

ESTUDIO ESPECTROFOTOMÉTRICO
SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS
CROMÁTICAS DE LOS METALES:
ESTADO NATURAL, CORROSIÓN Y
PROCESOS DE CONSERVACIÓN

♦ *Manlio Favio Salinas Nolasco* ♦

RESUMEN

El color de los metales constituye una cualidad que los identifica y distingue de cualquier otro tipo de material. La propiedad cromática de brillantez metalizada es un atributo que invariablemente está asociado con el valor económico de la sustancia y la intención de posesión. Por otro lado, sus propiedades físicas como la maleabilidad, resistencia, dureza, entre otras, permiten elaborar variadas formas en múltiples aplicaciones, entre las que destacan las ornamentales. Tomando como base el color, el presente trabajo analiza, a partir de mediciones espectrofotométricas de los metales a nivel superficial, la diferenciación perceptiva entre el color que los identifica y cualquier otro sin la propiedad de ser metalizado. Por otro lado, la cinética de corrosión de una superficie metálica puede definirse en términos de cambios de color con respecto al tiempo, permitiendo asociar los tonos apreciables en la pátina, con la cantidad de productos generados en un proceso continuo y controlado de degradación electroquímica. Para terminar, se discute un estudio pormenorizado de un registro cromático del color a lo largo de todo un proceso de restauración a través de sus diferentes etapas, para establecer los elementos experimentales que permitan definir criterios de intervención cromática con base en los atributos del color de los metales, de la evolución en la percepción de productos de corrosión a través del tiempo, así como de la evaluación de las diferentes etapas de intervención en la restauración y conservación para objetos metálicos.

La aplicación de la *colorimetría* a problemas de conservación y restauración del patrimonio cultural es un asunto aún poco explorado. Considerando que la apreciación de un objeto se realiza a través de la percepción visual, cuando menos en una primera instancia, los parámetros colorímetros obtenidos a través de una medición del color pueden definir su carácter único, además de algunas de sus cualidades estéticas, icónicas y valorativas.

La *colorimetría* propone, a través de mediciones físicas cuantitativas, valores para distinguir un color con respecto de otro; la precisión numérica puede ser tal que, en una observación directa sería difícil distinguir a simple vista diferencias en color, aunque los parámetros colorímetros sean diferentes.

Por lo anterior, la *colorimetría* basa sus aplicaciones en el *registro colorimétrico*, es decir, en la colección sistemática de mediciones del color de un objeto dado; lo que se realice o cómo se manejen los datos obtenidos depende del objetivo por el cual se llevaron a cabo dichas mediciones y del área de investigación donde se aplique. En el caso de la conservación y restauración de objetos culturales, sus aplicaciones van desde la simple documentación de los colores característicos, la descripción de la forma y composición de una obra pictórica, hasta las propuestas adecuadas de reintegración, según las cualidades cromáticas del objeto. En la presente contribución, se analizan tres características de los metales en bienes culturales en torno a sus colores: a) su percepción cromática, b) la evolución cromática en un proceso de corrosión, y c) los cambios de color en procesos de conservación.

ANTECEDENTES

La apariencia de los metales a través de sus colores, permite diferenciarlos de cualquier otro material, al grado de que la simple percepción de los mismos se

constituye como una técnica casi segura para identificarlos. Esta cualidad particular cobra importancia cuando su uso se sustenta en objetivos ornamentales, lo cual, a lo largo de la historia del hombre, ha generado múltiples manifestaciones artísticas de gran valor cultural.

Los colores de los metales se originan de las propiedades superficiales de los enlaces metálicos, que se explican bajo diversas teorías del estado sólido como una interfase constituida por electrones libres, los cuales absorben y emiten continuamente luz, prácticamente de cualquier longitud de onda. Debido a este fenómeno, el brillo o lustre metálico se puede observar en cualquier ángulo de visión y a cualquier dirección en que se encuentre la fuente de luz, reflejando casi en la totalidad cualquier intensidad que incida sobre el mismo.

En la práctica de la conservación y restauración de objetos metálicos, la apariencia es donde primero se observan los cambios de color debido a procesos de deterioro, notándose de manera preliminar una modificación en el lustre, para posteriormente, en relación al grado de alteración, un cambio de tonalidad.

Para procesos de reintegración cromática, resulta muy complicado caracterizar el color de un metal sin aplicar pigmentos o pinturas que no contengan partículas metálicas. Existen diferentes propuestas que intentan disimular el efecto a través de técnicas específicas de mezclas de colores, aunque su aspecto final resulte mate. Con respecto a esta disyuntiva operativa de la restauración, surge el cuestionamiento que intenta definir objetivamente la naturaleza de los colores metálicos y su semejanza con los demás colores tan comunes en la naturaleza.

Por otro lado, los cambios en los colores de los metales a lo largo del tiempo y debido a fenómenos de deterioro, permiten apreciar como resultado final, una pátina característica que le confiere un aspecto típico de los objetos envejecidos. Los colores finales así percibidos, son el resultado de la conformación de productos químicos superficiales que dependen de las condiciones ambientales y de las propiedades del metal y, que eventualmente, provocan la pérdida del lustre original del metal. El registro de las variaciones de color a lo largo del proceso de deterioro permite deducir qué cualidad de los colores se pier-

de a lo largo del tiempo, además de que cuantifica de manera indirecta las cantidades de material depositado, causantes del cambio.

Los procesos de restauración intentan devolver parcialmente la apariencia y vigor que originalmente mostraban los objetos metálicos, a través de operaciones que, además de restituir sus cualidades estructurales, intentan restituir sus cualidades formales, que lo identifican como pieza de valor cultural. El registro colorimétrico de estas operaciones, permite apreciar los cambios que ocurren en los colores por cada etapa, lo cual determina de manera directa el impacto de las intervenciones en la apariencia del objeto. El control específico del proceso y sus materiales aplicados provocan una labor de intervención coherente, bajo la norma de una configuración formal de acuerdo a los lineamientos estéticos del objeto.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las mediciones del color se realizaron con un espectrómetro de contacto CM2500d, de la marca Konika

Minolta®, registrando las magnitudes a campo cerrado, en el sistema $L^*a^*b^*$ y $L^*C^*h^*$, con un iluminante D65 (luz de día) y calibrado en un blanco patrón para puntos elegidos de acuerdo a la pieza de estudio: a) se midieron tres muestras de aproximadamente 12 g de oro, plata, cobre y zinc para el estudio de su color aparente; b) se prepararon 10 placas de cobre de 5.0 x 2.0 cm de lados y un espesor aproximado de 0.9 cm, corroídas con NH_4S grado analítico a 98% marca Sigma-Aldrich, a tiempos controlados, para posteriormente registrar el cambio de color en cada etapa; y, c) se analizó una pieza metálica durante el proceso de restauración, la cual corresponde a un objeto asiático elaborado en latón sobre hierro por la técnica de *cloisonné*, además se registraron los cambios cromáticos durante las operaciones de intervención.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de la presente contribución, es conocer el comportamiento natural de algunas cualidades físicas de los metales en relación a los colores y al as-

pecto que presentan, en determinadas condiciones de observación común, sobre todo si se relacionan con las diversas aplicaciones en la conservación y restauración de objetos metálicos.

A) EL COLOR DE LOS METALES

El color particular que presentan los metales se debe a las características superficiales del enlace metálico. En términos ópticos, la forma en que se percibe el color de un metal se debe a la cualidad de reflejar una considerable cantidad de luz incidente, con respecto a la cantidad que absorbe; el lustre metálico a través de un brillo particular permite distinguir estos materiales de otros.

Cuando se obtiene el espectro de reflectancia de los metales, no existen grandes diferencias entre ellos, salvo la leve inclinación hacia longitudes de onda dominantes amarillas o rojas, o en su defecto, tonos blancos o neutros. Todos los metales presentan prácticamente el mismo porcentaje promedio de reflectancia a la misma longitud de onda de radiación de luz visible. La diferencia en la percepción

metálica con cualquier otro aspecto cromático, radica en la diferencia entre la condición de reflexión difusa y especular que presenta todo metal.

En un espectrofotómetro, es posible medir el color de una superficie bajo dos condiciones experimentales: a) la componente difusa, la cual capta la luz reflejada por el objeto en la misma dirección en que se ubica la fuente, y b) la componente especular, la cual detecta la luz reflejada por el objeto en la dirección opuesta a la ubicación de la fuente; a ambas mediciones se les identifica como *campo abierto* y *campo cerrado* respectivamente. La diferencia entre ambas mediciones es una referencia directa de la brillantez del objeto medido. Esto implica que un objeto de alta brillantez, no se observe igual en su componente difuso como en su componente especular; es decir, se apreciará oscuro en su parte difusa, y muy claro o prácticamente blanco en su parte especular.

Los metales son objetos de muy alto brillo (grandes diferencias entre el componente difuso y especular); no existen en la naturaleza objetos más brillantes que los metales, por lo que medirlos colorimétricamente implica apreciar grandes diferencias entre el campo

abierto y el campo cerrado. Los metales medidos en el presente trabajo fueron cuatro: el zinc, la plata, el oro y el cobre, como se observa en la figura 1.

El color representado para cada metal de acuerdo al valor de sus coordenadas cromáticas (en diversos sistemas métricos), no se parece en lo absoluto a lo que reconocemos para cada caso como un color metálico. Por un lado, a campo abierto, los metales se observan prácticamente blancos o muy claros (columna izquierda de la figura 1); mientras que a campo cerrado, se aprecian muy oscuros y tendientes al negro (columna derecha de la figura 1). Lo anterior implica una gran reflectancia combinada con una difusión luminosa intensa, dependiendo el ángulo de observación.

El espectrofotómetro simplemente los cataloga como dos características independientes, aunque en la percepción humana se observe como una combinación particular y unívoca. De esta propiedad surge el problema de igualación o imitación de colores metálicos, sobre todo en operaciones de reintegración cromática de bienes culturales intervenidos, por la dificultad de combinar ambas pro-

- COLORIMETRÍA Y PROCESOS DE RESTAURACIÓN -

propiedades extremas en un solo aspecto perceptible. Así, el juego de la reintegración cromática para imitación de superficie metálicas consiste en conseguir un color base difuso, y aplicarle una capa de alta brillantez, mediante una técnica operativa en la cual se alternen ambas cualidades.



FIGURA 1. Variación de los parámetros colorimétricos para los cuatro metales de estudio en campo abierto (columna izquierda) y campo cerrado (columna derecha).

B) EL CAMBIO DE COLOR POR LA CORROSIÓN

La degradación superficial de algunos metales se aprecia de manera directa a través de su cambio de color, debido a la aparición paulatina de productos de reacciones químicas de transformación o electroquímicas denominadas genéricamente corrosión. Los productos de corrosión típicamente son compuestos de coordinación, sales u óxidos metálicos, que por la naturaleza atómica de poseer orbitales d, generan estructuras cristalinas coloreadas muy fácilmente observables a simple vista, aunque éstas se localicen en pequeñas cantidades.

Es claro que en diversos bienes culturales metálicos, este tipo de degradación particular se valora como una característica intrínseca a la antigüedad y estética de la obra, denominada pátina; sin embargo, la diferencia sustancial radica en la estabilidad superficial del material, con respecto a la permanencia de las cualidades naturales de los materiales constitutivos.

Sobre los límites de apreciación formal de las piezas metálicas como objeto de valor a partir de su color, no existen lineamientos claros y específicos. La cues-

tion radica en poder evaluar las fronteras físicas que permitan dilucidar cuándo los metales han perdido sus cualidades cromáticas al grado de no poder reconocerlos como originalmente fueron concebidos.

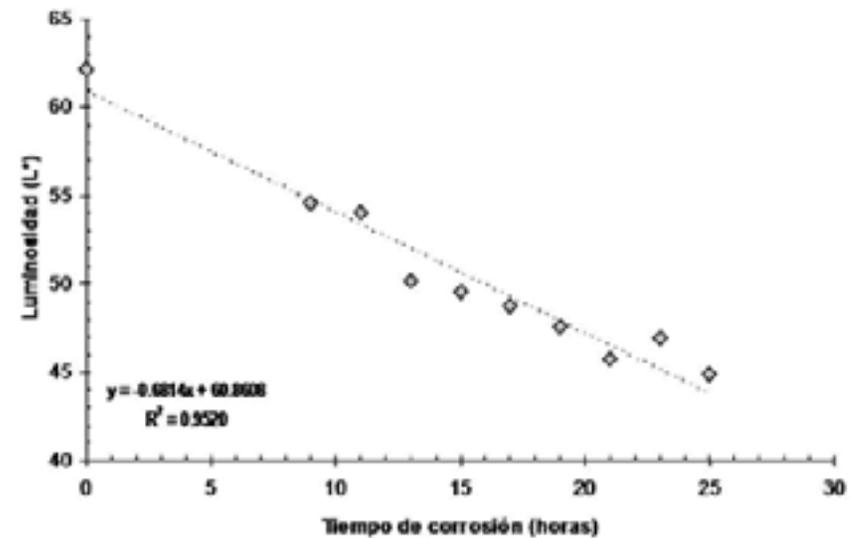


FIGURA 2. Variación de la luminosidad en la corrosión inducida de placas de cobre con respecto al tiempo.

Bajo la premisa anterior, se analizó el cambio de color de placas de cobre sometidas a un proceso controlado de corrosión, con la finalidad de determinar la variabilidad de los parámetros colorimétricos

(luminosidad, saturación y tono) con respecto al tiempo de exposición con el agente corrosivo.

En la figura 2, se observa que, para el caso particular de estudio, la luminosidad del metal disminuye de manera lineal y directamente proporcional durante el tiempo de contacto con el agente corrosivo. Esto muestra una tendencia constante a correlacionar los colores oscuros de los metales con prolongados tiempos de exposición en ambientes corrosivos.

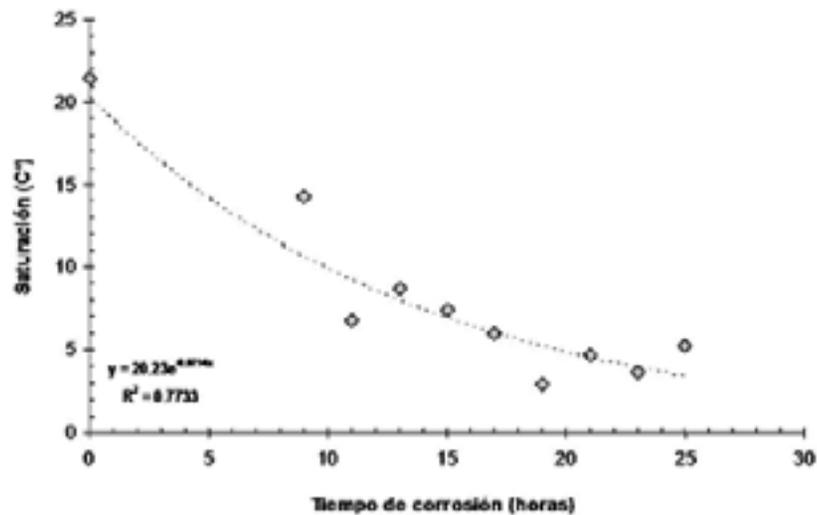


FIGURA 3. Variación de la saturación en la corrosión inducida de placas de cobre con respecto al tiempo.

La saturación (figura 3) disminuye conforme pasa el tiempo de contacto; la diferencia con respecto a la luminosidad radica en la tendencia de tipo exponencial, lo que implica una aceleración más pronunciada de la pérdida de esta cualidad. Los colores vivos o puros que pudiera haber presentado el metal originalmente se aprecian débiles o grisáceos, debido a largos tiempos de exposición.

Los cambios de tonalidad en contraste, presentan una tendencia oscilatoria hacia un color constante después de un tiempo crítico de exposición. Dependiendo de la naturaleza del producto de corrosión, la superficie va adquiriendo su tonalidad que corresponde con un cubrimiento paulatino casi total. Sin embargo, el equilibrio termodinámico de las soluciones acuosas que generó la corrosión, permite deducir que las reacciones químicas involucradas son mecanismos complejos, de múltiples etapas o reacciones secundarias, es decir, cuando la cinética cuenta con las condiciones necesarias para continuar el proceso de transformación, el equilibrio se desplaza hacia nuevas rutas.

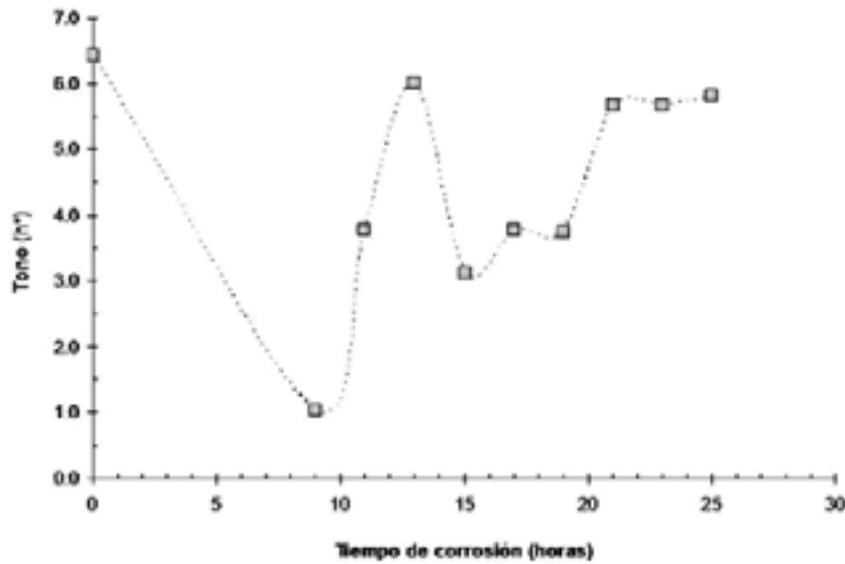


FIGURA 4. Variación de tono en la corrosión inducida de placas de cobre con respecto al tiempo.

De acuerdo a los resultados anteriores, es posible observar que la dinámica del cambio de color en procesos de corrosión de metales, puede ser caracterizada por medio de análisis espectrofotométricos. Es necesario correlacionar los parámetros cromáticos y las cantidades de productos de degradación generados por unidad de superficie, con los cuales se puede determinar que la evolución de los colores

representa una medida indirecta de los mecanismos químicos que suceden en el objeto a lo largo del tiempo. Estos resultados pueden conducir a estudios sobre el nivel de corrosión en el cual se encuentra el objeto, en el momento inicial de la intervención a partir de los colores que presenta.

C) EL CAMBIO DE COLOR POR PROCESOS DE INTERVENCIÓN

Resulta lógico imaginar que cualquier operación de intervención sobre un objeto metálico, en el cual se pretenda eliminar (limpieza) o depositar (pasivación, consolidación, recubrimiento) elementos materiales superficiales, modificará la percepción del mismo en términos de sus colores.

La pieza metálica de estudio (figura 5), en su apreciación directa, está conformada por una gama estrecha de colores, que lo caracteriza y distingue en su consistencia perceptual como objeto antiguo. Los colores base son: naranja, amarillo, verde y cyan, como la paleta básica de la pieza. Partiendo de un contexto subacuático, con las deposiciones y transformaciones químicas superficiales que caracterizan

- COLORIMETRÍA Y PROCESOS DE RESTAURACIÓN -

a las condiciones salinas prolongadas, la restauración implicó la eliminación de sales por inmersión, la pasivación y recubrimiento.



VISTA ANTERIOR



VISTA FRONTAL

FIGURA 5. Zonas del registro colorimétrico del objeto asiático de estudio durante su proceso de restauración.

- COLORIMETRÍA Y PROCESOS DE RESTAURACIÓN -

Los colores de la pieza cambian, conforme se le agregan los compuestos que conforman la pasivación y el recubrimiento, de acuerdo a la secuencia ilustrada en la figura 6. El impacto en los colores por la deposición de nuevos materiales sobre la superficie del metal, sólo puede ser cuantificada a través de las mediciones espectrofotométricas, las cuales permiten evaluar numéricamente el grado de desviación del sustrato original antes y después de la intervención.

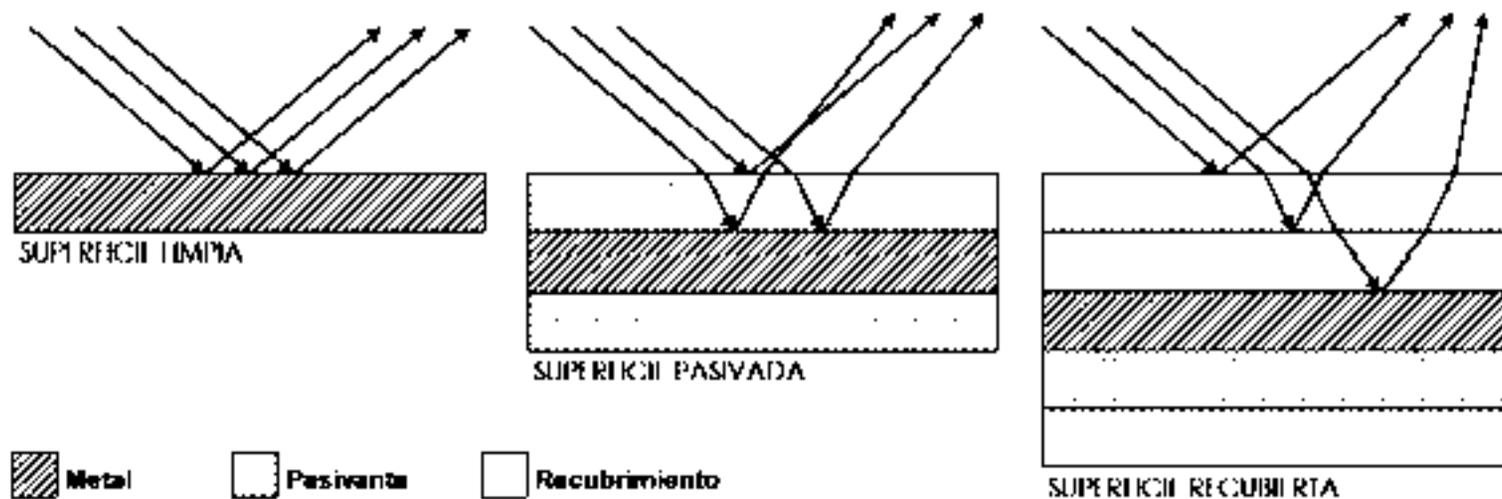


FIGURA 6. Modelo estratigráfico en la restauración del objeto asiático estudiado durante su restauración.

1.C) CAMBIOS DE TONO

La limpieza dejó al descubierto tonos del objeto que van del amarillo al cyan, predominando los colores amarillos. Sin embargo, la pasivación desplazó el predominio de los tonos amarillos hacia los tonos verdes. Esto implica necesariamente que la presencia del pasivante contribuye desde sus compuestos a un corrimiento de tonos cálidos hacia fríos. Finalmente, el recubrimiento es el resultado de una mezcla entre los efectos del metal limpio y el pasivante, dejando el predominio en las mismas proporciones de los amarillos y los verdes. En primera instancia, esto ya implica una modificación a la percepción original del objeto, en donde el predominio era absolutamente en los amarillos.

2.C) CAMBIOS DE SATURACIÓN

En términos de la saturación, la pasivación no modifica en nada las características cromáticas del objeto después de la limpieza, es decir, los tonos que son predominantemente grisáceos, siguen conservando esa cualidad. Sin embargo, el recubrimiento satura un

poco más el color de la superficie del metal, desplazando levemente los tonos grisáceos originales hacia tonos débiles. El recubrimiento a la percepción de los colores del objeto contribuye, en términos de un leve aumento (casi imperceptible), en la saturación.

3.C) CAMBIOS DE LUMINOSIDAD

La distribución de las luminosidades es muy homogénea, es decir, todos los colores de la pieza se encuentran en valores semejantes. La pieza es predominantemente de luminosidad media (lo que sería un gris neutro, en blanco y negro), abarcando algunos claros. La pasivación y el recubrimiento estrechan más la distribución y localizan prácticamente todos los colores a claridades medias, desapareciendo los tonos claros. Esto implica que la presencia en la superficie del metal del compuesto pasivante, así como del recubrimiento, oscurezcan en cierto grado la pieza. Es importante mencionar que el oscurecimiento se limita a los valores ya existentes de claridades en la superficie original, por lo que tanto el pasivante como el recubrimiento contienen pocos elementos de contraste, y se pueden considerar superficies transparentes.

De lo anterior, es posible destacar que la pieza tiene una paleta cromática estrecha, en la cual predominan los tonos amarillos, grisáceos y medios; y que la presencia de las capas protectoras influyen más en los tonos que en la saturación o la claridad de los colores. La distribución de frecuencias de las diferencias de color para el conjunto total de puntos registrados (figura 7) muestra que la mayoría de los puntos presentan altas diferencias (cambios bruscos) desde la impregnación de la primera capa (pasivación), disminuyendo a moderadas en la segunda etapa (recubrimiento), de aquí que el pasivante represente una operación de fuerte impacto en el color por la naturaleza del compuesto utilizado. Se puede observar además que la distribución global de diferencias representa la suma de las distribuciones por etapas, lo que explica la disminución en algunas regiones y el desplazamiento de valores.

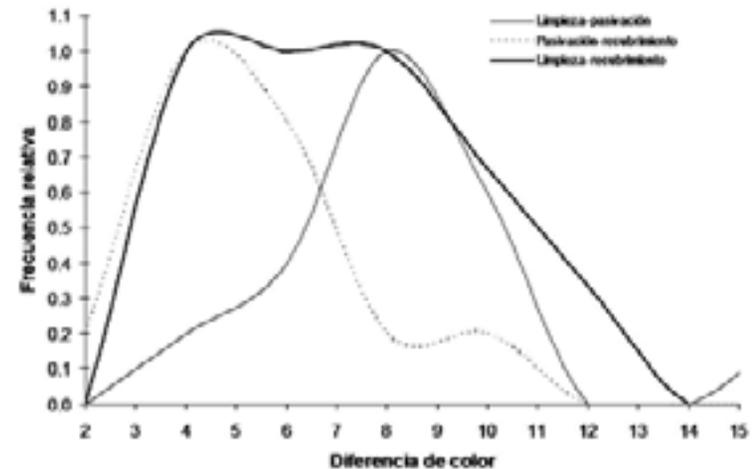


FIGURA 7. Distribución de frecuencias en los cambios de color a lo largo del objeto asiático estudiado durante su restauración.

CONCLUSIONES

El estudio espectrofotométrico de los metales abarca aplicaciones importantes sobre el entendimiento de sus cualidades cromáticas, que van desde los elementos de percepción e identificación visual, hasta la dinámica de deterioro en términos de los cambios en apariencia. Ambas condiciones típicas dentro de los análisis de bienes culturales metálicos como elementos de significación y justificación en procesos de restauración, pueden ser cuantificados numéricamente a partir del registro colorimétrico de los atributos de los colores base. En complemento, la información sobre la caracterización óptica de los mismos, permite establecer criterios de intervención, con respecto a los niveles de modificación de los colores o impacto en la apariencia, debido a la deposición de materiales aplicados con fines de conservación. Los estudios a nivel cromático de los metales, representan la fundamentación física sobre la apreciación visual de las intenciones formales en la preservación de las cualidades estructurales de estos materiales.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, R.M. Y JIMÉNEZ, V.B.

1995 *Iluminación y Color*; España, Ediciones Universidad Politécnica de Valencia; Valencia.

ARNHEIM, R.

1997 *Arte y Percepción Visual*, Madrid, España, Alianza Editorial, S.A.

BURGESS, C. ET AL.

1994 *Spectrophotometry, Luminescence and Colour*; Science and Compliance; 2nd Joint Meeting of the UV Spectrometry Group of the U. K. and the Council for Optical Radiation Measurements of the U. S. A., Rindge, 20-23.

2000 *Committee E-12 on Appearance of American Society for Testing and Materials (ASTM)*; ASTM Standards on Color and Appearance Measurement; American Society for Testing & Materials; New York, USA.

FORD, B.L.

1992 *Monitoring colour change in textiles on display*; *Studies in Conservation*, 37(1): 1-1.

GILARBERT, E.J.

1998 *Medida del Color*; Valencia, España, Ediciones Universidad Politécnica de Valencia.

HUNT, R.W.

1987 *Measuring Colour*; New York, USA, Prentice Hall.

HUNTER, R.S. ET AL.

1987 *The Measurement of Appearance*, New York, USA, John Wiley & Sons.

JOHNSTON-FELLER, R.

2001 *Color Science in Examination of Museum Objects. Nondestructive Procedures*. Los Angeles, USA: The Getty Conservation Institute, 361 p.

MACADAM, D. L.

1985 *Color Measurement*; Springer-Verlag New York, Incorporated.