención de generar un pigmento color beige a partir de la combinación de otros pigmentos, entonces la evidencia material señalaría una distribución elemental homogénea para todos los pigmentos beige, lo cual no sucede. Pareciera que se pudo llegar a la misma tonalidad por diferentes mezclas, lo cual no corresponde con la evidencia Teotihuacana, en donde todo parece indicar que se buscaba homogeneizar los procesos de producción de materiales en toda la metrópoli. Por lo anterior, parece ser que el beige no es un pigmento, sino la consecuencia del desgaste de un pigmento.

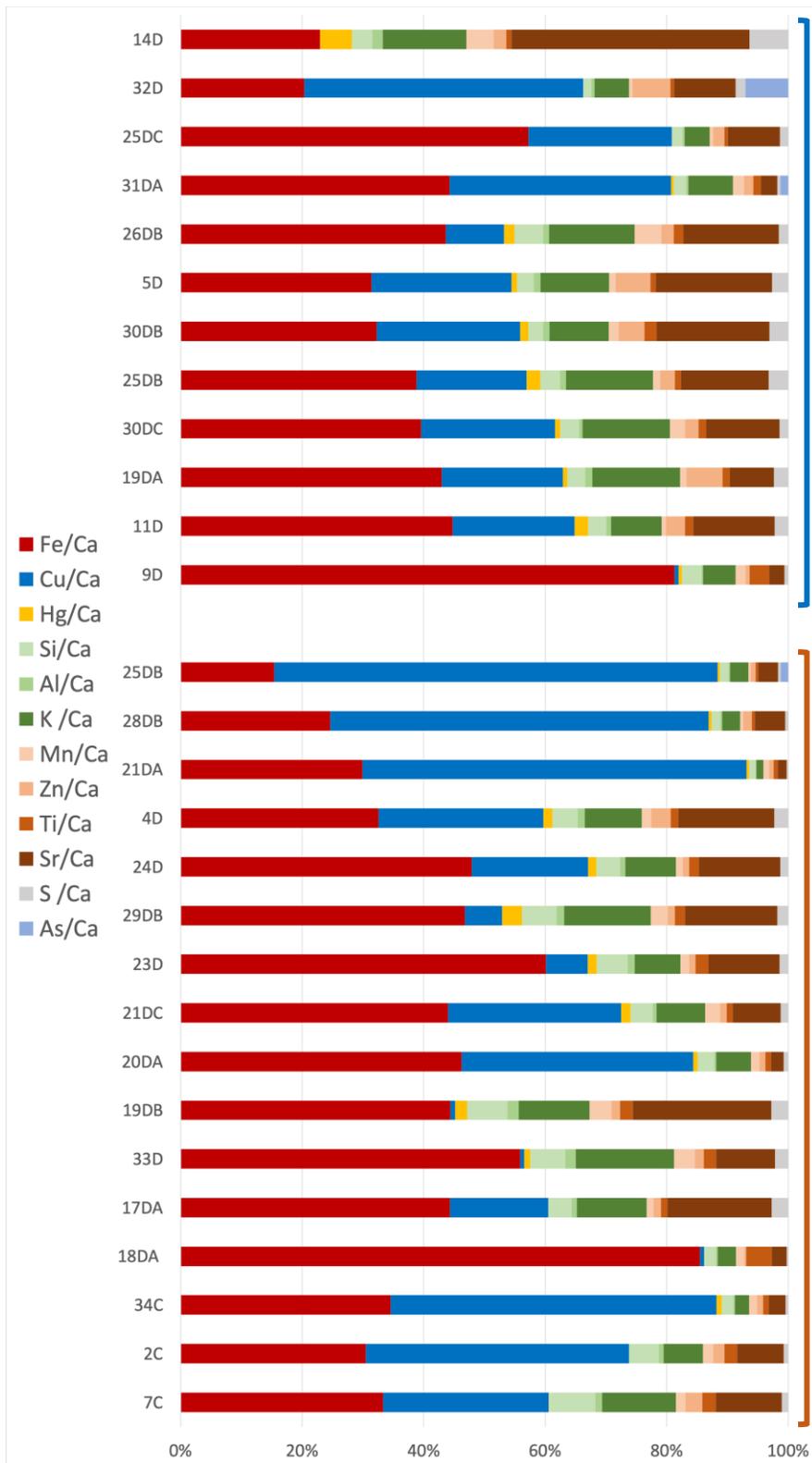


Figura 5-30: Resultados XRF para los blancos (enmarcados en azul) y beige (enmarcados en café) de la temporada 2016, normalizados al Ca.

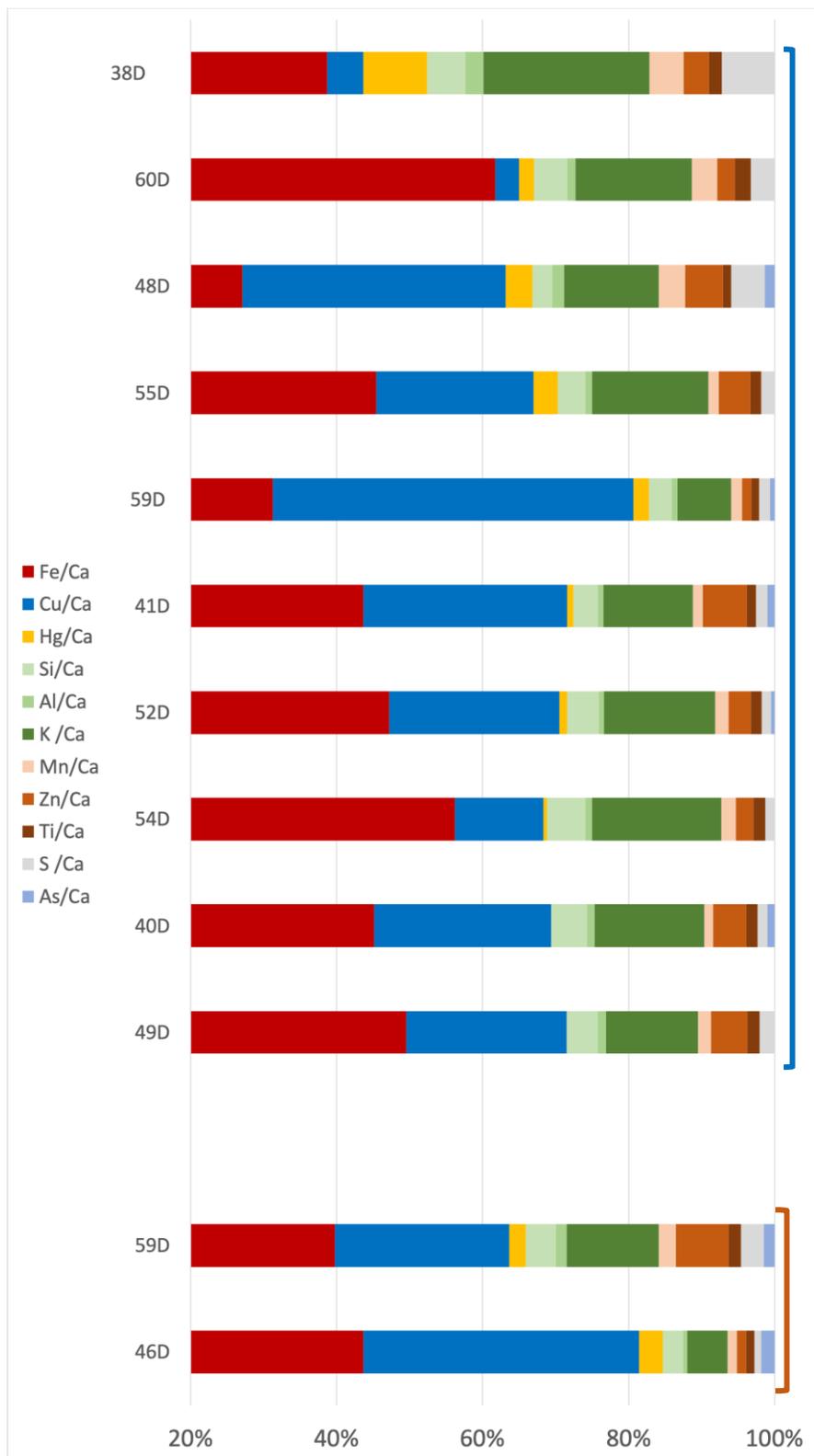


Figura 5-31: Resultados XRF para los blancos (enmarcados en azul) y beige (enmarcados en café) de la temporada 2017, normalizados al Ca.

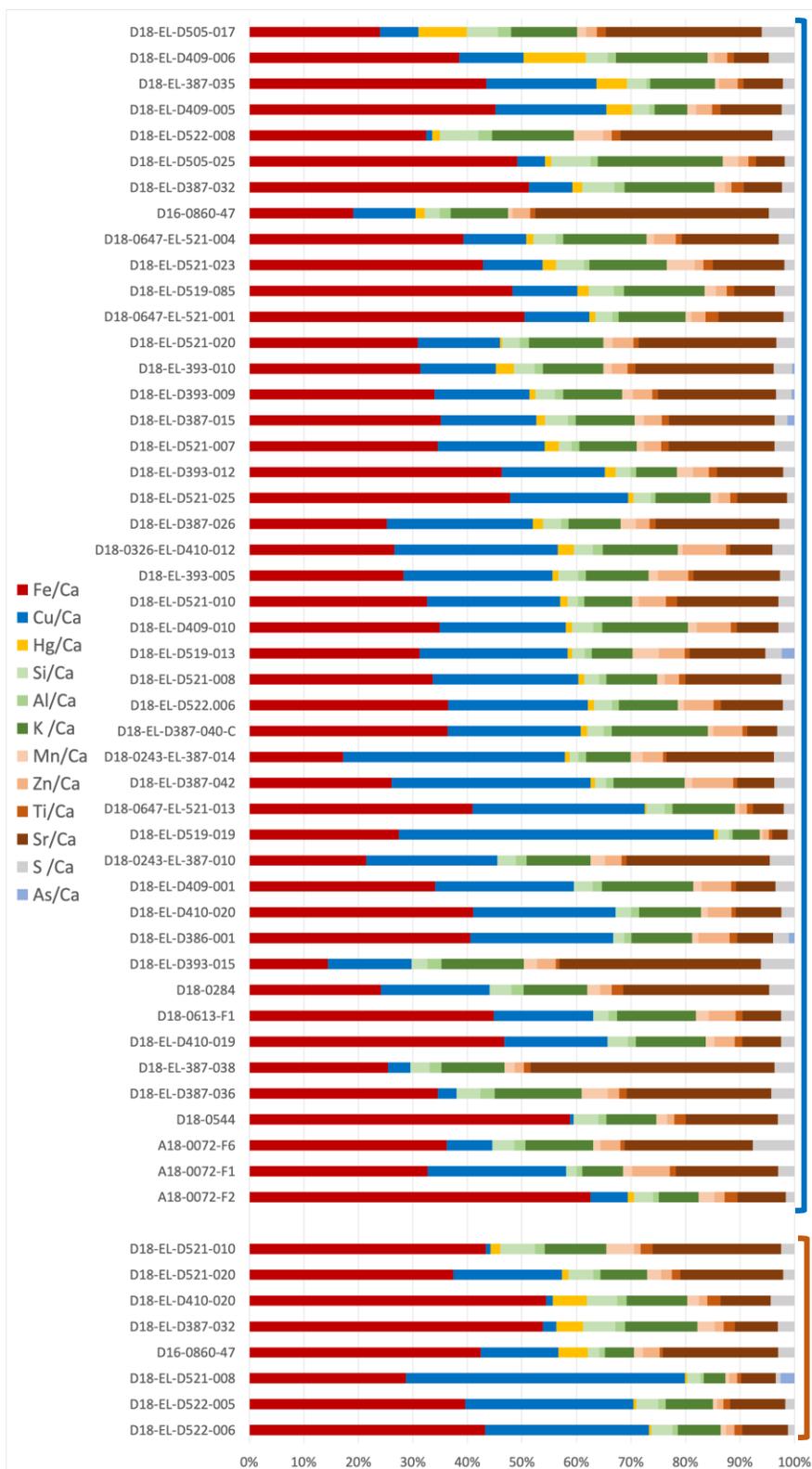


Figura 5-32: Resultados XRF para los blancos (enmarcados en azul) y beige (enmarcados en café) de la temporada 2018, normalizados al Ca.

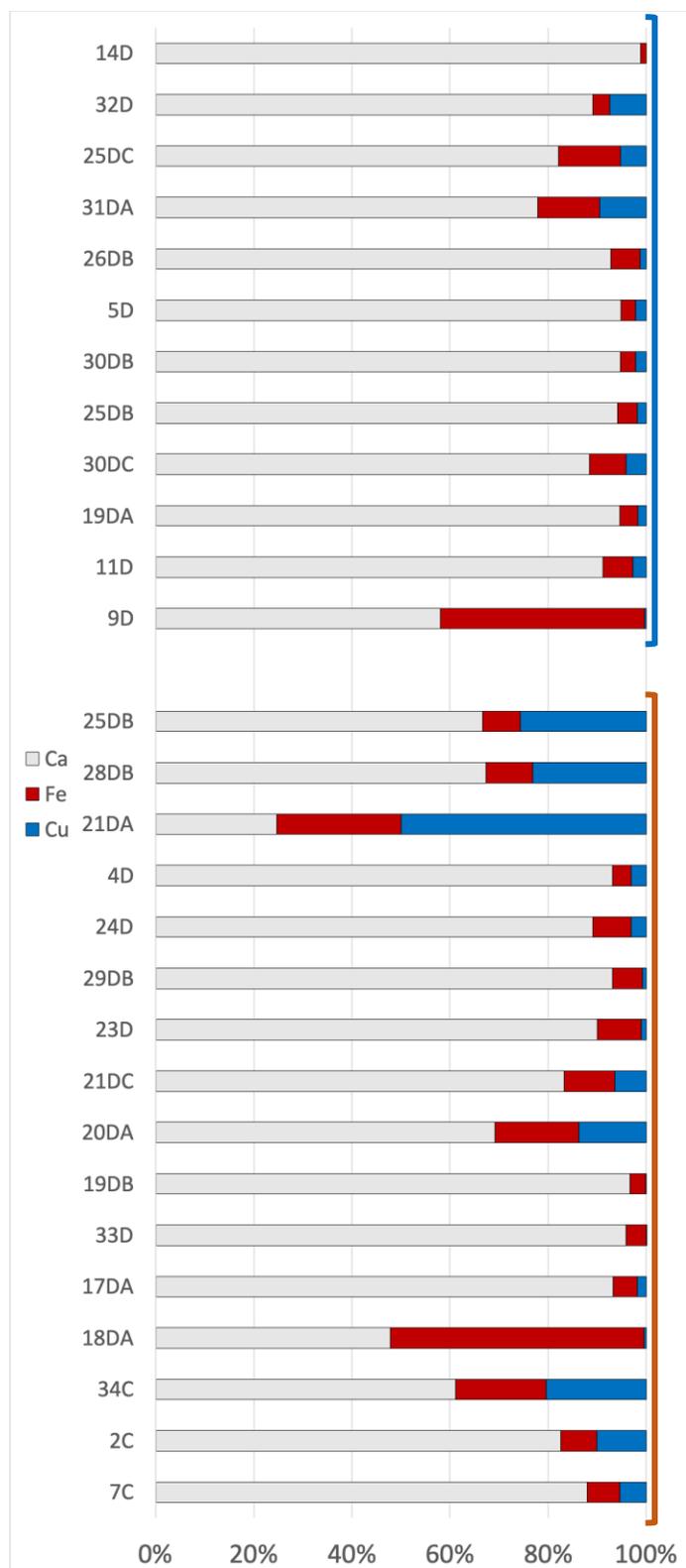


Figura 5-33: Resultados XRF para los blancos (enmarcados en azul) y beige (enmarcados en café) de la temporada 2016, normalizados al total

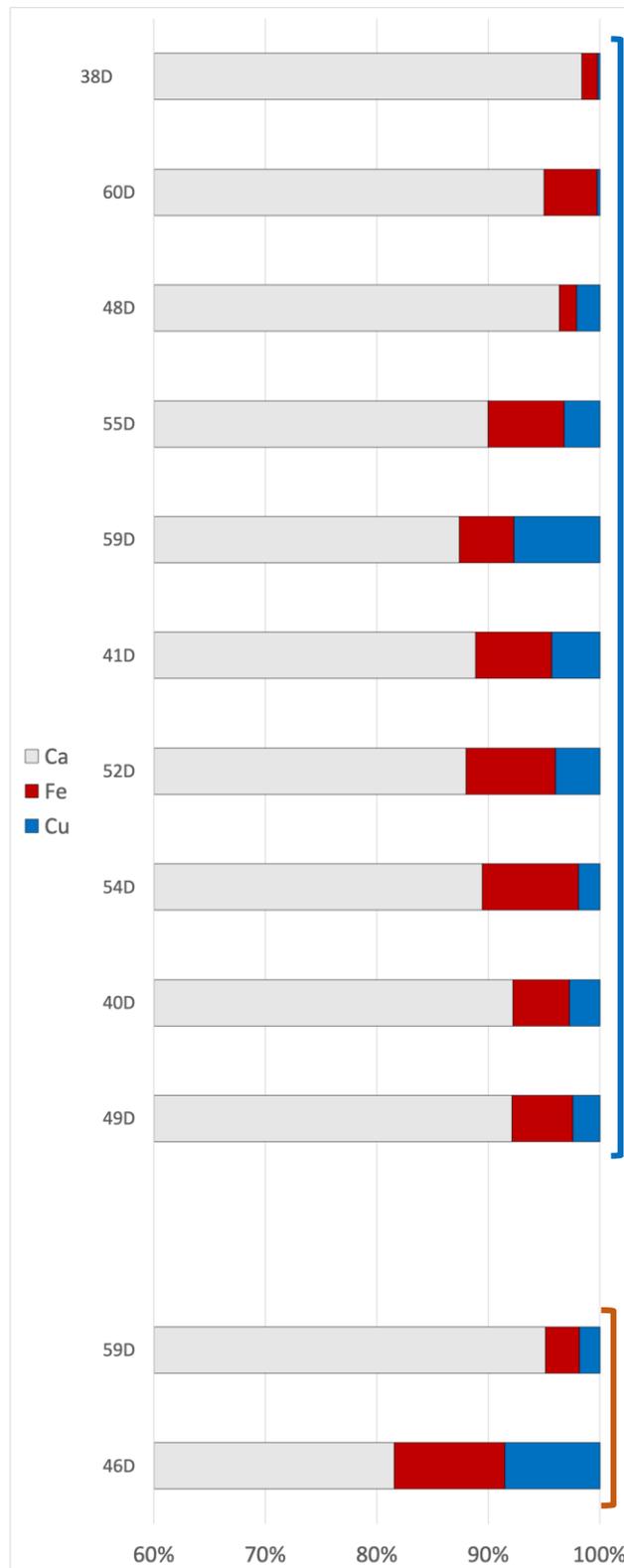


Figura 5-34: Resultados XRF para los blancos (enmarcados en azul) y beige (enmarcados en café) de la temporada 2017, normalizados al total

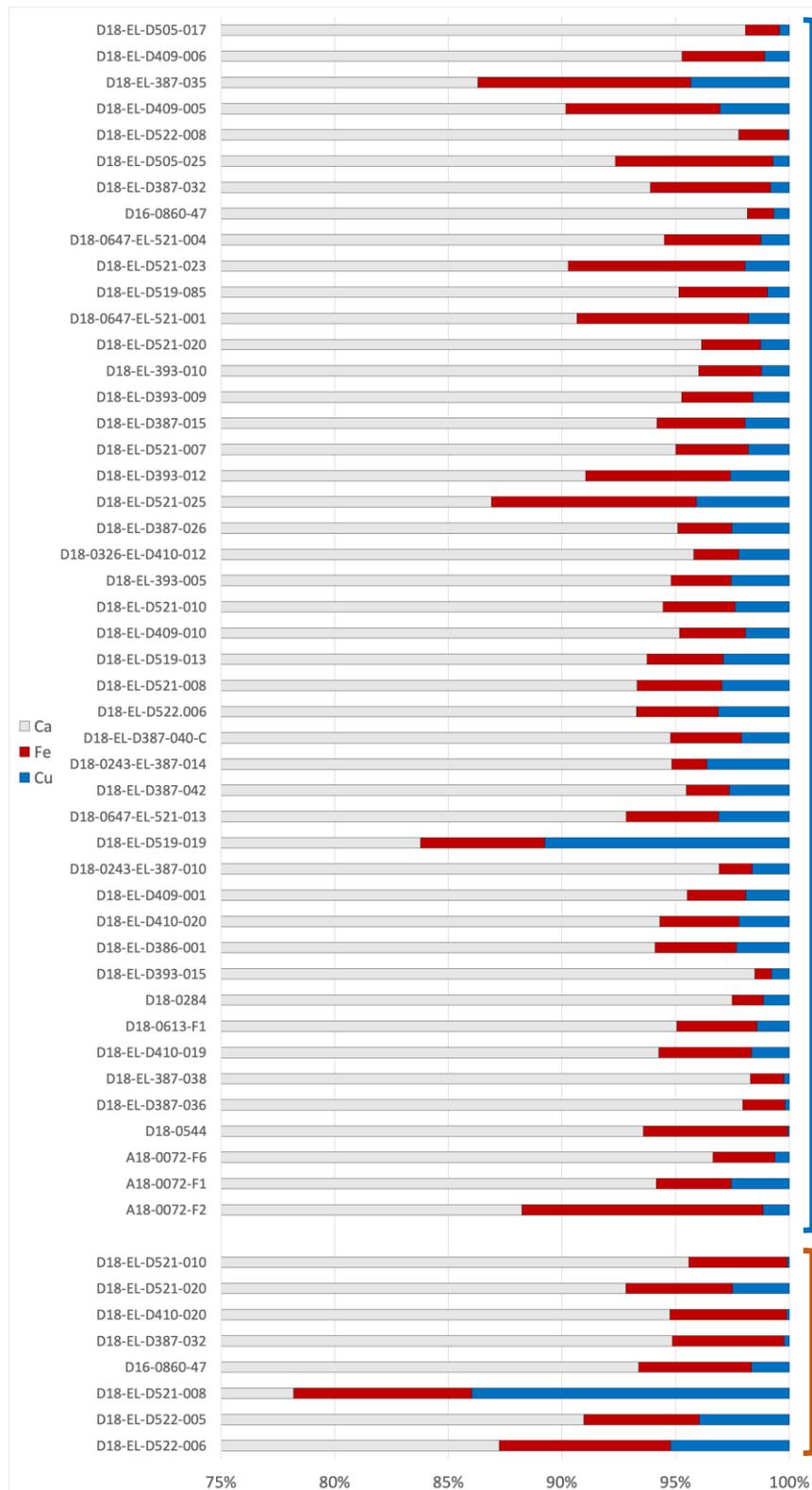


Figura 5-35: Resultados XRF para los blancos (enmarcados en azul) y beige (enmarcados en café) de la temporada 2018, normalizados al total

Resultados FORS:

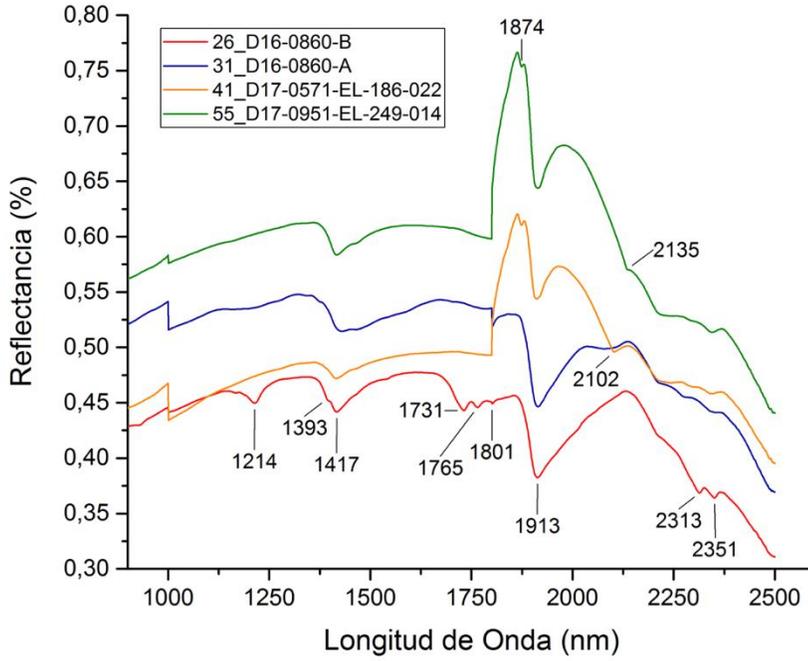


Figura 5-36: Espectros FORS en el intervalo de 1000 nm a 2500 nm para los blancos. En la región de 1800 nm se observa un artefacto producto del cambio de detector. De la misma forma se nota en la región de 1000 nm.

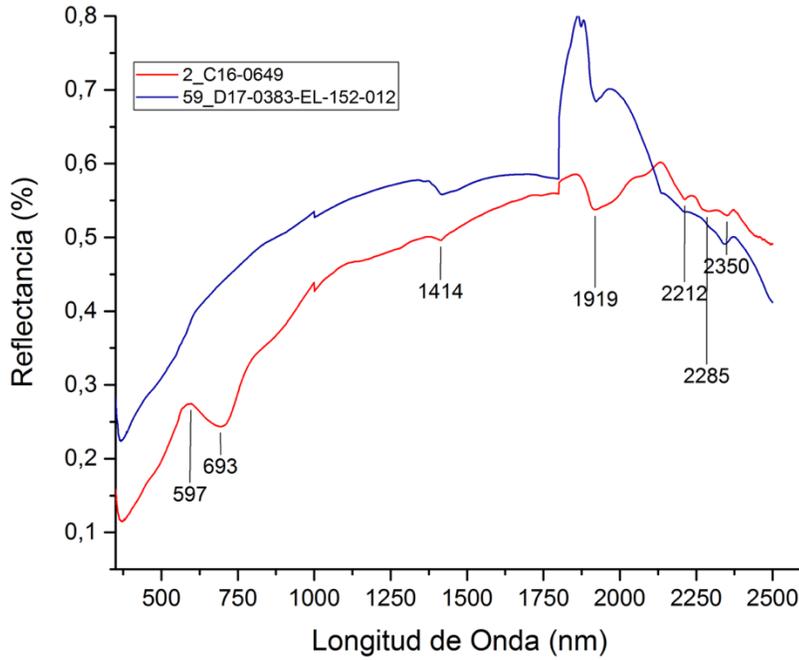


Figura 5-37: Espectro FORS en el intervalo de 300 nm a 2500 nm para los beige. Se nota el artefacto del cambio de detector en 1000 nm y 1800 nm.

En los espectros presentados en la Figura 5-36 se pueden apreciar cuatro espectros representativos para los fragmentos blancos en el intervalo del IRC. En ellos se identifican los picos de el carbonato de calcio. De acuerdo con el trabajo de caracterización reportado por M. Maynez (2017), la banda de absorción del enlace C-H se encuentra en 1203 *nm* para el carbonato de calcio. En el espectro de la Figura 5-36 esta banda se encuentra en 1214 *nm*. Además, otras bandas asociadas al estiramiento del enlace C-H se encuentran en la región de 1700 *nm* (Maynez Rojas, 2017). Las bandas de 1417 *nm* y 1913 *nm* se asocian con las encontradas para la argamasa (Figura 5-11). Por último, en la región de 2300 *nm* se pueden encontrar las bandas asociadas a los sobre tonos de los enlaces dobles C O (C=O). La banda de 2531 *nm* corresponde con la reportada por (Maynez Rojas, 2017) para esta vibración. Lo anterior indica que el pigmento blanco caracterizado para el fragmento 26_D16-0860-B es carbonato de calcio.

Para el caso de los otros espectros, la definición de las bandas anteriormente mencionadas no es tan clara. Sin embargo, se alcanza a ver una tendencia en la región de 2300 *nm*. Esto es un buen indicio para pensar que los demás fragmentos también están compuestos por carbonatos de calcio. Para poder comprobar esto, se pueden realizar estudios de FTIR en el cual es posible caracterizar a los carbonatos de calcio, como se ha hecho en investigaciones anteriores (Chukanov, 2014; Martínez García, Ruvalcaba Sil, Manzanilla, & Riquelme, 2012; Regev, Poduska, Addadi, Weiner, & Boaretto, 2010).

Con la evidencia anterior y los resultados elementales de XRF es posible decir que probablemente los blancos y enlucidos estén hechos de algún carbonato de calcio mezclado con aluminosilicatos ricos en K. También hay evidencia de agregados como lo son posibles vidrios volcánicos y materia orgánica quemada. Los blancos en superficie muestran un acabado pulido para dar lustre a la superficie. Además, también se encuentran restos de materia orgánica incrustados en la superficie Figura 5-38. Esta evidencia corresponde a lo descrito en la II y III fases técnicas de D. Magaloni (Magaloni, 1996).

En el caso de los beige el espectro FORS en el IRC muestra bandas características de la argamasa de tierra, así como dos bandas tenues en 2300 nm. Sin embargo, uno de los espectros muestra una banda de absorción en 693 nm así como un pico en 597 nm. Estas bandas están usualmente asociadas con los óxidos de hierro (sección 5.2.4). Encontrar estas bandas, junto con las imágenes de microscopía y la evidencia de XRF, fortalece la hipótesis de que el pigmento beige no existe como pigmento, sino como consecuencia de la degradación de otros pigmentos color rojo, ocre, verde o azul. De ser esto cierto, se podría aplicar la teoría de Kubelka-Munk para separar las mezclas de color y lograr obtener una mejor aproximación del remanente (Dupuis & Menu, 2006; Koirala, Hauta-Kasari, Martinkauppi, & Hiltunen, 2008).

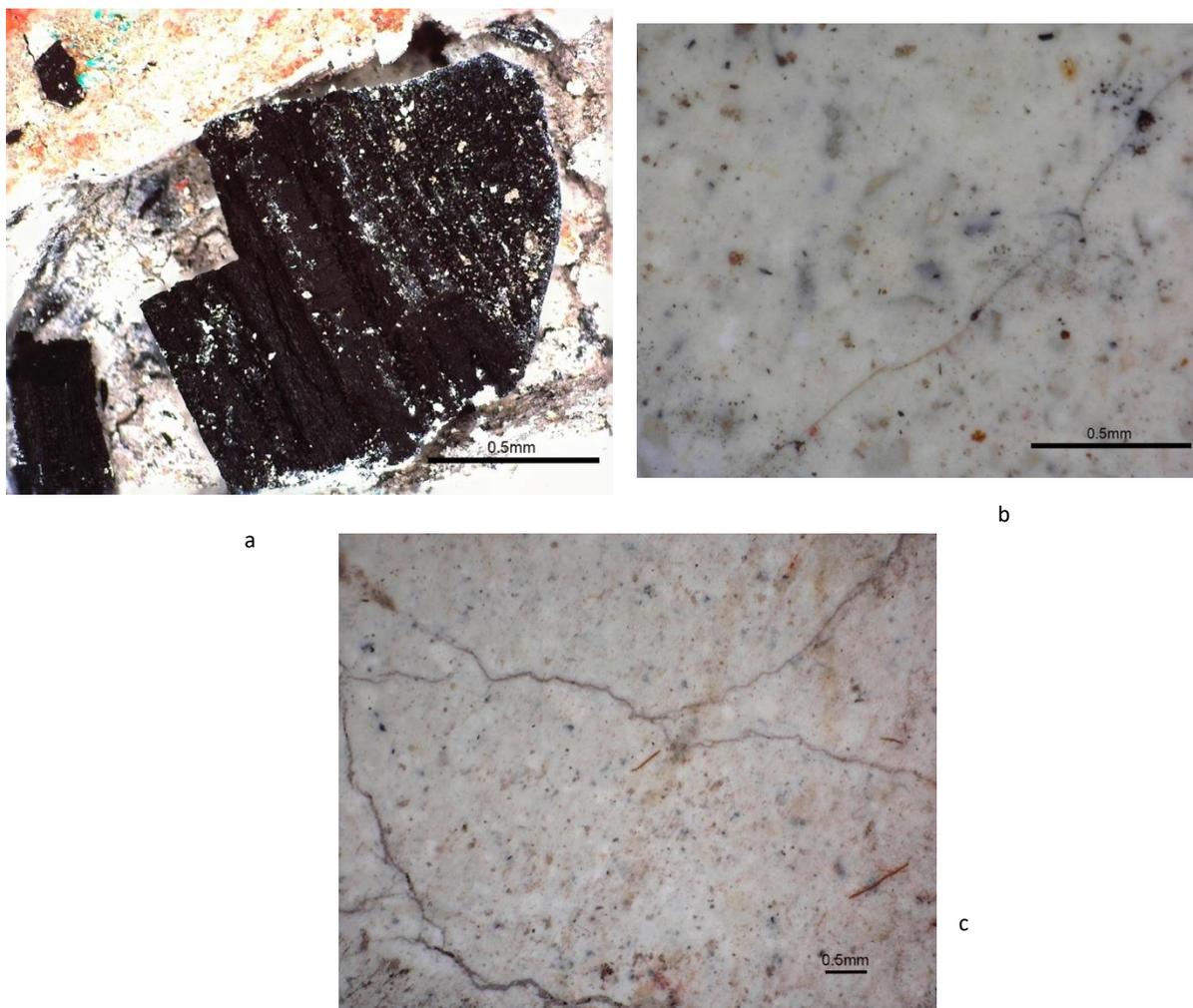


Figura 5-38: Imágenes de microscopio óptico a 50X y 100X en donde se muestra (a) evidencia de materia orgánica quemada en el blanco/enlucido, (b) agregados a la mezcla de blancos y (c) detalle del acabado de superficie en el que se presenta un pulido, se alcanzan a apreciar estrías producto del mismo, así como materia orgánica incrustada. Microscopías Paulina Guzmán

Con la evidencia encontrada hasta ahora, se puede decir que, la composición material de los enlucidos y de los blancos es la misma. Es por eso que lo más posible es que no exista un *pigmento blanco*, ya que no hay ningún material que esté siendo empleado específicamente para ello. Más bien, lo que se propone es que las regiones blancas en superficie son el mismo enlucido, con un acabado más fino y que se deja blanco con el fin de responder a una necesidad estética o discursiva. Es decir, el valor que distingue al pigmento blanco del enlucido, no es uno material, sino la forma en la que está siendo empleado.

5.2.2 Negros

De todos los fragmentos analizados, existen únicamente tres que son en su totalidad negros. Todos los demás pigmentos negros analizados eran líneas y trazos, lo cual dificulta su caracterización. Con el fin de minimizar el error debido a la dificultad de detección, los tres fragmentos negros servirán a lo largo de esta sección como referencia principal, mientras que los pigmentos negros encontrados en regiones o líneas serán referenciados a lo encontrado en los primeros tres fragmentos.

En la metodología de imagen infrarroja de falso color, una de las limitantes es la caracterización de los pigmentos negros. Lo anterior es porque no es posible diferenciar entre algunos de ellos debido a su baja saturación (Rangel Chávez, 2018). Por lo anterior, no fue posible caracterizar mediante IRFC los fragmentos negros ya que las mediciones presentan discrepancias. Sin embargo, las imágenes del falso color de los tres fragmentos negros presentan un ligero corrimiento al rojo, como está reportado para los pigmentos analizados por I. Rangel (2018).

Por otro lado, la caracterización colorimétrica Figura 5-39 muestra que los pigmentos negros se encuentran todos en el primer cuadrante, es decir, en la sección que corresponde a las tonalidades cálidas. Todos los negros se encuentran en un radio de tolerancia máximo de 35 unidades, igual que los pigmentos blancos. Además, únicamente tres fragmentos tienen

valores en L por encima de las 60 unidades. Los tres negros de referencia: 3_D16-0860, 19_D16-0860-C y 53_D17-0951-EL-249-015, están en un radio de tolerancia máximo de 10 unidades y se encuentran por debajo de las 60 unidades en L. Esto reafirma que estos tres fragmentos son buenos candidatos para ser utilizados como referencia para esta sección.

A partir del grupo de negros formado por colorimetría, se analizó a los pigmentos negros con fluorescencia de rayos-X, así como espectroscopía de reflectancia (FORS).

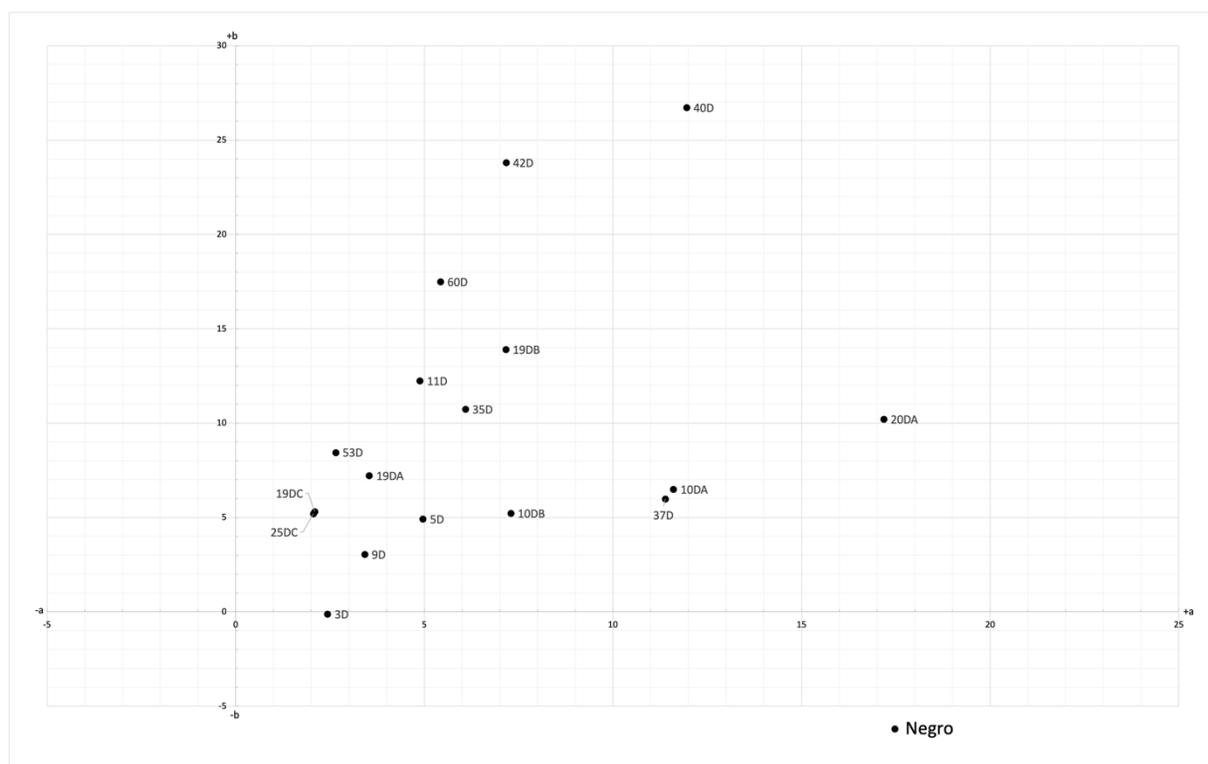


Figura 5-39: Gráfica colorimétrica en el plano a^*b^* para los pigmentos negros.

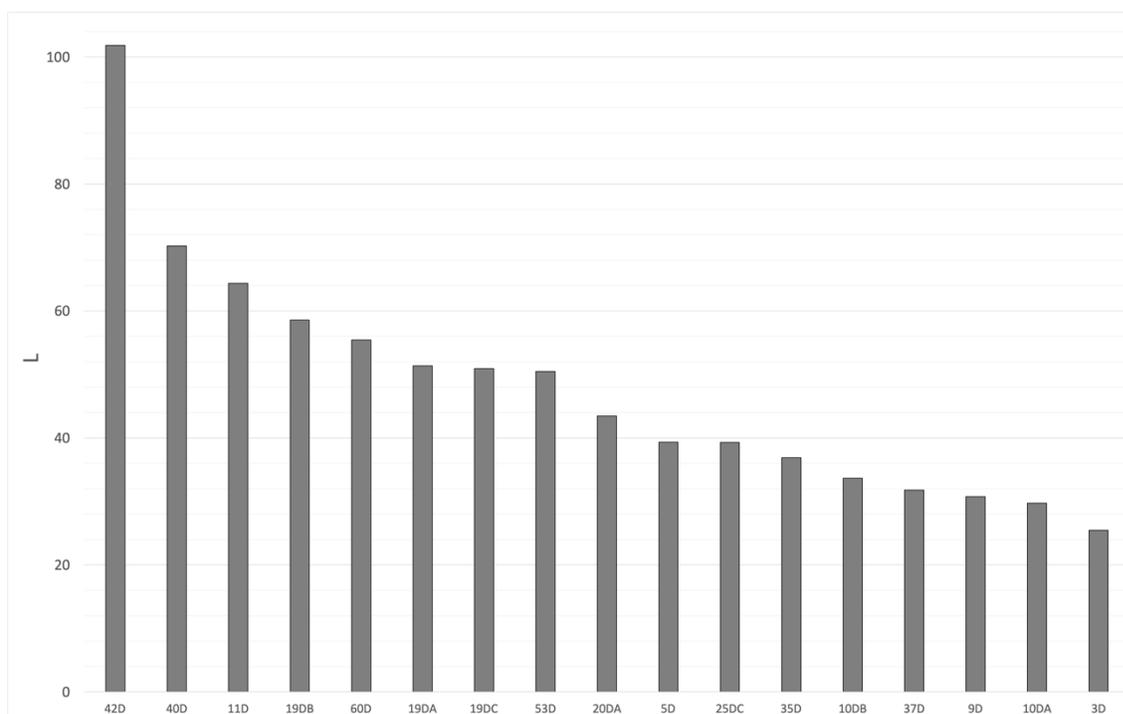


Figura 5-40: Gráfica colorimétrica de los valores de L* para los colores negros

Resultados XRF:

En los resultados de fluorescencia se pueden apreciar las tres diferentes temporadas de excavación. Los fragmentos de referencia negros pertenecen a las temporadas 2016 y 2017. Como se puede observar, estos tres fragmentos (3D, 19DC y 53D²⁹) muestran una distribución elemental similar (Figura 5-41, Figura 5-42). Están compuestos principalmente por Fe y Sr. El estroncio puede estar relacionado con una sustitución con el Ca como se discutió en la sección 5.1.2. Además de ser ricos en Fe, estos tres pigmentos tienen una composición elemental rica en potasio, esto puede estar relacionado al uso de algún tipo de mica rica en potasio, como por ejemplo la moscovita o biotita.

Los fragmentos negros tienen una apariencia granular y de tono rojizo, como se alcanza a

²⁹ Usando la nomenclatura abreviada, por ejemplo: 19_D16-0860-C = 19DC.

ver en la (Figura 5-46). Además, en la imagen de microscopio se pueden apreciar una alta cantidad de agregados.

Otro grupo que destaca son aquellos fragmentos con alta cantidad de Cu. Entre estos fragmentos se encuentran el 34_C16-0698, el D18-EL-D387-042 y el D18-EL-D393-012. Los tres fragmentos destacan también en la composición elemental del blanco, por una intensidad alta de Cu (Figura 5-30, Figura 5-32). Posiblemente las demás contribuciones en Cu a los pigmentos negros sean debidas a esta contribución. Esto sucede porque los negros en los fragmentos (que no sean los tres fragmentos negros de referencia) están siendo empleados como contornos de figuras, los cuales se caracterizan por ser trazos finos. Aunque el área de análisis del equipo SANDRA es de $\sim 1\text{mm}$ de diámetro, es posible que exista contribución de los pigmentos vecinos. Además, por el desgaste del mural, podría haber esparcimiento de partículas de pigmento que se desprendieran del enlucido y se depositaran en las regiones cercanas, es decir, en las líneas de contorno. (Figura 5-46) Lo anterior también explicaría aquellos fragmentos que tienen alta composición en Hg.

Finalmente resulta interesante discutir los fragmentos 20_D16- -B, 40_D17- y D18-EL-D521-020 porque presentan un contenido principalmente de Fe. Esto es debido a que todos los fragmentos tienen líneas negras dibujadas sobre un pigmento amarillo. Los amarillos, discutidos más adelante, están compuestos principalmente por Fe. De modo tal que la contribución de este elemento no se puede asociar por completo al negro, sino a la mezcla.

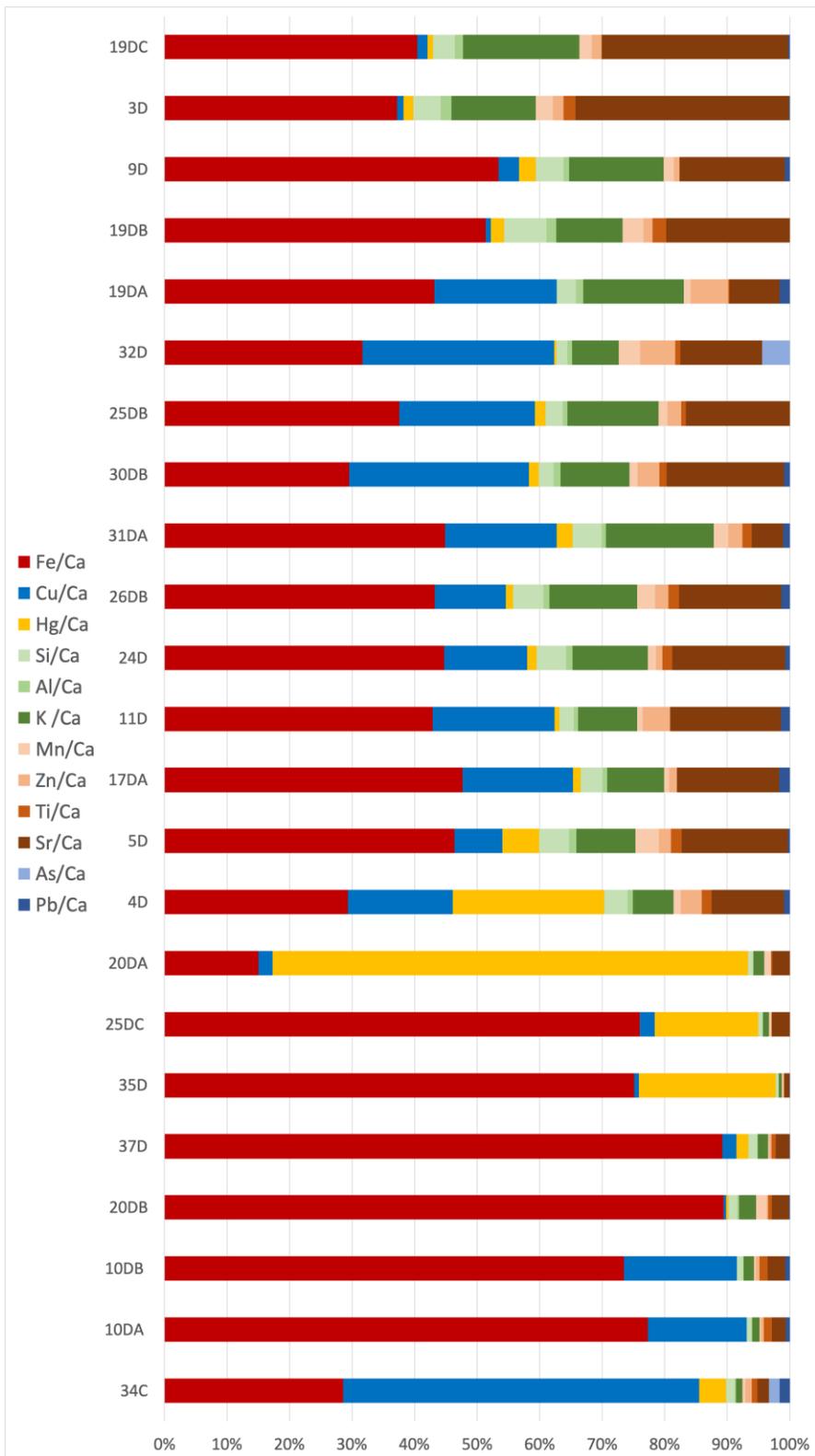


Figura 5-41: Resultados XRF para los fragmentos negros de la temporada 2016, normalizados al Ca

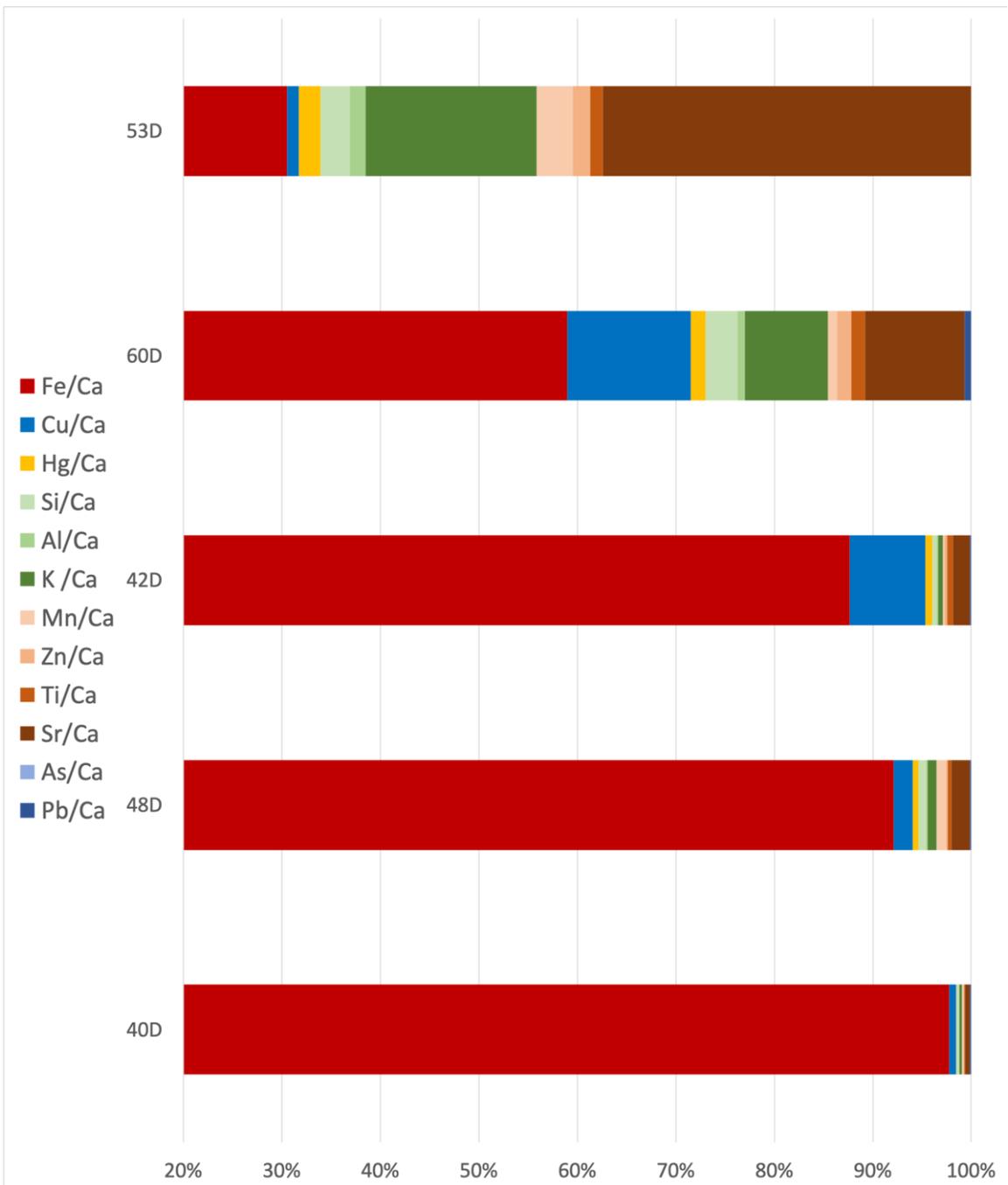


Figura 5-42: Resultados XRF para los fragmentos negros de la temporada 2017, normalizados al Ca

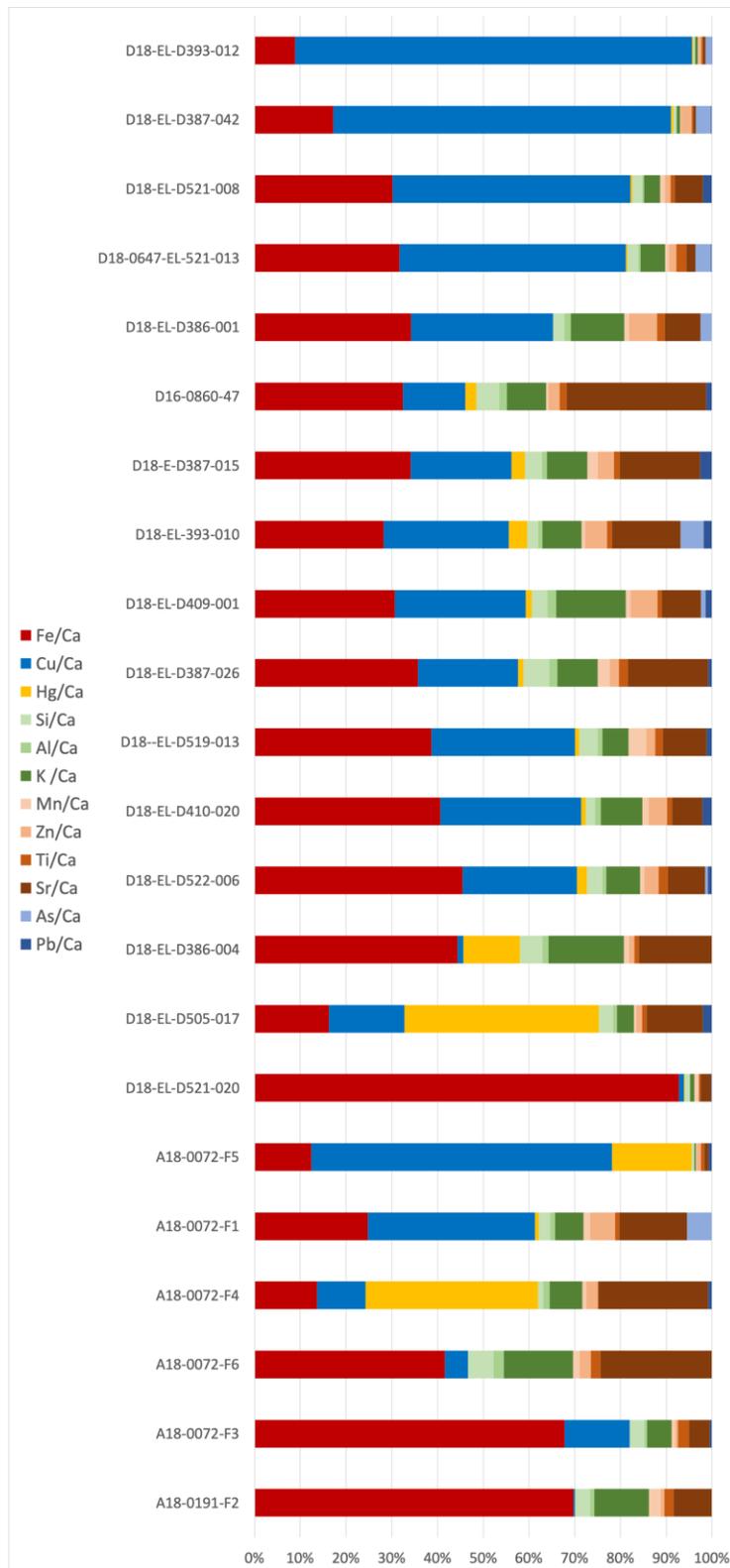
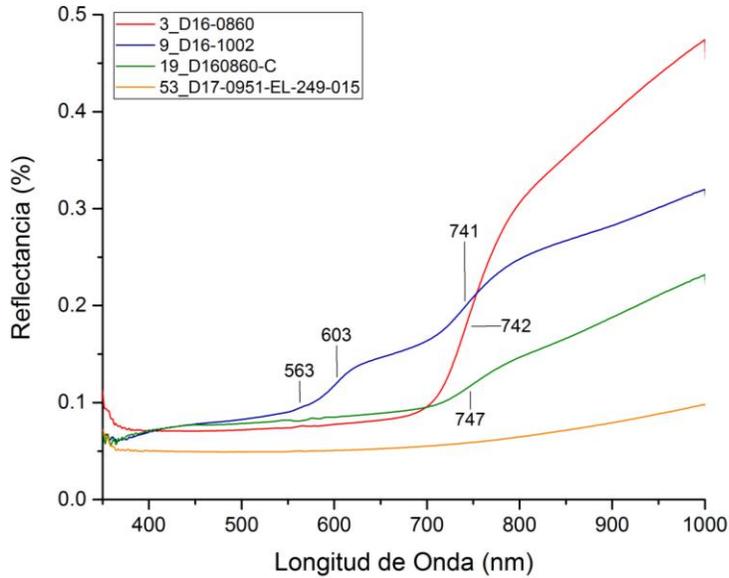


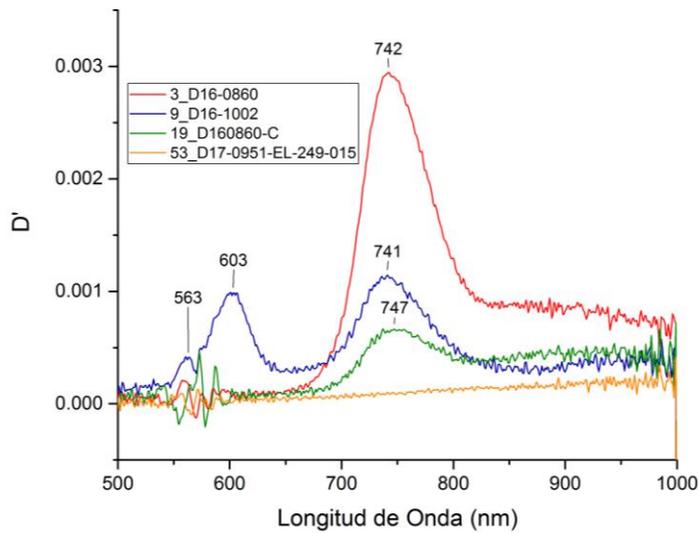
Figura 5-43: Resultados XRF para los fragmentos negros de la temporada 2018, normalizados al Ca

Resultados FORS:

Analizar los pigmentos negros en FORS no debería dar información en la región del visible. Sin embargo, los pigmentos negros de Plaza de las Columnas presentan un par de picos en la región del visible, así como pendientes características identificadas a través del análisis de la primera derivada.



a



b

Figura 5-44: (a) Espectro FORS para los pigmentos negros en el intervalo de 350-1000 nm; (b) espectro de la primera derivada en el intervalo de 350-1000 nm

En la Figura 5-44 se puede apreciar que el fragmento 53_D17-0951-EL-249-015, se comporta como un se esperaría para los pigmentos negros de carbón. Es decir, completamente nulo en la reflectancia. Sin embargo, los demás fragmentos muestran un comportamiento diferente. El primer caso analizado es el del fragmento 9_D16-1002, este muestra tres picos en su derivada, lo cual indica un cambio de pendiente en el espectro. Los primeros dos cambios en 563 nm y 603 nm pueden estar relacionados con los óxidos de Fe, mientras que el cambio de pendiente en 741 nm . Los cambios abruptos de pendiente están usualmente asociados al proceso de transferencia de carga, que para las absorciones de los iones férricos está indicada en $\lambda_m = 750\text{ nm}$ o menores (AUSPEC, 2012). Este mismo cambio se observa también en los espectros de los fragmentos 3_D16-0860 y 19_D16-0860-C.

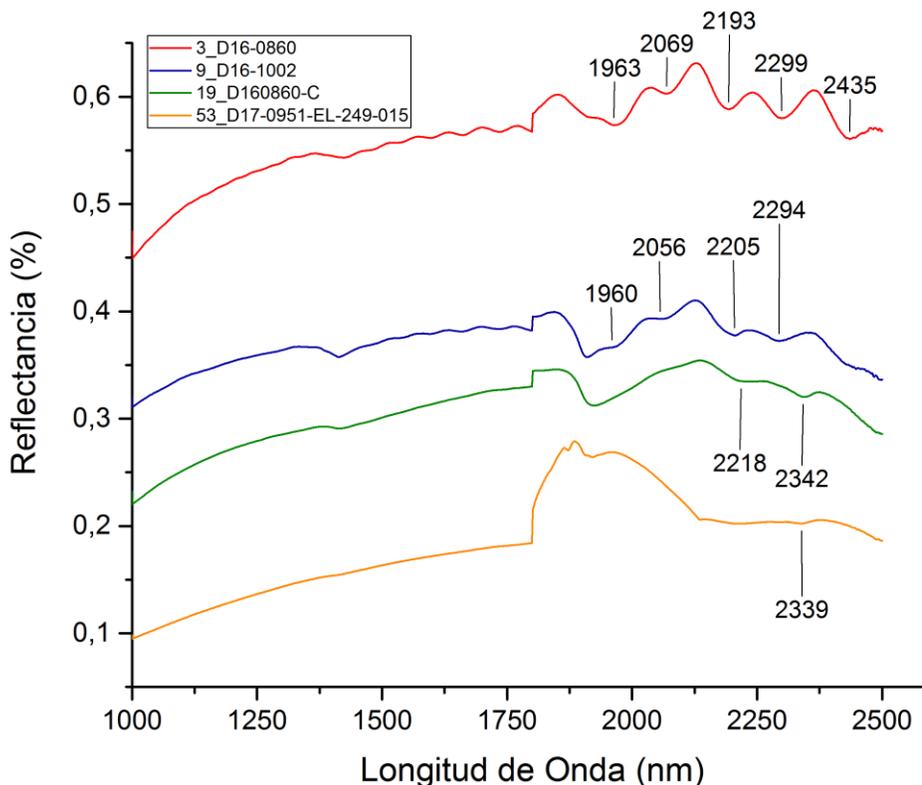


Figura 5-45: Espectro FORS de los pigmentos negros en el intervalo de IRC (1000-2500 nm). Se nota el artefacto en 1800 nm producto del cambio de detector.

En la región del IRC del espectro FORS (Figura 5-45) se distingue que los espectros de los fragmentos 3D, 9D y 19DC presentan bandas en la región de 2300 nm, 2200 nm y 2000 nm. Las bandas en la región de 2000 nm podrían estar asociadas al agua, aunque estos se presentan en menor intensidad que para el caso de las argamasas o enlucidos. Por el otro lado, las bandas en la región de 2300 nm y 2200 nm están indicadas para los compuestos MgOH y FeOH, respectivamente (AUSPEC, 2012).

Lo anterior lleva a pensar en algún material con alta composición en Fe y K, por la identificación elemental. Además, que presente un efecto de transferencia de carga alrededor de 740 nm y tenga algún tipo de absorción para los compuestos FeOH y MgOH. En la discusión de XRF, se había mencionado la posible presencia de una mica. Con la evidencia de FORS, se propone que la Biotita $K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2$, que es el mineral más común del grupo de las micas y un mineral de formación de rocas abundante. Se encuentra en Hidalgo, Baja California, Coahuila, Durango y Oaxaca (Panczner, 1987), siendo las fuentes más cercanas a la zona de Teotihuacan, en el municipio de Huasca de Ocampo y el municipio de Pachuca, ambas en Hidalgo. Sin embargo, existen estudios que identifican la procedencia de la biotita de la región de Oaxaca (Manzanilla et al., 2017). La biotita es una mica de apariencia oscura por su alto contenido en Fe y de lustre vítreo.

La biotita se encuentra caracterizada por su espectro de reflectancia en el Vis-IRC. Ésta muestra bandas en las regiones de 2240 – 2256 nm y en 2320 – 2360 nm (AUSPEC, 2012). Las bandas de la región de 2200 nm presentes en el espectro de los pigmentos negros se encuentran cercanas a la región de absorción de la biotita. Las bandas en la región de 2300 nm coinciden con lo reportado en la literatura. Por último, en el estudio del Vis-IRC para materiales terrestres por medio de espectroscopía de reflectancia, se identifica a la biotita por su absorción en 700 nm producto del proceso de transferencia de carga $Fe^{2+} - Fe^{3+}$ (Karr, 1975), como se puede observar en el espectro de la primera derivada Figura 5-44b, hay picos en la región de 740 nm que podrían asociarse con este proceso para la biotita.

Una posible explicación para el uso de la biotita en los negros puede ser en combinación con algún pigmento de óxido de hierro. La estructura granular que se observa en los pigmentos negros, así como la coloración rojiza que se puede apreciar, se explicaría como producto de la molienda con alguna tierra roja. La biotita es un mineral suave que se puede triturar fácilmente, en la escala de Mohs, la biotita tiene un valor de 2.5 – 3 Mohs. En comparación, la hematita tiene una dureza de 5 – 6 Mohs. Además, la combinación de pigmentos de óxido de hierro con micas, en particular biotita, está reportada para Teotihuacan en pintura corporal (María Luisa Vázquez de Ágredos Pascual & Manzanilla, 2016) para el periodo de Tlamimilolpa-Xolalpan. Si bien estos pigmentos fueron empleados para pintura corporal y las combinaciones de óxidos con mica dan una coloración roja, es posible que una variación en las proporciones de la coloración más oscura. Por supuesto esta hipótesis tendría que comprobarse mediante difracción de rayos-X para encontrar las fases cristalinas de la biotita.

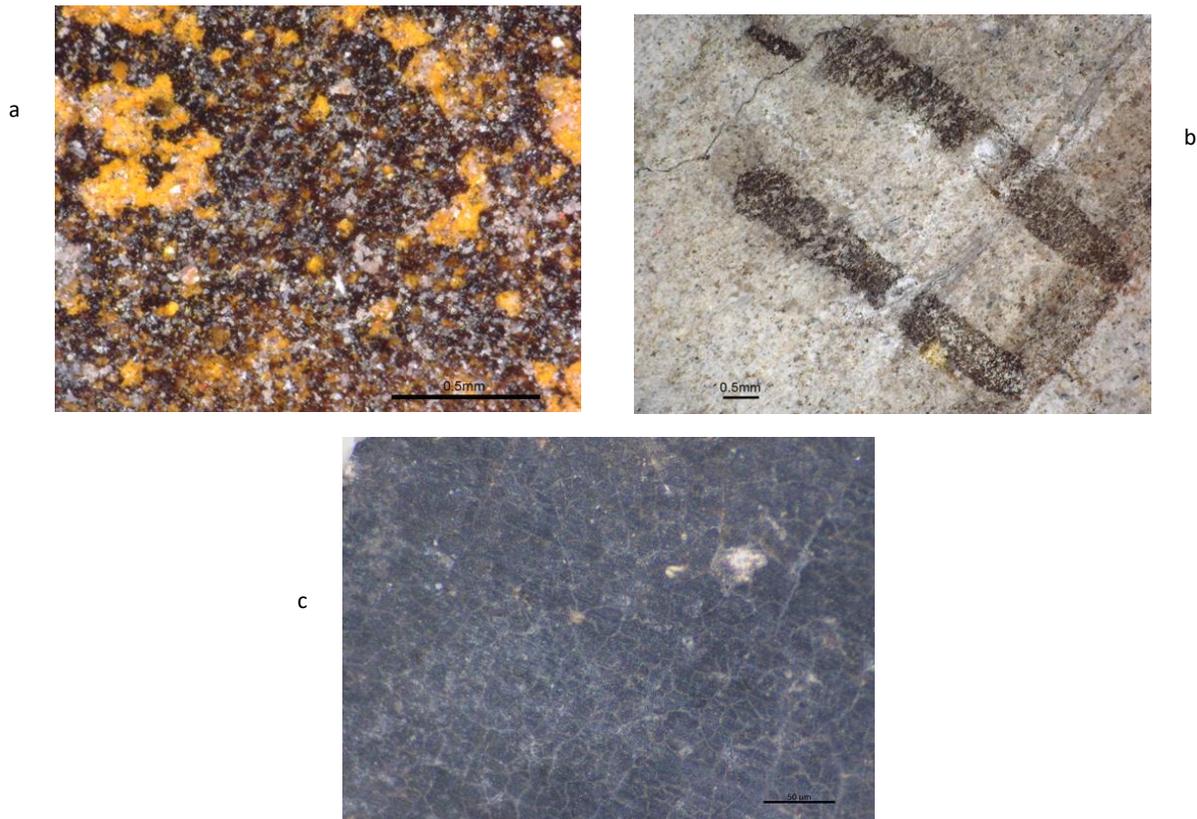


Figura 5-46: Imágenes de microscopio de los fragmentos (a) 40_D17-0685-EL-209-006 (b) EL-D521-020 y (c) 19_D16-0860-C. Microscopías Paulina Guzmán

5.2.3 Ocre y amarillos

Los pigmentos ocre y amarillos se agruparon en la imagen infrarroja de falso color en la región naranja y naranja/amarillo. Esto los agrupa en la región de las tonalidades cálidas. Entre los grupos de imagen infrarroja de falso color agrupa a los pigmentos ocre en ocho sub grupos. De estos grupos, cuatro son aquellos que presentan un cambio en el FC a las tonalidades Amarillo/Verde, Verde, Verde/Amarillo y Verde que son intervalos vecinos. Además, estos grupos están clasificados en el visible como naranjas. Por lo anterior se agruparán como uno solo. Los demás grupos de color únicamente tienen un elemento, por lo que no se tratará a las muestras como parte de un grupo sino como fragmentos individuales. Estos son el fragmento 21_D16-0860-A, 20_D16-0680-B, 49_D17-0951-EL-249-011 y 29_D16-0860-A.

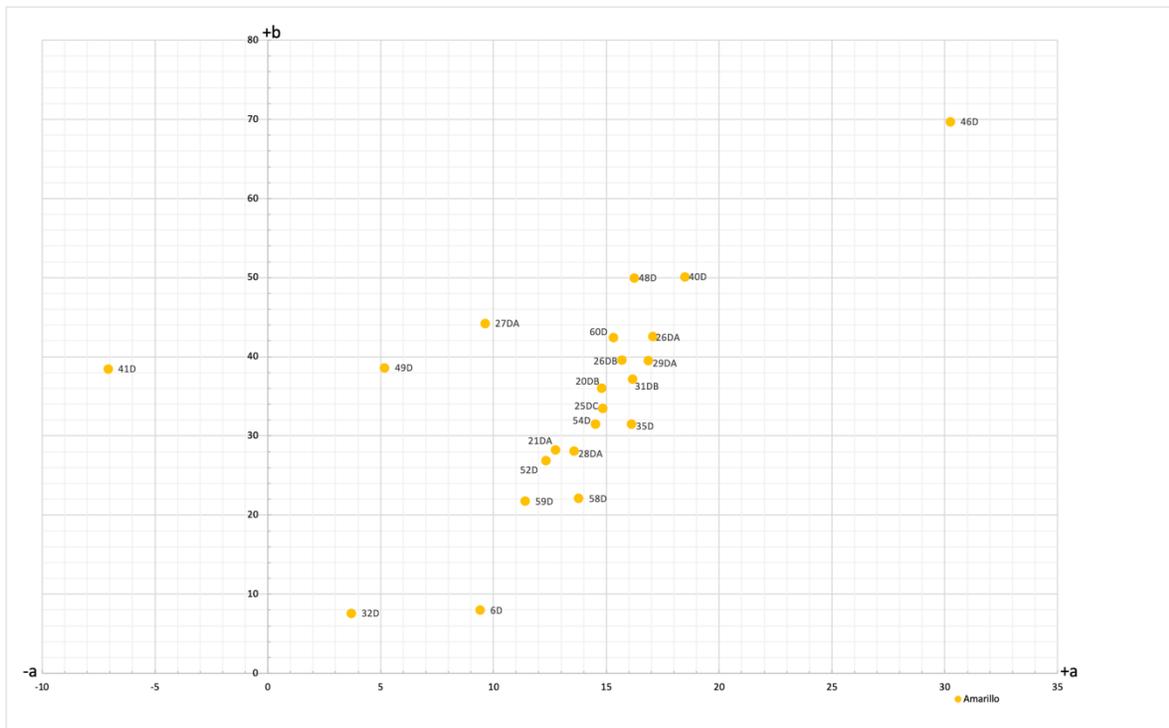


Figura 5-47: Gráfico $a*b^*$ de colorimetría para los amarillos

En el caso de la colorimetría, se puede observar la tendencia de los amarillos a incrementar hacia el valor b^+ (amarillo $L^*a^*b^*$). Además, se observa que, para el grupo más denso de

amarillos, existen dos tendencias de crecimiento. Existen algunos casos aislados, pero en general, la tonalidad de los amarillos está clasificada en los tonos ocres.

Resultados XRF:

En la Figura 5-48, la Figura 5-49, y la Figura 5-50 se aprecian los pigmentos ocres y amarillos para las tres temporadas de excavación respectivamente. El grupo de los ocres y amarillos se distingue por ser uno bastante homogéneo. La mayoría de los fragmentos muestran una abundancia principal de Fe, así como contribuciones minoritarias de los elementos comunes a las tierras. Únicamente destacan cuatro fragmentos con una composición sobresaliente de cobre, un fragmento con presencia importante de estroncio y dos fragmentos con presencia de Hg. A continuación, se discutirán cada uno de esos.

Los fragmentos con una cantidad importante de cobre son el 27DA, el 49D, el I D18-0613-F2 y el D18-0606-F2. Los primeros tres fragmentos son similares en tonalidad amarilla y también tienen un verde similar superpuesto. Esto quiere decir que se están encontrando tres fragmentos del mismo tipo (mismo pigmento amarillo con mismo pigmento verde superpuesto y una composición elemental similar) en tres temporadas de excavación diferentes. Lo anterior es una evidencia más de que los fragmentos a lo largo del frente D tienen una relación entre sí. Por otro lado, el fragmento D18-0606-F2 es un pigmento ocre opaco con pigmento azul cercano a él. Estas dos superposiciones de pigmentos explican la presencia notoria del cobre (Figura 5-53).

El fragmento con presencia de estroncio es el D18-EL-387-038. Este fragmento no presenta características especiales que expliquen la presencia de estroncio. Puede ser que éste aparezca por estar asociado a una sustitución del calcio. Finalmente, los fragmentos que presentan mercurio son porque en ambos casos la capa de pigmento amarillo se presenta superpuesta a una capa de rojo, posiblemente de mercurio (Figura 5-53).

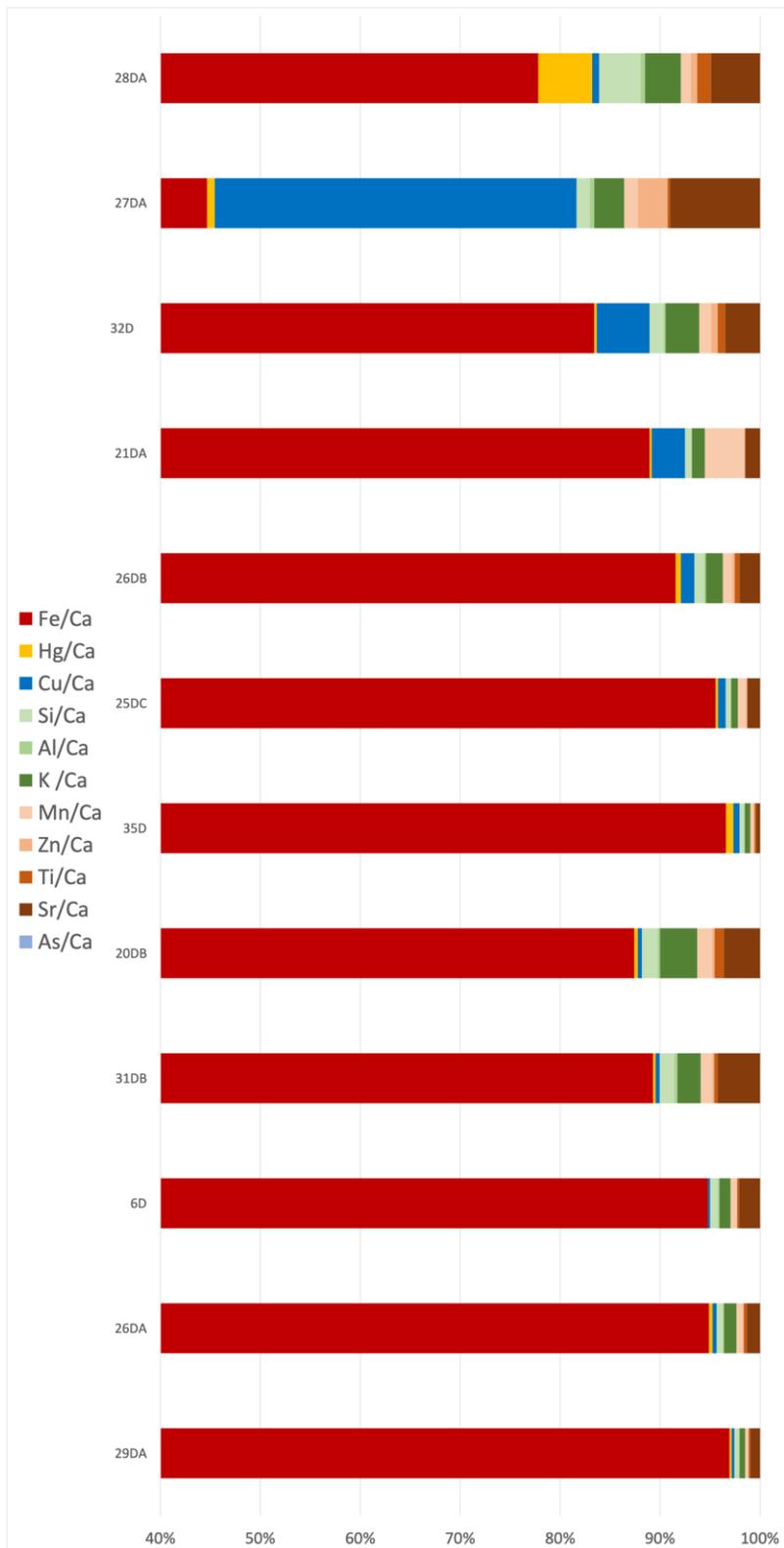


Figura 5-48: Resultados XRF para los fragmentos ocre y amarillo de la temporada 2016, normalizados al Ca



Figura 5-49: Resultados XRF para los fragmentos ocre y amarillo de la temporada 2017, normalizados al Ca

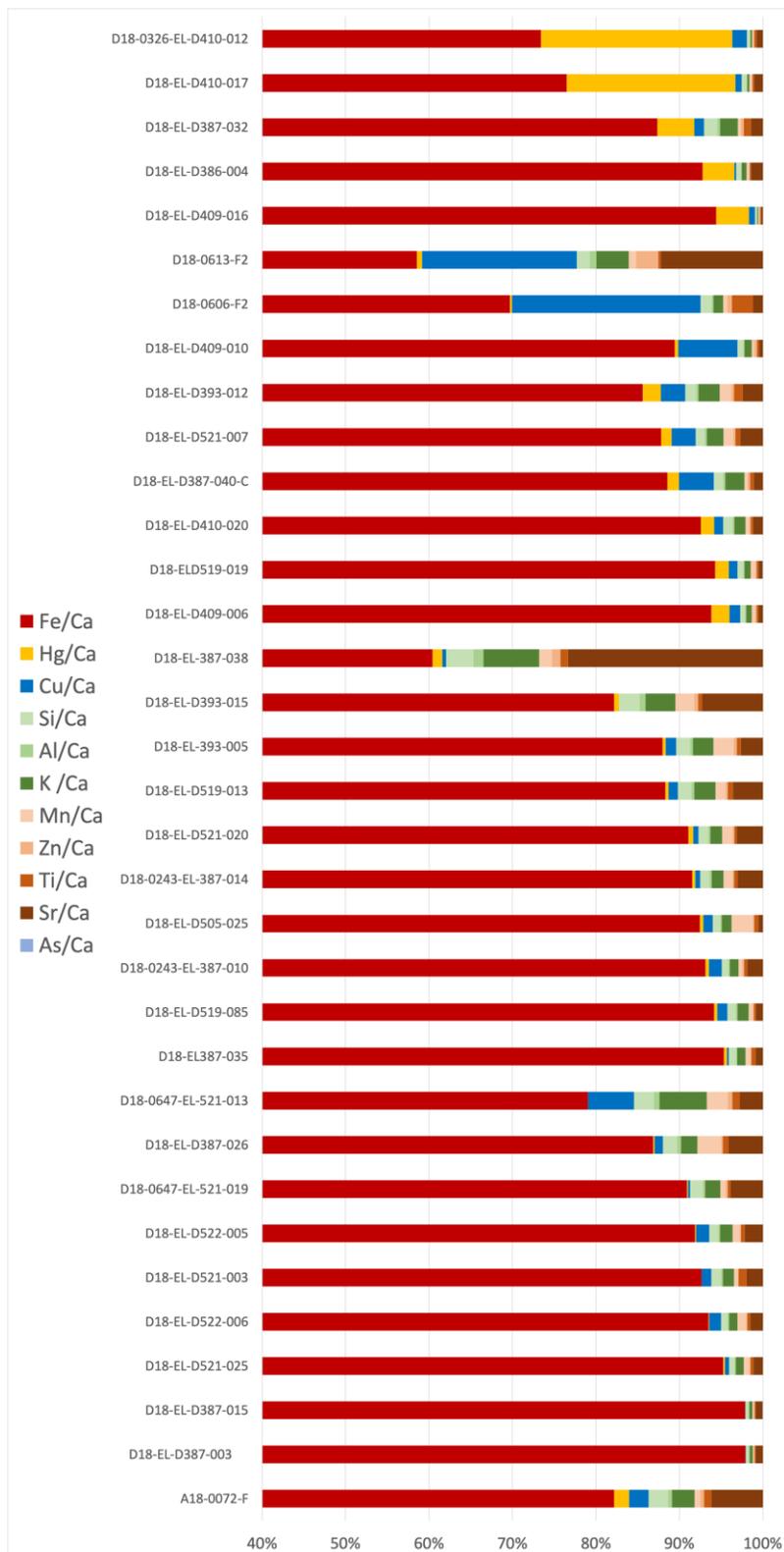


Figura 5-50: Resultados XRF para los fragmentos ocre y amarillo de la temporada 2018, normalizados al Ca

Resultados FORS:

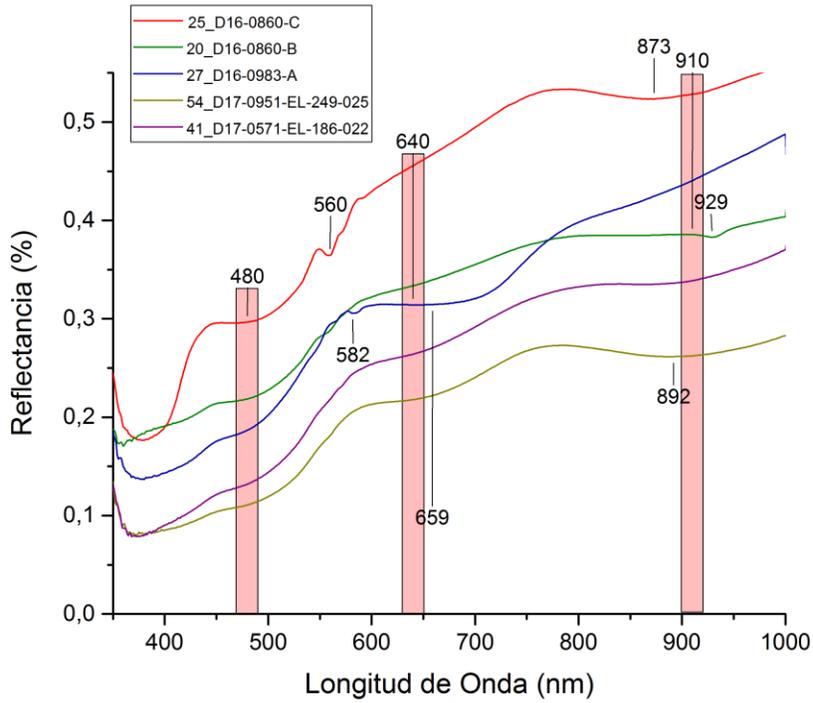


Figura 5-51: Resultados característicos de FORS en el intervalo de 350-1000 nm para los pigmentos amarillos y ocre

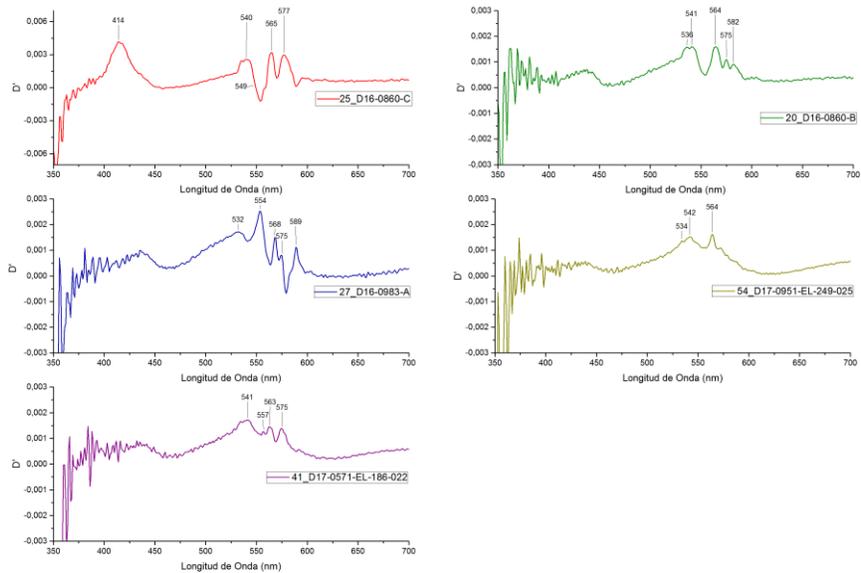
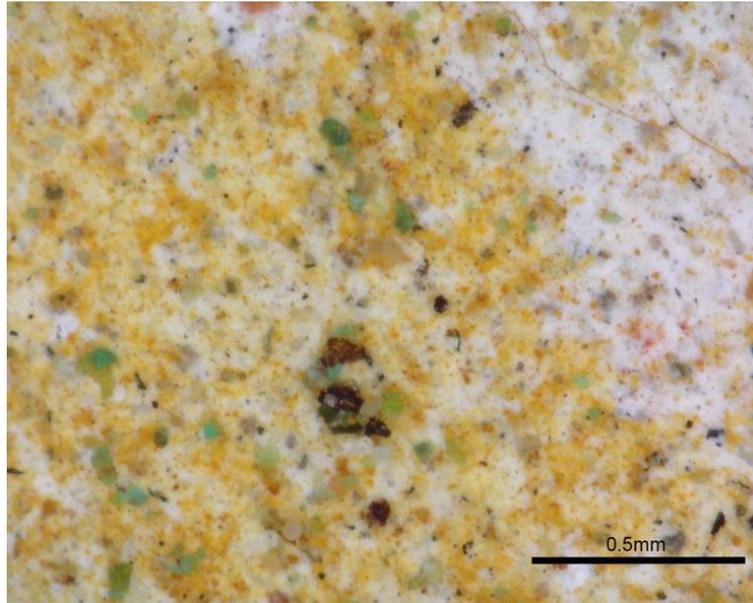


Figura 5-52: Derivadas de los espectros FORS en el intervalo 350-700 nm para los amarillos y ocre.

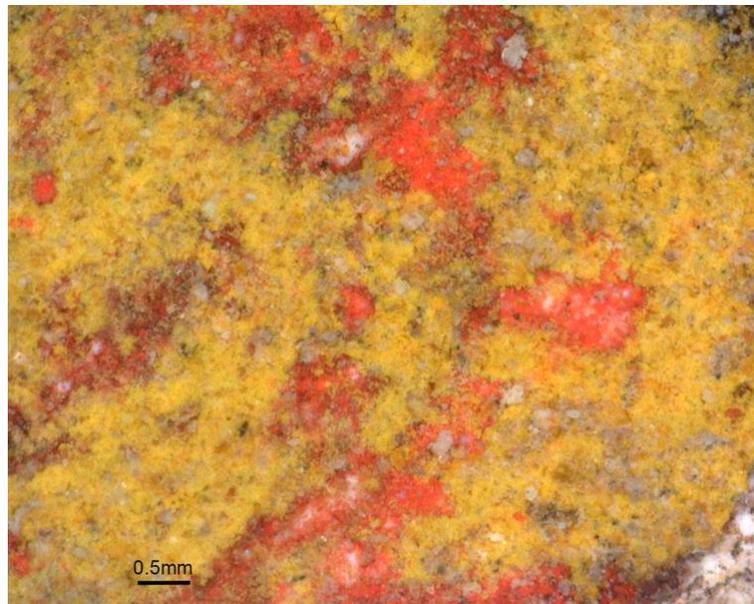
En los espectros FORS (Figura 5-51) se puede observar que las dos absorciones del Fe^{3+} alrededor de 660 nm y $910 - 940 \text{ nm}$ características de la goethita (AUSPEC, 2012; Cheilakou, Troullinos, & Kouli, 2014; Elias, Chartier, Prévot, Garay, & Vignaud, 2006). Además, para el 20_D16-0860-B se identifica un corrimiento de la banda de 910 nm a 929 nm , según el trabajo de E. Cheilakou (2014), este corrimiento es debido a la presencia de caolinita en la mezcla del pigmento debido a una sustitución Al-Fe.

Se identificaron también los picos en la derivada cercanos al 550 nm (Figura 5-52) que identifican el punto de inflexión característico de la goethita relacionado con el proceso de transferencia de carga (Elias et al., 2006). Finalmente también se puede observar una absorción alrededor de los 480 nm que corresponde a otro proceso de transición de electrones para la goethita (Cheilakou et al., 2014).

Con la evidencia obtenida hasta ahora, las altas cantidades de Fe y las bandas de la goethita identificadas en FORS, es posible decir que los pigmentos ocre y amarillos de Plaza de las Columnas están compuestos por goethita o alguna tierra ocre rica en este mineral y combinada con caolinita o alguna arcilla similar. Este tipo de pigmentos han sido identificados en Teotihuacan previamente (Doménech-Carbó et al., 2012; López Puertolas, 2017). Sin embargo, este tipo de pigmento para los amarillos fue identificado en núcleos de pigmento. Además, D. Magaloni (1996) únicamente reporta el uso de ilmenita para las fases técnicas de la pintura mural teotihuacana. Por otro lado, el uso de goethita en pintura mural ha sido reportado en el área maya (Vandenabeele, Bodé, Alonso, & Moens, 2005; M^a Luisa Vázquez de Ágredos Pascual et al., 2014).



a



b

Figura 5-53: Microscopía de los fragmentos (a) 49_D17-0951-EL-249-011 y (b) D18-0326-EL-D410-012. Microscopías Paulina Guzmán

5.2.4 Rojos

El grupo de los rojos es el más abundante en los fragmentos. El rojo es, por mucho, el pigmento más utilizado en los fragmentos analizados. Se encuentra tanto en detalles como en fondos. A priori los rojos se pueden dividir en dos grandes grupos, unos de tono más oscuro y otros brillantes de tono cercano al naranja. Ambos son utilizados en gran proporción y indiscriminadamente en los fondos. Esto resulta interesante ya que según las fases técnicas de D. Magaloni, los fondos rojos teotihuacanos tienen una coloración guinda y se comienzan a utilizar en la tercera fase correspondiente al periodo Tlamimilolpa y Xolalpan temprano.

El falso color permite concentrar a los pigmentos rojos en tres grupos. Los primeros son aquellos rojos que tienen un cambio en el FC al naranja o naranja/amarillo. Estos son rojos más oscuros y de tonalidades profundas. El otro gran grupo lo forman aquellos rojos que pasan al naranja/amarillo, amarillo y amarillo/verde. Este segundo grupo es el formado por los rojos brillantes. Finalmente están aquellos rojos que tienen una caracterización en el matiz de intervalo del visible en el rojo/naranja y en el FC pasan al rojo.

Posteriormente con la colorimetría se corroboraron estos tres grupos, clasificándolos a manera más intuitiva como: rojo, naranja y café. Los valores colorimétricos de estos grupos se encuentran en la Figura 5-54. Se puede apreciar que los rojos se encuentran en la región cercana al origen mientras que los rojos brillantes (naranjas) están más alejados. Así mismo, los cafés se encuentran cercanos al eje b^* el cual representa a los amarillos.

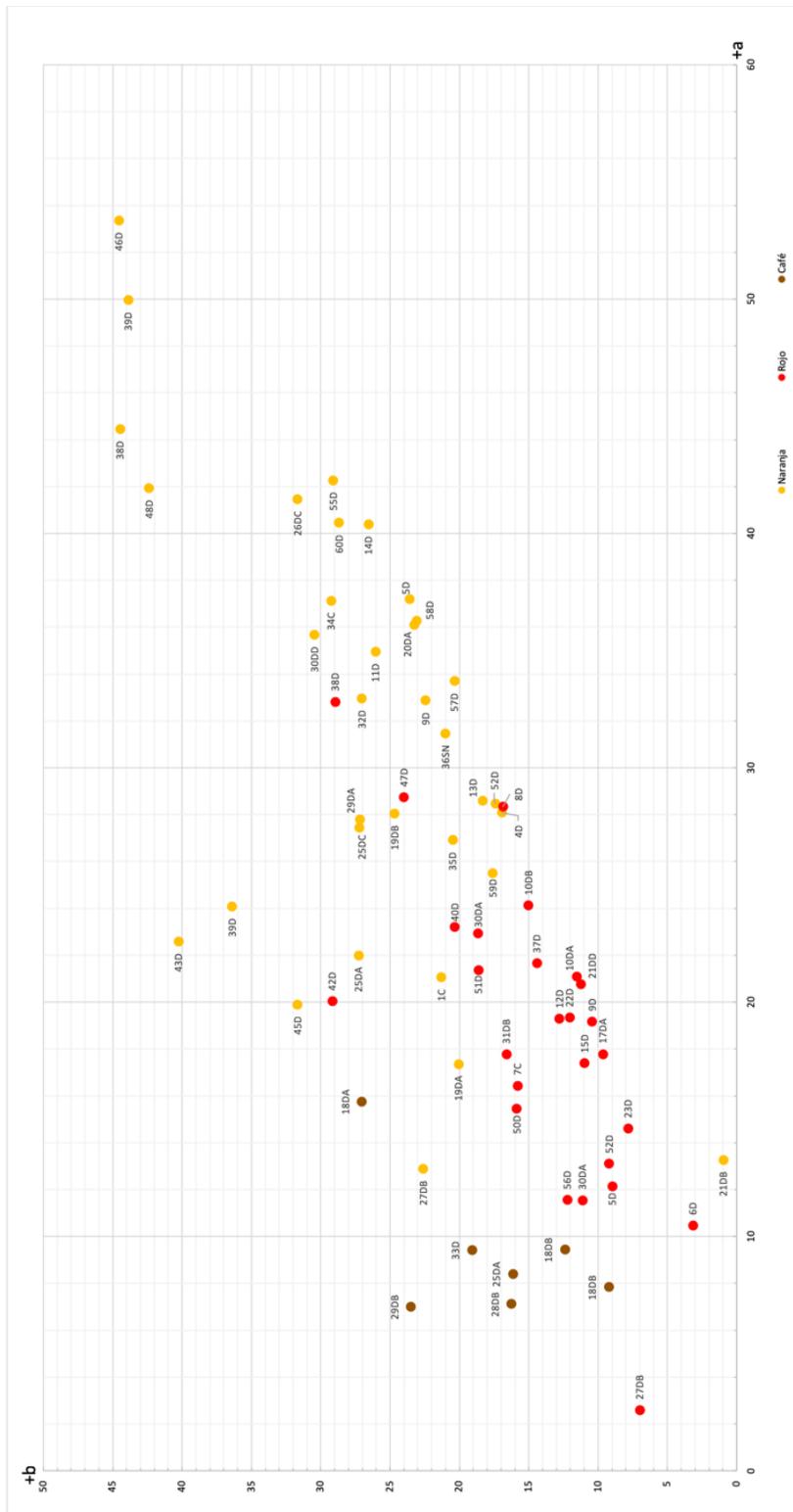


Figura 5-54: Valores colorimétricos a*b* para los rojos

Resultados XRF:

En la composición elemental se logran distinguir los tres grupos formados por colorimetría. Además, se pueden observar diferentes subgrupos dentro de estos. Comenzaremos discutiendo los pigmentos cafés que son los más heterogéneos en su composición elemental. Estos fueron encontrados únicamente en las temporadas 2016 y 2018 de los fragmentos analizados (Figura 5-55, Figura 5-57). Los de la temporada 2016 presentan una composición elemental principalmente conformada por Fe, salvo dos casos donde el Hg y el Cu son elementos principales respectivamente. Esos dos casos especiales se deben a la presencia de pigmento rojo y verde. Los pigmentos cafés destacan por un contenido alto en elementos característicos de las tierras y las arcillas, por lo cual es posible que estos fueran en un inicio rojos y se combinaran con alguna tierra para opacarlos.

El caso de los cafés de 2018 es representativo por el alto contenido en Cu. Esto se debe a que los pigmentos cafés de la temporada 2018 en realidad son verdes desgastados los cuales adquieren una coloración opaca.

El siguiente gran grupo es aquel de los rojos. En las tres temporadas se puede observar el mismo comportamiento, ya que los rojos están principalmente compuestos de Fe y tienen algunos fragmentos con presencia de Cu y Hg (Figura 5-56). Los agregados en los rojos son pocos; posiblemente lo que se logra notar son algunos agregados a la mezcla para dar un acabado brillante. Estas contribuciones no pueden ser de la capa de enlucido, porque como ya se demostró en la sección A.2 los elementos ligeros no logran salir más profundo que el grosor de la capa de pigmento. Esto es debido a que en los fragmentos se encuentran partículas de pigmento verde en la capa pictórica, como se puede apreciar en la (Figura 5-60).

Los rojos compuestos de Fe únicamente tienen superficies lisas y se pueden apreciar constantemente las inclusiones de algún material de apariencia laminar, negro y con tamaños de alrededor de $\sim 0.05\text{ mm}$. Esto se puede apreciar en las imágenes de microscopía en la (Figura 5-60).

Finalmente se encuentra el grupo de los naranjas, estos presentan un tono rojizo y brillante. Ellos están compuestos principalmente por Hg, aunque se logran apreciar algunos que presentan una mayor cantidad de Fe. Esta distribución se reconoce para todas las temporadas de excavación. Los rojos de mercurio con presencia de Cu son pocos y se debe a la inclusión de algunas partículas verdes en el pigmento.

Los rojos que tienen una combinación de Hg con Fe, posiblemente se deban a la combinación de dos tipos de pigmento para lograr obtener una coloración diferente. Los fragmentos 29DA, 25DC y 35D (Figura 5-55) presentan este tipo de combinación, además en la técnica de FC son identificados en un grupo diferente a aquellos pigmentos que tienen una alta cantidad de Hg. Estos pigmentos tienen un acabado de superficie granular, aunque de grano muy fino y únicamente se logra reconocer por la dispersión que se puede apreciar en las microscopías (Figura 5-60). A diferencia del acabado en los pigmentos de Fe, éste no parece estar pulido para obtener un lustre.

Entre los resultados encontrados para la temporada 2018, destaca un solo fragmento que tiene una coloración rosa. Usualmente los rosas están compuestos por una combinación de minerales ricos en Fe y Ca. Sin embargo, como se logra apreciar en la Figura 5-57, el pigmento rosa tiene igual cantidad de Fe que de Hg. Esto lleva a pensar que el rosa es una combinación de los tres pigmentos y no solo dos. Hacen falta más análisis para poder determinarlo con certeza.

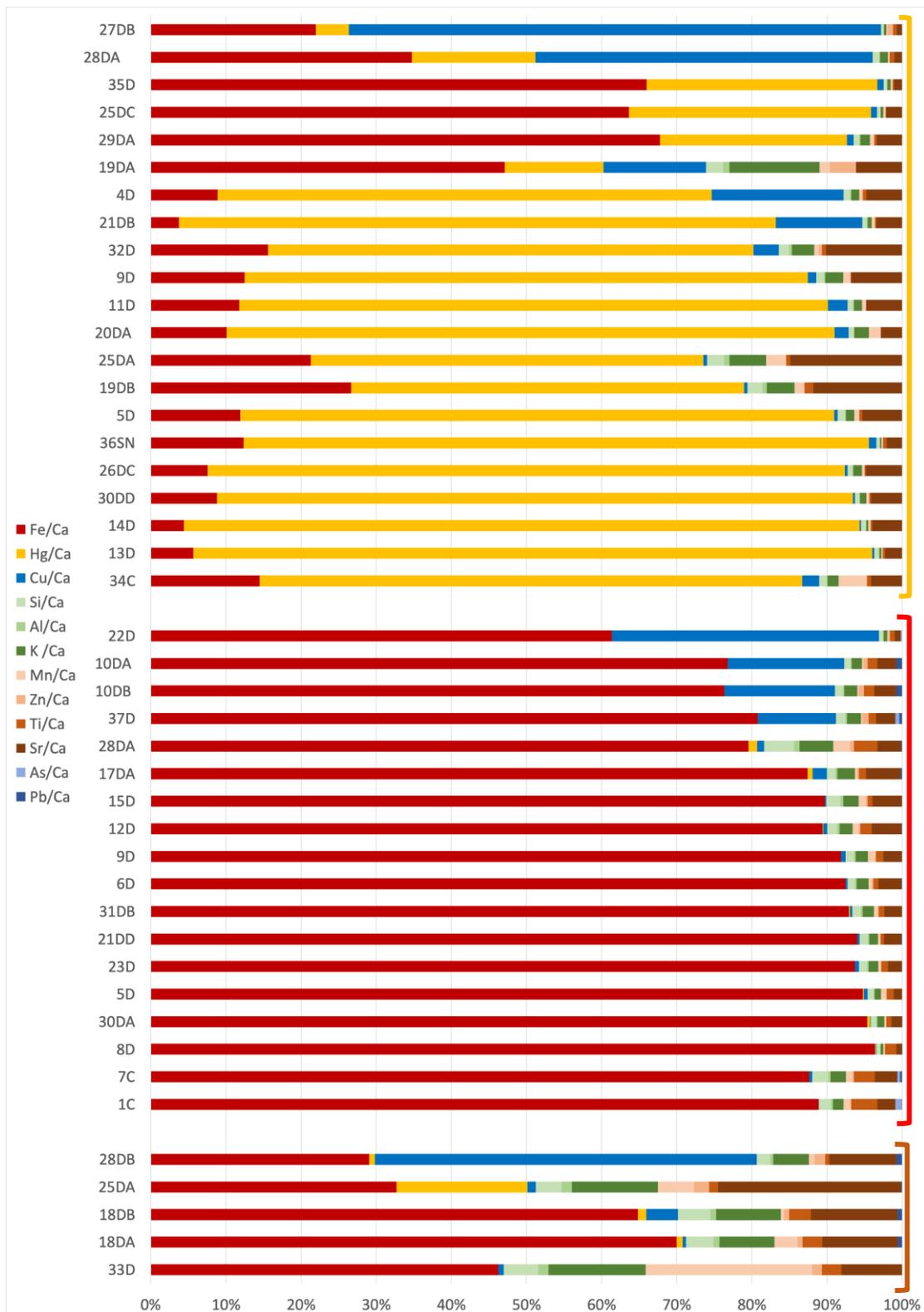


Figura 5-55: Resultados XRF para los fragmentos rojos (enmarcados en rojo), naranjas (enmarcados en amarillo) y cafés (enmarcados en café) de la temporada 2016, normalizado al Ca

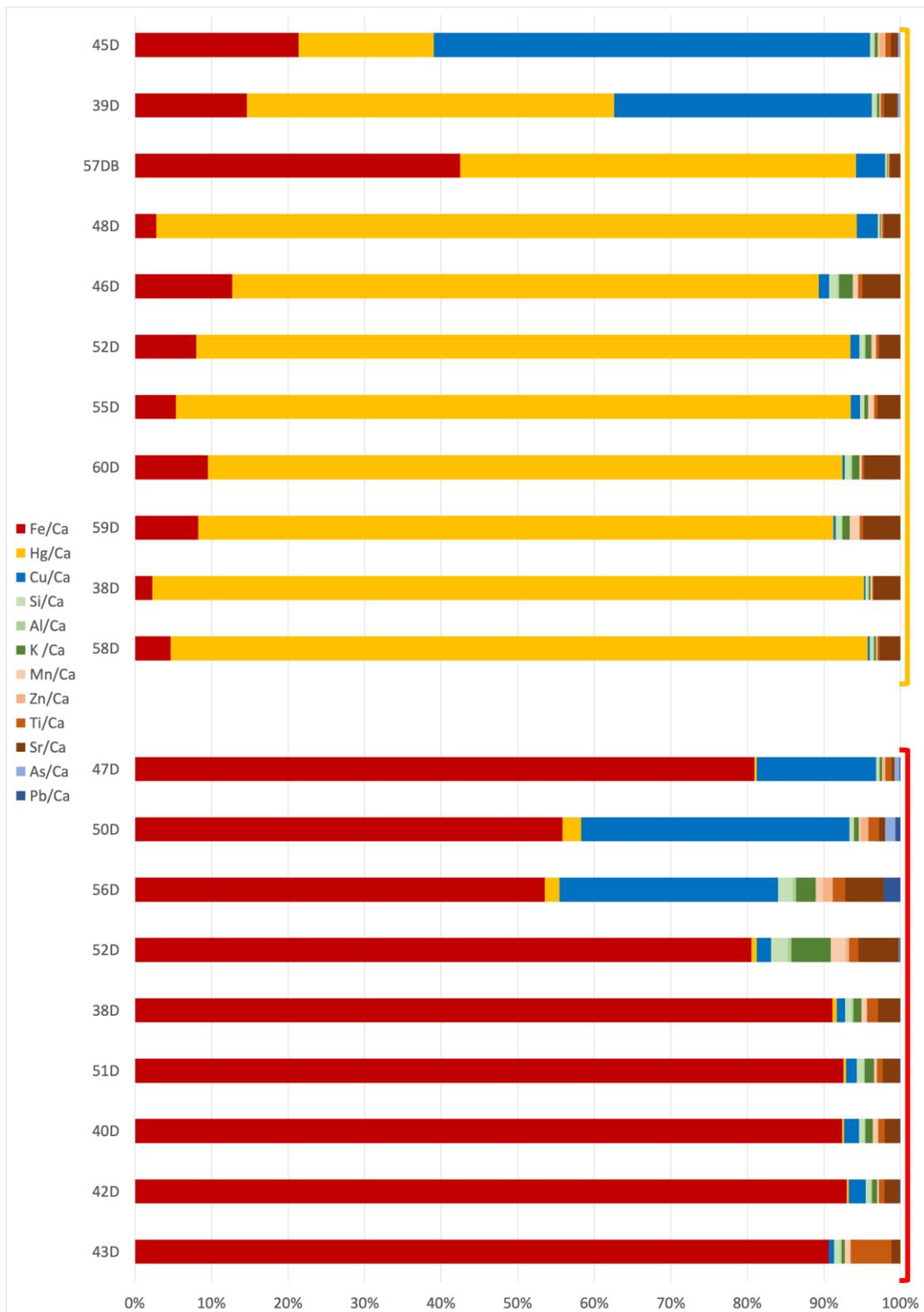


Figura 5-56: Resultados XRF para los fragmentos rojos (enmarcados en rojo) y naranja (enmarcados en amarillo) de la temporada 2017, normalizado al Ca

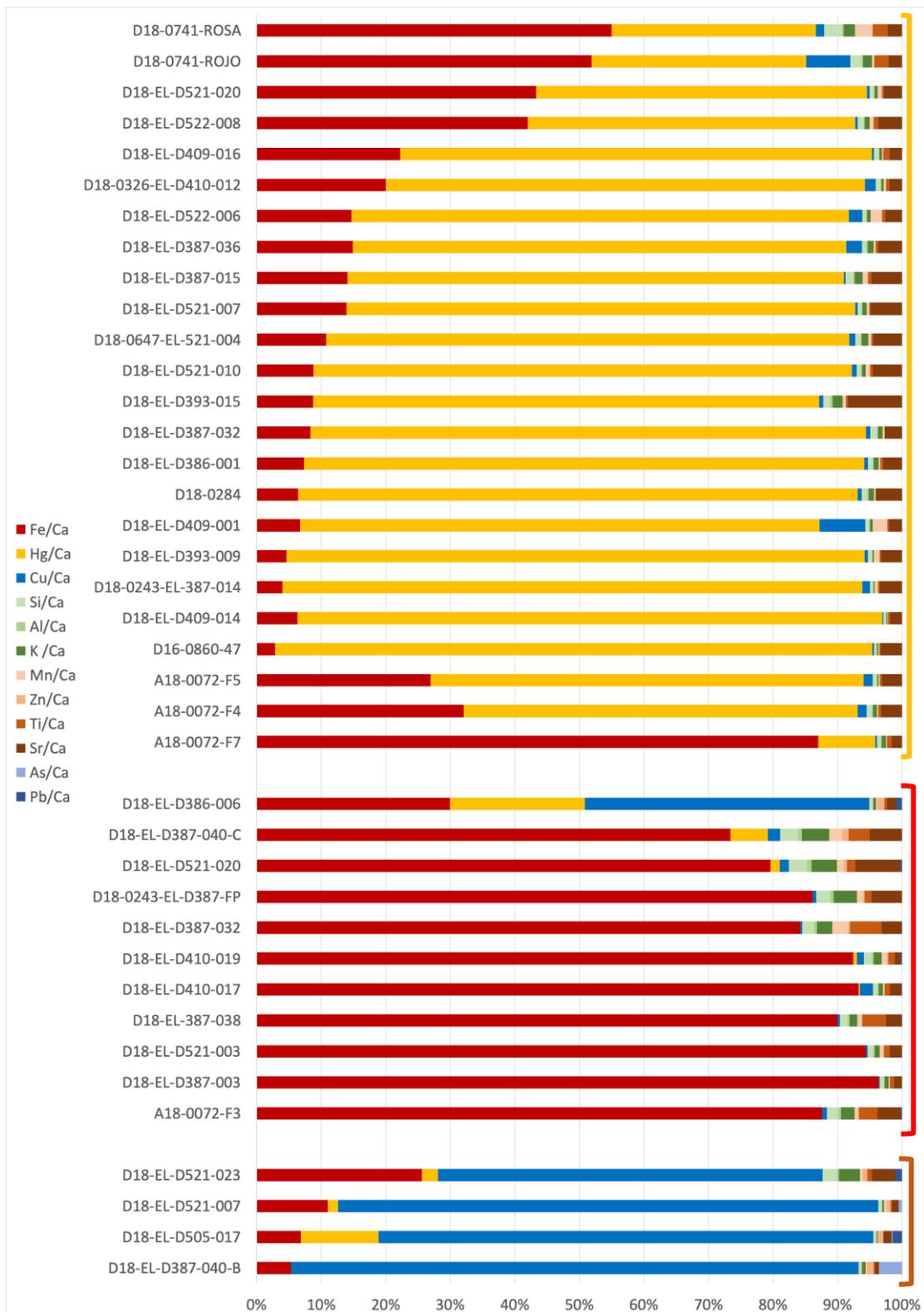


Figura 5-57: Resultados XRF para los fragmentos rojos (enmarcados en rojo), naranjas (enmarcados en amarillo) y cafés (enmarcados en café) de la temporada 2018, normalizado al Ca

Resultados FORS:

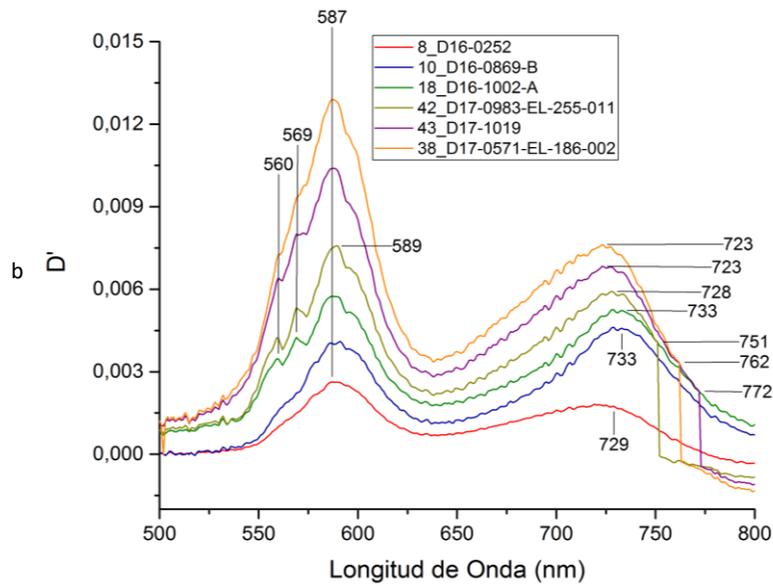
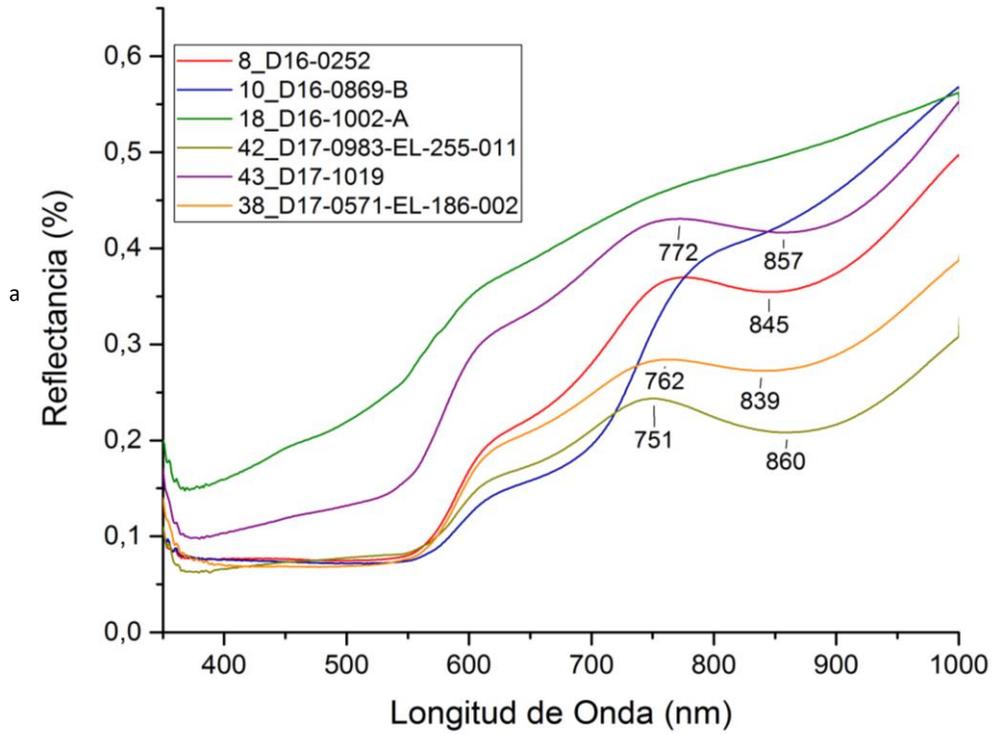


Figura 5-58: Resultados FORS de los rojos de Fe, en (a) espectro de reflectancia de 350-1000 nm y (b) derivada del espectro de reflectancia en el intervalo de 500-800 nm

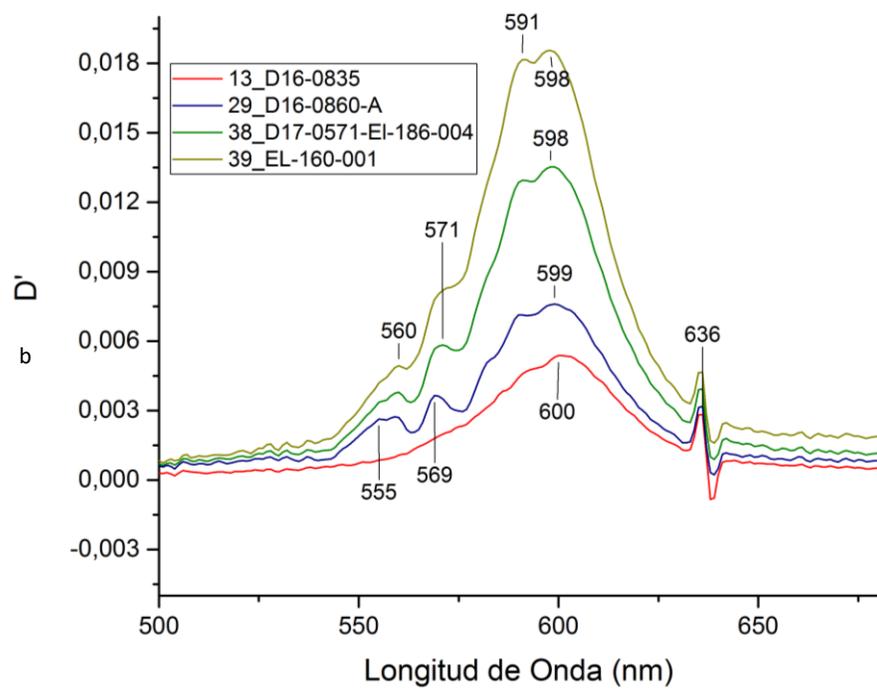
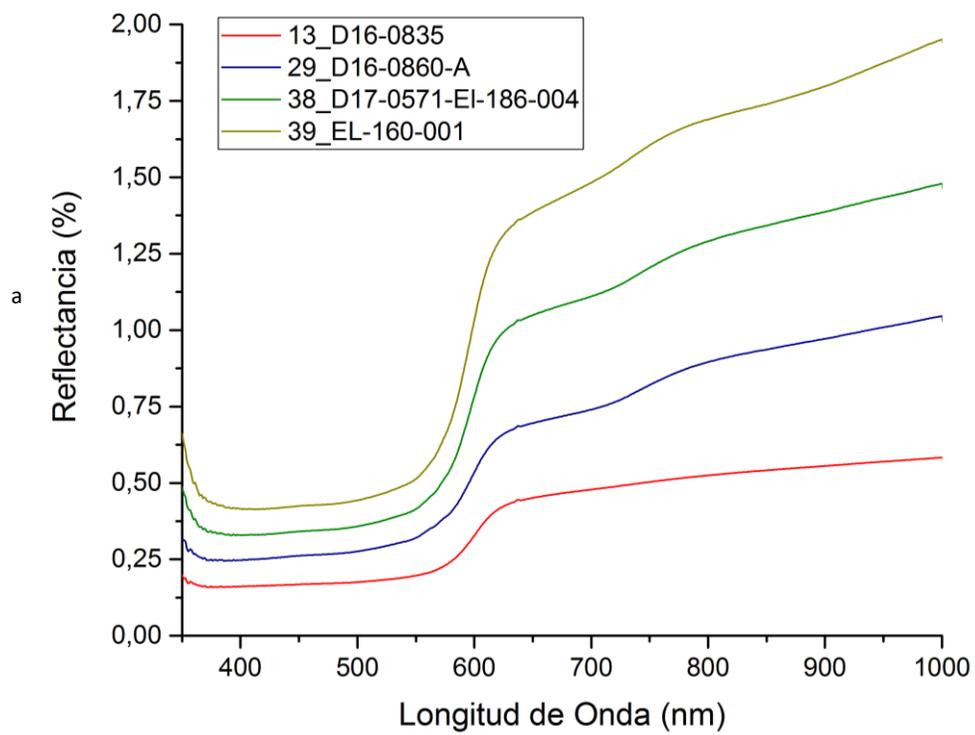


Figura 5-59: Resultados FORS para los rojos de Hg, en (a) espectro de reflectancia de 350-1000 nm y en (b) derivada de los espectros de reflectancia en el intervalo 500-700nm

Los espectros de reflectancia para ambos pigmentos rojos fueron analizados en el intervalo de 350 – 1000 *nm* y para ambos casos, dos tipos diferentes de pigmentos se lograron identificar.

El primer grupo se caracteriza por tener un punto de inflexión en ~ 580 *nm*. Los puntos de inflexión indican una pendiente, este tipo de señal está relacionada con el proceso de transferencia de carga de los óxidos de hierro (AUSPEC, 2012). El valor del punto de inflexión para la transferencia de carga característico de la hematita se encuentra en 580 *nm* (Elias et al., 2006). Además, este mineral presenta un máximo en 730 *nm* (Elias et al., 2006) y en el espectro de reflectancia (Figura 5-58) se puede apreciar que hay un máximo de 750 – 770 *nm*. Finalmente, la hematita tiene una absorción característica debido a una transición electrónica en ~ 840 *nm* (Cheilakou et al., 2014). Los espectros de reflectancia para los pigmentos de Plaza de las Columnas muestran una banda de absorción en 840 – 860 *nm*. De acuerdo con el manual de campo Auspec, esta absorción es la que discrimina a la hematita de la goethita (AUSPEC, 2012).

Por otro lado, están los pigmentos rojos de Hg (Figura 5-59). En el espectro de reflectancia estos aparentan tener el mismo comportamiento. Sin embargo, en la gráfica de la derivada se logran diferenciar dos tipos de comportamientos: uno con únicamente dos picos y el otro con cuatro picos. Todos los pigmentos comparten el pico en ~ 600 *nm* que corresponde a un punto de inflexión en esa longitud de onda para el espectro de reflectancia. También todos tienen un mínimo local en el espectro de reflectancia en 636 *nm*, este fue identificado a partir del criterio de la primera derivada.

En los materiales semiconductores, los electrones se encuentran en la banda de valencia y necesitan una cantidad de energía para pasar al estado excitado y entrar a la banda de conducción. Este tipo de transiciones son representadas como una función escalón, en donde al salto de energía se le conoce como *band-gap*. La reflectancia es una buena forma de identificar materiales semiconductores (López & Gómez, 2012; Nowak, Kauch, &

Szperlich, 2009). Para los semiconductores el *band gap* corresponde a las longitudes de onda del visible y el infrarrojo cercano (Clark, 1995). En particular el cinabrio (HgS) tiene una pendiente pronunciada en la región de 600 nm (Cheilakou et al., 2014). Como ya se mencionó, todos los espectros tienen una pendiente pronunciada en 600 nm, identificando así a los pigmentos rojos de Hg como cinabrio.

Sin embargo, algunos de los pigmentos rojos de cinabrio tienen otros picos en la derivada que no son características de este material en ~560 nm y ~570 nm. Estos mismos picos también se pueden observar en la derivada de los rojos de hematita Figura 5-58b. Es posible que algunos pigmentos rojos fueran mezclados para obtener una coloración especial. Esto podría comprobarse mediante la separación de ambas fases con la teoría de Kubelka-Munk (Dupuis & Menu, 2006; Koirala et al., 2008), además de la medición de concentración de elementos en fluorescencia de rayos-X por medio de referencias del NIST.

De acuerdo con D. Magaloni (1996), en Teotihuacan el uso del rojo estaba principalmente a los dibujos preparatorios, contornos, pinturas bícromas y fondos *rojos teotihuacanos*. El llamado rojo teotihuacano está identificado en diversas pinturas murales en la metrópoli y su composición es del mineral de hematita o hematita especular. Se emplea principalmente en los fondos a partir de la II fase técnica de la pintura mural teotihuacana. En los fragmentos de plaza de las columnas se encontraron fondos rojos de hematita con algunas inclusiones laminares de color negro.

Por otro lado, el cinabrio fue identificado en gran cantidad de los fragmentos analizados de Plaza de las Columnas. El uso de este material también está reportado en Teotihuacan, para diversos contextos, incluido el de pintura mural (Conides, 1997; Gazzola, 2009; Gómez-Chávez et al., 2017; María Luisa Vázquez de Ágredos Pascual & Manzanilla, 2016). Sin embargo, el cinabrio en los fragmentos de Plaza de las Columnas está siendo utilizado también como fondo. Esto rompe con la tradición teotihuacana de fondos rojos de hematita. Además, el cinabrio está siendo aplicado, en algunos casos, directamente sobre

el estuco, sin una capa de hematita como lo sugiere J.Gazzola (2009). Esta última es otra de las características sobresalientes del mural encontrado en Plaza de las Columnas. El uso de un material tan limitado y el rompimiento de las normas estilísticas de la metrópoli sugieren que el grupo que mandó pintar este mural, era un grupo de élite.

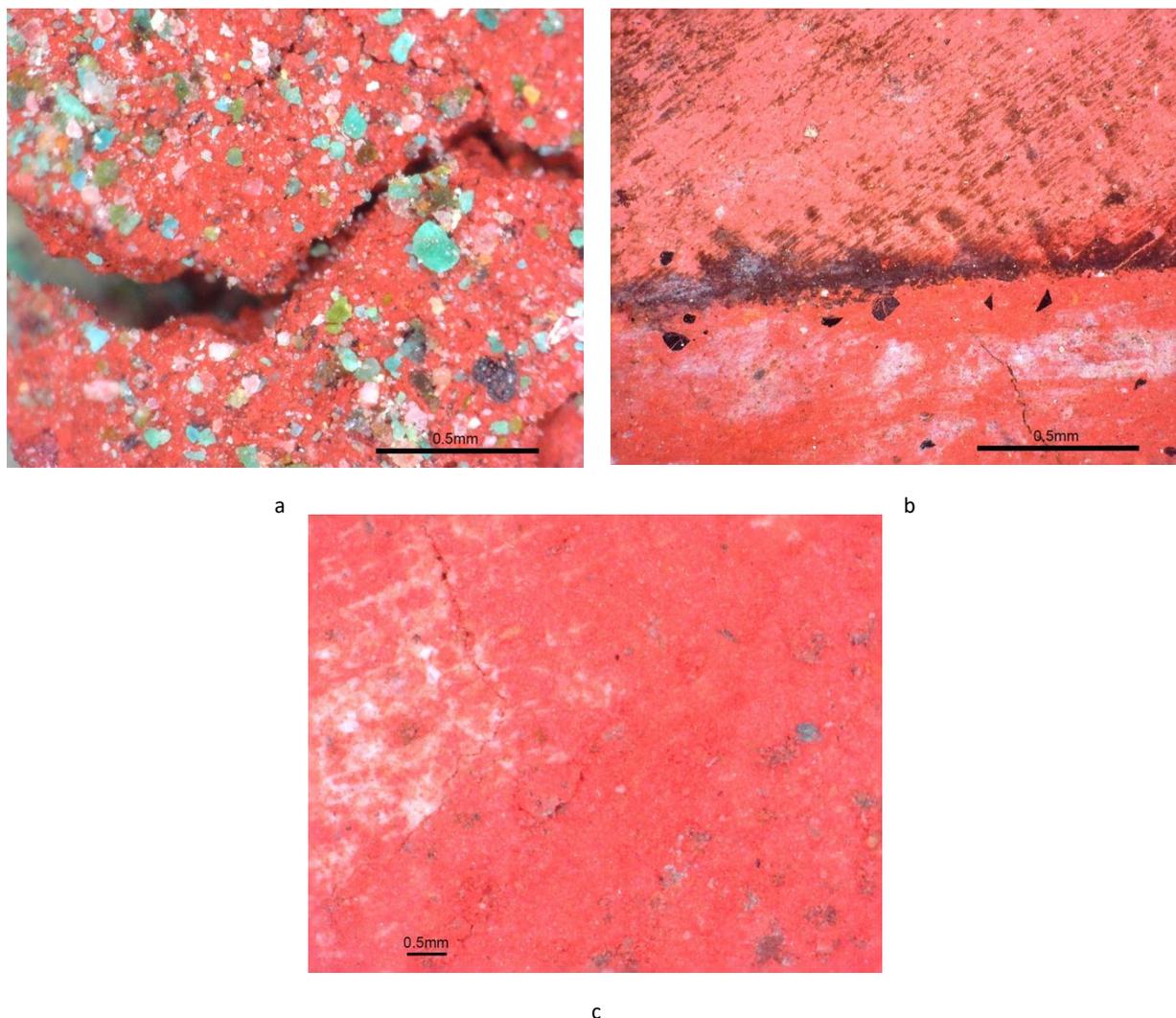


Figura 5-60: Microscopías de los fragmentos (a) 47_D17-0983-EL-255-014, (b) EL-D386-003 y (c) 38_D17-0571-EL-186-002. Microscopías Paulina Guzmán

5.2.5 Verdes

El grupo de los verdes en falso color fue identificado en tres grandes grupos: verde/amarillo, verde y verde/cian. Estos se encuentran en la región de las tonalidades frías. Entre los pigmentos verdes y azules, el verde es el más representado. Los verdes parecen estar siendo utilizados de dos maneras distintas, como pigmentos en superficie o bien como fondos que luego fueron pintados con rojo.

Además, se lograron clasificar de manera visual tres niveles de molienda de grano en los verdes. Esto resulta interesante porque también parece estar asociada al color. Los verdes con un acabado granular están poco adheridos a los soportes. Esto pudo haber sido por el tipo de aglutinante usado y su desgaste a lo largo del tiempo.

Por otro lado, la clasificación colorimétrica muestra que todos los verdes se encuentran alrededor de la región central y en el caso de los verdes, muestran una tendencia hacia los amarillos. Esto resulta interesante ya que los pigmentos con una tendencia amarilla son aquellos de una tonalidad más clara. Los verdes de tonalidad opaca tienen una tendencia a los rojos y finalmente los verdes oscuros brillantes tienen una tendencia a crecer hacia la tonalidad verde del sistema CIE $L^*a^*b^*$.

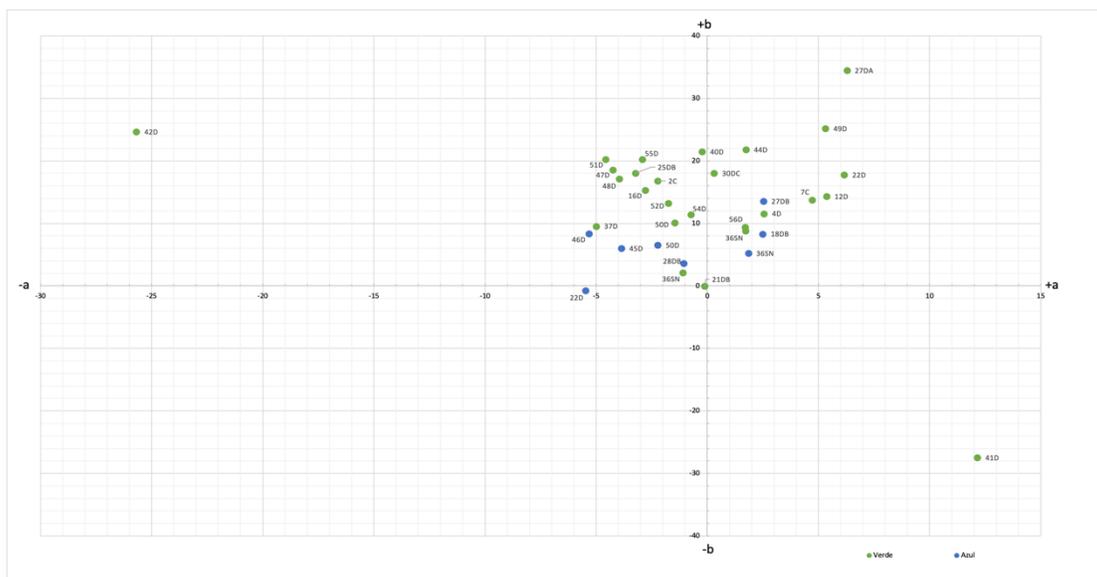


Figura 5-61: Gráfica colorimétrica a^*b^* de los pigmentos verdes y azules

Resultados XRF:

Los resultados de fluorescencia muestran que la composición elemental de los verdes es principalmente de cobre (Figura 5-62, Figura 5-63, Figura 5-64). Algunos de ellos tienen Fe y Hg. Como ya se discutió en las secciones anteriores, este tipo de elementos son debidos a la presencia de los pigmentos rojos de hematita y cinabrio, ya que muchos de los pigmentos verdes se encuentran superpuestos a una capa roja de fondo.

Destacan los fragmentos 12_D16-0983 y D18-0741 por el contenido de hierro por encima de la distribución del promedio. Esto puede ser debido a que ambos se encuentran combinados con una serie de materiales que podrían ser tierras. Es necesario realizar un estudio más a fondo para poder determinarlo con precisión.

Como ya se mencionó, se identificaron tres distintos tipos de verdes (Figura 5-67). Sin embargo, estas diferencias no se ven representadas en la composición elemental. Lo anterior lleva a pensar que la diferencia en pigmento se debe más bien al tipo de molienda y los agregados y no necesariamente a la composición elemental. Las diferencias en molienda para los verdes están reportadas para la segunda y tercera fase técnicas de D. Magaloni. Esto coincide con la datación de los murales de Plaza de las Columnas, Tlamimilolpa-Xolalpan.

En la identificación elemental destacan dos características que separan a los verdes de los demás pigmentos analizados. Esto es la constante presencia de As y P, este tipo de impurezas se han detectado también en otros estudios arqueométricos en Teotihuacan (Martínez García, Ruvalcaba Sil, Manzanilla, et al., 2012). Ambos elementos pertenecen a un mismo grupo en la tabla periódica, por lo cual, mineralógicamente hablando pueden existir sustituciones entre ellos. A partir de los resultados obtenidos en fluorescencia se podría considerar la posible presencia de conicalcita ($\text{CaCuAsO}_4(\text{OH})$), reportada previamente para el conjunto de Xalla (López Puertolas, 2017).

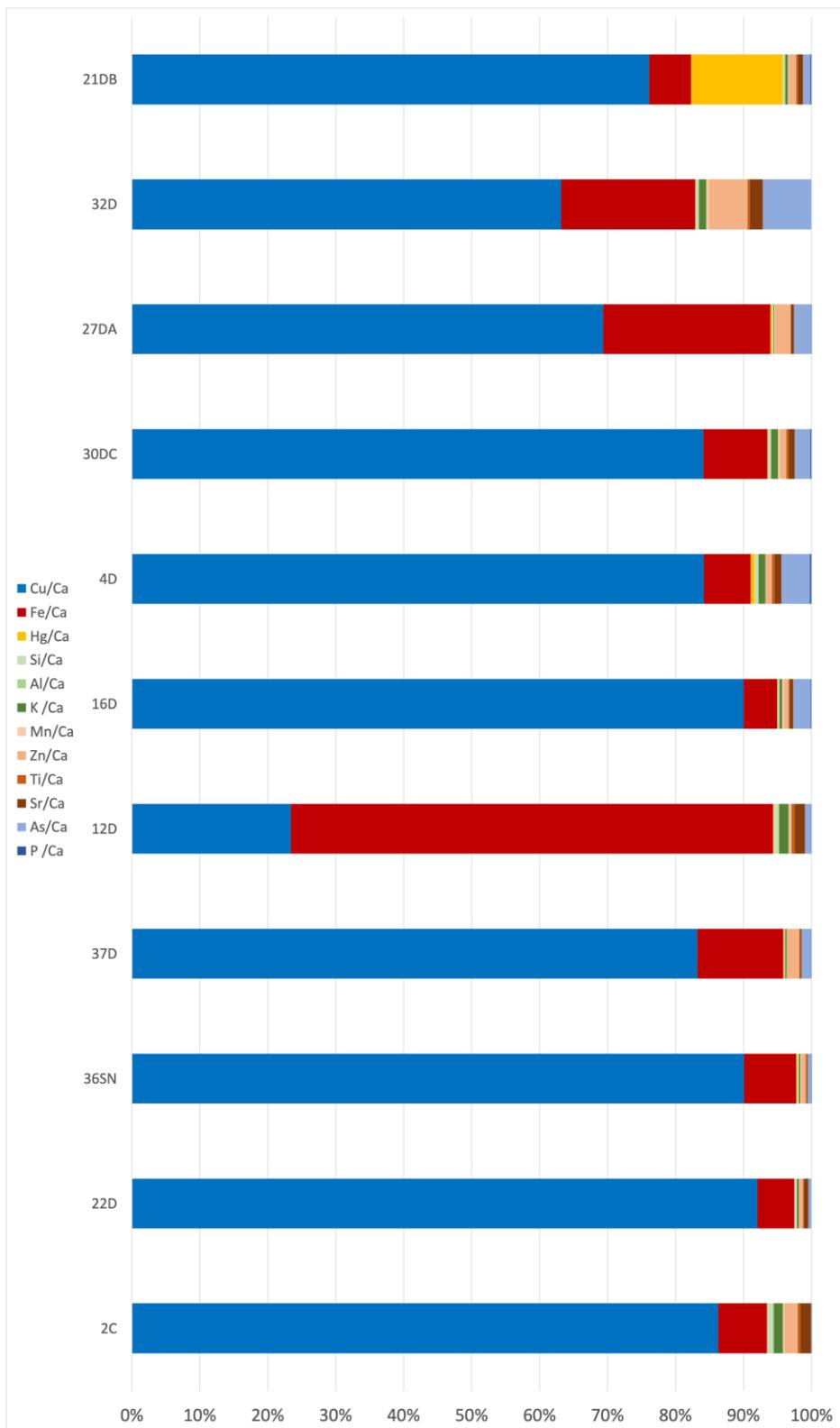


Figura 5-62: Resultados XRF para los fragmentos verdes de la temporada 2016, normalizados al Ca

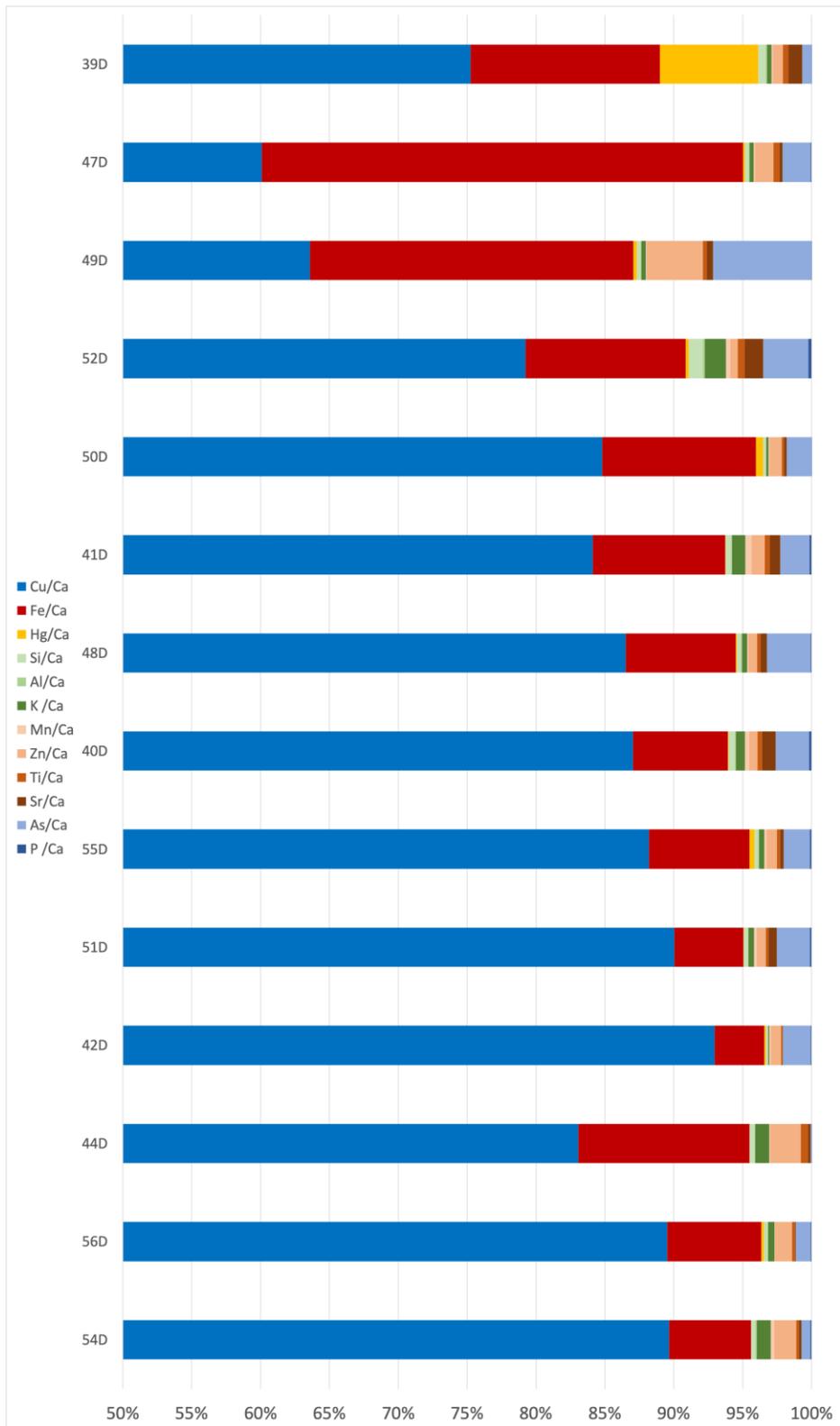


Figura 5-63: Resultados XRF para los fragmentos verdes de la temporada 2017, normalizados al Ca

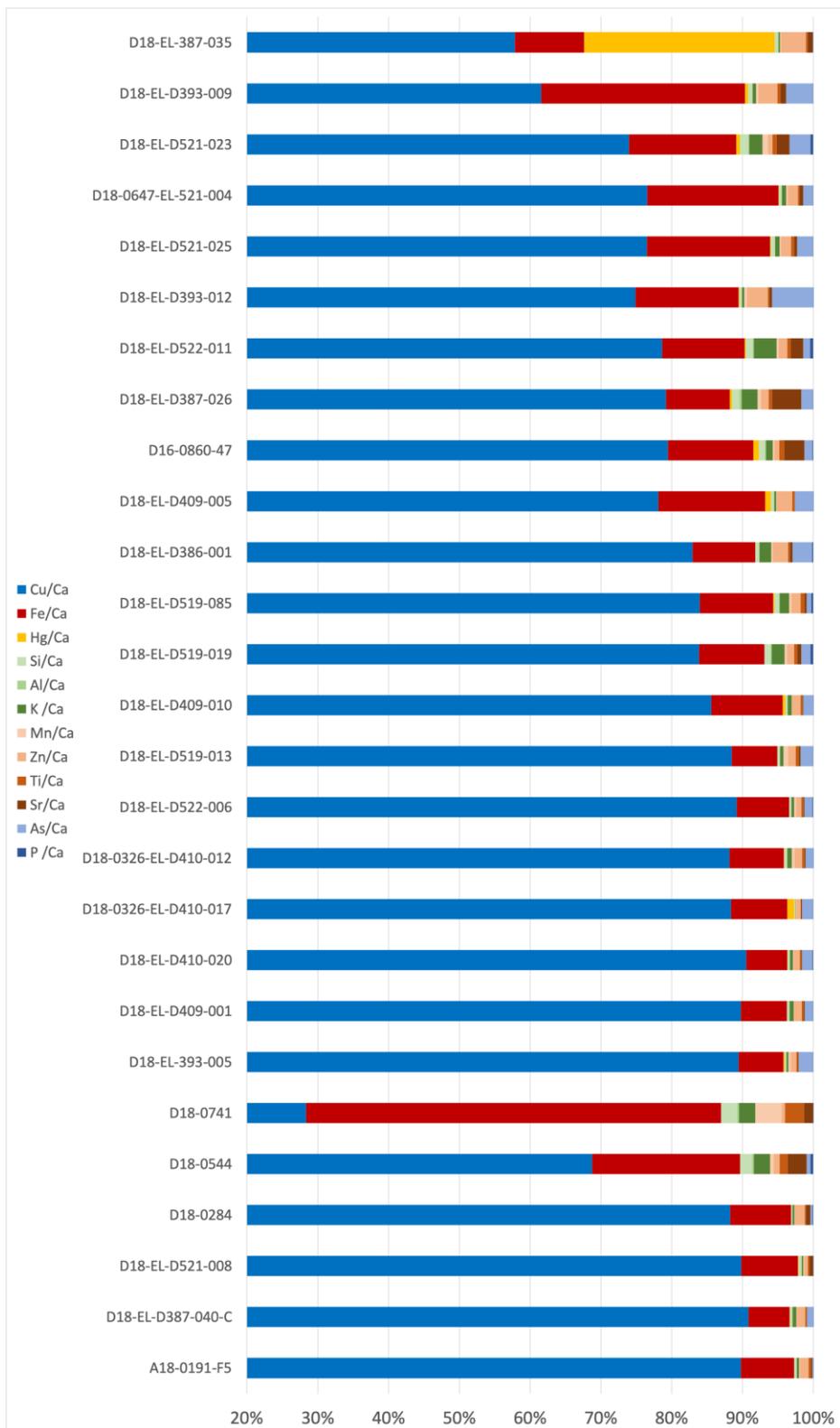
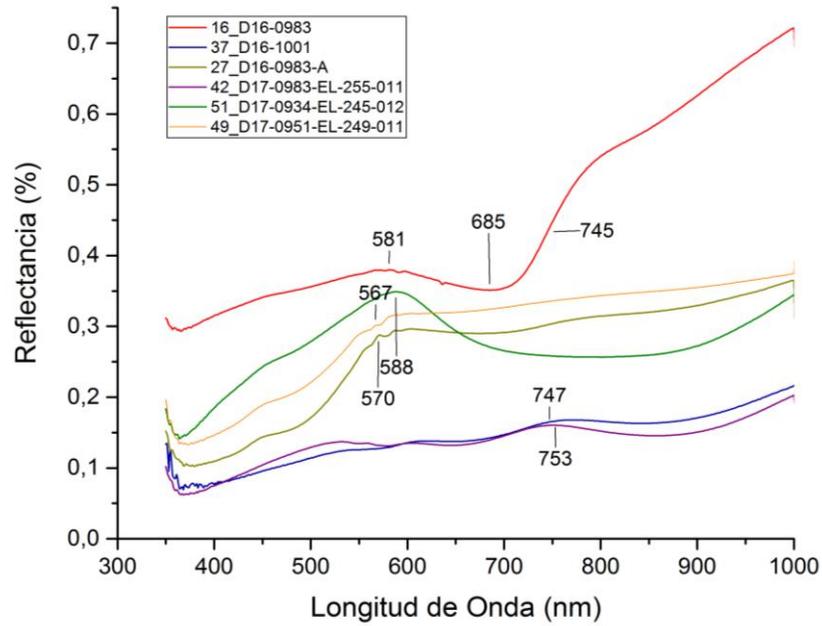
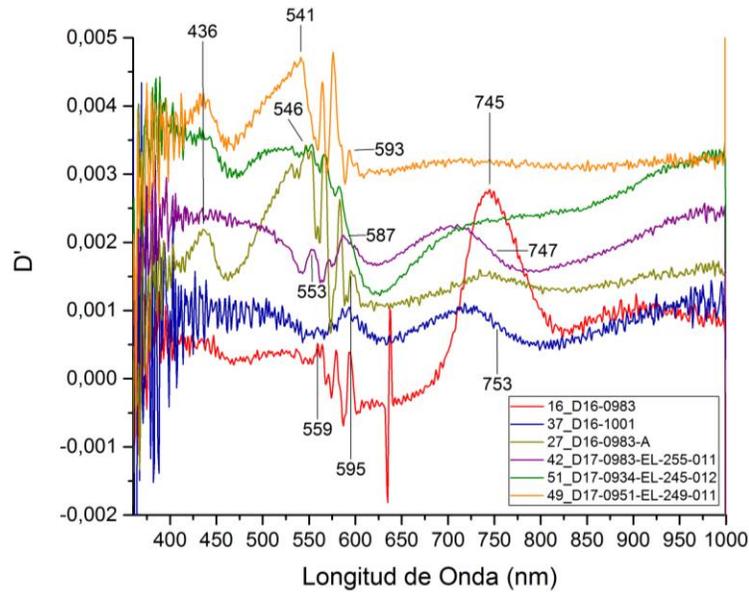


Figura 5-64: Resultados XRF para los fragmentos verdes de la temporada 2018, normalizados al Ca

Resultados FORS:



a



b

Figura 5-65: (a) Espectro FORS de los pigmentos verdes en el intervalo de 300-1000 nm y (b) derivada del espectro de reflectancia

En el espectro de reflectancia se pueden identificar cuatro tipos de comportamiento. El primero es el fragmento 51_D17-0934-EL-245-012, que presenta un máximo en reflectancia en 588 nm y un máximo de absorbancia en la región de 700 – 900 nm.

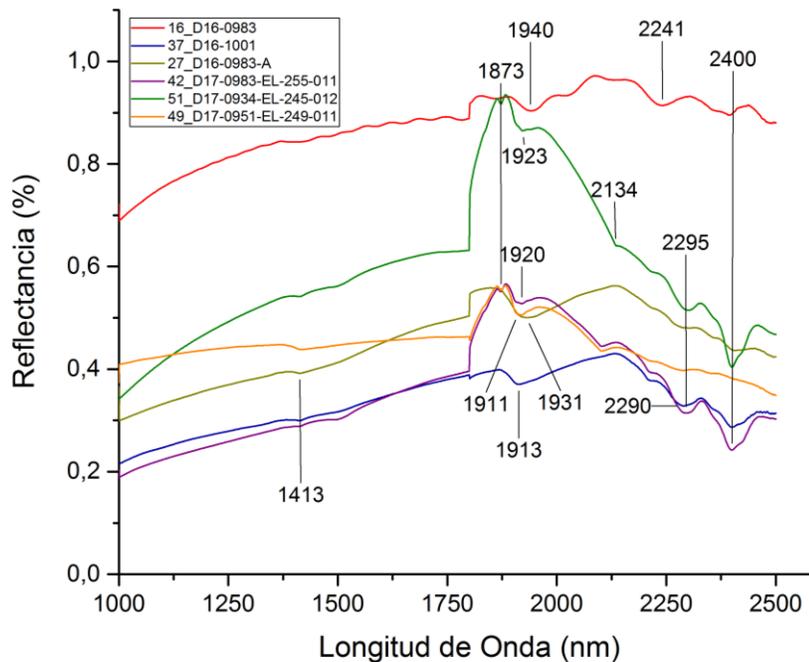


Figura 5-66: Espectro FORS para los pigmentos verdes en el intervalo de 1000-2500 nm

El segundo es de aquellos espectros con un máximo de reflectancia en ~750 nm y puntos de inflexión en ~580 nm. Estos son los fragmentos 37_D16-1001 y el 42_D17-0983-EL-255-011. Después están dos fragmentos, 27_D16-0963-A y 49_D17-0951-EL-249-011, que tienen un máximo en 570 nm y un punto de inflexión en ~540 nm. Estos tres primeros comportamientos corresponden a los tres tipos de grupos de molienda en los fragmentos. Finalmente se encuentra el fragmento 16_D16-0983 que tiene un comportamiento diferente a todos los demás, ya que, aunque presenta un máximo en 581 nm, tiene un punto de inflexión en 745 nm y un máximo de absorción en 685 nm.

El mineral más común para los pigmentos verdes en Mesoamérica es la malaquita. Esta es un carbonato básico de cobre y tiene una dureza de 3.5 – 4 Mohs, lo cual facilita su molienda. D. Magaloni (1996) identifica el uso de la malaquita para la pintura mural en

Teotihuacan. Además se ha encontrado este pigmento en área Maya, para el sitio de La Blanca (M^a Luisa Vázquez de Ágredos Pascual et al., 2014).

La malaquita se caracteriza por un pico diagnóstico en la región de 530 – 540 *nm*, así como una absorción en la región de ~830 *nm* (Appolonia, Vaudan, Chatel, Aceto, & Mirti, 2009; AUSPEC, 2012). Así mismo, un indicador característico de la malaquita son dos picos de absorción en 2260 *nm* y 2355 *nm* debido al doble enlace C=O del carbonato (Maynez Rojas, 2017).

Para los casos de los fragmentos 27_D16-0963-A, 49_D17-0951-EL-249-011, 37_D16-1001 y el 42_D17-0983-EL-255-011 las bandas en el visible de la malaquita se encuentran un poco recorridas. Sin embargo, se logran distinguir ligeramente las bandas de absorción del infrarrojo. Cada uno de estos fragmentos tienen agregados de diferente tipo, los primeros dos de tipo ocre y los segundos transparentes. El fragmento 51_D17-0934-EL-245-012 está bien caracterizado por todas las bandas como malaquita.

Finalmente, el fragmento 16_D16-0983, tiene algunas de las bandas en el infrarrojo y tiene el máximo de reflexión en el visible un poco corrido. Además, el máximo de absorción es estrecho en relación al de la malaquita. Sin embargo, no todas las bandas fueron identificadas y presenta una forma en el espectro diferente a la de la malaquita. Es importante realizar más análisis a este fragmento para poder determinar su composición.

Lo anterior nos lleva a pensar que los pigmentos verdes de Plaza de las Columnas están hechos de malaquita. Sin embargo, algunas bandas extras o faltantes, así como ciertas características distintivas en la composición elemental, sugieren que estos pigmentos estén combinados con algún otro material. Cabe señalar que la sensibilidad y la resolución de la técnica FORS no permite observar otros minerales de Cu además de la malaquita.

Los resultados para los verdes no son completamente concluyentes y aún es necesario

hacer más trabajo en este campo. Para esta identificación se podría utilizar la técnica de difracción de rayos-X, la cual ayudaría a ver las demás fases del pigmento. Además, la espectroscopía infrarroja en un intervalo más extenso, podría caracterizar los enlaces involucrados en los demás componentes.

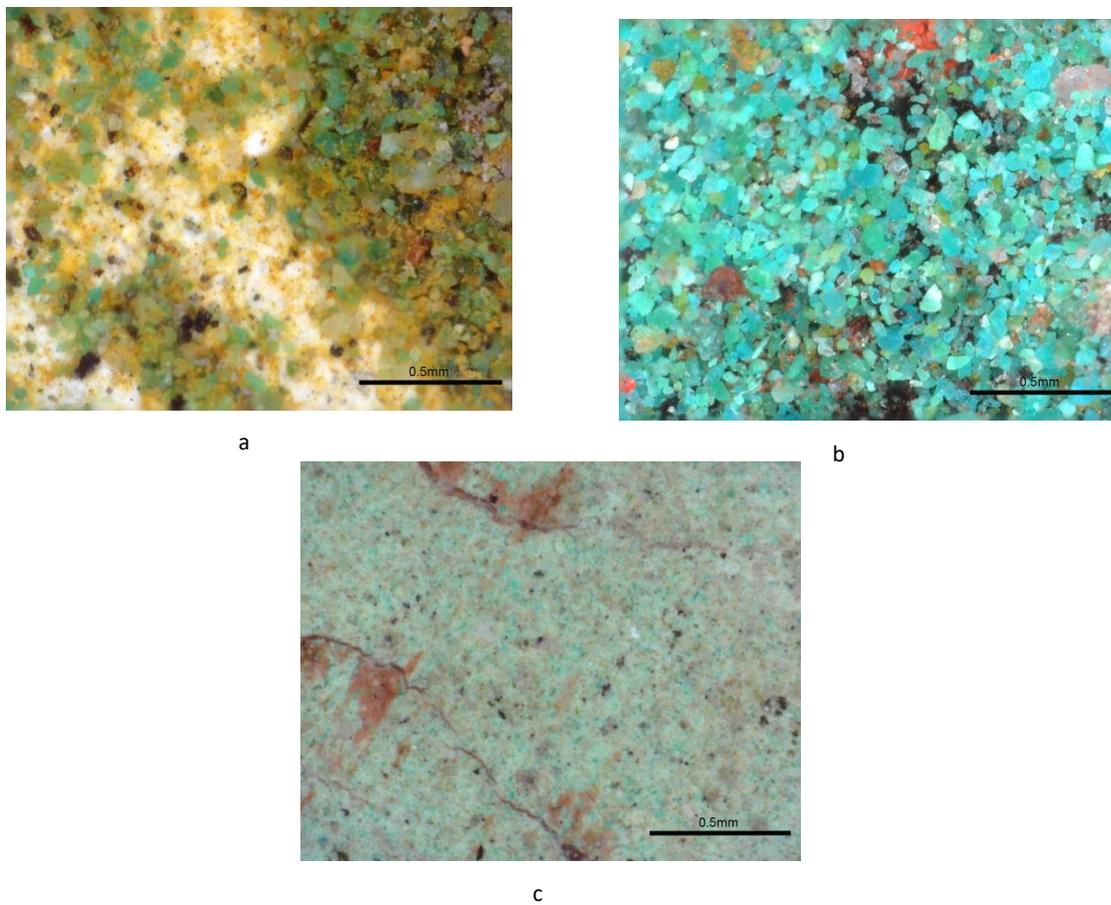


Figura 5-67: Microscopías de los fragmentos amarillos (a) 49_D17-0951-EL-249-011, (b) 51_D17-0934-EL-245-012 y (c) EL-D410-017. Microscopías Paulina Guzmán

5.2.6 Azules

Los pigmentos azules de plaza de las columnas son pocos y se presentan en cantidades reducidas. De todos los pigmentos encontrados, estos son los que están menos representados. Debido a esto, la clasificación de falso color no logra hacer subgrupos, únicamente ubicar a los azules en la región de las tonalidades frías.

Por otro lado, por medio de la colorimetría, únicamente se logra agrupar a los azules en la misma región que los verdes, pero en un radio de tolerancia menor Figura 5-61.

Las imágenes de microscopía (Figura 5-72) permiten observar que los azules tienen una apariencia granular y con una molienda heterogénea. No parecen tener agregados y están aplicados sobre enlucido como sobre la argamasa.

Resultados XRF:

Los azules presentan una composición principalmente de Cu y homogénea en la cantidad de agregados de tierras (Figura 5-68, Figura 5-69, Figura 5-70). En únicamente dos casos se presenta una cantidad de Fe que destaca del promedio. En ambos casos el pigmento azul está en la misma región que uno rojo (o café), como se puede observar en (Figura 5-72). Esto explica la cantidad de Fe en los fragmentos.

De la misma forma que en los fragmentos verdes, se puede notar una cantidad no despreciable de As en los fragmentos. Dado que ambos son pigmentos ricos en Cu, puede ser que la presencia de As se deba a una impureza de las fuentes minerales.

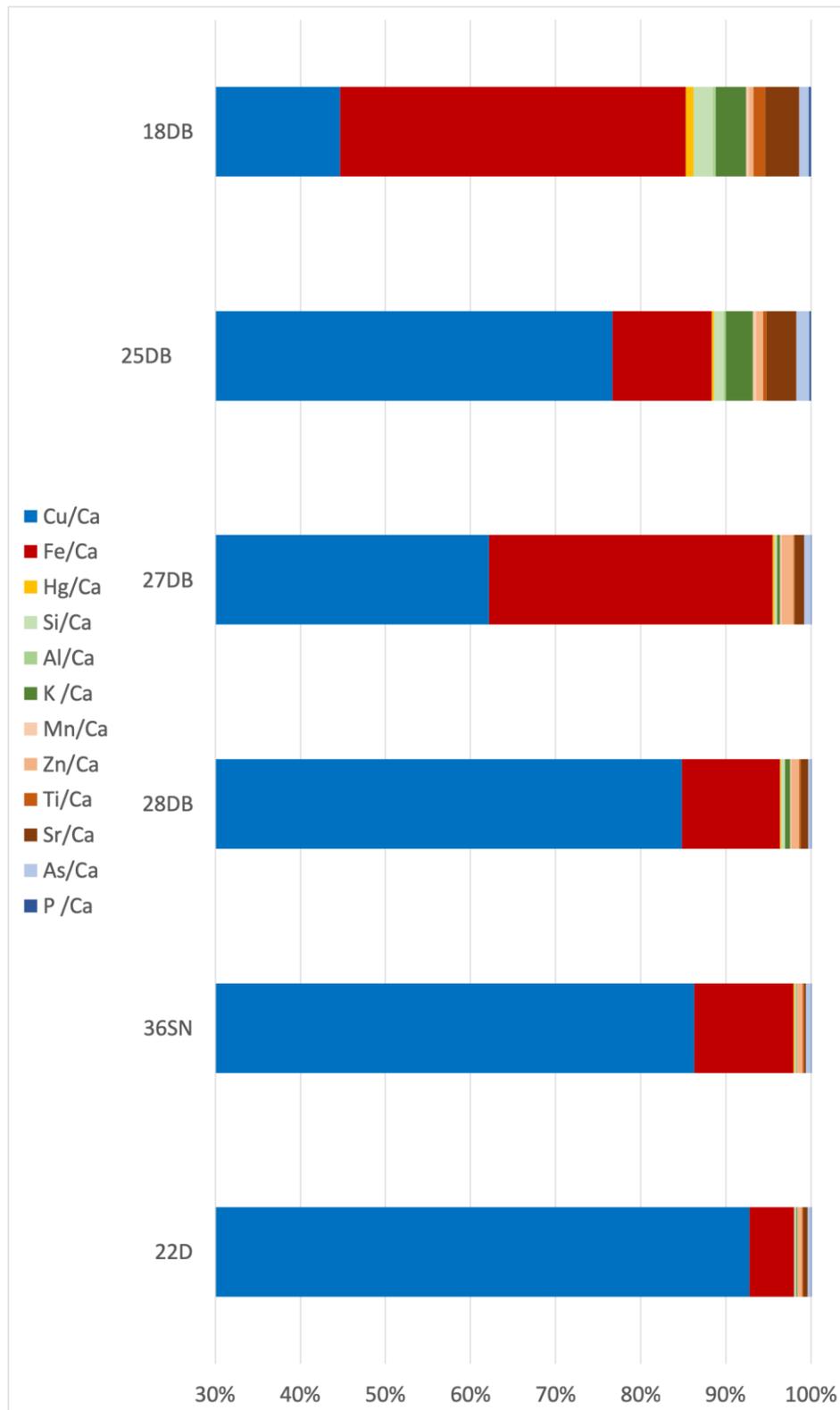


Figura 5-68: Resultados XRF para los fragmentos azules de la temporada 2016, normalizados al Ca

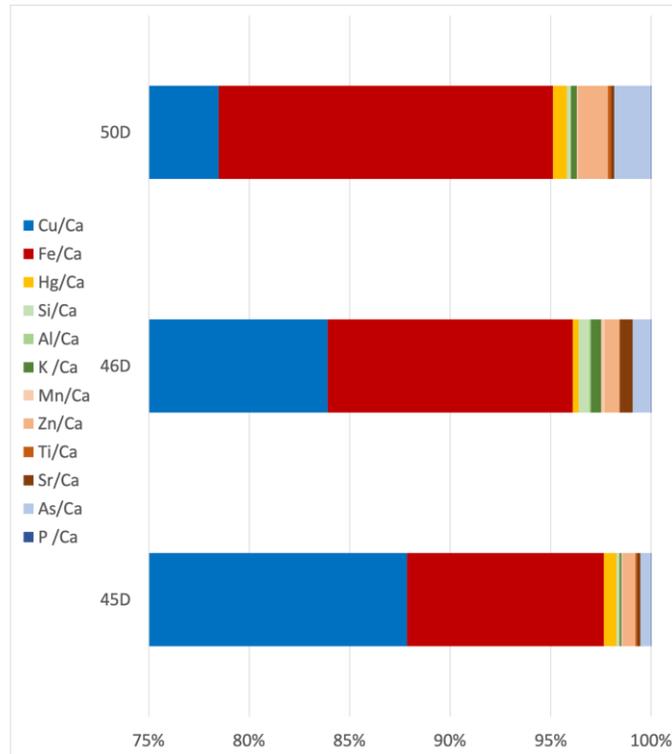


Figura 5-70: Resultados XRF para los fragmentos azules de la temporada 2017, normalizados al Ca

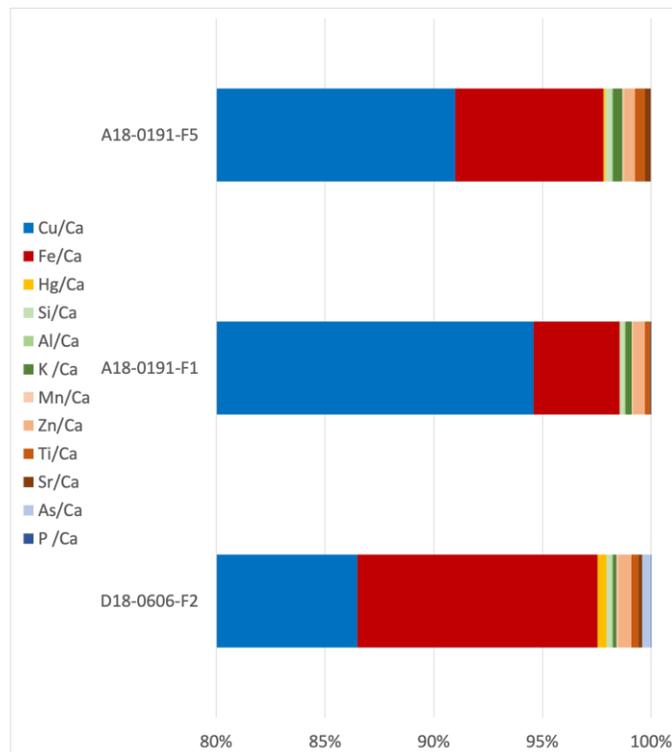


Figura 5-69: Resultados XRF para los fragmentos azules de la temporada 2018, normalizados al Ca

Resultados FORS:

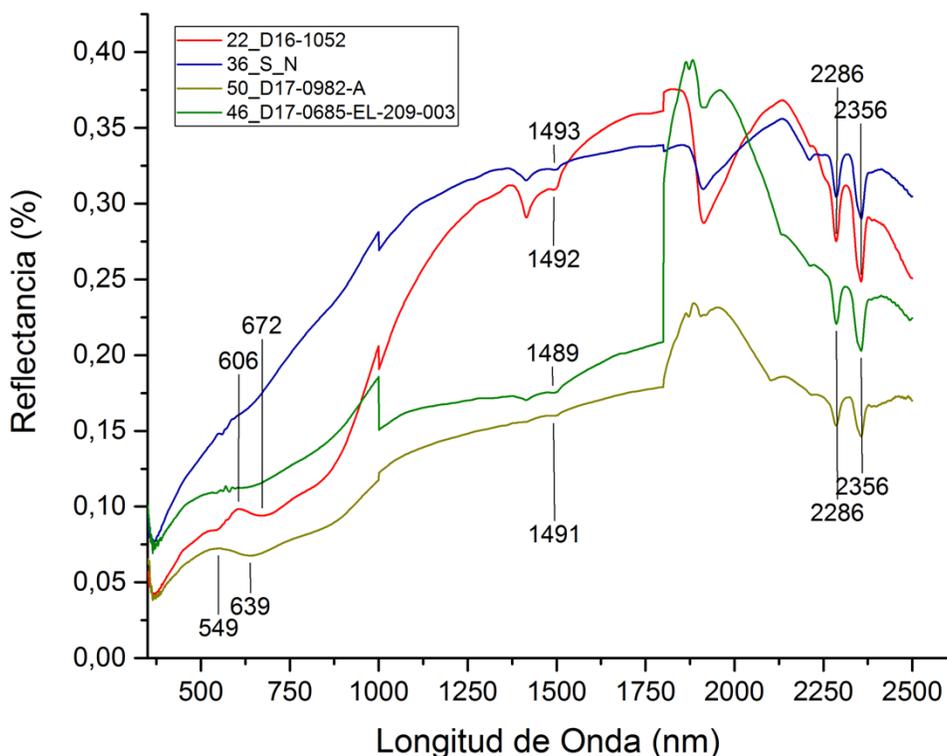
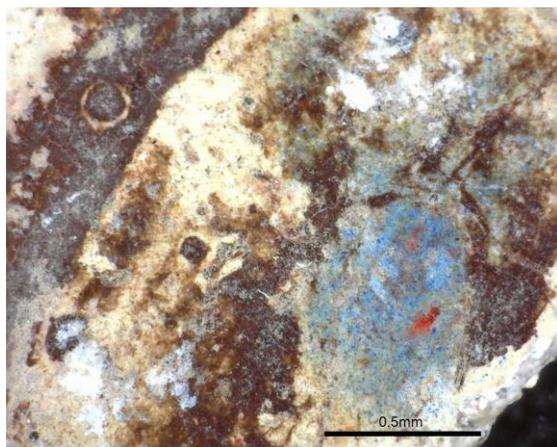


Figura 5-71: Espectro FORS para los azules en el intervalo de 350-2600 nm. Se pueden observar los artefactos de cambio de detector en 1000 nm y 1800 nm.

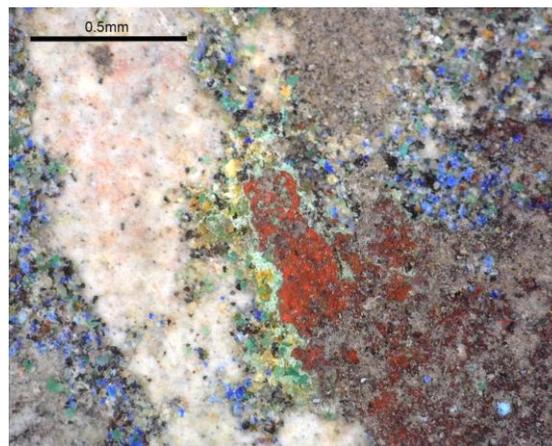
Los pigmentos azules de Plaza de las Columnas tienen un pico en la región del visible en 550 – 600 nm así como un máximo de absorción en 640 – 670 nm. Por otro lado, muestran un pico de absorción en la región de 1490 nm y una pareja de máximos de absorción angostos en 2286 nm y 2356 nm.

De acuerdo con la literatura, la azurita muestra un máximo local de reflectancia en ~450 nm en la región del visible, así como una absorción en ~790 nm (AUSPEC, 2012; Maynez Rojas, 2017). Por otro lado, en el IRC la azurita se caracteriza por tener máximos de absorción en 1496 – 1498 nm , 2284 nm y 2351 nm que corresponden a las combinaciones vibraciones de sobre tonos para los grupos O–H y –CO₃, siendo este un buen indicador de la presencia de azurita (Delaney et al., 2014).

Por lo anterior se puede concluir que los pigmentos azules de plaza de las columnas están compuestos de azurita y algún otro material como agregado, por ejemplo, tierras arcillosas por las bandas de absorción del agua similares a las encontradas en la argamasa. Esto ha sido identificado en Teotihuacan en diversos estudios (Fletcher, 2002; Magaloni, 1996), así como la identificación de carbonatos de cobre para pigmentos azules en Teopancazco (Martínez García, Ruvalcaba Sil, Manzanilla Naim, & Riquelme, 2012). Para el área Maya está identificado el uso de azurita (Vázquez de Agredos Pascual, 2010) o bien de azurita combinada con azul Maya (Magaloni, Newman, Baños, & Falcon, 1993), por mencionar algunos estudios.



a



b

Figura 5-72: Microscopías de los fragmentos (a) 18_D16-1002-B y (b) 27_D16-0983-B. Microscopías Paulina Guzmán

Pigmentos:

En resumen, la paleta de colores encontrada en los fragmentos de pintura mural de Plaza de las Columnas es: rojos, ocre, amarillos, verdes, azules, negros y blancos.

De estos pigmentos, la mayor cantidad de ellos son rojos, los cuales están siendo empleados tanto como fondos, aunque en algunos fragmentos parecen estar siendo utilizados para los detalles. Se encontraron dos tipos principales de rojos, rojos de hematita y rojos de cinabrio. Ambos usados en los fondos sin una aparente tendencia a emplear más un tipo que otro. Fue identificada una posible mezcla entre ambos rojos, aunque hace falta un análisis más detallado para determinar si esta mezcla es debido a la superposición de capas o bien, una mezcla de pigmentos. Un único pigmento rosa fue identificado, este es una posible combinación de hematita, cinabrio y carbonato de calcio. Los pigmentos rojos de hematita tienen acabados de superficie pulidos e inclusiones negras. Los pigmentos de cinabrio no presentan inclusiones y tienen un acabado granular fino.

Los pigmentos ocre y amarillos son ampliamente utilizados. La mayor cantidad de fragmentos que presentan diseño tienen ocre y amarillos en la paleta. Los pigmentos ocre y amarillos se aplican sobre la capa de rojo o sobre la capa de blanco. Únicamente una fracción pequeña de los fragmentos parece tener amarillos empleados como fondo y tienen pigmento verde. Todos los pigmentos ocre fueron identificados como goethita o goethita con caolinita u otra arcilla. Posiblemente la inclusión de agregados en los pigmentos ocre fuera más extensa que sólo la caolinita, pero esta fue la única fase identificada.

El caso de los pigmentos verdes fue no concluyente. Existen tres tipos de verde, todos con una molienda y agregados diferente, sin embargo, elementalmente no parece haber diferencias sustanciales. Aunque se logró identificar malaquita para los tres tipos de pigmentos, aún no están completamente caracterizados ya que hay algunas bandas del Vis-IRC que no tienen correspondencia con ningún pigmento registrado. Podría ser que esto fuera debido a alguna tierra o bien otra fase mineral que aportara información al color.

Además, por la identificación elemental se considera la posibilidad de la presencia de la conicalcita, que ha sido reportada previamente en la zona de Teotihuacan. Los verdes se emplean en menor cantidad que los rojos y amarillos. Son utilizados para pintar detalles que se encuentran enmarcados por líneas negras finas. Hay elementos verdes muy deteriorados, pero se emplean sobre un fondo rojo de hematita o amarillo de goethita. Finalmente hay algunos fragmentos que presentan un posible fondo verde que está siendo recubierto por pigmento rojo. También se encontró un fragmento con un enlucido pintado de verde que está siendo recubierto por otro enlucido sobre el cual se pintó de amarillo con verde.

Los pigmentos azules son el color menos representado. Por esto no es posible encontrar una relación en la forma en la que está siendo empleado. En algunos casos se utiliza sobre el enlucido, en algunos otros no parece tener algún contexto o función y finalmente en unos fragmentos el pigmento azul se encuentra directamente sobre la argamasa. Estos contienen azurita en todos los casos, aunque hay algunas bandas no identificadas que podrían ser debido a agregados o a la argamasa.

Los pigmentos negros son empleados principalmente como líneas de contorno o divisorias. En algunos casos se alcanza a distinguir el uso de el negro como un trazo de dibujo preparatorio. Finalmente, entre los fragmentos se encuentran algunos que están compuestos por negro completamente. Tomando estos negros como referencia se logró identificar la posible presencia de biotita y óxidos de hierro. Basándose en la literatura y otros estudios arqueométricos para Teotihuacan, se propone que esto es una posible combinación de hematita con alguna mica como la biotita para buscar obtener un tono oscuro.

Finalmente, los blancos no muestran diferencia alguna con los enlucidos tanto en su composición elemental, como en la identificación molecular y los agregados a la mezcla. Se logró identificar calcita en algunos fragmentos, aunque para poder caracterizarlos se

propone emplear FTIR y así identificar todas las bandas características de la calcita. Además, los blancos en superficie tienen un pulido fino y de lustre brillante. Los blancos y los enlucidos están hechos de carbonato de calcio.

Los pigmentos analizados en este trabajo corresponden con lo descrito para la segunda y tercera fase técnica de D. Magaloni. Además, los materiales han sido reportados para diferentes contextos, no sólo de pintura mural, en Teotihuacan. La mayoría de estos materiales son empleados en el área Maya, aunque no con tanta frecuencia. Además, en este estudio no se identificó ningún pigmento característico de la región Maya, como lo son el azul y verde Mayas.

Los materiales identificados en este estudio son todos de origen mineral. Aunque hace falta un trabajo más profundo para caracterizar por completo a todos los fragmentos. A continuación, se presentan las tablas resumen para los fragmentos clasificados como rojos, ocre y amarillos, verdes y azules. Los pigmentos blancos no figuran en esta tabla ya todos están hechos de carbonatos de calcio y se necesita un análisis más detallado para poder identificar a todos los elementos de los agregados.

Tabla 5-1: Tabla resumen de los materiales encontrados en los pigmentos rojos

<i>Clasificación</i>	<i>Fragmentos</i>	<i>Material identificado</i>	<i>Observaciones</i>
<i>Rojo</i>	1C, 18DA, 56D	Tierras rojas (óxidos de hierro) (Fe ₂ O ₃)	Hace falta un estudio más detallado para determinar agregados
	5D, 6D*, 7C*, 9D, 8D , 10DA, 10DB, 12D, 15D*, 17DA*, 19DA*, 19DB*, 21DD, 22D*, 31DB, 37D, 38D, 42D , 43D, 51D	Hematita (α-Fe ₂ O ₃)	* : Algunos de los fragmentos identificados presentan agregados ya que los espectros FORS tienen bandas que no corresponden al mineral del pigmento.
	4D, 5D, 13D , 14D, 20DA*, 26DC, 34C, 36SN, 38D, 45D, 46D, 48D, 50D, 52D, 55D*, 57DB, 58D, 60D	Cinabrio (HgS)	Reportado para pintura mural Teotihuacana, sin embargo, en los fragmentos de PCPC es empleado como fondo rojo. *: Algunos de los fragmentos presentan agregados.
	9D, 11D, 21DB, 25DA, 25DC, 29DA , 30DD, 35D, 39D , 52D	HgS + Fe ₂ O ₃	Hace falta un estudio más detallado para determinar agregados
	D18-0742	HgS + Fe ₂ O ₃ + Carbonato de calcio (CaCO ₃)	Únicamente fue analizado mediante XRF y microscopía.

Tabla 5-2: Tabla resumen de los materiales encontrados en los colores ocre y amarillos

Clasificación	Fragmentos	Material identificado	Observaciones
<i>Ocres y amarillos</i>	21DA, 25DC , 26DB, 28DA, 35D, 40D, 41D , 46D, 54D , 59D	Goethita (α -Fe ³⁺ O(OH))	
	6D, 20DB , 25DB, 26DA, 31DB, 33D, 48D, 52D	Goethita + ¿caolinita? (arcilla) (α -Fe ³⁺ O(OH + Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	Hace falta más estudio para caracterizar a la arcilla
	27DA , 56D	Goethita + ¿? (α -Fe ³⁺ O(OH + ¿?))	Hace falta más estudio para caracterizar a los agregados

Tabla 5-3: Tabla resumen de los materiales para los colores verdes

Clasificación	Fragmentos	Material identificado	Observaciones
<i>Verdes</i>	4D, 22D , 36SN , 47D , 48D , 50D , 51D , 52D , 56D	Malaquita (Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂)	
	16D , 40D	Malaquita + ¿?	No se logró identificar a los demás materiales en los fragmentos
	2C, 21DB, 27DA , 41D, 49DA	Malaquita + agregados ocre (¿arcillas, Fe ₂ O ₃ ?)	Los agregados se pueden observar en las microscopías
	37D , 42D	Malaquita + agregados transparentes (¿cuarzo?)	Los agregados se pueden observar en las microscopías

Tabla 5-4: Tabla resumen de los materiales encontrados para los colores azules

Clasificación	Fragmentos	Material identificado	Observaciones
Azules	18DB, 22D , 25DB, 27DB, 28DB , 36D , 45D , 46D , 50DA	Azurita + agregados	Se propone emplear DRX para identificar a los agregados

Tabla 5-5: Tabla resumen de los materiales encontrados para los colores negros

Clasificación	Fragmentos	Material identificado	Observaciones
Negros	3D , 4D, 5D, 9D , 10DA, 10DB, 11D, 19DC , 37D	Fe ₂ O ₃ + Biotita o alguna mica (K(Mg, Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂)	Se propone emplear DRX para identificar a los agregados
	34C, 53D	Carbón	No es un resultado concluyente. Es necesario emplear otras técnicas como Raman, para identificarlo

Tabla 5-6: Fragmentos no identificados en este trabajo

Fragmento	Observaciones
12D, 30DC, 39D, 44D, 54D, 55D	No se pudieron identificar los verdes
29DA, 49D, 58D, 60D	No se pudieron identificar los amarillos
23D, 27DB, 28DA, 30DA, 47D, 50D	No se pudieron identificar los rojos
32D	No se pudo identificar en general
Fragmentos de la temporada 2018	La identificación no es concluyente ya que sólo se empleó el análisis XRF para su estudio

6 Discusión y conclusiones

En este trabajo se analizó un total de 150 fragmentos de pintura mural Teotihuacana de estilo Maya encontrados en el complejo Plaza de las Columnas, Teotihuacan, Edo. Mex. Los fragmentos se dividieron en tres temporadas de excavación: 57 de la temporada 2016, 23 de la temporada 2017 y 70 de la temporada 2018. Además, en este trabajo, se propuso un modelo para calcular la profundidad de análisis en XRF para un sistema de capas superpuestas.

El análisis se realizó mediante las técnicas de imagen infrarroja de falso color, colorimetría, microscopía óptica, fluorescencia de rayos-X (XRF), espectroscopía de reflectancia por fibra óptica (FORS) y microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS). En los fragmentos de las temporadas 2016 y 2017 se emplearon todos los análisis. Para los fragmentos de la temporada 2018 únicamente se realizó XRF y microscopía óptica.

Con este estudio se logró identificar, en cuanto a composición química, el 85% de los fragmentos de las temporadas 2016 y 2017. Los fragmentos de la temporada 2018 no entran en esta contabilidad ya que, al haber sido analizados por XRF, únicamente se puede inferir su composición material pero no se puede asegurar nada a partir de un único análisis.

Las técnicas espectroscópicas empleadas en este trabajo funcionaron de manera adecuada, logrando con ellas identificar una buena cantidad de los materiales. Sin embargo, para lograr una caracterización óptima de los materiales, es necesario emplear más técnicas, como lo son la espectroscopía infrarroja, la espectroscopía Raman y la difracción de rayos-X. Este trabajo es una primera aproximación a los materiales constituyentes de los fragmentos de pintura mural encontrados en Plaza de las Columnas.

El análisis de los materiales se dividió en dos grandes secciones: soportes y pigmentos. Los soportes fueron identificados como argamasas compuestas de tierras ricas en hierro como material principal, algún carbonato de calcio como material aglomerante y agregados de

tipo mineral. Estos últimos fueron identificados como posibles aluminosilicatos, fragmentos de vidrio volcánico, feldespatos y materiales comunes a los suelos. Para la identificación de las argamasas fue útil la identificación elemental ya que el empleo de la espectroscopía FORS se veía limitado por la irregularidad de la superficie. Sin embargo, fue posible identificar en un fragmento las bandas comunes a los suelos en el infrarrojo cercano.

El segundo material constituyente de los soportes son los enlucidos. En ellos se logró identificar por composición elemental que eran un material con base de calcio. De acuerdo con la bibliografía existen dos posibilidades, el carbonato de calcio (CaCO_3) y el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), el carbonato de calcio es el material más probable ya que la cantidad de azufre en los enlucidos no es representativa. En la región del infrarrojo cercano fue posible observar algunas bandas que parecían ser las del enlace $\text{C}=\text{O}$ característico de los carbonatos. Además, por medio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, fue posible identificar algunas de los agregados como vidrios volcánicos, material orgánico quemado, material orgánico y aluminosilicatos.

Para la identificación de pigmentos, se dividió el análisis de acuerdo a la caracterización colorimétrica: blancos, negros, rojos, ocre y amarillos, verdes y azules. Los colores blancos fueron identificados como el mismo material que el enlucido: carbonato de calcio, por medio de la técnica de reflectancia de fibra óptica en el intervalo de $1000 - 2600 \text{ nm}$. Se logró ver que la única diferencia entre los enlucidos y los *pigmentos blancos* es la forma en la que están siendo empleados, así como el acabado de superficie. Tanto en composición material como en tipos de agregados, los pigmentos blancos y los enlucidos se comportan de la misma manera. Con la evidencia recabada en este trabajo se puede concluir que no existe un *pigmento blanco* ya que no hay evidencias materiales para diferenciarlo del soporte.

Por otro lado los colores negros fueron un caso especial. Usualmente los negros están compuestos de carbón, ya sea materia orgánica quemada o *negro de humo*, por medio del

cual se ahúma la superficie a pintar y adquiere así una coloración negra. Sin embargo, únicamente un fragmento negro parece estar compuesto de carbón. Los demás fragmentos negros analizados parecen ser una combinación de óxidos de hierro y algún tipo de mica, como la biotita. Esta combinación de materiales ha sido identificada previamente para la zona de Teotihuacan en pintura corporal. Sería la primera vez que esta mezcla se identifica para pintura mural. No obstante, hasta ahora este resultado se considera preliminar, ya que es necesario realizar otro tipo de análisis espectroscópicos para poder determinarlo.

Los colores rojos son empleados como fondos. Son el color con mayor variedad en el tipo de materiales identificados, así como el color más representado en los fragmentos de Plaza de las Columnas. Los materiales identificados en los colores rojos son: óxidos de hierro, hematita, cinabrio, hematita + cinabrio, hematita + cinabrio + carbonato de calcio. El uso de la hematita y los óxidos de hierro en los fondos rojos teotihuacanos es común y ampliamente reportado. Estos tienen un acabado de superficie pulido y contienen agregados laminares y negros, como es usual para los rojos teotihuacanos. El uso de cinabrio está reportado en pocas ocasiones para pintura mural y es más reportado en cerámica, pintura corporal, núcleos de color. En este caso, el empleo de cinabrio destaca por las áreas extensas en las que está siendo empleado como fondo. Esta característica es una que destaca a los fragmentos de Plaza de las Columnas de lo reportado en Teotihuacan hasta ahora. Además, la combinación de hematita y cinabrio resulta interesante ya que puede estar tanto asociada tanto a la superposición de capas como a la mezcla intencional de los materiales para obtener un color específico. Finalmente, un único fragmento fue identificado como *rosa*. Este contiene hierro, mercurio y calcio. Es por lo anterior que se propone que este material sea el resultado de la mezcla entre hematita + cinabrio + carbonato de calcio.

En el caso de los ocre y amarillos se identificó goethita y goethita con agregados. Los agregados empleados en los ocre y amarillos fueron identificados como arcillas. Se propone el uso de la caolinita debido a un corrimiento de la absorción en 910 *nm* a 930 *nm*. No obstante, es necesario realizar otro tipo de análisis para poder identificar el tipo de

arcilla empleado. Resulta interesante que la identificación mediante FORS sea capaz de sugerir la presencia de agregados. Esta técnica es fácil de llevar a campo y por este tipo de identificaciones sería conveniente seguirla empleando en el trabajo de campo.

El color verde fue dividido por tres tipos de molienda. Esto formaba grupos que tenían molienda gruesa y agregados ocres, molienda gruesa y agregados transparentes y molienda fina sin agregados. El único mineral identificado en este trabajo para los verdes es la malaquita. Falta realizar más análisis para poder identificar los agregados, así como confirmar el uso de la malaquita como el único material colorante. La identificación de los colores verdes en este trabajo no es concluyente.

Finalmente, los colores azules son empleados en proporciones menores a los demás colores. Fue posible identificarlos como azurita. Esto es común para la pintura mural en Teotihuacan. Los colores azules posiblemente tienen algún tipo de agregado y son aplicados indiscriminadamente sobre un enlucido o la argamasa.

Los resultados de este trabajo comprueban que la metodología empleada fue una buena aproximación al problema de investigación. No se encontraron resultados contradictorios y se lograron caracterizar en buena medida los materiales.

Con este trabajo y, la evidencia material recabada hasta ahora, es posible decir que los materiales empleados, tanto de los soportes como de los colores, son en su mayoría comunes a los materiales de la II y III fase técnica de la pintura mural teotihuacana de D. Magaloni. Esto es congruente con la datación Tlamimilolpa-Xolalpan. Sin embargo, estos fragmentos tienen materiales como el cinabrio y el negro de óxidos de hierro y mica, que no corresponden a lo reportado hasta ahora para la pintura mural teotihuacana. De acuerdo con la evidencia encontrada en este trabajo, se presenta a continuación la Tabla 6-1 y la Tabla 6-2 que, a manera comparativa, contrasta los materiales encontrados en los fragmentos de pintura mural de Plaza de las Columnas, con aquellos encontrados en diferentes sitios de

Teotihuacan, así como de área Maya. Es importante destacar que esta comparación se realizó con los trabajos de D. Magaloni (1996, 1998), C. Martínez, et.al (2012), M. L. Vázquez de Agredos, et. al (2010), L. Barba (2010) y H. Lozano (2018) , aunque éstos no son los únicos trabajos realizados en el área.

Los fragmentos de pintura mural de Plaza de las Columnas parecen romper con el *estilo teotihuacano* en más formas que únicamente el uso de los materiales. Aunque esto último es trabajo de otra disciplina, desde el punto de vista material, se sugiere que los el mural encontrado en Plaza de las Columnas pudo haber sido hecho por un grupo que tenía acceso a los materiales encontrados en los fragmentos. Este aprovechó los materiales y las técnicas locales, pero destacó por romper con algunos de, los que hoy se creen, estatutos de la pintura mural teotihuacana. Este trabajo, en conjunto con los demás estudios realizados alrededor de los fragmentos de pintura mural de Plaza de las Columnas, posiblemente se podrán replantear las características básicas de la pintura mural Teotihuacana.

Finalmente es importante destacar que esta investigación refuerza la importancia del trabajo colaborativo entre diferentes disciplinas. Como se dijo en la introducción, al tratarse de materiales arqueológicos, estos resultados adquieren sentido cuando son analizados en un contexto para responder una pregunta sobre la sociedad. Aunque los alcances de esta investigación abarcan únicamente la caracterización material, los resultados aportan información a un objetivo más grande, que es la investigación de la sociedad a partir de sus restos materiales.

Tabla 6-1: Tabla comparativa de los materiales encontrados en Plaza de las Columnas con otros estudios en Teotihuacan y área Maya

Clasificación	Material	Plaza de las Columnas	Teotihuacan	Teopancazco	Área Maya
<i>Argamasas</i>	Tierras + agregados (aluminosilicatos, vidrio volcánico, materia orgánica quemada)	X	X[E,F]		
	Argamasas con base de cal y agregados				X[B]
<i>Enlucidos</i>	Carbonato de calcio + agregados (aluminosilicatos, vidrio volcánico, materia orgánica quemada)	X	X[A,E,F]	X[C]	
	Albita			X[C]	
	<i>Sascab</i> + estucos re utilizados y agregados				X[B]
<i>Rojo</i>	Tierras rojas (óxidos de hierro) (Fe ₂ O ₃)	X	X[A]	X[C]	X[B,D]
	Hematita (α -Fe ₂ O ₃)	X	X[A,E,F]	X[C]	X[B,D]
	Hematita + lepidocrosita		X[A]		
	Cinabrio (HgS)	X	X[F]	X[C*]	X[D]
	HgS + Fe ₂ O ₃	X			
	HgS + Fe ₂ O ₃ + Carbonato de calcio (CaCO ₃)	X			
	Hematita + Cal		X[A]		X[B,D]
	Orgánicos (palo de Campeche)				X[D]
<i>Ocre y Amarillo</i>	Goethita (α -Fe ³⁺ O(OH))	X			X[B,D]
	Goethita + ¿caolinita? (arcilla) (α -Fe ³⁺ O(OH) + Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	X		X[C]	
	Goethita + ¿? (α -Fe ³⁺ O(OH) + ¿?)	X			
	Lepidocrosita		X[A]		X[B,D]
	Ferroactinolita + agregados			X[C]	
	Lepidocrosita + cal		X[A]		
	Limonita				X[D]
	Colorante + arcilla (amarillo Maya)				X[D]

Tabla 6-2: Tabla comparativa de los materiales encontrados en Plaza de las Columnas con otros estudios en Teotihuacan y área Maya

Clasificación	Material	Plaza de las Columnas	Teotihuacan	Teopancazco	Área Maya
<i>Verde</i>	Malaquita (Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂)	X	X[A]	X[C]	X[B,D]
	Malaquita + ¿?	X			
	Malaquita + agregados ocres (¿arcillas?)	X	X[A]		
	Malaquita + agregados transparentes (¿cuarzo?)	X			
	Malaquita + yeso		X[A]		
	Colorante + arcilla (verde Maya)				X[B,D]
<i>Azul</i>	Azurita + agregados	X	X[A]		X[B,D]
	Pirolusita + yeso		X[A]		
	Sulfato de cobre		X[A]		
	Sepiolita			X[C]	
	Posiblemente orgánico			X[C]	
	Colorante + arcilla (azul Maya)				X[B,D]
<i>Negro</i>	Fe ₂ O ₃ + Biotita o alguna mica (K(Mg, Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂)	X			
	Carbón	X	X[A]	X[C]	
	Pirolusita		X[A]		
	Meionita + cuarzo + deltaita			X[C]	
	Bitumen				X[D]
	Magnesita				X[B,D]

a) (Magaloni, 1996); b) (Magaloni, 1998); c) (Martínez García, Ruvalcaba Sil, Manzanilla, et al., 2012); d)(Vázquez de Agredos Pascual, 2010); e) (L. A. Barba Pingarrón & Córdova Frunz, 2010) ; f) (Lozano Bravo, 2018)

7 Referencias

- Aguilar Melo, V. (2014). *Desarrollo y aplicación de difracción y fluorescencia de rayos X in situ para la caracterización de materiales*. Tesis de Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Al-Arif, M., & Kakil, D. (2015). Calculated-Experimental Model for Multilayer Shield. *Aro, The Scientific Journal of Koya University*, 3(1), 23–27. <https://doi.org/10.14500/aro.10057>
- Alfeld, M., Siddons, D. P., Janssens, K., Dik, J., Woll, A., Kirkham, R., & Wetering, E. (2013). Visualizing the 17th century underpainting in Portrait of an Old Man by Rembrandt van Rijn using synchrotron-based scanning macro-XRF. *Applied Physics A*, 111(1), 157–164. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-7490-5>
- Alonso, A., Pérez, N. A., Sil, J. L. R., Casanova, E., Claes, P., Melo, V. A., & Cañetas, J. (2014). Comparative Spectroscopic Analysis of Maya Wall Paintings from Ek'Balam, Mexico. *MRS Proceedings*, 1618, imrc2013-8a-031. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.455>
- Appolonia, L., Vaudan, D., Chatel, V., Aceto, M., & Mirti, P. (2009). Combined use of FORS, XRF and Raman spectroscopy in the study of mural paintings in the Aosta Valley (Italy). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 395(7), 2005–2013. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-3014-3>
- AUSPEC. (2012). *Spectral Interpretation Field Manual*. AusSpec International Ltd ASD Inc.
- Barba, L., Blancas, J., Manzanilla, L. R., Ortíz, A., Barca, D., Crisci, G. M., ... Pecci, A. (2009). Provenance of the limestone used in teotihuacan (mexico): a methodological approach. *Archaeometry*, 51(4), 525–545. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00430.x>
- Barba Pingarrón, L. A., & Córdova Frunz, J. . (2010). *Materiales y energía en la arquitectura de Teotihuacan*. Mexico: UNAM, IIA.
- Barba Pingarrón, L., & Alonso Villaseñor, I. (2013). *La cal : historia, propiedades y usos*. Mexico: UNAM, IIA. Obtenido de <http://eds.a.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=1&sid=3b314a1b-dc68-404b-a039-ae21501dfff%40sessionmgr4010&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3D%3D#AN=lib.MX001001634454&db=cat02025a>
- Barca, D., Miriello, D., Pecci, A., Barba, L., Ortiz, A., Manzanilla, L. R., ... Crisci, G. M. (2013). Provenance of glass shards in archaeological lime plasters by LA-ICP-MS: implications for the ancient routes from the Gulf of Mexico to Teotihuacan in Central Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 40, 3999–4008. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.05.016>

- Beiser, A. (2003). *Concepts of modern physics*. Tata McGraw-Hill Education.
- Bowers, S. A., & Hanks, R. J. (1965). Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, *100*(2), 130–138.
- C.T. Chantler; K. Olsen; R.A. Dragoset, J. C. A. R. K. S. A. K. D. S. Z., & NIST, P. M. L. (2005). X-Ray Form Factor, Attenuation, and Scattering Tables. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.18434/T4HS32>
- Cadena Irizar, A. C. (2018). *Metodología para la caracterización de vidrios históricos aplicada a la colección de la ex hacienda del siglo XIX San Pedro Cholul*. Tesis de Licenciatura en Física, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cano Baca, L. R. N. (2018). *Conjunto tabular de San Agustín Acolman : eventos materiales de una técnica pictórica*. Tesis de Maestría en Historia del Arte, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castellan, G. W. (University of M. (1998). *Fisicoquímica* (Segunda ed). Addison Wesley Longman de México.
- Chang, C.-W., Laird, D. A., Mausbach, M. J., & Hurburgh, C. R. (2001). Near-Infrared Reflectance Spectroscopy—Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, *65*(2), 480. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x>
- Cheilakou, E., Troullinos, M., & Kouli, M. (2014). Identification of pigments on Byzantine wall paintings from Crete (14th century AD) using non-invasive Fiber Optics Diffuse Reflectance Spectroscopy (FORS). *Journal of Archaeological Science*, *41*, 541–555. <https://doi.org/10.1016/J.JAS.2013.09.020>
- Chukanov, N. V. (2014). *Infrared spectra of mineral species : extended library*. Springer.
- Ciani, A., Goss, K.-U., & Schwarzenbach, R. P. (2005). Light penetration in soil and particulate minerals. *European Journal of Soil Science*, *56*(5), 561–574. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00688.x>
- Clark, R. N. (1995, January 1). Reflectance Spectra. *Rock Physics & Phase Relations*. <https://doi.org/doi:10.1029/RF003p0178>
- Complejo Plaza de las Columnas – Proyecto Complejo Plaza de las Columnas. (n.d.). Retrieved March 21, 2019, from <http://ppcteotihuacan.org/es/area-de-estudio/complejo-plaza-de-las-columnas/>
- Conides, C. A. (1997). Social Relations Among Potters in Teotihuacan, Mexico. *Museum of Antropology*, *21*(2), 39–54. Obtenido de

- <https://anthrosource.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1525/mua.1997.21.2.39>
- De la Fuente, B. (1995a). *La pintura mural prehispánica en México. Teotihuacán. Volumen I*. Mexico: UNAM, IIE.
- De la Fuente, B. (1995b, December). La Pintura Mural Prehispánica en México. *Arqueología Mexicana*, 6–15.
- Delaney, J. K., Ricciardi, P., Glinsman, L. D., Facini, M., Thoury, M., Palmer, M., & Rie, E. R. de la. (2014). Use of imaging spectroscopy, fiber optic reflectance spectroscopy, and X-ray fluorescence to map and identify pigments in illuminated manuscripts. *Studies in Conservation*, 59(2), 91–101. <https://doi.org/10.1179/2047058412Y.0000000078>
- Demortier, G., & Ruvalcaba-Sil, J. L. (1996). Differential PIXE analysis of Mesoamerican jewelry items. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 118(1–4), 352–358. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(96\)00248-0](https://doi.org/10.1016/0168-583X(96)00248-0)
- Dik, J., Janssens, K., Van Der Snickt, G., van der Loeff, L., Rickers, K., & Cotte, M. (2008). Visualization of a Lost Painting by Vincent van Gogh Using Synchrotron Radiation Based X-ray Fluorescence Elemental Mapping. *Analytical Chemistry*, 80(16), 6436–6442. <https://doi.org/10.1021/ac800965g>
- Doménech-Carbó, M. T., Vázquez de Agredos-Pascual, M. L., Osete-Cortina, L., Doménech-Carbó, A., Guasch-Ferré, N., Manzanilla, L. R., & Vidal-Lorenzo, C. (2012). Characterization of prehispanic cosmetics found in a burial of the ancient city of Teotihuacan (Mexico). *Journal of Archaeological Science*, 39(4), 1043–1062. <https://doi.org/10.1016/J.JAS.2011.12.001>
- Dupuis, G., & Menu, M. (2006). Quantitative characterisation of pigment mixtures used in art by fibre-optics diffuse-reflectance spectroscopy. *Applied Physics A*, 83(4), 469–474. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3522-3>
- Ejarque Gallardo, Á. (2017). *Color y tratamientos mortuorios : estudio arqueométrico, ritual y cultural de materias colorantes procedentes de tres contextos funerarios teotihuacanos : La Ventilla, Teopanazgo y el barrio Oaxaqueño*. Tesis de Maestría en Estudios Mesoamericanos, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Elias, M., Chartier, C., Prévot, G., Garay, H., & Vignaud, C. (2006). The colour of ochres explained by their composition. *Materials Science and Engineering: B*, 127(1), 70–80. <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2005.09.061>
- Fletcher, J. M. (2002). Stuccoed Tripod Vessels from Teotihuacan: An Examination of Materials and

- Manufacture. *Journal of the American Institute for Conservation*, 41(2), 139–154.
<https://doi.org/10.1179/019713602806112940>
- García Bucio, M. A. (2015). *Espectroscopia Raman para estudio no destructivo de pigmentos y colorantes*. Tesis de Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gazzola, J. (2000). *Les utilisations du cinabre à Teotihuacan*. <http://www.theses.fr>. Paris: Université Paris 1- Panthéon Sorbonne. Retrieved from <https://www.theses.fr/2000PA010658>
- Gazzola, J. (2009). Uso de cinabrio en la pintura mural de Teotihuacán. *Arqueología*, (40), 57–70.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
- Gómez-Chávez, S., Solís, C., Gazzola, J., Chávez-Lomelí, E. R., Mondragón, M. A., Rodríguez-Ceja, M., & Martínez-Carrillo, M. A. (2017). AMS 14C Dating of Materials Recovered from the Tunnel under the Temple of the Feathered Serpent in Teotihuacan, Mexico. *Radiocarbon*, 59(02), 545–557. <https://doi.org/10.1017/RDC.2016.77>
- Hecht, E. (2002). *Optics*. (A. Black, Ed.) (4th Editio). San Francisco, USA: Addison Wesley.
- Hecht, H. G. (1976). The interpretation of diffuse reflectance spectra. In *Standardization in Spectrophotometry and Luminescence Measurements: Proceedings of a Workshop Seminar Held at the National Bureau of Standards* (pp. 567–576). South Dakota, USA.
- Hitachi. (2014). Tabletop Microscope TM3030Plus. Retrieved February 19, 2019, from https://www.hitachi-hightech.com/eu/product_detail/?pn=em-tm3030plus&version=
- Hollas, J. M. (2004). *Modern spectroscopy*. John Wiley & Sons.
- Karr, C. (1975). *Infrared and Raman spectroscopy of lunar and terrestrial minerals*. Academic Press.
- Koirala, P., Hauta-Kasari, M., Martinkauppi, B., & Hiltunen, J. (2008). Color mixing and color separation of pigments with concentration prediction. *Color Research & Application*, 33(6), 461–469. <https://doi.org/10.1002/col.20441>
- Larkin, P. (2011). *Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation*. Elsevier.
- Lombardo de Ruiz, S. (1996). El estilo Teotihuacano en la pintura mural. In B. De la Fuente (Ed.), *La pintura mural prehispánica en México, Teotihuacan, Volumen I. Estudios. Tomo II* (pp. 3–64). México: UNAM, IIE.
- Lombardo de Ruiz, S. (1998). Los estilos en la pintura mural maya. In L. Staines Cicero (Ed.), *La pintura mural prehispánica en México, Área maya. Volumen II. Estudios. Tomo III* (pp. 85–

- 154). Mexico: UNAM, IIE.
- López Puertolas, C. (2017). *Arqueometría del color en el conjunto Palaciego de Xalla, Teotihuacán : primeros resultados para un estudio de su producción y uso*. Tesis de Maestría en Estudios Mesoamericanos, Universidad Nacional Autónoma de México.
- López, R., & Gómez, R. (2012). Band-gap energy estimation from diffuse reflectance measurements on sol-gel and commercial TiO₂: a comparative study. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 61(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2582-9>
- Lozano Bravo, H. (2018). *Propuesta cronológica de las etapas constructivas del conjunto plaza de la Pirámide del Sol, Teotihuacán, mediante arqueomagnetismos y caracterización de materiales constructivos*. Tesis de Mestría en Estudios Mesoamericanos, Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/CH6V35X896L99S69UA1QCAQ5B8T78HRFPL4BJ4A8HFL1KCC4II-00010?func=find-b&request=Hilda+Lozano+Bravo&find_code=WRD&adjacent=N&local_base=TES01&x=0&y=0&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=
- Magaloni, D. (1995). Técnicas de la pintura mural en Mesoamérica. *Arqueología Mexicana*, 3(16), 16–23.
- Magaloni, D. (1996). El espacio pictórico Teotihuacano. Tradición y técnica. In B. De la Fuente (Ed.), *La pintura mural prehispánica en México, Teotihuacan, Volumen I. Estudios. Tomo II* (pp. 187–225). Mexico: UNAM, IIE.
- Magaloni, D. (1998). Materiales y técnicas de la pintura mural maya. In L. Staines Cicero (Ed.), *La pintura mural prehispánica en México, Área maya. Volumen II. Estudios. Tomo III* (pp. 155–198). Mexico: UNAM, IIE.
- Magaloni, D., Falcon, T., Cama, J., Siegel, R. W., Lee, R., Pancei, R., ... Castano, V. (1992). Electron Microscopy Studies of the Chronological Sequences of Teotihuacan Plaster Technique. *MRS Proceedings*, 267, 997. <https://doi.org/10.1557/PROC-267-997>
- Magaloni, D., Newman, R., Baños, L., & Falcon, T. (1993). Los pintores de Bonampak. In M. J. Macri & M. J. (dir) (Eds.), *Eighth Palenque Round Table*. Pre-Columbian Art Research Institute: Pre-Columbian Art Research Institute.
- Manrique Ortega, M. D. (2012). *Análisis no destructivo por técnicas espectroscópicas de las piedras verdes del ajuar funerario del rey maya Pakal*. Tesis de Licenciatura en Física, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Manzanilla, L. R. (2014). The Basin of Mexico. In C. Renfrew & P. Bahn (Eds.), *The Cambridge World Prehistory* (pp. 986–1004). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CHO9781139017831.067>
- Manzanilla, L. R., Bokhimi, X., Tenorio, D., Jiménez-Reyes, M., Rosales, E., Martínez, C., & Winter, M. (2017). Procedencia de la mica de Teotihuacan: control de los recursos suntuarios foráneos por las élites gobernantes. *Anales de Antropología*, 51(1), 23–38. <https://doi.org/10.1016/J.ANTRO.2016.09.001>
- Manzanilla Naim, L. R. (Ed.). (2012). *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en teotihuacan*. Mexico: Coordinación de la Investigación Científica, Coordinación de Humanidades de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Manzanilla Naim, L. R. (2017). *Teotihuacan, ciudad excepcional de Mesoamérica* (Opúsculos). México: El Colegio Nacional.
- Marcus, R. T. (1997). The measurement of color. In K. Nassau (Ed.), *Color for Science, Art and Technology* (pp. 31–96). Elsevier.
- Martínez García, C., Ruvalcaba Sil, J. L., Manzanilla Naim, L. R., & Riquelme, F. (2012). Teopancazco y su pintura. Aplicación de técnicas analíticas PIXE, MEB-EDX, DRX, FTIR y Raman. In L. R. Manzanilla (Ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan* (pp. 165–210). Coordinación de la Investigación Científica, Coordinación de Humanidades de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maynez Rojas, M. Á. (2017). *Uso de espectroscopías UV-Vis-IRC para el estudio de piezas históricas y obras de arte*. Tesis de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/8E1LUIFCRXIPXUHI3A9UU792X73H16SKVP2NHDHFLQDC2NCMUA-63877?func=full-set-set&set_number=011360&set_entry=000003&format=999
- Mindat.org - Mines, Minerals and More. (2019). Retrieved March 15, 2019, from <https://www.mindat.org/>
- Mitrani Viggiano, A. (2017). *Desarrollo e implementación de una microsonda de iones para caracterización de materiales*. Tesis de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales, A Escobedo and Mora, E Sanchez and Pal, U. (2007). Use of diffuse reflectance spectroscopy for optical characterization of un-supported nanostructures. *Revista Mexicana de Física*, 53(5), 18–22.

- Murakami, T. (2016). Materiality, regimes of value, and the politics of craft production, exchange, and consumption: A case of lime plaster at Teotihuacan, Mexico. *Journal of Anthropological Archaeology*, 42, 56–78. <https://doi.org/10.1016/J.JAA.2016.03.003>
- Nassau, K. (1983). *The physics and chemistry of color: the fifteen causes of color*. New York: Wiley Interscience Publications, Wiley & Sons.
- Nassau, K. (1997). Fundamentals of color science. In K. Nassau (Ed.), *Color for Science, Art and Technology* (pp. 1–30). Elsevier.
- Nowak, M., Kauch, B., & Szperlich, P. (2009). Determination of energy band gap of nanocrystalline SbSI using diffuse reflectance spectroscopy. *Review of Scientific Instruments*, 80(4), 046107. <https://doi.org/10.1063/1.3103603>
- Ohta, N., & Robertson, A. (2006). *Colorimetry: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Ontalba Salamanca, M. Á., Ruvalcaba-Sil, J. L., Bucio, L., Manzanilla, L., & Miranda, J. (2000). Ion beam analysis of pottery from Teotihuacan, Mexico. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 161–163, 762–768. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00844-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00844-7)
- Panczner, W. D. (1987). *Minerals of Mexico*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5848-1>
- Pauling, L. (1960). *The Nature of the Chemical Bond...* (Vol. 260). Cornell university press Ithaca, NY.
- Pecci, A., Miriello, D., Barca, D., Crisci, G. M., De Luca, R., Ortiz, A., ... Barba, L. (2018). Identifying a technological style in the making of lime plasters at Teopancazco (Teotihuacan, México). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10(2), 315–335. <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0352-x>
- Penrose, R. (1991). The mass of the classical vacuum. *The Philosophy of the Vacuum*. Clarendon, Oxford.
- Peñuelas, G., Ruvalcaba, J. L., Contreras, J., Hernández, E., & Ortiz, E. (2011). Non Destructive In Situ Analysis of Gold and Silver Artifacts from Tomb 7 of Monte Alban, Oaxaca, Mexico. In *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th - 16th May 2008, Siena, Italy* (pp. 623–627). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14678-7_91
- Pérez Ireta, G. (2016). *Caracterización por métodos no destructivos de espectroscopía de rayos X de cerámicas arqueológicas del sitio de Cerro de los Remedios, Guanajuato*. Tesis de

- Licenciatura en Química, Universidad de Guanajuato.
- Pérez, N. A., Bucio, L., Lima, E., Soto, E., & Cedillo, C. (2016). Identification of allophane and other semi-crystalline and amorphous phases on pre-Hispanic Mexican adobe earth bricks from Cholula, Mexico. *Microchemical Journal*, *126*, 349–358.
<https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2015.12.033>
- Rangel Chávez, I. (2018). *Metodología para el estudio de pigmentos y colorantes en obras de arte y patrimonio cultural mediante la técnica de imagen infrarroja de falso color*. Tesis de Licenciatura en Diseño y Comunicación Visual, Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/LQDHULDEURBQ6YKMD1ALQSK8C3K1CH5SRMG15K7GJHBBFVBCH-32812?func=full-set-set&set_number=021460&set_entry=000002&format=999
- Regev, L., Poduska, K. M., Addadi, L., Weiner, S., & Boaretto, E. (2010). Distinguishing between calcites formed by different mechanisms using infrared spectrometry: archaeological applications. *Journal of Archaeological Science*, *37*(12), 3022–3029.
<https://doi.org/10.1016/J.JAS.2010.06.027>
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, *3*, 1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- Ruvalcaba, J. L., & Demortier, G. (1995). Non-Destructive Analysis Of American Gold Jewellery Items By PIXE, RBS and PIGE. In *Application of Particle and Laser Beams in Materials Technology* (pp. 463–470). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8459-3_31
- Ruvalcaba, J. L., Zetina, S., Calvo del Castillo, H., Arroyo, E., Hernández, E., Van der Meer, M., & Sotelo, L. (2007). The Grolier Codex: A Non Destructive Study of a Possible Maya Document using Imaging and Ion Beam Techniques. *MRS Proceedings*, *1047*, 1047-Y06-07.
<https://doi.org/10.1557/PROC-1047-Y06-07>
- Ruvalcaba Sil, J. L., Ramírez Miranda, D., Aguilar Melo, V., & Picazo, F. (2010). SANDRA: Portable XRF system for the study of Mexican cultural heritage. *X-Ray Spectrometry*, *39*(5), 338–345.
<https://doi.org/10.1002/xrs.1257>
- Schapiro, M. (1962). El Estilo. In *Documentos*. Universidad Nacional de Chile, Facultad de Arquitectura.
- Shaw, M., & Williard, A. (1996). *Física Nuclear: Problemas Resueltos*. Madrid, España: Alianza Editorial.

- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (2001). *Principios de análisis instrumental*. McGraw-Hill Interamericana de España,.
- Socrates, G. (2007). *Infrared and raman characteristic group frequencies : tables and charts*. (3rd ed.). John Wiley & Sons. Obtenido de <https://www.wiley.com/en-us/Infrared+and+Raman+Characteristic+Group+Frequencies%3A+Tables+and+Charts%2C+3rd+Edition-p-9780470093078>
- Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy : fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ : J. Wiley, [2004] ©2004. Retrieved from <https://search.library.wisc.edu/catalog/999974109102121>
- Sugiyama, N., Sugiyama, S., Ortega, V., & Fash, W. (2016). ¿Artistas mayas en Teotihuacan? *Arqueología Mexicana*, (142), 8.
- Tandon, SP and Gupta, J. (1970). Measurement of forbidden energy gap of semiconductors by diffuse reflectance technique. *Physica Status Solidi (B)*, 38(1), 363–367.
- Tite, M. S. (1991). ARCHAEOLOGICAL SCIENCE-PAST ACHIEVEMENTS AND FUTURE PROSPECTS. *Archaeometry*, 33(2), 139–151.
- Torres Flores, A. P. (2017). *Caracterización espectroscópica no destructiva de la paleta de Diego Rivera*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Uriarte, M. T., & Zabé, M. (1998). *Fragmentos del pasado : murales prehispánicos*. Mexico: Artes de México. Retrieved from http://132.248.9.34/libroe_2006/0817094/Index.html
- Vandenabeele, P., Bodé, S., Alonso, A., & Moens, L. (2005). Raman spectroscopic analysis of the Maya wall paintings in Ek'Balam, Mexico. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 61(10), 2349–2356. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2005.02.034>
- Vázquez de Agredos Pascual, M. L. (2010). *La pintura mural maya: materiales y técnicas artísticas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vázquez de Ágredos Pascual, M. L., Lorenzo, C. V., & Cosme, G. M. (2014). Archaeometrical Studies of Classic Mayan Mural Painting at Peten: La Blanca and Chilonche. *MRS Proceedings*, 1618, imrc2013-8a-024. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.454>
- Vázquez de Ágredos Pascual, M. L., & Manzanilla, L. R. (2016). Corporate Paint and Ancient Pharmaceutical Mixtures from Teotihuacan: the Teopancazco Neighborhood Center sex and age profiles, paleopathology, and activity markers of the people in Teopancazco View project. *International Journal of Pharmacovigilance*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.15226/2476-2431/1/1/00110>

- Verma, H. R. (2007). *Atomic and nuclear analytical methods*. Springer.
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., & Skjemstad, J. O. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1–2), 59–75.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2005.03.007>
- Zetina, S., Luis Ruvalcaba, J., Falcón, T., Hernández, E., González, C., Arroyo, E., & Cáceres, M. L. (2008). *Painting syncretism: a non-destructive analysis of the badiano codex*. Obtenido de www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=65
- Zetina, S., Ruvalcaba, J. L., Cáceres, M. L., Falcón, T., Hernández, E., González, C., & Arroyo, E. (2011). Non Destructive In Situ Study of Mexican Codices: Methodology and First Results of Materials Analysis for the Colombino and Azoyu Codices. In *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th - 16th May 2008, Siena, Italy* (pp. 349–354). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14678-7_50

A Anexos

A.1 Cronología de Teotihuacan

	Late Postclassic	1350–1520 CE
Postclassic	Middle Postclassic	1150/1200–1350 CE
	Mazapa Phase-Toltec	800/900–1150/1200 CE
Epiclassic	Coyotlatelco Phase	650–800/900 CE
	Metepc Phase	550–650 CE
	Xolalpan Phase	350–550 CE
Classic	Tlamimilolpa Phase	200–350 CE
	Miccaotli Phase	100–200 CE
	Terminal Formative	150 BCE to 100 CE
	Late Formative	600–150 BCE
Formative	Middle Formative	1100–600 BCE
	Early Formative	1700–1100 BCE
Early Horizon		c. 22,000–1700 BCE

Figura 7-1: Cronología propuesta para la Cuenca de México (Manzanilla, 2014, p. 988)

A.2 Sistema de análisis y profundidad de análisis

En un trabajo de esta naturaleza, los materiales con los que se trabaja constan de varias capas superpuestas. Es por ello que resulta importante realizar los cálculos pertinentes para delimitar la profundidad de análisis. A continuación se presenta el desarrollo y cálculo para los materiales de esta investigación.

El sistema que se analizará en este trabajo es un arreglo de tres capas superpuestas con diferentes grosores. La primera capa será la del pigmento, después le sigue la capa de enlucido y finalmente una capa de argamasa, como se muestra en la

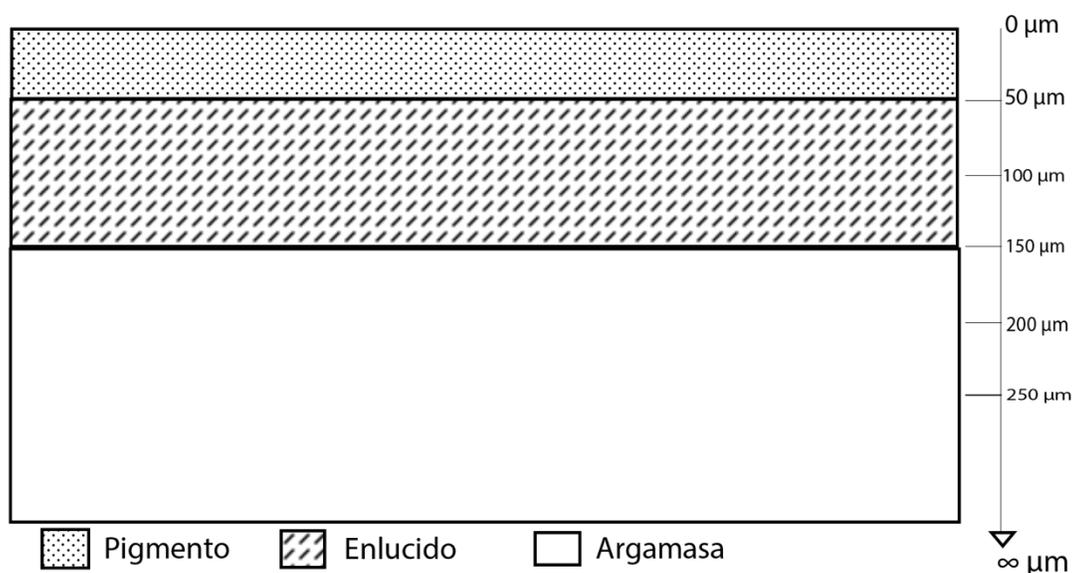


Figura 2: Diagrama del arreglo de tres capas

En este trabajo las dos principales fuentes de radiación que se utilizaron fueron: radiación UV-Vis-IRC y rayos-X. Para el primero grupo, el tipo de interacción de la materia con la fuente de radiación, está definido por el modelo de Kubelka-Munk (KM) (sección 3.3.2). En el modelo KM se describe la relación entre dos flujos luz que se propagan en sentidos opuestos, los cuales son dependientes de la longitud de onda y de la penetración al

material. En su trabajo, Cianni, Gross y Schwarzenbach (2005), obtuvieron valores para la penetración máxima a la cual se obtiene información espectroscópica por medio de la espectroscopia de reflectancia difusa en el intervalo de 275 – 700 *nm*, para suelos de diversos tipos. De acuerdo con el estudio, a 250 *nm* el intervalo de penetración será de 8 – 60 μm , mientras que a 700 *nm* será de 60 – 175 μm .

El estudio anterior únicamente abarca el intervalo del UV-Vis y los equipos utilizados en este trabajo operan en el intervalo del Vis-IRC, pero lo anterior permite hacer una aproximación de la profundidad del análisis en estos casos. Los estudios que se rigen por el modelo KM son la espectroscopía por reflectancia de fibra óptica (FORS) y la espectrocolorimetría.

Para el caso de la fluorescencia de rayos-X (XRF) se modeló la penetración para matrices de CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , Cu_2CO_3 y HgS . Los datos del coeficiente de atenuación másico se obtuvieron de las referencias del NIST (C.T. Chantler; K. Olsen; R.A. Dragoset & NIST, 2005). La penetración se obtuvo empleando la ecuación (3-14) y considerando que la tasa de I/I_0 varía entre el 99% y 90%, es decir, que únicamente el 90 – 99% de los fotones emitidos regresan al detector como rayos-X característicos. Además, los valores para la densidad de cada uno de los compuestos fueron obtenidos de las referencias de Mindat (“Mindat.org - Mines, Minerals and More,” 2019).

En la matriz de carbonato de calcio (Figura 3.a) se observa que para los elementos Al, Si, S, K y Ca, la penetración sigue una tendencia creciente, llegando a el máximo de penetración en 0.2 *mm* de la matriz. Es decir que, teniendo una capa de carbonato de calcio, los rayos-X característicos del Ca provendrían de una profundidad máxima de 0.2 *mm*. Así mismo, para elementos más pesados que el calcio, el comportamiento decrece y después crece exponencialmente.

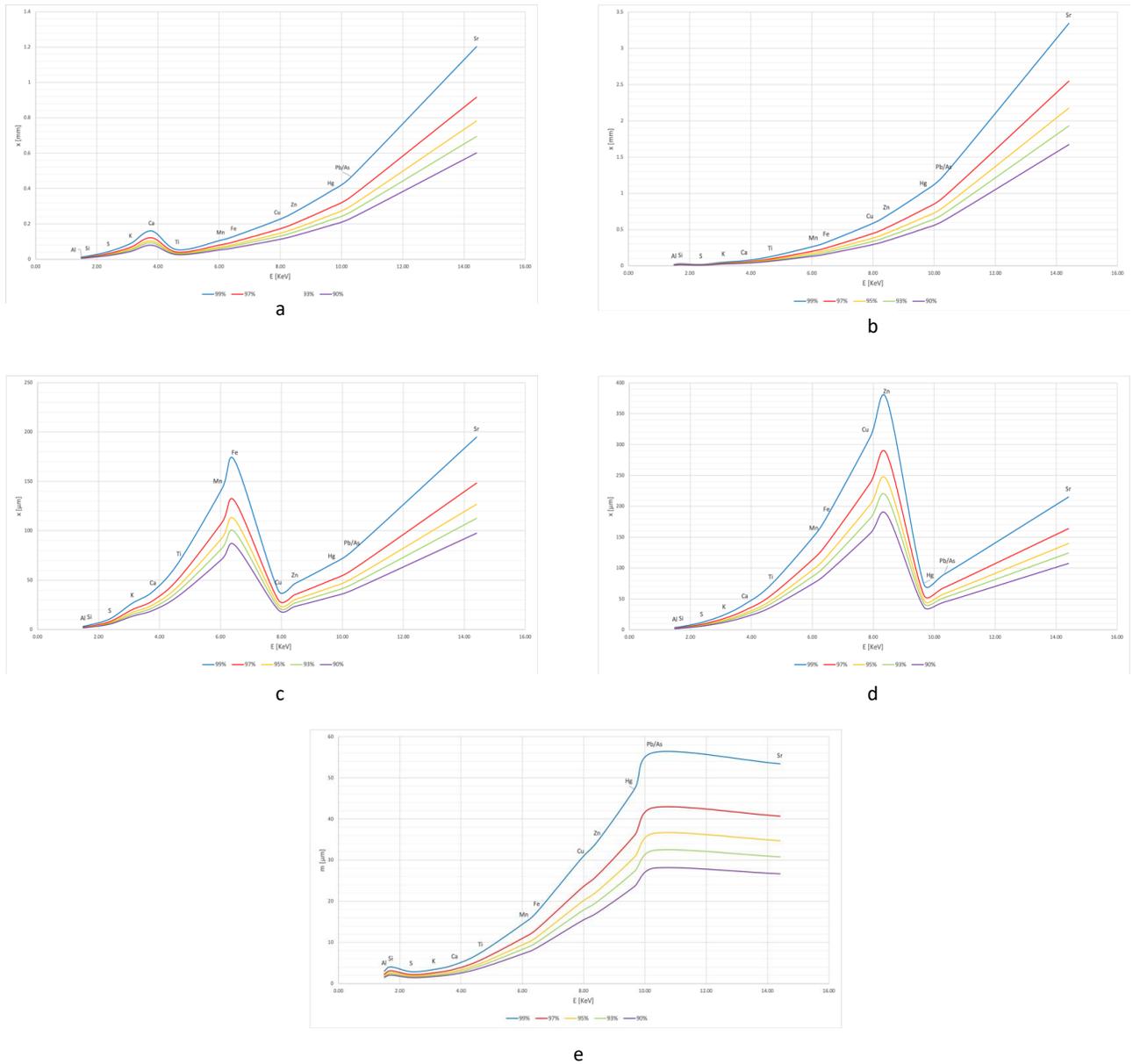


Figura 3: Cálculo de penetración para una matriz (a) $CaCO_3$ (b) SiO_2 (c) Fe_2O_3 (d) Cu_2CO_3 (e) HgS

El comportamiento anterior es común a todas las demás matrices. Como se puede observar, en todas las matrices, la penetración aumenta con la energía de los rayos-X característicos hasta el elemento principal de dicha matriz, después de esto decae abruptamente y comienza a subir de nuevo. Esto es debido a el comportamiento del coeficiente de atenuación másico para cada una de estas matrices decae exponencialmente conforme la energía de los rayos-X característicos aumenta. Como la penetración es inversamente

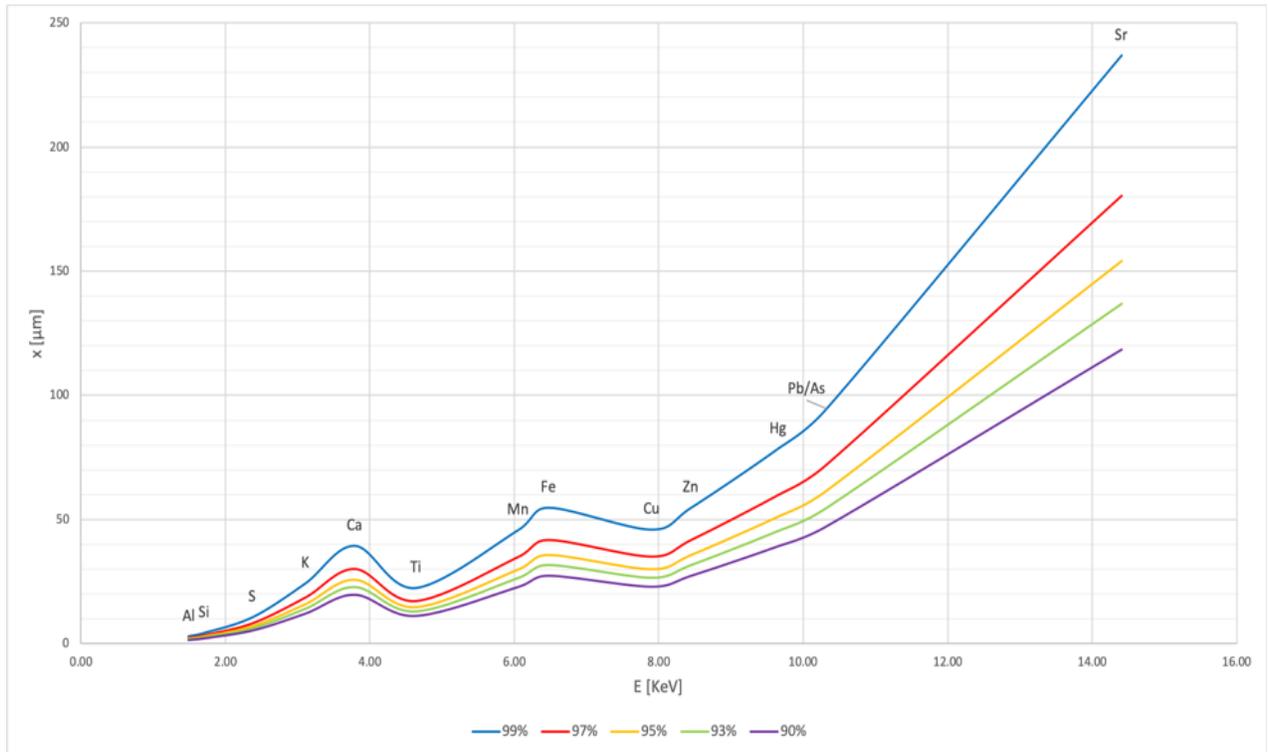
proporcional al coeficiente de atenuación másico, entonces la penetración reflejará ese comportamiento de manera exponencial. El caso menos evidente es el del silicio en la matriz de óxido de silicio, ya que los valores crecen, pero al ser rayos-X característicos de baja energía, a gran escala dicho comportamiento se puede observar únicamente de manera numérica.

Con estos resultados se planteó un modelo de capas en donde la capa de enlucido midiera $100 \mu m$ y la capa de pigmento $50 \mu m$ como se puede ver en la Figura 5-1. Además, se consideró la capa de enlucido conformada por una matriz de carbonato de calcio y los pigmentos por matrices de óxido de hierro, carbonato de cobre y sulfuro de mercurio. Esto dio tres modelos de comportamiento, uno por cada matriz de pigmento. Es importante destacar que los coeficientes de atenuación másicos no pueden sumarse directamente, es necesario usar un modelo de capas superpuestas (Al-Arif & Kakil, 2015) donde el coeficiente de atenuación másico efectivo (μ_{eff}) se expresa de la siguiente manera:

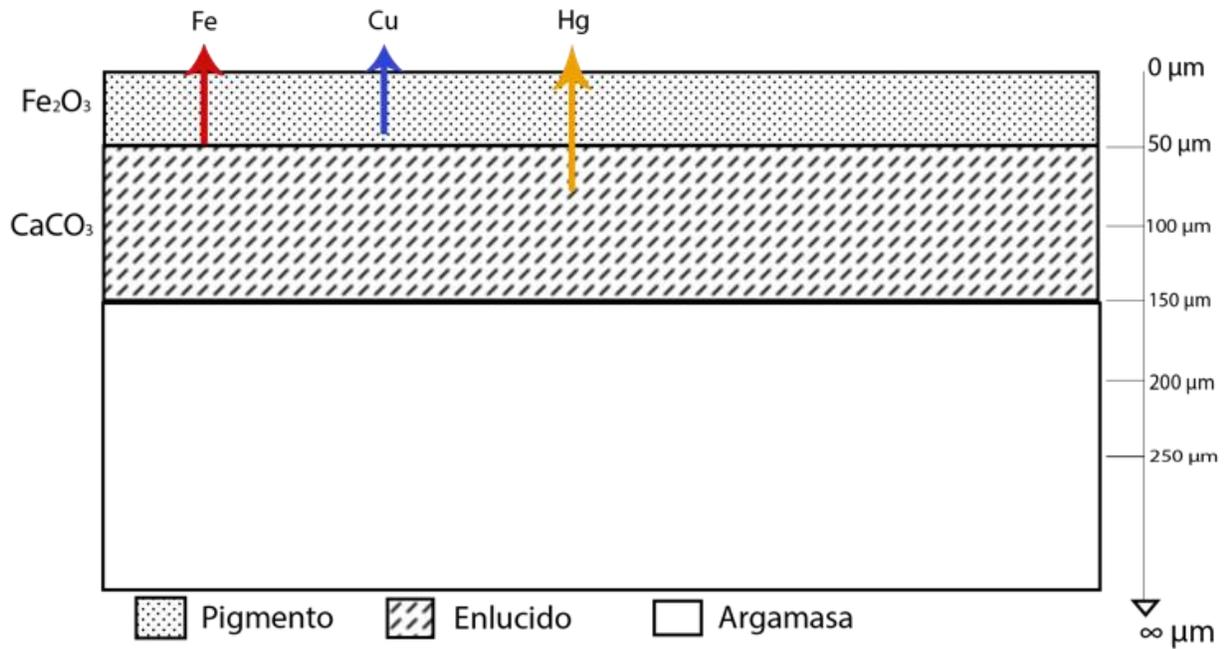
$$\mu_{eff} = \frac{\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \dots + \mu_n x_n}{x_{Tot}} \quad (1)$$

Donde los x es el grosor de cada capa y los índices indican a cada una de las capas superpuestas.

Considerando la aproximación en donde la capa de pigmento es de la mitad de grosor que la capa de enlucido, el comportamiento en los tres casos tiene una contribución únicamente del enlucido y la capa pictórica para todos los elementos considerados, menos el Sr. En el caso del sulfuro de mercurio con una capa de carbonato de calcio (Figura 6, Tabla 3), la totalidad de los elementos considerados pertenece a la capa pictórica y de enlucido.



a

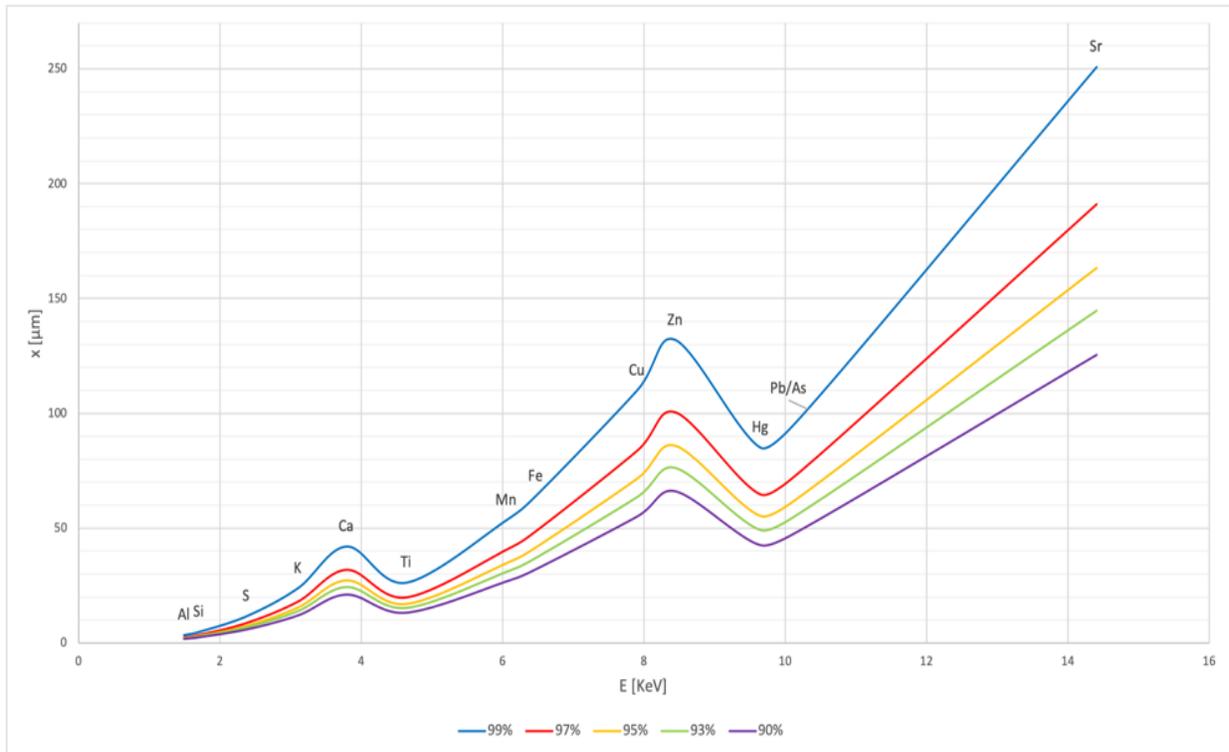


b

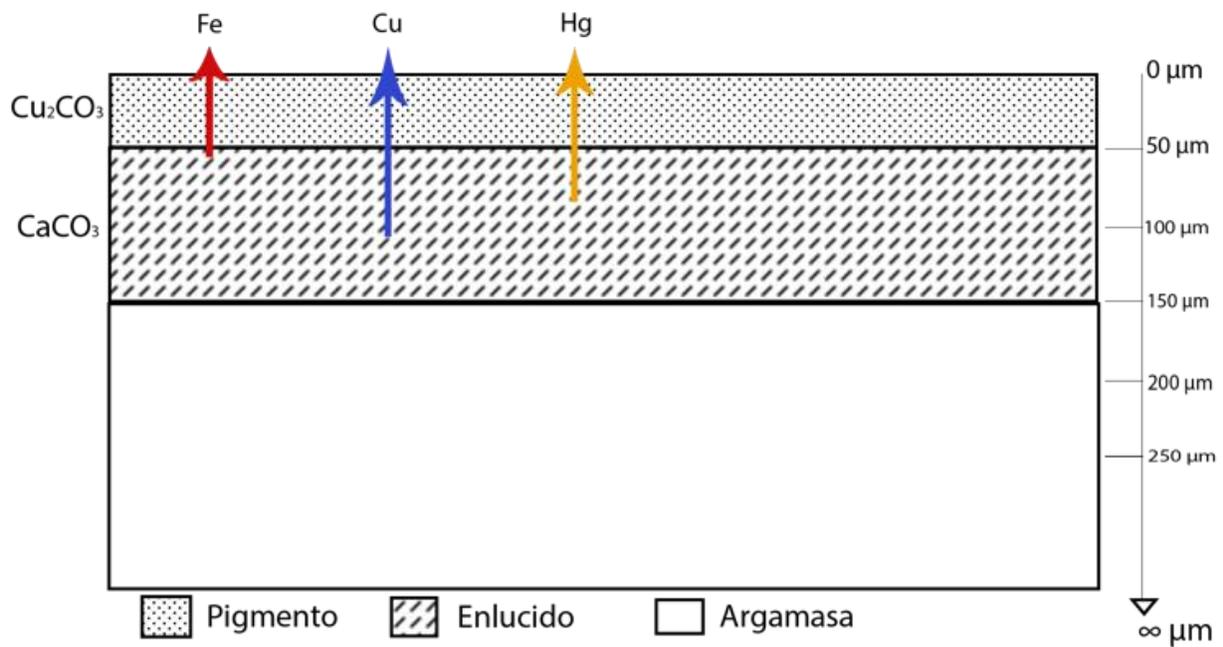
Figura 4: Modelo para la penetración de rayos-X para una capa de óxido de hierro con un enlucido de carbonato de calcio. La dinámica (a) está representada para diferentes valores de eficiencia y (b) el esquema de los rayos-X característicos.

Tabla 1: Valores para la penetración según el modelo de capas superpuestas con una capa de óxido de hierro

Elemento	$x_{99\%}$ [μm]	$x_{97\%}$ [μm]	$x_{95\%}$ [μm]	$x_{93\%}$ [μm]	$x_{90\%}$ [μm]
Al	3.1	2.3	2.0	1.8	1.5
Si	4.4	3.3	2.8	2.5	2.2
S	10.7	8.2	7.0	6.2	5.4
K	24.3	18.5	15.8	14.0	12.1
Ca	39.5	30.0	25.7	22.8	19.7
Ti	22.5	17.1	14.6	13.0	11.2
Mn	45.8	34.8	29.8	26.4	22.9
Fe	54.8	41.7	35.6	31.6	27.4
Cu	46.0	35.0	29.9	26.6	23.0
Zn	54.8	41.7	35.6	31.6	27.4
Hg	78.6	59.9	51.1	45.4	39.3
Pb/As	94.6	72.0	61.5	54.6	47.3
Sr	236.9	180.4	154.1	136.8	118.4



a

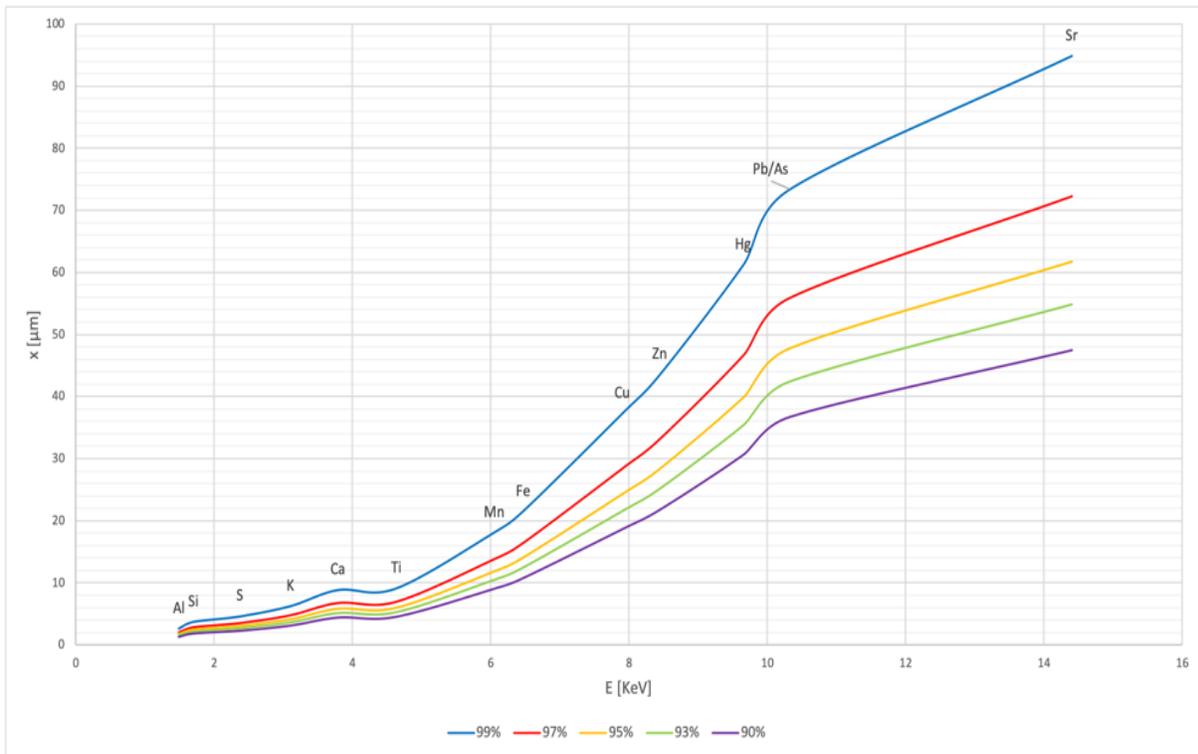


b

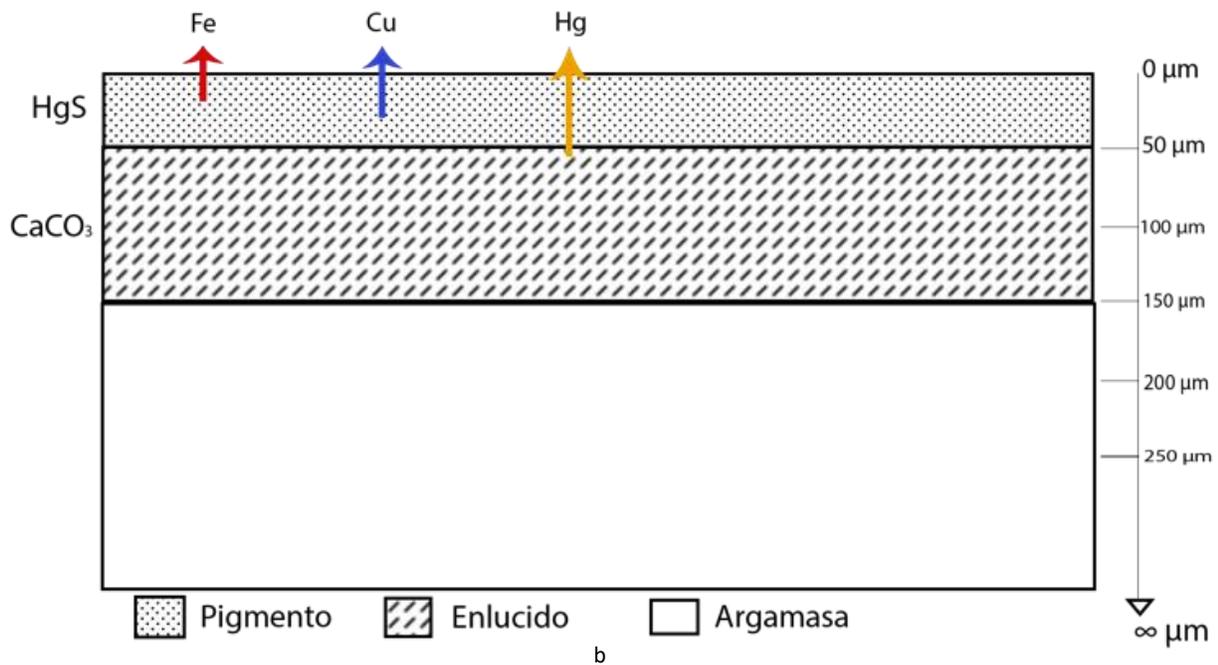
Figura 5: Modelo para la penetración de rayos-X para una capa de carbonato de cobre con un enlucido de carbonato de calcio. La dinámica (a) está representada para diferentes valores de eficiencia y (b) el esquema de los rayos-X característicos.

Tabla 2: Valores para la penetración según el modelo de capas superpuestas con una capa de carbonato de cobre

Elemento	$x_{99\%}$ [μm]	$x_{97\%}$ [μm]	$x_{95\%}$ [μm]	$x_{93\%}$ [μm]	$x_{90\%}$ [μm]
Al	3.4	2.6	2.2	1.9	1.7
Si	4.8	3.6	3.1	2.8	2.4
S	11.6	8.7	7.6	6.7	5.8
K	23.9	18.2	15.5	13.8	11.9
Ca	42.0	32.0	27.3	24.2	21.0
Ti	26.2	20.0	17.1	15.1	13.1
Mn	53.4	40.7	34.7	30.8	26.7
Fe	64.0	48.7	41.6	36.9	32.0
Cu	110.0	83.7	71.5	63.5	55.0
Zn	131.9	100.4	85.8	76.2	65.9
Hg	85.0	64.7	55.3	49.1	42.5
Pb/As	101.9	77.6	66.3	58.8	50.9
Sr	250.8	191.0	163.2	144.9	125.4



a



b

Figura 6: Modelo para la penetración de rayos-X para una capa de sulfuro de mercurio con un enlucido de carbonato de calcio. La dinámica (a) está representada para diferentes valores de eficiencia y (b) el esquema de los rayos-X característicos.

Tabla 3: Valores para la penetración según el modelo de capas superpuestas con una capa de sulfuro de mercurio

Elemento	$x_{99\%}$ [μm]	$x_{97\%}$ [μm]	$x_{95\%}$ [μm]	$x_{93\%}$ [μm]	$x_{90\%}$ [μm]
Al	2.7	2.0	1.7	1.5	1.3
Si	3.8	2.8	2.4	2.2	1.9
S	4.6	3.5	3.0	2.7	2.3
K	6.3	4.8	4.1	3.6	3.1
Ca	8.9	6.7	5.8	5.1	4.4
Ti	9.1	6.9	5.9	5.3	4.6
Mn	18.1	13.8	11.8	10.5	9.0
Fe	21.5	16.4	14.0	12.4	10.8
Cu	37.3	28.4	24.2	21.5	18.6
Zn	43.5	33.3	28.3	25.1	21.8
Hg	61.2	46.6	39.8	35.3	30.6
Pb/As	73.3	55.8	47.7	42.3	36.7
Sr	94.9	72.2	61.7	54.8	47.4

Para el primer caso, capa pictórica de óxido de hierro, la contribución de hierro de la capa de pigmento es ~86% de la intensidad total, mientras que la del cobre será en su totalidad del pigmento y la del mercurio únicamente el ~64% pertenece al pigmento³⁰.

De la misma manera, en el caso de una capa de pigmento de carbonato de cobre, la contribución del cobre será únicamente del ~45%, la de hierro de ~79% mientras que la de mercurio de ~59%.

Finalmente, para la capa de pigmento de sulfuro de mercurio, el 100% de la intensidad total del Fe y Cu pertenecerá al pigmento mientras que el ~82% de la intensidad del Hg

³⁰ Considerando los valores de mayor penetración que corresponden a un 99% de eficiencia.

corresponderá a la capa de pigmento.

Por supuesto el anterior es únicamente un modelo que busca aproximar las mediciones a continuación presentadas, así como el intervalo de confianza de las mismas. Sin embargo, se calculó la penetración al 99% de eficiencia para una capa de pigmento con un grosor de $25\mu m$ y de $5\mu m$. Los resultados se presentan en la Figura 7-7. El comportamiento en los tres casos muestra que a medida que la capa pictórica es más delgada, la profundidad de análisis aumentará. También es importante destacar que, aunque la capa de pigmento sea de $5\mu m$, la penetración es 10^2 veces menor que cuando se tiene una capa de carbonato de calcio únicamente. En otras palabras, el pigmento amortigua los rayos-X por un factor de 10^2 .

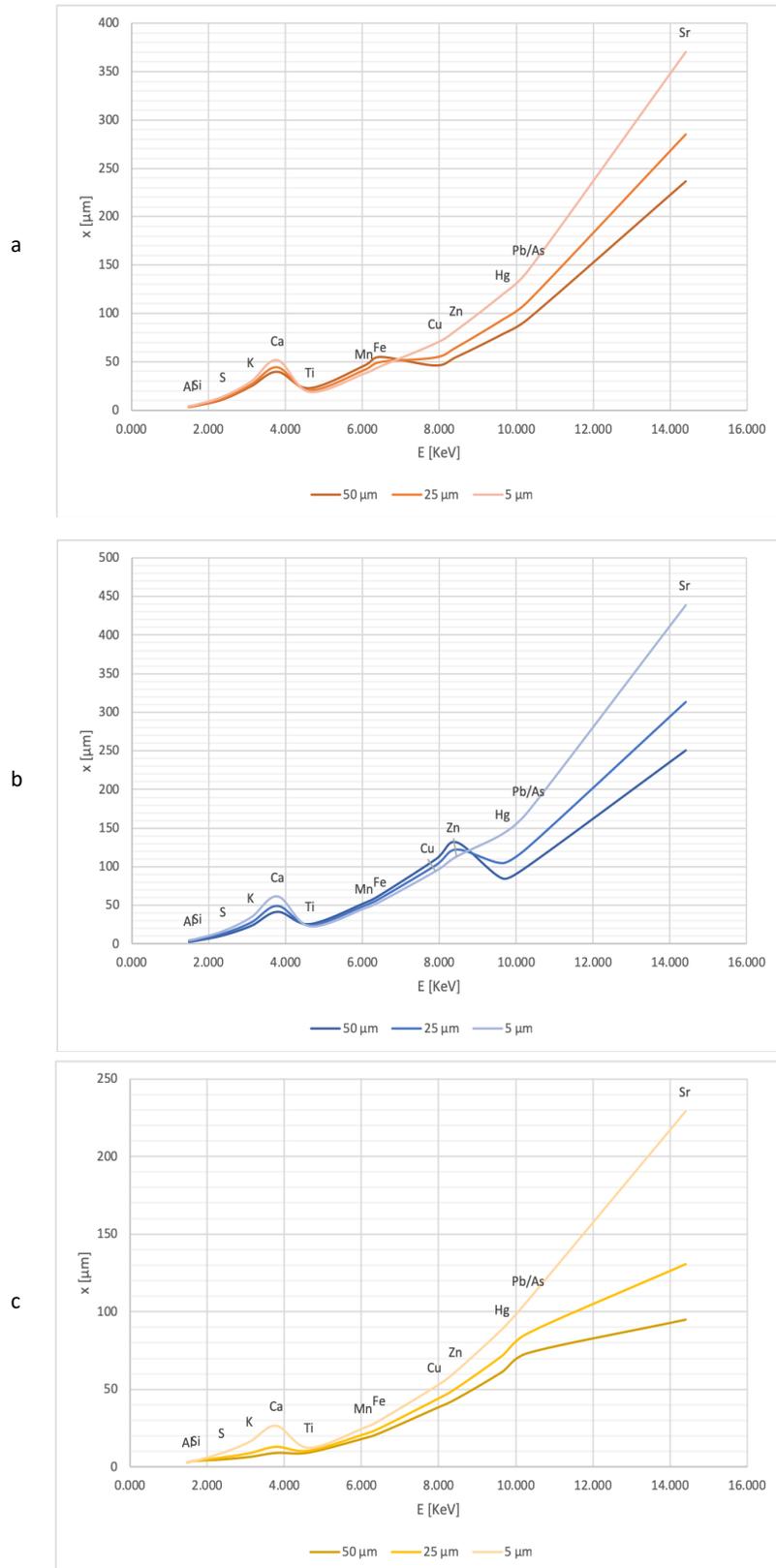


Figura 7-7: Modelo de penetración con variaciones en el grosor de la capa pictórica de (a) óxido de hierro, (b) carbonato de cobre y (c) sulfuro de mercurio.

A.3 Resumen de resultados

Tabla 4: Tabla con los resultados de los análisis efectuados en los fragmentos 2016 y 2017

Fragmento	Clasificación	Colorimetría (L*, a*, b*)	IR-Falso color	XRF	FORS
1_C16-0649	Rojo	(62.6, 21.0, 21.3)	RN→AV	Fe, Ti, Sr, As	Tierras rojas
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Sr, K, Si	Carbonato de calcio
2_C16-0649	Beige	(68.7, 9.9, 23.1)	N→VA	Ca, Cu, Fe, Sr, K	Carbonato de calcio
	Verde	(69.6, -2.2, 16.8)	AV→CC	Cu, Fe, Zn, Sr, K, Si	Malaquita + agregados (Fe ₂ O ₃)
3_D16-0860	Negro	(25.5, 2.4, -0.1)	Mo→R	Fe, Sr, K, Si	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
4_D16-0983	Naranja	(48.4, 28.1, 16.9)	R→AV	Hg, Cu, Fe, Sr	Cinabrio
	Beige	(62.3, 7.0, 14.0)	–	Ca, Fe, Cu, Sr, K	Carbonato de calcio
	Verde	(58.4, 2.5, 11.5)	NA→CV	Cu, Fe, As, Hg	Malaquita
	Negro	–	RR→RN	Fe, Hg, Cu, Sr, K	Fe ₂ O ₃ + ¿mica (biotita)?
	Enlucido	–	–	Fe, Ca, Cu, K	–
	Argamasa	–	–	Fe, Ca	–
5_D16-0869	Rojo	(41.7, 12.1, 9.0)	R→NA	Ca, Fe, K, Sr, Cu	Hematita
	Naranja	(47.8, 37.2, 23.6)	R→AV	Hg, Fe, Sr	Cinabrio
	Negro	(39.3, 5.0, 5.0)	R→RN	Fe, Sr, K, Hg, Cu	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
	Blanco	(74.9, 2.1, 9.4)	–	Ca, Fe, Cu, Sr, K	Carbonato de calcio
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Sr, K, Si, Hg	Posible carbonato de calcio
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Ti, K	Posibles tierras arcillosas
6_D16-0860	Ocre	(30.0, 9.4, 8.0)	N→AV	Fe, Sr, K	Goethita + arcilla (caolinita)
	Rojo	(26.3, 10.4, 3.2)	R→A	Fe, K, Sr	Hematita + agregados
7_C16-0698	Rojo	(51.5, 16.4, 15.8)	R→A	Fe, Sr, Si, K, Ti	Hematita + agregados
	Beige	(61.7, 10.9, 21.3)	–	Ca, Fe, Cu, K, Sr	Posible carbonato de calcio
	Enlucido c/ verde	(54.5, 4.7, 13.8)	–	Cu, Ca, Fe, K, Zn	–
8_D16-0252	Rojo	(45.7, 28.3, 16.8)	R→AV	Fe, Ti, Si, Sr	Hematita
9_D16-1002	Blanco	–	–	Ca, Fe, K	–
	Rojo	(34.9, 19.1, 10.4)	R→NA	Fe, K, Sr	Hematita
	Naranja	(47.0, 32.9, 22.4)	R→VA	Hg, Fe, Sr, K, Cu	Cinabrio + hematita

	Negro	(30.7, 3.4, 3.0)	–	Fe, Sr, K, Si, Cu, Hg	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
10_D16-0860-A	Rojo	(42.1, 21.1, 11.6)	R→AV	Fe, Cu, Sr, Pb, Si, K	Hematita
	Negro	(29.7, 11.6, 15.0)	R→N	Fe, Cu, Sr, K, Si	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
10_D16-0860-B	Rojo	(53.3, 24.1, 15.0)	R→AV	Fe, Cu, Sr, Pb, Si, K	Hematita
	Negro	(33.7, 7.3, 5.2)	MR→RN	Fe, Cu, Sr, K, Si	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
11_D16-0983	Naranja	(60.9, 34.9, 26.1)	R→AV	Hg, Fe, Sr, Cu	Cinabrio + hematita
	Blanco	(85.6, 2.9, 15.9)	–	Ca, Fe, Cu, Sr	Posible carbonato de calcio
	Negro	(64.3, 4.9, 12.2)	MR→RN	Fe, Cu, Sr, K, Pb	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Cu, Sr, K	–
12_D16-0983	Verde	(42.0, 5.4, 14.3)	N→RN	Fe, Cu, K, Sr, As	–
	Rojo	(42.8, 19.3, 12.8)	R→NA	Fe, Sr, Si, K, Cu	Hematita
	Enlucido	(73.1, 2.0, 15.2)	–	Ca, Cu, Fe, Sr, K, As	Se identifican las tierras del soporte
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Ti	Tierras + arcillas
13_D16-0835	Naranja	(46.2, 28.6, 18.3)	R→AV	Hg, Fe, Sr	Cinabrio
	Enlucido	(68.7, 8.1, 12.0)	–	Ca, Fe, Hg, Sr, S, K	Se identifican las tierras del soporte
14_D16-0242	Naranja	(56.5, 40.4, 26.6)	R→AV	Hg, Sr, Fe	Cinabrio
	Blanco	(76.9, 5.5, 17.1)	–	Ca, Sr, Fe, K, S, Hg	Se identifican las tierras del soporte
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Ti	Tierras + arcillas
15_D16-0242	Rojo	(50.2, 17.4, 11.0)	–	Fe, Sr, Si, K	Hematita + agregados
16_D16-0983	Verde	(70.0, -2.8, 15.3)	–	Cu, Fe, As	Malaquita + agregados
17_D16-0680-A	Rojo	(36.1, 17.7, 9.7)	R→RN	Fe, Sr, K, Cu, Hg	Hematita + agregados
	Beige	(70.4, 6.5, 20.6)	–	Ca, Fe, K, Sr, Cu	–
	Negro	–	RN→R	Fe, Sr, Cu, K, Pb	–
17_D16-0680-B	Enlucido c/ Rojo	(82.1, 5.0, 13.4)	–	Ca, Fe, Sr, Cu	–
18_D16-0680-A	Beige	(77.1, 4.8, 18.8)	–	Ca, Fe, Ti	Se identifican las tierras del soporte
	Café	(68.7, 15.7, 27.0)	RN→AV	Fe, Sr, K, Si, Pb, Hg	Tierras rojas
18_D16-0680-B	Café	(54.0, 7.9, 9.2)	–	Fe, Se, K, Si, Cu	Se identifican las tierras del soporte
	Azul	(53.5, 2.5, 8.3)	–	Fe, Cu, Sr, K, Si, As	–
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Cu, Sr, K	Se identifican las tierras del soporte
19_D16-0860-A	Blanco	(78.3, 2.8, 14.4)	–	Ca, Fe, Cu, K, Sr	Se identifican las tierras del soporte
	Negro	(51.4, 3.5, 7.2)	M→R	Fe, Cu, K, Sr, Zn, Pb	–
	Naranja	(65.1, 17.3, 20.1)	R→AV	Fe, Hg, Cu, K, Sr, Zn	Hematita + agregados (cinabrio)

19_D16-0860-B	Naranja	(67.2, 28.0, 24.7)	R→AV	Hg, Fe, Sr, K, Zn, Si	Hematita + agregados (cinabrio)
	Negro	(58.6, 7.1, 13.9)	–	Fe, Sr, K, Si, Mn	–
	Beige	(72.6, 6.3, 17.7)	–	Ca, Fe, Sr, K	–
19_D16-0860-C	Negro	(59.9, 2.1, 5.3)	–	Fe, Sr, K, Si	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
20_D16-0680-A	Beige	(68.2, 10.8, 25.0)	N→V	Ca, Fe, Cu, K	–
	Naranja	(56.8, 36.1, 23.3)	R→AV	Hg, Fe, Sr, Zn, K, Cu	Cinabrio + agregados
	Negro	(43.4, 17.2, 10.2)	Ma→R	Hg, Fe, Cu, Sr	–
20_D16-0680-B	Ocre	(63.3, 14.8, 36.0)	–	Fe, Sr, K, Si	Goethita + arcilla (caolinita)
	Negro	–	R→RN	Fe, Sr, K, Si, Zn	–
21_D16-0860-A	Ocre	(41.9, 12.7, 28.3)	N→A	Fe, Mn, Cu, K	Goethita
	Beige	(39.8, 6.1, 12.3)	N→RN	Cu, Fe, Ca	Posible carbonato de calcio
21_D16-0860-B	Verde	(32.6, -0.1, -0.1)	–	Cu, Hg, Fe, Zn, As	Malaquita + agregados (Fe ₂ O ₃)
	Naranja	(24.9, 13.2, 1.0)	R→A	Hg, Cu, Fe, Sr	Cinabrio + hematita
21_D16-0860-C	Beige	(17.5, 4.9, -4.4)	N→R	Ca, Fe, Cu, Sr	Se identifica el soporte
	Café	–	R→RN	–	–
	Enlucido	(22.0, 4.5, -5.0)	–	–	Posible carbonato de calcio
21_D16-0860-D	Rojo	(45.6, 10.8, 11.3)	R→N	Fe, K, Sr, Cu	Hematita
22_D16-1052	Rojo	(45.0, 19.3, 12.1)	R→NA	Fe, Cu	Hematita + agregados
	Verde	(58.0, 6.1, 17.8)	NA→N	Cu, Fe, Sr, Zn, As	Malaquita
	Azul	(54.2, -5.5, -0.7)	CC→R	Cu, Fe, As	Azurita + agregados
23_D16-0860	Rojo	(43.5, 14.6, 7.9)	R→NA	Ca, Fe, K, Sr, Cu	–
	Beige	(48.0, 8.3, 8.2)	R→N	Ca, Fe, K, Sr, Cu	Se identifican las tierras del soporte
24_D16-0860	Beige	(77.8, 5.3, 22.1)	–	Ca, Fe, Cu, Sr	Calcita
	Negro	–	–	Fe, Sr, Cu, K, Pb	Se identificó la calcita del enlucido
	Enlucido/Blanco	(85.0, 1.9, 19.1)	–	–	Calcita
25_D16-0860-A	Naranja	(69.9, 22.0, 27.2)	R→N	Hg, Fe, Sr, K, Si, Zn	Cinabrio + hematita
	Café	(58.7, 8.4, 16.2)	–	Fe, Sr, Hg, K, Mn, Si	Se identifican las tierras del soporte
25_D16-0860-B	Beige	(75.9, 4.7, 22.1)	N→AV	Ca, Cu, Fe	Posible carbonato de calcio
	Blanco	(60.0, 14.8, 33.5)	–	Ca, Fe, Cu, K, Sr	Posible carbonato de calcio
	Azul	(86.6, -3.2, 18.0)	VC→CA	Cu, Fe, Sr, K, As	–
	Negro	–	–	Fe, Cu, Sr, K, Si, Hg	–

25_D16-0860-C	Ocre	(60.0, 14.8, 33.5)	N→A	Fe, Sr	Goethita
	Naranja	(56.0, 27.4, 27.2)	R→A	Fe, Hg, Sr, Cu	Cinabrio + hematita
	Negro	(39.3, 2.1, 5.2)	–	Fe, Hg, Sr, Cu	La señal no se ha podido identificar
	Blanco	–	–	Ca, Fe, Cu, Sr, K	–
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Hg, Sr, S, K	–
26_D16-0860-A	Ocre	(65.3, 17.0, 42.6)	N→AV	Fe, Sr, K	Goethita + arcilla (caolinita)
	Enlucido	(82.2, 3.4, 19.8)	–	Ca, Fe, Sr, K	Posible carbonato de calcio
26_D16-0860-B	Blanco	(80.5, 2.3, 17.0)	–	Ca, Fe, Sr, K, Cu	Calcita
	Ocre	(66.9, 15.7, 39.6)	N→A	Fe, Sr, Cu	Goethita
	Negro	–	–	Fe, Sr, K, Cu, Pb	Se identifican las tierras del soporte
26_D16-0860-C	Naranja	(64.9, 41.4, 31.7)	R→AV	Hg, Fe, Sr, K, Si	Cinabrio
27_D16-0983-A	Ocre	(79.5, 9.6, 44.2)	NA→VA	Cu, Sr, Fe, K	Goethita + agregados
	Verde	(57.3, 6.3, 34.5)	–	Cu, Fe, Zn, As	Malaquita + agregados (Fe ₂ O ₃)
	Argamasa	–	–	Ca, Sr	Posible tierras + arcillas
27_D16-0983-B	Rojo/Azul	(41.1, 2.6, 7.0)	R→R	–	–
	Naranja	(62.0, 12.9, 22.6)	R→NA	Cu, Fe, Hg, Zn	–
	Azul	(59.5, 2.5, 13.5)	Ce→RR	Fe, Cu, Zn, As	Azurita + agregados
	Enlucido	–	–	Ca, Cu, Fe, Sr	Calcita
28_D16-0242-A	Ocre	(60.3, 13.6, 28.1)	–	Fe, Hg, Sr, Si	Goethita
	Rojo	–	–	Fe, Si, K, Sr, Ti, Hg	–
	Naranja	–	R→A	Cu, Fe, Hg, Si	–
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Ti	Tierras + arcillas
28_D16-0242-B	Café	(60.8, 7.1, 16.3)	–	Cu, Fe, Sr, K, Si, Hg	Posible carbonato de calcio
	Beige	(63.4, 6.8, 19.7)	–	Ca, Cu, Fe, Sr	Posible carbonato de calcio
	Azul	(50.8, -1.1, 3.6)	CC→Rs	Cu, Fe, Zn	Azurita + agregados
29_D16-0860-A	Ocre	(60.5, 16.9, 39.5)	–	Fe, Sr	–
	Naranja	(62.2, 27.8, 27.2)	N→NA	Fe, Hg, Sr, Cu	Cinabrio + hematite
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Sr, K, Cu	–
29_D16-0860-B	Beige	(81.5, 7.0, 23.5)	–	Ca, Fe, Cu, Sr, K	Se identifican las tierras del soporte
30_D16-0860-A	Rojo	(62.9, 22.9, 18.6)	R→NA	Ca, Fe, K, Sr, Hg	–
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Sr, K	–
30_D16-0860-B	Blanco	(75.2, 2.4, 11.9)	–	Ca, Fe, Cu, Sr	Se identifican las tierras del soporte
	Negro	–	–	Fe, Cu, Sr, K, Zn	Se identifican las tierras del soporte
30_D16-0860-C	Blanco	(78.8, 1.9, 13.0)	–	Ca, Fe, Cu, K, Sr	Se identifican las tierras del soporte
	Verde	(75.1, 0.3, 18.0)	–	Cu, Fe, As	–

30_D16-0860-D	Naranja	(68.3, 35.6, 30.5)	R→AV	Hg, Fe, Sr, K, Si	Cinabrio + hematita
31_D16-0860-A	Blanco	–	–	Ca, Fe, Cu, K, Sr	Calcita
	Enlucido	–	–	Fe, Ca, Cu, K, Ti	Calcita
	Negro	–	N→R	Fe, Cu, K, Si, Sr, Pb	Se identifican las tierras del soporte
31_D16-0860-B	Rojo	(61.9, 17.7, 16.6)	R→NA	Ca, Fe, K, Sr	Hematita
	Ocre	(71.8, 16.1, 37.2)	N→AV	Fe, Sr, K, Si	Goethita + arcilla (caolinita)
32_D16-0869	Naranja	(65.3, 32.9, 27.0)	R→VA	Hg, Fe, Sr, K, Cu	–
	Ocre	(52.0, 3.7, 7.6)	–	Fe, Cu, Sr, K	–
	Blanco	(81.0, 1.4, 13.9)	–	Ca, Cu, Fe, Sr, As, K	–
	Negro	–	–	Fe, Cu, Sr, K, As, Zn	Se identifican las tierras del soporte
	Verde	–	V→CA	Cu, Fe, As, Zn, K	–
33_D16-0869	Café	(55.1, 9.4, 19.1)	N→AV	Fe, Mn, K, Sr, Si	Se identifican las tierras del soporte
	Beige	(73.6, 5.5, 18.8)	–	Ca, Fe, Sr, K, Si	Se identifican las tierras del soporte
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Sr, K	–
34_C16-0698	Naranja	(65.0, 37.1, 29.3)	R→AV	Hg, Fe, Sr, Zn, Cu, Si	Cinabrio
	Beige	(78.8, 7.1, 27.5)	N→V	Ca, Cu, Fe	Posible carbonato de calcio
	Negro	–	RN→RN	Cu, Fe, Hg, As, Pb	Posible carbón
	Enlucido	(94.8, 1.0, 13.9)	–	Ca, Fe, K, Sr, Cu	Calcita
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Ti	Tierras + arcillas
35_D16-0653	Naranja	(47.1, 26.9, 20.5)	R→A	Fe, Hg, Sr, Cu	Cinabrio + hematite
	Ocre	(51.8, 16.1, 31.5)	N→A	Fe, Hg	Goethita
	Negro	(36.9, 6.1, 10.7)	RN→RN	Fe, Hg	Óxidos de hierro y soporte de tierras
36_S_N	Verde	(38.0, 1.7, 8.8)	A→Ci	Cu, Fe, Zn, As	Malaquita
	Azul	(38.1, 1.8, 5.2)	CC→MR	Cu, Fe, As	Azurita + agregados
	Naranja	(37.8, 31.4, 21.0)	R→AV	Hg, Fe, Sr, Cu	Cinabrio
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Ti	Tierras + arcillas
37_D16-1001	Verde	(42.9, -5.0, 9.5)	VC→Ma	Cu, Fe, Zn, As	Malaquita + agregados transparentes
	Rojo	(47.2, 21.6, 14.4)	–	Fe, Cu, Sr, Si, Pb, As	Hematita
	Negro	(31.8, 11.4, 6.0)	MR→RN	Fe, Sr, Cu, Hg	Fe ₂ O ₃ + mica (biotita)
38_D17-0571-EL-186-002	Rojo	(8.2, 32.8, 29.0)	R→A	Fe, Sr, Cu, Si, K, Hg	Hematita
	Naranja	(102.3, 44.4, 44.5)	R→AV	Hg, Sr, Fe	Cinabrio
	Blanco	–	–	Ca, Fe, K, Hg, S	Posible carbonato de calcio
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Ti, Sr	–

39_EL-160-001	Naranja	(97.1, 49.9, 43.9)	R→AV	Hg, Cu, Fe, Sr, As	Cinabrio + hematita
	Verde	(101.6, 24.1, 36.4)	RN→NA	Cu, Fe, Hg, Sr, As	–
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, K, Cu, Si	Posible carbonato de calcio
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	–
40_D17-0685-EL-209-006	Blanco	(129.8, -1.0, 3.9)	–	Ca, Fe, Cu, K, Si, As	Calcita
	Ocre	(90.3, 18.4, 50.1)	N→A	Fe, Sr, K	Goethita
	Rojo	(74.1, 23.2, 20.3)	R→N	Fe, Cu, Sr	–
	Verde	(122.2, -0.2, 21.4)	AV→CC	Cu, Fe, As, Sr, K, Si	Malaquita + agregados
	Negro	(70.2, 26.7, 11.9)	N→RN	Fe, Cu	Se identifica calcita del soporte
41_D17-0571-EL-186-022	Ocre	(127.4, -7.1, 38.4)	N→A	Fe, Cu, Sr, Mn	Goethita
	Blanco	(131.2, 13.0, -28.5)	–	Ca, Cu, Fe, K, Zn, As	Posible carbonato de calcio
	Verde	(131.2, 12.1, -27.5)	A→Ci	Cu, Fe, As, K, Zn, Pb	Malaquita + agregados (Fe ₂ O ₃)
42_D17-0983-EL-255-011	Verde	(126.6, -25.7, 24.7)	VC→M	Cu, Fe, As, Zn	Malaquita + agregados transparentes
	Rojo	(116.1, 20.0, 29.2)	R→A	Fe, Cu, Sr	Hematita
	Negro	(101.8, 7.1, 23.8)	R→RN	Fe, Cu, Sr	Se identifica calcita del soporte
	Blanco	(130.0, -4.1, 8.2)	–	–	Calcita
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Cu, K, Si	Calcita
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Ti	–
43_D17-1019	Rojo	(114.9, 22.6, 40.3)	RN→AV	Fe, Ti, Sr, Si	Hematita
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, K, Si, Cu, S	–
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Ti	–
44_D17-1044-EL-270-002	Verde	(121.0, 1.7, 21.8)	–	Cu, Fe, Zn, K	Se identifica calcita del soporte
	Enlucido	–	–	–	Calcita
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Sr	–
45_D17-0406-EL-153-019	Naranja	(116.7, 19.9, 31.7)	R→AV	Cu, Fe, Hg, Sr, As	Cinabrio
	Azul	(130.2, -3.9, 6.0)	Ce→Ro	Cu, Fe, Hg, As, Zn	Azurita + agregados
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Sr	Posibles tierras + arcillas
46_D17-0685-EL-209-003	Naranja	(95.0, 53.3, 44.6)	R→AV	Hg, Fe, Sr, K, Si, Cu	Cinabrio
	Azul	(110.6, -5.3, 8.4)	–	Fe, Cu, As, Si, Zn	Azurita + agregados
	Beige	(120.4, 11.6, 30.5)	–	Ca, Cu, Fe, K, Hg, As	Posible carbonato de calcio
	Ocre	(105.5, 30.2, 69.7)	M→VA	Fe, Sr, K	Goethita
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Sr	–
47_D17-0983-EL-255-014	Rojo	(78.6, 28.7, 24.0)	–	Fe, Cu, As	–
	Verde	(110.1, -4.2, 18.6)	A→Ci	Fe, Cu, As, Zn	Malaquita
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	–

48_D17-0699-EL-216-006	Naranja	(103.1, 41.9, 42.4)	R→AV	Hg, Fe, Cu, Sr	Cinabrio
	Ocre	(111.4, 16.2, 50.0)	N→AV	Fe, Sr, K	Goethita + arcilla (caolinita)
	Verde	(128.7, -3.9, 17.1)	–	Cu, Fe, As	Malaquita
	Beige	(130.0, -2.9, 6.6)	–	–	Se identifican las tierras del soporte
	Blanco	(130.9, 3.6, -12.3)	–	Ca, Cu, K, Fe, Zn, As	Se identifican las tierras del soporte
	Negro	–	RN→N	Fe, Sr, Cu, Zn	La señal del cinabrio interfiere
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Sr, Ti	Tierras + arcillas
49_D17-0951-EL-249-011	Ocre	(82.8, 5.2, 38.6)	NA→V	Cu, Sr, As, K, Fe	–
	Verde	(51.9, 5.3, 25.1)	–	Fe, Cu, As, Zn	Malaquita + agregados (Fe ₂ O ₃)
	Blanco	(87.1, 0.6, 10.3)	–	Ca, Fe, Cu, K, Zn	–
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Si, Cu, Sr	Se identifican tierras del soporte
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	Tierras + arcillas
50_D17-0982-A	Rojo	(45.1, 15.4, 15.9)	RN→NA	Fe, Cu, Hg, As, Pb	–
	Verde	(38.8, -1.5, 10.1)	VA→R	Cu, Fe, As, Zn	Malaquita
	Azul	(45.5, -2.2, 6.5)	–	Fe, Cu, As, Zn, Hg	Azurita + agregados
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Ti	–
51_D17-0934-EL-245-012	Rojo	(61.6, 21.3, 18.6)	R→A	Fe, Sr, Si, Cu, K	Hematita
	Verde	(80.9, -4.6, 20.2)	NA→CV	Cu, Fe, As, Pb, Zn	Malaquita
	Enlucido	–	–	Ca, Cu, Fe, K, Si, S	–
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	–
52_D17-0654-EL-207-047	Ocre	(45.4, 12.3, 26.9)	N→AV	Fe, Cu, Sr, Mn	Goethita + arcilla (caolinita)
	Naranja	(43.3, 28.5, 17.4)	R→AV	Hg, Fe, Sr, Cu, Si, K	Cinabrio + hematita
	Rojo	(38.7, 13.1, 9.2)	R→A	Fe, Sr, K, Si, Cu	Hematita + cinabrio
	Verde	(64.9, -1.7, 13.2)	A→Ci	Cu, Fe, As, Si, Sr, Pb	Malaquita
	Blanco	(62.8, 4.3, 11.5)	–	Ca, Cu, Fe, K, Si, As	Se identifican tierras del soporte
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, K, Si	Se identifican tierras del soporte
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Ti	Tierras + arcillas
53_D17-0951-EL-249-015	Negro	(50.5, 2.6, 8.4)	–	Sr, K, Fe, Mn	Carbón
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, K, Si, Sr	Se identifican tierras del soporte
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	Tierras + arcillas
54_D17-0951-EL-249-025	Ocre	(50.0, 14.5, 31.5)	N→A	Fe, Sr, K	Goethita
	Naranja	–	RN→A	–	–
	Verde	(62.3, -0.7, 11.4)	AV→CC	Cu, Fe, Zn, K, As	–
	Blanco	(65.5, 4.4, 10.7)	–	Ca, Fe, K, Cu	Se identifican tierras del soporte
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	Tierras + arcillas

55_D17-0951-EL-249-014	Verde	(79.1, -2.9, 20.3)	AV→Ci	Cu, Fe, As, Zn	–
	Naranja	(59.0, 42.2, 29.1)	R→AV	Hg, Fe, Sr, Cu	Cinabrio + agregados
	Blanco	(88.5, 2.5, 16.5)	–	Ca, Fe, Cu, K	Posible carbonato de calcio
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Cu, K, Hg	Posible carbonato de calcio
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	–
56_D17-0382	Verde	(42.4, 1.7, 9.4)	A→CV	Cu, Fe, As, Zn	Malaquita
	Rojo	(45.0, 11.5, 12.2)	RN→AV	Fe, Cu, Sr, Pb, K, Hg	Tierras rojas
	Ocre	–	–	–	Goethita + agregados
	Enlucido	–	–	Cu, Fe, Ca, As	Posible carbonato de calcio
	Argamasa	–	–	Fe, Ca, Cu, Sr	–
57_D17-0982-B	Naranja	(39.7, 33.7, 20.4)	R→AV	Hg, Fe, Cu, Sr	Cinabrio
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	–
58_D17-0489-EL-170-019	Naranja	(45.1, 36.3, 23.1)	R→AV	Hg, Fe, Sr	Cinabrio
	Ocre	(41.2, 14.8, 22.1)	N→VA	Fe, Hg, Sr, Mn	La señal del cinabrio interfiere
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, Hg, K	–
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	–
59_D17-0383-EL-152-012	Naranja	(51.1, 25.5, 17.6)	R→AV	Hg, Fe, Sr, Zn, K, Si	Cinabrio
	Ocre	(52.9, 11.4, 21.8)	N→V	Fe, Cu, Sr, Mn	Goethita
	Blanco	(66.1, 4.6, 12.0)	–	Ca, Cu, Fe, K, As	Posible carbonato de calcio
	Beige	(57.3, 6.6, 12.0)	–	Ca, Cu, Fe, K, Hg, As	–
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	–
60_D17-0951-EL-249-031	Naranja	(63.0, 40.4, 28.7)	R→AV	Hg, Fe, Sr, K, Si	Cinabrio
	Ocre	(74.3, 15.3, 42.4)	N→VA	Fe, Sr, K	–
	Blanco	(86.6, 4.4, 21.0)	–	Ca, Fe, K, S, Si	Se identifica las tierras del soporte
	Negro	(55.4, 5.4, 17.5)	–	Fe, Cu, Sr, K, Pb	–
	Enlucido	–	–	Ca, Fe, K, Si, Hg	–
	Argamasa	–	–	Fe, Ca Ti, Sr	Tierras + arcillas

Los valores del IRFC presentados en la Tabla 4 están abreviados de acuerdo al siguiente código:

Rojo (R), Rojo-Naranja (RN), Naranja (N), Naranja-Amarillo (NA), Amarillo (A), Amarillo-Verde (AV), Verde-Amarillo (VA), Verde (V), Verde-Cian (VC), Cian-Verde (CV), Cian (Ci), Celeste-Cian (CC), Celeste (Ce), Azul (Az), Azul-Morado (AM), Morado (Mo), Morado-Magenta (MM), Magenta (Ma), Rosa (Rs) y Rosa-Rojo (RR).

