

Escuela Nacional de Conservación, Restauración  
y Museografía “Manuel del Castillo Negrete”

**El color del sonido:  
el temperamento y afinación  
del clavicordio ubicado en el  
Museo Nacional del Virreinato,  
Tepetzotlán, Estado de México**

Esteban Mariño Garza

**Estudios  
sobre conservación,  
restauración y museología**

V O L U M E N II

ISBN: 978-607-484-649-2

comisionpublicacionesencrym@gmail.com  
www.publicaciones-encrym.org

*Quiero agradecer profundamente a Pablo Padilla, Alfons Huber, Stewart Pollens y Peter Bavington por guiarme en todo el proceso de análisis del temperamento y afinación del clavicordio en cuestión. También agradezco a José Luis Ruvalcaba por su ayuda en los análisis de fluorescencia de rayos x.*

### **Palabras clave**

Clavicordio, temperamento, histórico, artefacto histórico, afinación, estética sonora.

### **Resumen**

Se expone el análisis realizado en el clavicordio en cuestión para ejemplificar la problemática estética e histórica que ocurre al momento de encontrar un temperamento y afinación de un instrumento musical histórico.

### **Introducción**

Este artículo utiliza como ejemplo el clavicordio del Museo Nacional del Virreinato, mismo que fue el objeto de estudio de la tesis de licenciatura del autor. El tema central de este texto está abocado a las cuestiones de afinación y temperamento, en tanto las características principales del cordófono que nos ocupa son explicadas más adelante. Cabe mencionar que en el presente escrito se consolidan dos metodologías de investigación que se han utilizado en el pasado con otros clavicordios (Huber: 1999 y Bavington: comunicación personal, febrero de 2013). Aunque dichos métodos se explican en el desarrollo del texto, vale la pena adelantar que Huber se destaca por utilizar un método geométrico y gráfico con el diapasón como

principal guía para determinar longitudes de cuerda vibrante, mientras Bavington profundiza en la posición de las tangentes.

La idea principal es mostrar cómo dichos procedimientos pueden auxiliar en la aproximación sistemática al temperamento y afinación intrínsecas de un clavicordio histórico.

## La necesidad del temperamento en los instrumentos musicales

El temperamento nace a raíz de la imposibilidad matemática de establecer consonancias justas en una escala. Una consonancia es un concepto psicológico y físico. Se trata de la sensación “agradable” que se produce cuando el cerebro humano aprecia una o más frecuencias<sup>1</sup> cuyas proporciones entre ellas son múltiplos sencillos (Bibby, 2003: 14).

Las consonancia más común es la relación 1:1 que se da en frecuencias idénticas. Ésta se llama *unísono*. Cuando se tiene la proporción 2:1, entonces se da la consonancia conocida como *octava*.<sup>2</sup> Es decir, que una de las frecuencias<sup>1</sup> es dos veces más alta que otra. La *quinta* justa se produce cuando una de las frecuencias percibidas es 3/2 de la original. La *cuarta* justa se debe a que uno de los sonidos está en una proporción de 4/3 del sonido inicial. El principio de proporción entre estas cuatro consonancias fue suficiente para que el ser humano pudiera construir un escala completa utilizando cuerpos sonoros como las cuerdas tensadas. Las evidencias históricas indican que la escala más antigua en formarse fue la pitagórica, aunque

<sup>1</sup> El sonido se puede traducir como oscilaciones de presión de la atmósfera. Las frecuencias son un número determinado de ciclos completos de variaciones de presión en un periodo de tiempo.

<sup>2</sup> Se le llama octava porque en la escala de notas occidentales se requieren ocho sucesiones de tonos para alcanzar la duplicación de la frecuencia. El mismo principio se cumple para nombrar a la quinta, cuarta, tercera, sexta y séptima.

se cree que dicho sistema data de aproximadamente 550 a.C., mucho antes que la vida y obra del propio Pitágoras (*idem*). El principio básico de construcción de la escala consiste en encontrar todas las notas utilizando octavas, quintas y cuartas justas. Por ejemplo, si se utiliza la nomenclatura anglosajona de designación de notas, y a la vez se asignan los valores justos a cada una, se puede construir una escala:

Nota	c	f	g	c <sup>1</sup>
Frecuencia	f	4/3f	3/2f	2f

Utilizando la proporción de las quintas y octavas se puede seguir completando esta escala. Por ejemplo, si se quisiera obtener el valor de la nota *d*, primero se multiplicaría 3/2f por 3/2, lo que daría de resultado 9/4. Sin embargo, este valor se debe dividir entre dos porque en la sucesión, se ha pasado al valor de c<sup>1</sup> ó 2f que es la octava de la escala. Por tanto, la nota *d* correspondería a 9/8 de *f*. Ahora seguiría buscar qué es la quinta de *e*, por lo que habría que multiplicar 9/8 por 3/2, lo que daría 27/16 de *f* para *a*. Esta vez no se divide entre 2 porque no se ha pasado ninguna octava. A continuación se muestra la escala mencionada:

Nota	c	d	f	g	a	c <sup>1</sup>
Frecuencia	f	9/8f	4/3f	3/2f	27/16f	2f

El proceso se puede ir repitiendo hasta completar lo que se conoce como escala occidental de siete tonos:

Nota	c	d	e	f	g	a	b	c <sup>1</sup>
Frecuencia	f	9/8f	81/64f	4/3f	3/2f	27/16f	243/128f	2f

Conociendo los valores de la escala, es posible conocer sus intervalos dividiendo los valores entre sí. Por ejemplo, entre *f* y *g* hay 9/8, que es el resultado de la división de sus valores (3/2 entre 4/3). Este intervalo de 9/8 fue considerado como otra consonancia, que se llamó *segunda mayor*, ya que hay un intervalo más pequeño entre *e-f* y *b-c* que se traduce como 256/243. Éste se nombró *semitono* o *segunda menor*. Así mismo, la distancia entre *c-e* fue llamada tercera mayor, de *c-a* fue llamada sexta mayor y de *b-c* fue *séptima mayor*.

Las primeras escalas occidentales, que probablemente fueron modificaciones de las pitagóricas, se empezaron a construir siguiendo esta progresión de octavas y quintas (*idem*). La idea fue ir aplicando los valores justos de las consonancias hasta encontrar todas las notas de una octava. Sin embargo, al tratar de construir dicha progresión de notas surgió un problema matemático. Éste radica en determinar intervalos justos para todas las frecuencias que se encuentran entre una misma octava (*ibidem*: 15), cuestión que puede ser descrita de la siguiente manera: si se retoma el ejemplo numérico anterior, se asignan valores a las frecuencias y se hacen las multiplicaciones y divisiones necesarias, se tendría el siguiente resultado:

Nota	c	D	e	f	g	a	b	c <sup>1</sup>
Frecuencia afinación Hz	130.8	147.15	165.543	174.4	196.2	220.725	248.315	261.6
Proporción real		1.125	1.1249	1.0535	1.125	1.125	1.1249	1.0535
Proporción justa		1.125	1.125	1.053	1.125	1.125	1.125	1.053

Los valores anteriores permiten apreciar cómo algunos intervalos no siguen la proporción justa. Esto haría que ciertas notas, al no cumplir con los intervalos ideales, sonaran disonantes con respecto a las demás. Esta imposibilidad matemática también se puede explicar de forma más sencilla:

- Para cerrar un ciclo completo de quintas se requieren doce de estos intervalos. Por tanto, teniendo un valor determinado de frecuencia inicial (*f*), su octava se produciría con la siguiente operación:

$$\frac{3^{12}}{2} (f)$$

- Para llegar al mismo resultado utilizando octavas se necesitaría multiplicar siete veces su intervalo por sí mismo, ya que son siete los semitonos que componen una quinta.
- Si se asigna un valor numérico a *f*, las supuestas igualdades teóricas se expresarían de la siguiente forma:

$$2^7 (130.8 \text{ Hz}) = \frac{3^{12}}{2} (130.8 \text{ Hz})$$

- Sin embargo, los resultados producen una inequidad de 228 Hz de discrepancia:

$$16742.4 \text{ Hz} \neq 16970.821 \text{ Hz}$$

- De hecho los propios factores potenciados no son iguales.

$$2^7 \neq \frac{3^{12}}{2} \quad \text{o} \quad 128 \neq 129.746$$

La discrepancia en ambos casos sigue una proporción decimal de 1.014. Este valor se conoce como la coma pitagórica. Se trata de la diferencia que existe al tratar de completar una nota de escalas utilizando los intervalos justos de las consonancias ya mencionadas.

La coma pitagórica se hace más evidente si se consideran los valores de frecuencias en cents. Estas unidades expresan el tamaño de los intervalos que dividen a las notas. Como se ha visto, la teoría indica que una quinta sigue una proporción de

3/2 con la frecuencia original. Este intervalo también se puede traducir como de 702 cents (Campbell, Greated, Myers, 2009: 24). Si se intentara construir una escala a partir de los valores en cents de quintas, comenzando por la nota C y se hiciera una progresión de doce quintas para llegar a la misma nota (siete octavas arriba), la imposibilidad matemática surgiría de nuevo:

$$12(702) \equiv 8424 \text{ cents}$$

Como se sabe que una octava se compone de 1200 cents entonces,

$$7(1200) \equiv 8400 \text{ cents}$$

Por tanto, vuelven a dar resultados distintos con la ya mencionada coma pitagórica, que en este caso se expresa con un valor de 24 cents.

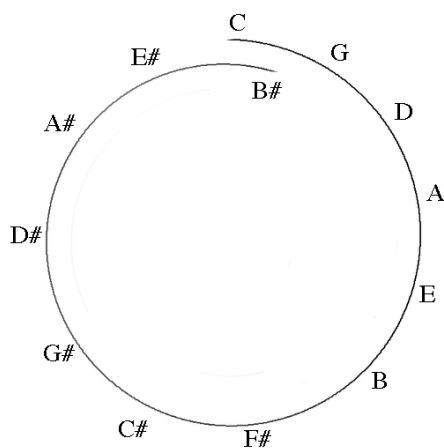


Figura 1. Espiral de quintas que expresa gráficamente cómo al construir una progresión por medio de siete octavas o doce quintas, la nota B# no tiene el mismo valor que el C inicial. En cualquier teclado, las notas tendrían que tener el mismo valor. Realizado por Esteban Mariño, basado en Campbell, Greated y Myers (*idem*).

Las imposibilidades matemáticas conllevan al hecho de que en una escala no todas las consonancias pueden tener el valor justo. Con base en esta cuestión, los constructores diseñaron sistemas con ciertos intervalos justos y otros alterados o desafinados, donde la coma pitagórica se distribuye a lo largo de la escala. Dichos sistemas se conocen como *temperamentos*. A la determinación de intervalos justos se le conoce como *afinación*, la cual va directamente ligada al temperamento, puesto que al seleccionar una serie de intervalos justos necesariamente algunos requieren ser temperados o desafinados. Por tanto, estos sistemas favorecen la pureza tonal de algunos intervalos a costa de otros. A lo largo de la historia de la música, y con base en la estética musical, tecnología y practicidad, se han diseñado varios sistemas de temperamento y afinación (Shulter, 1998).<sup>3</sup>

## Luz, sonido y estética

Los antiguos experimentaron con las consonancias en los cuerpos sonoros, las cuales se dan de forma natural. Sin embargo, la acústica ha mostrado que un solo sonido o frecuencia desprende otras frecuencias más altas y relacionadas entre sí, llamadas sobretonos. Cuando éstos presentan una proporción matemática sencilla, tal como las consonancias antes vistas, se llaman armónicos (Campbell, Greated, Myers, 2009: 17-24). Esto quiere decir que una sola frecuencia puede producir su propio unísono, octava, quinta, cuarta, tercera, etcétera. Por tanto, los diferentes temperamentos se pueden comparar con la paleta o técnica de una obra pictórica. De hecho, en el mundo musical constantemente se han hecho comparaciones entre el color y el

<sup>3</sup> Cabe aclarar que el temperamento y afinación se establecen de forma fija en los instrumentos de teclado y en los cordófonos de mástil con trastes fijos. Sin embargo, en otros instrumentos musicales (la voz sería el mejor ejemplo) el temperamento puede ser modificado por el músico (*ibidem*: 25).

sonido, siendo el primero un producto del reflejo de la luz visible que incide en los materiales, y cuyas características cromáticas se deben a la frecuencia de su onda luminosa. Incluso la luz y el sonido se comportan en el espacio como ondas. Este tipo de analogía entre colores y sonidos tal vez se deba al intento del ser humano de categorizar algo tan abstracto como la interpretación fónica que ocurre en nuestro cerebro.

En una obra pictórica las características cromáticas son esenciales para determinar la estética de la composición visual. En este caso los colores dependen del soporte, los pigmentos, sus mezclas en paleta, tipo de aglutinante, barniz, tipo de luz incidente y de la propia capacidad técnica del artífice, por supuesto. En el caso del sonido, la cantidad y tipo de armónicos —que al fin y al cabo son consonancias— van a determinar lo que algunos conocen como el *color del sonido*, el cual va a ser caracterizado de diferentes formas según quien lo escuche. Generalmente, se dice que los sonidos *brillantes* se producen cuando éste tiene armónicos altos y con mayor intensidad que otros. Por otro lado, los sonidos *cálidos* se dan cuando hay mayor intensidad<sup>4</sup> en los armónicos bajos. Curiosamente, una frecuencia luminosa alta (del espectro visible) se acerca hacia colores fríos como el azul y el violeta, mientras las frecuencias bajas son cálidas, acercándose al rojo y amarillo.

Así como una octava produce una sensación característica en el cerebro humano, una tercera o una quinta justa lo hará de forma diferente. Sin embargo, cuando la tesitura de un instrumento musical se encuentra temperada, la relación entre las diferentes consonancias producen un color *diferente*. Es por ello que el temperamento y afinación es un elemento fundamental para la estética sonora de un artefacto histórico.

4 La intensidad puede ser definida como la cantidad de energía que pasa a través de un área correspondiente en un metro cuadrado por segundo. La amplitud es el tamaño de las crestas o valles de una onda sonora estacionaria (*ibidem*).

Por ejemplo, un instrumento medieval está construido para producir consonancias justas, es decir, con afinación pitagórica. Por otro lado, un instrumento renacentista probablemente estará construido con el esquema de un temperamento mesotónico, donde las quintas se temperan (desafinan), mientras las terceras son justas, puesto que en este periodo dichas consonancias eran estéticamente importantes. Entonces, el temperamento de un instrumento histórico es como la paleta de colores utilizada por un pintor en una obra pictórica, pues constituye una elección previa de las consonancias y disonancias, las cuales juegan un papel estético fundamental en la *sonoridad intrínseca*<sup>5</sup> del instrumento musical.

Por otro lado, el temperamento elegido depende de la producción musical vigente, el contexto de fabricación y uso del instrumento. Por tanto, también es un reflejo de la concepción social, tecnológica, científica, espiritual, filosófica y estética de una cultura. Se trata de información intrínseca del artefacto y es fundamental tanto para la *voz musical*<sup>6</sup> como para la voz histórica (Watson, 2005: 6).<sup>7</sup>

5 El tipo de sonido único de cada instrumento histórico, el cual va a depender directamente de su construcción, materiales, afinación y temperamento, funcionamiento y entorno. La *sonoridad intrínseca* es lo que también puede llamarse la imagen sonora, en el entendido de que no existe el sonido original o sonido histórico (Watson, 2010) y la conservación sólo es capaz de aproximar el estado actual de la sonoridad intrínseca con base principal al estado de la materialidad (Ibarra, 2006: 59). Término propuesto en la tesis de licenciatura del autor.

6 Capacidad de impactar sensorialmente al oyente y de experimentar un paisaje artístico musical en el que nuestros ancestros vivieron. También permite la investigación de música antigua y la ejecución de la música históricamente informada (Watson, 2005: 18-20).

7 Cualidad de informar acerca del pasado. Los instrumentos musicales son registros de actividades constructivas, pensamientos pasados, tecnologías antiguas, procesos sociales, políticos, económicos y religiosos (*Idem*).

## Los clavicordios

El clavicordio es un instrumento de teclado encordado, generalmente de caja rectangular, que produce sonido gracias a que sus cuerdas son percutidas por laminillas metálicas llamadas tangentes. Cuando una tecla se presiona, el extremo se levanta y la tangente golpea las cuerdas. Cuando las teclas no están en acción, reposan en las tablas de descanso, mientras las tangentes están a unos milímetros debajo de las cuerdas.<sup>8</sup>

Cabe aclarar que las tangentes no sólo ponen a vibrar a la cuerda, sino que determinan la longitud de cuerda vibrante al dividirla en dos: aquélla que corresponde de las puntas de enganche a la tangente, y la distancia entre el puente y tangente. Las longitudes responsables de las frecuencias determinadas, que se distinguen como notas musicales, son aquéllas que corresponden desde la tangente al puente. Para que la otra longitud (punta de enganche a tangente) no tenga la misma capacidad de vibración que la longitud principal se utilizan los fieltros apagadores, los cuales se colocan justo detrás de cada tangente.

Otra peculiaridad de los clavicordios es la posibilidad de producir diferentes notas en un mismo orden de cuerdas. Ésta se conoce como sistema de ligado o ligadura. Por tanto, el teclado debe estar construido de tal forma que las tangentes tengan determinadas distancias entre ellas, lo cual permite tener diferentes longitudes vibrantes en un mismo orden de cuerdas. Por eso las teclas de los clavicordios ligados se aprecian en forma de manivela o, a veces, en abanico. La ligadura permite reducir el número de cuerdas, haciendo al instrumento más fácil de construir y afinar. Sin embargo, las notas que están

<sup>8</sup> Para una explicación más detallada de cómo funciona un clavicordio, así como los fenómenos físicos básicos involucrados, se recomienda la sección de anexos de la tesis de licenciatura del autor (Mariño, 2014: 199).

ligadas no pueden sonar de forma simultánea, por lo cual algunos acordes no se pueden formar, entre otras desventajas.

## El clavicordio del Museo Nacional del Virreinato

Las características principales del instrumento (véase Figura 2 y Esquemas 1-3) son las siguientes:<sup>9</sup>

- Extensión C/E-c<sup>3</sup>. En total son 45 notas con octava corta.<sup>10</sup>
- Ligado múltiple de tres y cuatro notas. Esto quiere decir que a partir de la nota e cada cuerda es golpeada por tres y cuatro tangentes.
- Morfología rectangular con una disposición de bloque de puntas de enganche a la izquierda, clavijero a la derecha, y compartimentos en ambos lados del teclado.
- Encordado de latón y hierro. Originalmente el instrumento estuvo diseñado para llevar 22 órdenes de cuerdas. Éstas tienen un ángulo semiparalelo al largo del instrumento.
- Tres puentes móviles y baja cuerdas. Los últimos permiten que las cuerdas estén en contacto constante con el puente (en caso de duda verificar notas).

En cuanto a la procedencia, el instrumento se ha resguardado en el Museo Nacional del Virreinato desde 1981, cuando fue entregado por Eduardo Villa Kamel, quien entonces

<sup>9</sup> Para más información sobre la factura de este instrumento musical se puede revisar mi tesis de licenciatura (Mariño, 2014).

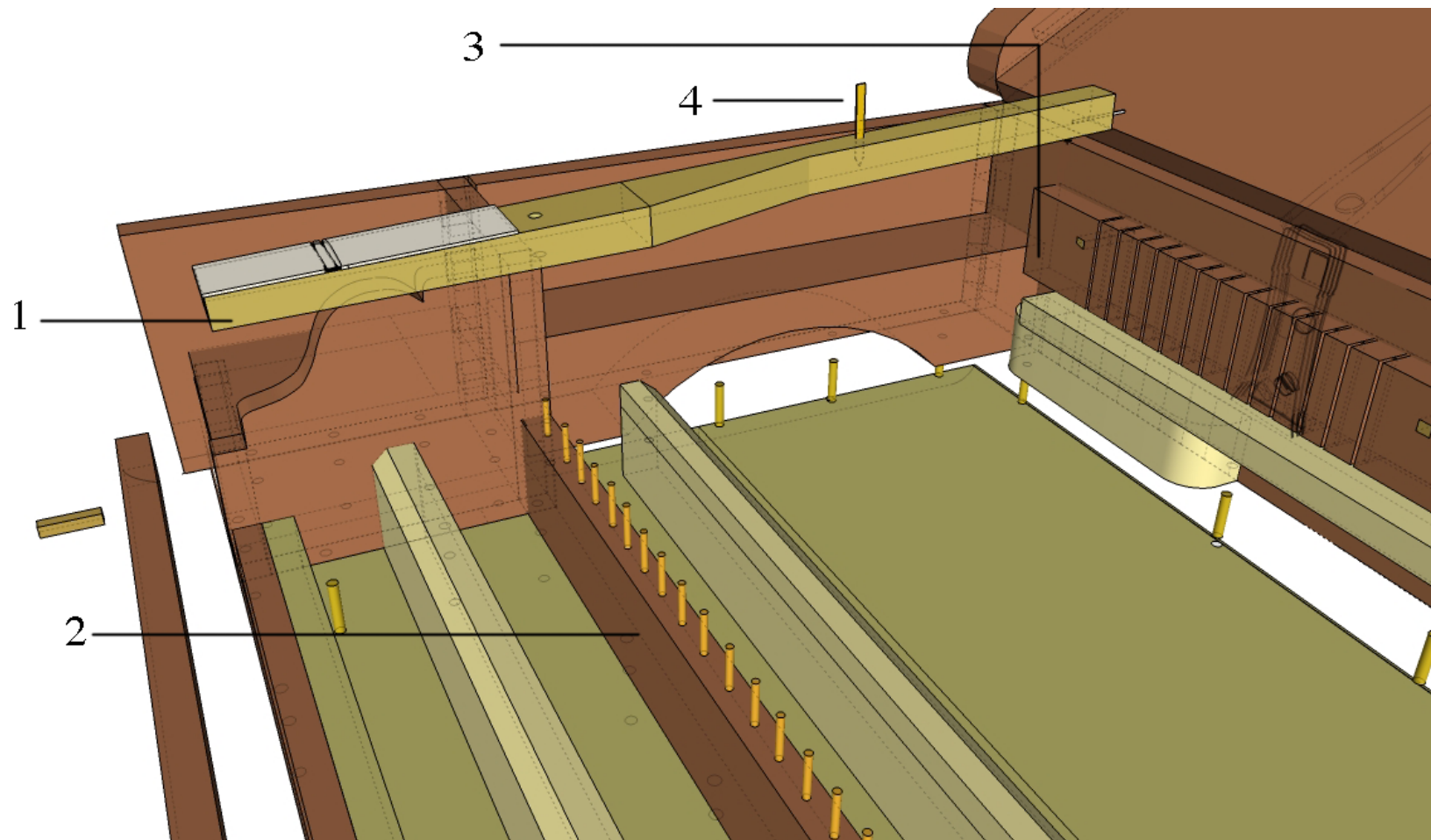
<sup>10</sup> La octava corta es una ampliación y reducción de notas bajas en un teclado. El esquema C/E indica que la nota E es afinada para que suene a C. La nota cromática que parece F# se afina a D y la aparente G# se afina como E o Eb. Esta alteración permite extender la tesitura baja de un instrumento con la destitución de algunas notas prácticamente no utilizadas por los compositores durante los siglos XVI y XVII (Kottick, 2003: 40).

trabajaba en el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Estos son los únicos datos que se conocen acerca de su origen, pues aun cuando presenta varias características autóctonas de Hispanoamérica, y otras que no están presentes en instrumentos europeos, bien podría haber sido construido en cualquier colonia o reino americano de España y posteriormente haber sido transportado. Tampoco se debe descartar la posibilidad de que haya sido importado desde la metrópoli. Su fecha de construcción también es incierta, si bien sus rasgos principales sugieren que se trata de un instrumento de transición entre los siglos XVI y XVII.



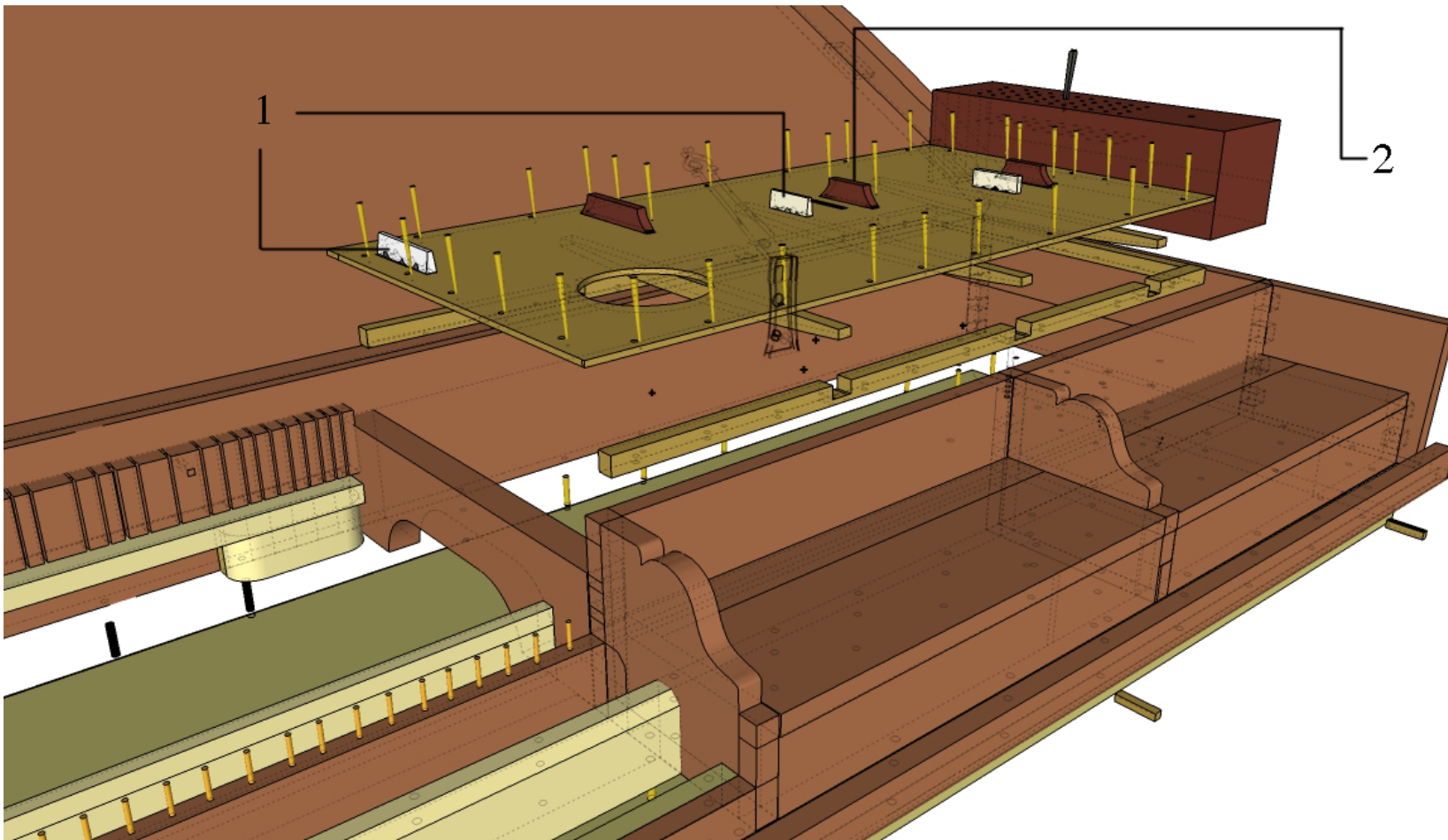
Figura 2. Múltiples vistas del clavichordio MNV. Tomada por Esteban Mariño.





Esquema I. Ensamblado de componentes en caja de resonancia. Nótese puentes (1) y baja cuerdas (2).  
Realizado por Esteban Mariño.





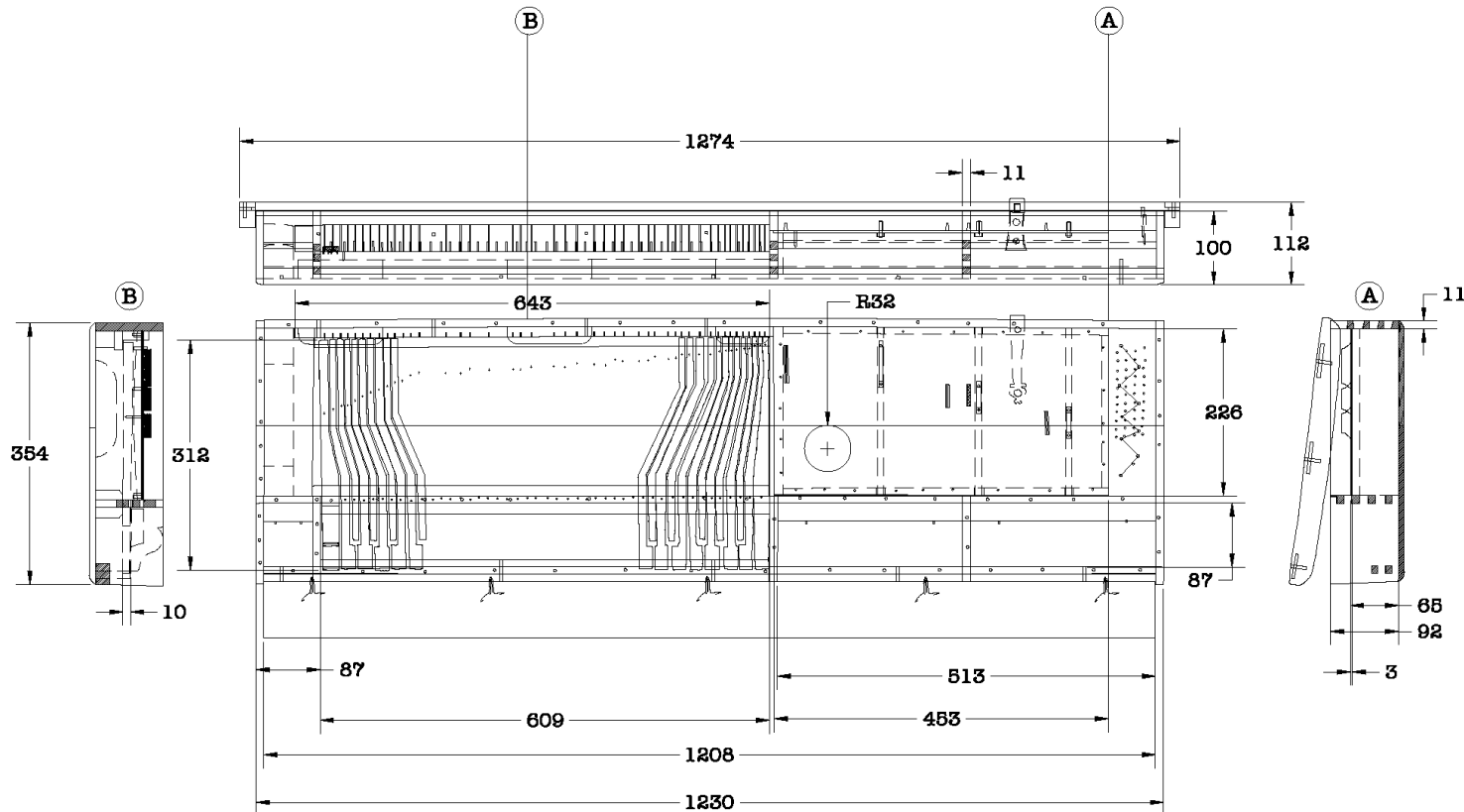
Esquema 2. Ensamblado de tecla (1), balancín (2) y diapasón (3). Nótese la tangente (4).  
Realizado por Esteban Mariño.

En cualquier clavicordio el temperamento se define por las proporciones que hay entre los intervalos de sus diferentes notas o frecuencias. Sin embargo, el sistema de ligado múltiple del clavicordio de Tepotzotlán implica que la mayoría de las notas o frecuencias son determinadas por la distancia de percusión que hay entre las diferentes tangentes en relación con el puente tiple o de agudos (véase Esquema 4). Éste representa el límite que fija la distancia de longitud de cuerda vibrante de todas las notas ligadas.

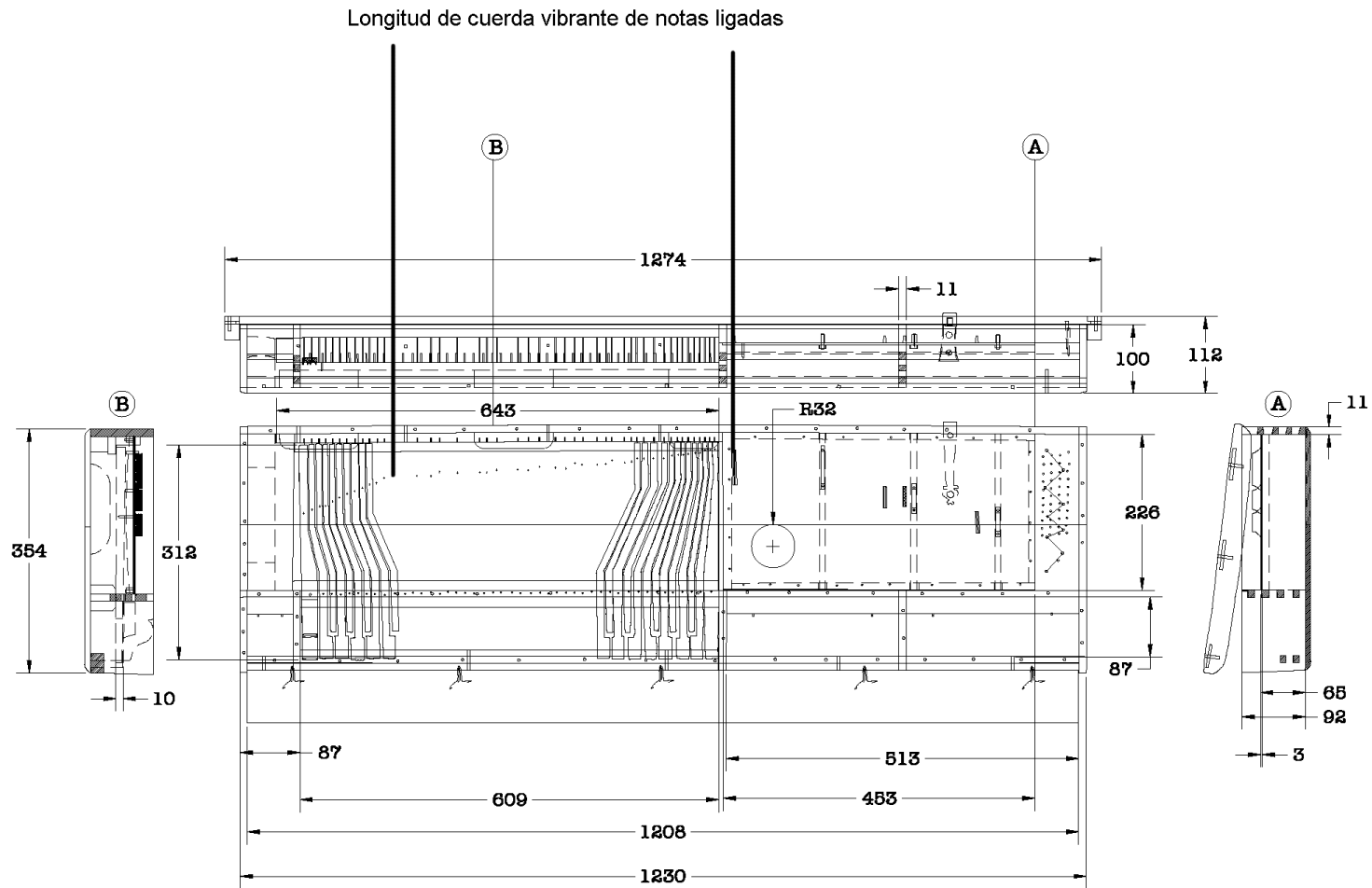
Se ha considerado que el diapasón de un clavicordio es la guía principal de la posición de las tangentes (como la disposición de

trastes fijos en un diapasón) y, por tanto, junto con el puente, es un reflejo directo del temperamento de un instrumento (Brauchli, 1998:p.60). En consecuencia, la disposición de ranuras del diapasón del clavicordio de Tepotzotlán y el puente tiple son claves importantes para descifrar el temperamento.

Desafortunadamente, la posición original del puente tiple del clavicordio no puede ser conocida porque es móvil. El mismo problema fue encontrado antes por el restaurador e investigador Alfons Huber (1999), por lo cual desarrolló un método geométrico para conocer la posición de este transmisor de vibraciones. Dicho método se aplica en el presente análisis.



Esquema 3. Medidas generales en milímetros. Realizado por Esteban Mariño.



Esquema 4. Se expresan las longitudes de cuerda vibrante de las notas ligadas que parten desde la posición del tangente hasta el puente tiple. Nótese que en este gráfico la posición del puente es la que fue encontrada al momento de la inspección del instrumento.

Realizado por Esteban Mariño.

## Método Huber

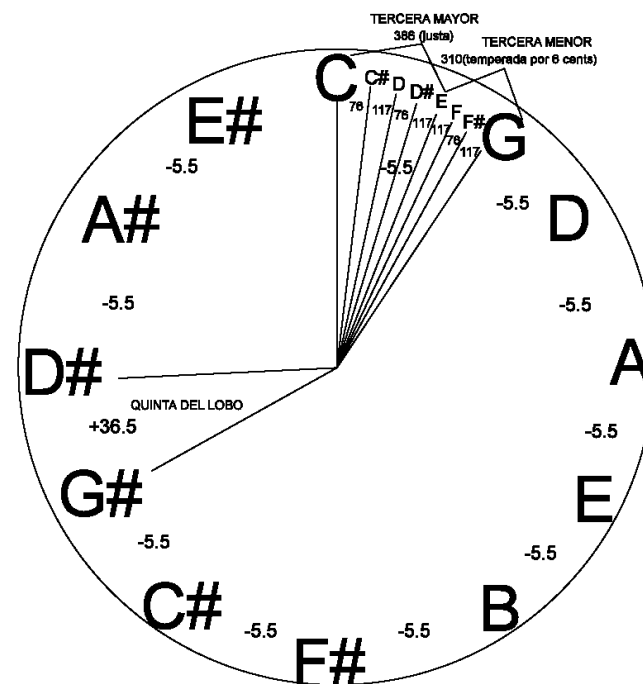
Se basa en la relación geométrica que hay entre las diferentes distancias de las ranuras del diapasón (funcionan como guías para las tangentes) y la longitud del puente tiple, encargado de transmitir la vibración de todas las notas ligadas. Dicha longitud generalmente se mide desde la nota  $c^2$  (do central), aunque dicha medición se puede hacer desde cualquier nota. El procedimiento consiste en transportar la disposición exacta de ranuras del diapasón sobre una línea base, y posteriormente se levantan alturas que corresponden a la longitud entre las ranuras. Éstas crean diferentes radios que decrecen de forma progresiva desde las notas graves hasta las agudas. Si se traza una línea desde cada punto de las alturas (radios) levantadas y se prolonga hasta el final de la línea base, se puede encontrar la posición del puente. Ésta se expresaría gráficamente como el foco, donde todas las líneas tendrían que converger.

La técnica de Huber también se basa en el principio de que cualquier temperamento regular<sup>11</sup> presenta dos proporciones diferentes en los semitonos *cromáticos* y *diatónicos*.<sup>12</sup> Dicha diferencia es constante en todas las octavas. Es decir, que cada proporción debe ser idéntica para cada intervalo en todas las octavas. Por ejemplo, la proporción entre el intervalo e-f (semitono *diatónico*) debe ser igual en el intervalo e'-f' (Peter Bavington, comunicación personal, junio 2013). Para explicarlo de forma más clara se puede tomar como ejemplo al temperamento mesotónico. La idea principal de estos diseños es que cada quinta es reducida  $\frac{1}{4}$  de coma o  $\frac{1}{4}$  de

<sup>11</sup> Se tratan de sistemas en donde todas las quintas excepto la quinta del lobo se temperan de la misma forma. Los sistemas más ejemplares son el mesotónico (siglos XVI y XVII), Silberman y el temperamento igual (doce semitonos con proporciones iguales de 100 cents) (Shulter, 1998).

<sup>12</sup> Se tratan de dos semitonos con tamaños diferentes. Uno más corto y otro más largo. En el temperamento mesotónico de  $\frac{1}{4}$  de comma el cromático es de 76 cents y el diatónico es de 117 cents.

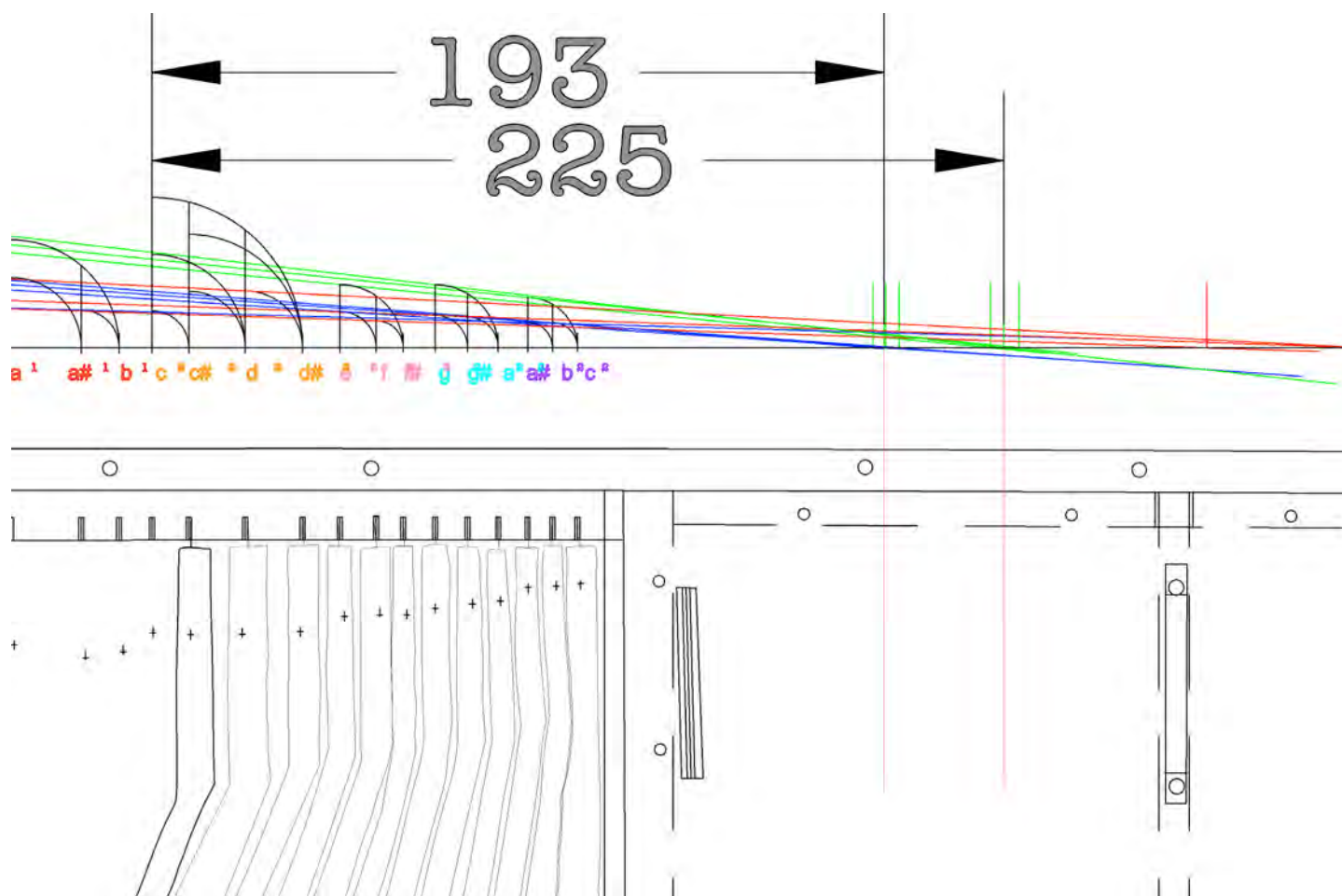
24 cents. Por tanto, se divide la distancia de la tercera mayor y menor en dos. La primera sería justa (386 cents), mientras la menor sería temperada (310 cents). Esto conllevaría a tener dos semitonos de distinto tamaño: 76 cents para el semitono llamado cromático y 117 cents para el semitono llamado *diatónico* (véase Esquema 5). Dicha proporción se debe de cumplir en toda la tesitura del instrumento, la cual también se expresaría gráficamente en el método de Huber si las líneas trazadas desde los puntos de las alturas (radios) convergieran en un mismo punto.



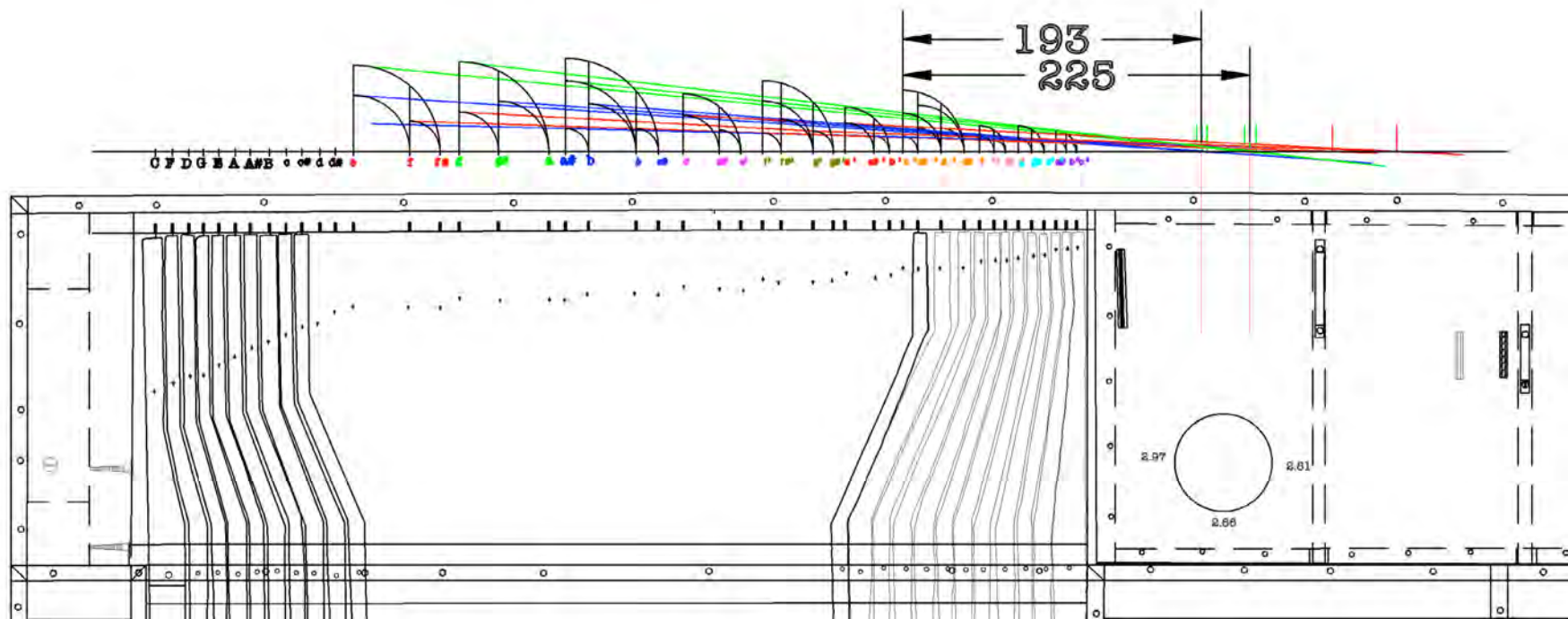
Esquema 5. Círculo de quintas que expresa en cents el compromiso tonal del temperamento mesotónico de  $\frac{1}{4}$  de coma. Realizado por Esteban Mariño basado en Shulter (1998).

Los resultados mostraron que las líneas convergieron en diversos puntos, por ello se determinó que, con el método de Huber, el diseño del diapason del clavicordio de Tepotzotlán no refleja un temperamento regular. Sin embargo, los gráficos muestran dos puntos en que la intersección de las líneas se

acercan. Estos puntos se identificaron como posibles distancias para el puente triple, el cual tendría 193 mm como mínimo y 225 mm como máximo. Estos puntos son mediciones que parten desde la posición de la tangente que correspondería a  $c^2$  (véase Esquema 6 y 7).



Esquema 6. Se muestra el método gráfico de Alfons Huber que usa como referencia las posiciones de las ranuras del diapason del clavicordio.



Esquema 7. Nótese como desde la nota  $c^2$  se miden las posibles longitudes de cuerda vibrante que aproximan a una posición ideal para el puente de las notas ligadas.

## Posición de tangentes (Método Bavington)

El rango de 193 mm a 225 mm produce varias posibilidades de posiciones para el puente tiple. Una forma lógica de establecer las más probables fue la utilización de la media aritmética (199 mm) y el promedio (209 mm). Estas cuatro probables distancias se utilizaron para hacer un segundo análisis, ya que el diapasón no pareció reflejar un temperamento coherente. Para este estudio se utilizaron las posiciones de las tangentes<sup>13</sup> y sus diferentes proporciones de longitudes de cuerda vibrante. Esta sección requirió medir todas las longitudes desde tangente a puente tiple (en sus cuatro posibilidades de colocación). Posteriormente se obtuvo la proporción entre cada nota y se comparó con diferentes tablas de valores de semitonos de temperamentos históricos (proporcionadas por Peter Bavington y Alfons Huber). Se observaron los valores tratando de buscar coincidencias con los ya establecidos. Los resultados no fueron satisfactorios, aunque sí hay un acercamiento a un temperamento mesotónico<sup>14</sup> (véase Tabla I).

## Frecuencia estándar

El temperamento y ligadura determinan qué consonancias serán justas y qué tonalidades serán posibles de ejecutar en un clavicordio. Sin embargo, también hay una elección que determina cuál va a ser la altura o frecuencia estándar del instrumento. Se puede elegir cualquier nota de la tesitura y se

<sup>13</sup> Es muy importante mencionar que la posición de las tangentes cambia a lo largo de la vida de un clavicordio, ya que para corregir la afinación, los músicos recurren a doblarlas un poco según el objetivo deseado. Por tanto, el análisis de sus posiciones es sólo otra aproximación.

<sup>14</sup> Las listas completas de comparación entre proporciones de notas se pueden revisar en la tesis de licenciatura del autor (Mariño, 2014: 222-227).

decide qué tan agudo o grave será. A partir de esta referencia se afinarán las siguientes notas, respetando el temperamento elegido. Esta regularización funciona como referencia para que otros instrumentos se afinen de la misma forma y puedan sonar juntos.<sup>15</sup>

## Regla longitud de flauta longitud de cuerda

Dicha regla afirma lo siguiente: una flauta abierta del registro principal de un órgano con una longitud de 275 mm produce una frecuencia entre 515-525 Hz, lo cual depende de la cantidad de humedad en el aire y de la temperatura del contexto en que esté sonando dicho aerófono. Esta nota corresponde al  $c^2$  afinado en una frecuencia estándar de 440 Hz para  $a^1$  (Alfons Huber, comunicación personal, octubre 2013). Dada la cercana relación que existe entre los clavicordios y órganos, se aplicó dicho principio con las cuatro probabilidades de los triples. Por ejemplo, para encontrar la frecuencia de 225 mm se siguió la siguiente fórmula:

$$\frac{275 \text{ mm}}{225 \text{ mm}} \equiv \frac{x}{440 \text{ Hz}} \quad X \equiv \frac{(275 \text{ mm}) (440 \text{ Hz})}{225 \text{ mm}} \approx 538 \text{ Hz para } a^1$$

<sup>15</sup> A través de los años, las afinaciones estándares han cambiado y antes de la moderna (440 Hz para  $a^1$ ) no había tanta regulación (Kottick, 2003: 4).



Tipo de tono	D	C	D	C	D	C	D	D	C	D	C	D
Nota	e-f	f-f#	f#-g	g-g#	g#-a	a-a#	a#-b	b-c'	c'-c#'	c#'-d'	d'-d#'	d#-e'
193 mm	1.070	1.043	1.030	1.060	1.060	1.024	1.038	1.085	1.043	1.051	1.074	1.054
199 mm	1.070	1.040	1.025	1.057	1.057	1.024	1.037	1.080	1.045	1.047	1.072	1.053
209 mm	1.068	1.039	1.026	1.055	1.055	1.023	1.036	1.078	1.041	1.048	1.070	1.051
225 mm	1.068	1.038	1.025	1.053	1.053	1.022	1.035	1.075	1.039	1.046	1.067	1.049
Justa	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053	1.053
Meso 1/3	1.075	1.037	1.075	1.037	1.075	1.037	1.075	1.037	1.075	1.075	1.037	1.075
Meso 1/4 de comma	1.070	1.043	1.070	1.045	1.070	1.045	1.070	1.045	1.070	1.070	1.045	1.070
Meso 1/5 de comma	1.067	1.050	1.067	1.050	1.067	1.050	1.067	1.050	1.067	1.067	1.050	1.067
Meso 1/6 de comma	1.065	1.051	1.065	1.051	1.065	1.051	1.065	1.051	1.065	1.065	1.051	1.065

Tabla 1. Proporciones obtenidas para el clavicordio de Tepotzotlán contrastada con los valores justos y del temperamento mesotónico en sus variantes. Las columnas sombreadas con gris representa aquellas proporciones de notas que separan un grupo ligado de otro. Por tanto, no guardan una proporción relacionada a un temperamento.

El procedimiento se repitió con cada opción arrojando diferentes posibilidades.

- 193 mm-627Hz
- 199 mm-608 Hz
- 209 mm-579 Hz

Aunque estos resultados parezcan muy altos, no se debe descartar la probabilidad de que algunos clavicordios hispanoamericanos puedan estar diseñados para ser afinados con frecuencias altas (Peter Bavington, comunicación personal, junio 2013). Sin embargo, la regla *longitud de flauta = longitud de cuerda* no es universalmente aceptada, y para hacerla efectiva se tendría que comprobar que el clavicordio de Tepetzotlán fue construido por un organero (Peter Bavington, comunicación personal, junio 2013).

## La fórmula de Marin Mersenne

El teólogo, filósofo y matemático Marin Mersenne, en su obra titulada *Harmonie Universalle* (1637), propuso una fórmula que hasta ahora es un pilar básico de la acústica de las cuerdas tensadas. Con la siguiente fórmula fue posible trazar aproximaciones acerca de la frecuencia estándar del clavicordio en cuestión (Stewart Pollens, comunicación personal, enero 2013).

$$F = \sqrt{\frac{9.81T}{L^2 \rho \pi D^2}}$$

La fórmula se puede explicar de la siguiente manera (Campbell, Greated y Myers, 2009: 233, 237, 307):

- F es la frecuencia en hercios.
- T es la tensión en kilogramos sobre fuerza. La tensión determina la elasticidad de las cuerdas y, por tanto, todo su comportamiento al vibrar periódicamente.
- L es la longitud de cuerda vibrante en metros. La longitud es el principal tramo de vibración en donde el material tendrá su vibración periódica.
- $\rho$  es la densidad del metal en kilogramos por metro cúbico. El material de una cuerda modifica la masa y esto hace que tenga un comportamiento diverso hacia la tensión. Los materiales más comunes son hierro y latón, aunque hay evidencia de cobre-berilio, acero e incluso plata y oro (*idem*).
- D es el diámetro de la cuerda en metros. Modifica la masa y por tanto la densidad de la cuerda (Bavington 2013).

En base a lo que ya se ha visto en este escrito y a otras evidencias del propio instrumento en cuestión, fue posible arrojar aproximados a cada uno de los rubros.

### Material y densidad

Para hacer una primera aproximación al metal utilizado se pueden considerar las longitudes de cuerda vibrante ya estudiadas, las cuales, según la tradición constructiva, son apropiadas para ciertos metales:

- Las longitudes apropiadas para latón en afinación estándar de 523 Hz para  $c^2$  pueden estar en un rango de 250 (mínima) a 270 mm (máxima).
- Las longitudes apropiadas para hierro en afinación estándar de 523 Hz para  $c^2$  pueden oscilar de 315 a 330mm (Peter Bavington, comunicación personal, 2013).

Las ya mencionadas aproximaciones de 193 mm-225 mm como longitudes de cuerda vibrante para  $c^2$  en el clavicordio de Tepotzotlán, se acercan más a los ideales para el uso de latón en cuerdas. Aunque de nuevo hay variantes que deben de ser tomadas en cuenta. Por ejemplo, se sabe que el latón puede producir frecuencias de 523 Hz aun teniendo longitudes de entre 130 mm a 160 mm (Peter Bavington, comunicación personal, septiembre 2013). Esto sucede en función de la cantidad de cobre y zinc, que modifica la respuesta de la cuerda ante la tensión.

Las cuerdas del instrumento en cuestión fueron identificadas con fluorescencia de rayos x (FRx), y se encontró latón y hierro. Esto no necesariamente quiere decir que estos metales fueron los que se pensaron originalmente para el artefacto en cuestión. Sin embargo, dada las longitudes de cuerda vibrante propuestas y el hecho de que estén entrelazadas,<sup>16</sup> ello indica que tienen una significancia histórica con el instrumento. Teniendo esta aproximación al uso de cuerdas de latón, se decidió utilizar la información recabada por los análisis de FRx realizados en las cuerdas. Se demostró que el promedio general de la aleación es de 77.81% de cobre y 21.33% de zinc. Estas proporciones se acercan a la mezcla conocida como latón bajo (*low brass*), que idealmente debe tener 80% de cobre y 20% de zinc. Por tanto, se decidió utilizar la densidad del latón bajo para los cálculos de la fórmula de Mersenne como una aproximación: 8 670 kg (Brookes, 2013).

<sup>16</sup> Este tipo de cuerdas están mencionadas en el tratado de Marin Mersenne, *Harmonie Universelle* (1637), y se han encontrado en clavicordios hispanoamericanos construidos en el siglo XX y un ejemplar peruano construido después de 1837 (Bavington, 2006: 108). También se encontraron cuerdas entrelazadas en un virginal fabricado por Hans Ruckers en 1581 encontrado en Perú (Stewart Pollens, comunicación personal, enero 2013).

## Diámetro

Los calibres de las cuerdas también varían conforme al gusto y tradición de los constructores de instrumentos de teclado encordados. Sin embargo se relaciona directamente con la tensión, ya que entre más gruesa, su resistencia a la tensión se incrementa. En este caso, se decidió utilizar la información de los diámetros medidos en el propio clavicordio de Tepotzotlán y tomar en cuenta la significancia histórica de sus cuerdas. Por tanto, para los cálculos de la fórmula de Mersenne se utilizó el grosor de la cuerda correspondiente con  $a^1$ : 0.4 mm.

## Tensión

La tensión es uno de los factores del diseño de un instrumento musical más efímero, pues depende en gran medida del gusto del músico y constructor. Algunos investigadores suelen respaldarse en la tradición de fabricación y uso de instrumentos de teclado encordados. Se sabe que entre más tensión, mejor sonido,<sup>17</sup> y para lograrlo se cree que la cuerda debe tensarse hasta casi romperse. Sin embargo, qué tan cerca del punto de ruptura debe tensarse depende del material usado y del conocimiento empírico de los constructores. Suele considerarse que la frecuencia máxima debe tener un margen de tres semitonos menos para que la cuerda no se rompa en el uso del instrumento (Stewart Pollens, comunicación personal, septiembre 2013).

Toda vez que tenemos una aproximación al metal utilizado y al calibre de las cuerdas, con base en lo que dictan las

<sup>17</sup> Físicamente, lo que sucede cuando se tiene mayor tensión es que la oscilación de la cuerda es más uniforme y esto produce armónicos más sencillos y por ende, más consonantes (d'Alessandro, Katz y Boudet, 2006: 171).

tradiciones de construcción de instrumentos de teclado, se eligió una tensión de 5 kg para cuerdas de calibre de 0.4 mm (Peter Bavington, comunicación personal, noviembre 2013).

### Aplicación de la fórmula de Marin Mersenne

Con base en las aproximaciones descritas se realizaron los cálculos necesarios, obteniéndose los siguientes resultados para la frecuencia estándar del clavicordio de Tepotzotlán:

- 193 mm para  $c^2$  producen una frecuencia de 452 Hz para  $a'$  de 229 mm.
- 225 mm para  $c^2$  producen una frecuencia de 395 Hz para  $a'$  de 262 mm.
- 199 mm para  $c^2$  producen una frecuencia de 439 Hz para  $a'$  de 236 mm.
- 209 mm para  $c^2$  producen una frecuencia de 421 Hz para  $a'$  de 245 mm.

## Conclusiones

Como se ha visto, el temperamento y afinación son rasgos que determinan la estética del instrumento, al establecer el tipo de consonancias presentes y tonalidades posibles de interpretar. Por otro lado, son un reflejo directo de la concepción cultural dominante en el contexto en que el artefacto fue construido, por ello también forman parte imprescindible de la información histórica del artefacto. Sin embargo, conocer este diseño sonoro es de hecho imposible, puesto casi siempre está supeditado a factores de gusto y tradición, mismos que cambian con la historicidad del artefacto. Incluso algunas características determinantes para el temperamento y afinación

(características de las cuerdas y su tensión) son efímeras desde que son concebidas.

Como se ha visto, sólo se pueden trazar aproximaciones acerca del sistema de temperamento y afinación, y proponer una reconstrucción de la *sonoridad intrínseca* del artefacto histórico. Considerando el nivel fuerte de interpretación, para tener un máximo respeto a la *voz musical* y la *voz histórica* de un instrumento musical, la reconstrucción de esta *laguna sonora* en el temperamento y afinación debe siempre de estar basado en una metodología rigurosa y respaldarse no sólo con la propia información que el artefacto brinda, sino con abundantes evidencias históricas. Sin esta pesquisa, el diseño de la *sonoridad intrínseca* puede confundirse y llevar a cometer falsos históricos, como bien pueden ser elegir temperamentos y afinaciones no apropiados, los cuales darían una idea falsa del sonido general del instrumento, e incluso podrían amenazar la estabilidad física del instrumento musical. Por tanto, en el caso particular de este escrito se expusieron dos metodologías de aproximación al temperamento y afinación del clavicordio del Museo Nacional del Virreinato, mostrando las siguientes aproximaciones:

- No se pudo conocer con certeza el tipo de temperamento elegido. Existe probabilidad de que se trate de un tipo de mesotónico.
- Lo más probable es que haya sido diseñado para ser encordado en latón.
- La aproximación a la frecuencia estándar oscila entre 395 y 452 Hz para  $a^1$ .
- Debido a la gran cantidad de notas ligadas, es probable que el instrumento se haya diseñado para tener una tensión constante.
- Las posición de las tangentes guarda mayor coherencia con un temperamento mesotónico que el propio diseño del diapasón. El hecho de que esta pieza no refleje una afinación y

temperamento coherente puede significar que el constructor no estaba familiarizado con los principios básicos del diseño sonoro de los instrumentos de teclado encordado. Esto se ha visto también en otro ejemplar hispanoamericano ubicado en Lima (Huber, 1999). Asimismo, es posible que los constructores trabajaran con una plantilla de diapasón con una disposición de ranuras ya calculada (copiada de un diseño europeo), la cual fue pasando de generación en generación, y por ende perdió precisión (Alfons Huber, comunicación personal, enero 2013). Procesos similares suceden en Paracho, Michoacán, donde los artesanos tienen plantillas de diapasones de guitarra con posiciones de trastes ya calculados (Alejandro Vélez, comunicación personal, junio 2013). Esto también se ha visto en la factura de instrumentos de cuerda frotada de las regiones de la Huasteca potosina y las comunidades nahuas (Roubina, 2007: 48).

Las incógnitas que se han suscitado se deben a los siguientes factores:

- Los puentes móviles permiten que el instrumento pueda tener diferentes longitudes de cuerda vibrante.
- Posición de tangentes susceptibles a alterarse, ya que a lo largo de la vida del instrumento pueden doblarse a los lados para corregir afinaciones.
- Parte de la información utilizada (*tensión, regla longitud de flauta = longitud de cuerda*) para calcular la frecuencia estándar proviene de fuentes secundarias que se basan en preferencias estéticas tradicionales y no de la propia evidencia del artefacto histórico.
- El diámetro y presencia de *latón bajo* en la cuerdas, aunque guardan un significado histórico, pueden ser evidencias no originales.

## Bibliografía

Bavington, Peter (2006), "Surviving Clavichords Made in Latin America", *De Clavicordio, Proceedings of the IV International Clavichord Symposium* (7), 108.

\_\_\_ (2003), "Some Aspects of Clavichord Design and Set-up", *Clavichord International*, vol. 7, núm. 1, en línea [<http://homepage.ntlworld.com/peter.bavington/edintalk.htm>], visitado el 20 de abril de 2014.

Bibby, Neil (2003), "Tuning and Temperament: Closing the Spiral", en John Fauvel, Raymond Flood y Robin Wilson (eds.), *Music and Mathematics From Pythagoras to Fractals*, Oxford, Oxford University Press.

Campbell, Murray, Clive Greated y Arnold Myers (2009), *Musical Instruments: History, Technology and Performance of Instruments of Western Music*, Nueva York, Oxford University Press.

d' Alessandro, Christophe, Brian Katz y Francois Boudet (2006), "On the Acoustics of the Clavichord", *De Clavicordio, Proceedings of the IV International Clavichord Symposium*.

Huber, Alfons y Ana Savarain de Graf (1999), "A Clavichord from Peru in the Period of the Imperial Viceroyalty", *De Clavicordio, Proceedings of the IV International Clavichord Symposium*, pp. 105-117.

Ibarra Carmona, Laura Olivia (2006), "Metodología de aproximación para la recuperación de la sonoridad de un instrumento musical. Restauración de un armonio del siglo XIX procedente del Museo de Arte Religioso, Ex Convento de Santa Mónica, Puebla", tesis de licenciatura, México, ENCRYM-INAH.

Kottick, Edward L., (2003), *A History of The Harpsichord*, Bloomington, Indiana University Press.

Mariño Garza, Esteban (2014), “Estudio de la historia, tecnología, y significado cultural del clavicordio ubicado en el Museo Nacional del Virreinato, Tepotzotlán, Estado de México”, tesis de licenciatura, México, ENAH-INAH.

Roubina, Evgenia 2007, “La perspectiva interdisciplinaria en el estudio de los instrumentos de arco de México: un acercamiento al problema”, *Revista del Instituto de Investigación Musicológica “Carlos Vega”*, 21, 2007, Argentina, p. 48.

Shulter, Margo, “Pythagorean Tuning and Gothic Polyphony”, en línea [<http://www.medieval.org/emfaq/harmony/pyth.html>], visitado el 20 de abril de 2014.

Watson, John (2005), “Beyond Sound: Preserving the Other Voice of Historic Organs”, en John Watson (ed.), *Organ Restoration Reconsidered, Proceedings of a Colloquium*, Detroit, Harmonie Park Press.

involucró una investigación documental previa sobre recetas utilizadas para preparar barnices o corlas susceptibles de ser elaboradas en condiciones de laboratorio y sirvieran de estándar en la técnica de cromatografía en capa fina.

Los resultados de la investigación documental condujeron hacia dos importantes fuentes inéditas correspondientes a tesis de la licenciatura en restauración de la ENCRyM. La primera corresponde a Romero (2003), quien presenta una recopilación y registro sobre corladuras a través de una investigación bibliográfica y de campo. Con la información recabada propone las reproducciones de ciertas recetas, donde analiza sus características y similitudes con las observadas en piezas originales. Esto fue de gran ayuda para realizar una selección de las recetas más representativas, de modo que sirvieran de referencia y punto de partida para nuestra investigación.

Se seleccionó la cromatografía de capa fina por ser una técnica ya utilizada con éxito en el campo de la conservación-restauración de bienes culturales, por su simplicidad, versatilidad, rapidez y precisión para la identificación de materiales constitutivos (Domínguez, 1975). Para la implementación de esta técnica se partió de los resultados obtenidos por Campos-Díaz (2011), quien realizó la identificación de resinas naturales mediante cromatografía en capa fina; logró establecer una metodología factible para su identificación y aporta buenos resultados para dos casos de estudio.

En la técnica de manufactura de una escultura policromada se reconoce la aplicación de una técnica decorativa llamada corladura, definida como la aplicación sobre la madera de una hoja metálica —ya sea de oro, plata, antiguamente estaño—; esta se decora por un recubrimiento coloreado traslúcido de composición variable llamado corla e imita el brillo característico del oro, si es amarillo, o de piedras preciosas, si es de otro color (De la Fuente, 1999; Giannini y Roani, 2008). Se aplica con pincel, en una o más capas delgadas conocidas como veladuras. A diferencia de un barniz, la corla no tiene como función princi-

pal proteger al estrato pictórico, o en este caso a la hoja metálica. Tal condición hace que el restaurador no aplique los mismos criterios de eliminación que normalmente se llevan a cabo para un barniz de protección. Aun cuando no es muy frecuente que una escultura presente este tipo de decoración, cuando se llega a analizar la composición de este tipo de decoraciones los procedimientos de laboratorio, pruebas a la flama, de solubilidad y análisis histoquímicos (Plesters, 1956), todos los cuales se aplican hoy en el STREP, ofrecen resultados insuficiente para el conocimiento integral de la obra, entender intervenciones anteriores y, en algunos casos, para su óptima limpieza. Tampoco se obtiene información acerca del tipo de resina utilizada ni sobre la posible receta seguida para su elaboración.

La complejidad para analizar una corla radica en la escasa información sobre los materiales empleados, los procesos llevados a cabo para su manufactura y la diversidad de componentes que la integran: se sabe que pueden contener mezclas de resinas naturales, aceites secativos, pigmentos, colorantes, sales metálicas y aditivos. En consecuencia, la presente investigación tiene como objetivo proponer un método sencillo y rápido —por cromatografía en capa fina— que sirva para complementar la identificación de corlas a partir de patrones de multicomponentes.

### *Elementos principales en la preparación de una corla empleando materiales de origen natural*

La resina natural es el ingrediente principal que contiene una corla, y puede ser de origen vegetal o animal. El aceite secante se emplea porque contribuye al endurecimiento de la película, produciendo una capa fimógena dura y sólida. El vehículo debe tener la capacidad de disolver las resinas naturales y aceites secativos, es por ello que se pueden utilizar aguarrás, esencia de trementina, alcohol y éter, entre otros (Matteini y Moles, 2001).



## Procedimiento experimental

### Elaboración de probetas utilizadas como muestras patrón

La reproducción de las recetas consistió en una selección de cuatro procedimientos para preparar corlas, y que además se contara con la disposición de los compuestos para su preparación. Las diferencias consistieron en los materiales utilizados y su proceso de elaboración.

Una de las recetas seleccionadas se encuentra en el tratado de Orellana (1755), asignada con la clave M5, cuyo componente principal es la resina colofonia. Otras dos se tomaron del libro *Los mejores métodos para fabricar barnices y lacas de todas clases*, de Santini (1944), asignadas con las claves M12 y M37, que contemplan el uso de la resina fósil -copal- y la resina de origen animal -goma laca-, respectivamente. Mientras que una más fue propuesta por la maestra en Artes Visuales Lilia Flores Ramírez León, asignada como M50 y compuesta por la oleoresina conocida como trementina de Venecia. El análisis y síntesis de los barnices fueron realizados en el Laboratorio de Fisicoquímica de la ENCRyM-INAH. Si bien se contaba con las proporciones de cada una de las recetas, fue necesario realizar pruebas preliminares para establecer las cantidades de cada componente. También se hicieron pruebas con varios colorantes y pigmentos, siendo la laca de garanza (LG), azul de prusia (AP) y sangre de drago (SD) los que produjeron las mejores coloraciones y transparencia. La cantidad de pigmento utilizado fue de 0.01g en todas las probetas elaboradas.

En la tabla I se muestran las sustancias y cantidades empleadas para la preparación de las corlas. Las mezclas se realizaron a baño maría, en agitación constante, a una temperatura superior a 80 °C a excepción de la receta M37, que se preparó a temperatura ambiente.

Receta	Resina	Proporción y cantidad de resina (g)	Esencia de trementina (ml)	Aceite de linaza (g)	Alumbre (g)	Alcohol etílico (ml)
M5	Colofonia	30	10	10		
M12	Copal	5	30	5		
M37	Goma Laca	4				24
M50	Trementina de Venecia	11		25		

Tabla I. Cantidades empleadas en las diferentes recetas para la reproducción de corlas con materiales de origen natural. Orlando Martínez Zapata, 2014.

### Corla M5

La colofonia se molió en un mortero de ágata, se vertió en un vaso de precipitado, se agregó aceite de linaza; en seguida la esencia de trementina y se llevó a baño maría durante 90 minutos. Al inicio la preparación presentaba un color amarillo, que al término del proceso se tornó de color amarillo-café muy intenso, de consistencia muy viscosa.

### Corla M12

El copal se pulverizó en un mortero de ágata, se vertió a un vaso de precipitados y se agregó el aceite de linaza; en seguida se añadió la esencia de trementina y se llevó a baño maría durante 12 horas. Durante su preparación mostró un color café. Después de retirarlo del fuego se dejó enfriar a temperatura ambiente, y con el paso de los días la sustancia se tornó de color amarillo.

### Corla M37

La goma laca se dispuso sobre un vaso de precipitado; se sabe que entre las propiedades de esta resina destaca la de ser muy soluble en alcohol, y por ello se adicionó etanol; esta receta se hizo a temperatura ambiente, y en agitación constante, por un lapso de 30 minutos, una vez disuelta, la mezcla se tornó de color café.

### Corla M50

La trementina de Venecia se agregó en un vaso de precipitado y se añadió una mayor proporción de aceite de linaza y alumbre; la mezcla se llevó a baño maría durante 2 horas. Durante el proceso se observó que el barniz presentó un color amarillo claro, además de que el alumbre no se disolvió por completo.

Al término del proceso de preparación las corlas se reservaron en viales de vidrio parcialmente cerrados durante siete días para propiciar su oxidación. Cada una de las cantidades de corlas obtenidas se dividieron y se separaron en cuatro porciones iguales, y a tres de ellas se les adicionó uno de los pigmentos mencionados anteriormente, reservando una porción de corla sin colorear.

Las corlas se aplicaron con pincel de pelo de buey sobre madera cubierta con hojas de oro y plata falsa. Lo anterior permitió observar la textura, color, transparencia, fluidez y tiempo de secado, con la finalidad de que fueran semejantes a las corladuras observadas en las esculturas.

Después de que cada una de las probetas asignadas como estándares secan completamente, lo cual requirió alrededor de un mes, se procedió a la toma de muestras mediante un hisopo de algodón impregnado con una disolución de acetato de etilo:hexano 3:1, y se reservaron para completar su disolución durante 24 horas antes de realizar la cromatografía.

### Cromatografía en capa fina

Para realizar la cromatografía se utilizó una cámara de elución rectangular de vidrio, además se ocuparon placas de Silica gel, de 20 x 20cm (diámetro promedio 60 Å), de la marca Aldrich®, en algunos casos se recortaron a una medida de 10 x 10cm. En todas se trazó una línea base de 1cm, donde se agregó la muestra con un capilar, y además se trazó una línea superior de cm para limitar dónde se debía poner fin al proceso de elución.

Se emplearon mezclas binarias y terciarias disolventes, seleccionados por presentar la mayor afinidad a cada una de las resinas utilizadas. Por cada mezcla disolvente se utilizaron 120ml, esta cantidad cubre 0.5cm de altura en la cámara de elución, y es la necesaria para no rebasar la línea de inicio donde se coloca la muestra.

Las mezclas de disolventes usados son:

- acetato de etilo : hexano 3:1
- butanona: hexano 3:1
- acetato de etilo : butanona : hexano 1:1:1
- acetona : acetato de etilo : etanol 2:2:1
- acetato de etilo : butanona: hexano 2:3:5

### Revelado

Las cromatoplacas se revelaron usando una lámpara ultravioleta (UV); se midieron las distancias recorridas de cada uno de los componentes para realizar los cálculos del factor de retención y el parámetro de RED.

### Cálculo del factor de retención

La separación de mezclas de moléculas mediante la cromatografía de capa fina se basa en el principio del reparto entre dos fases. En general, una cromatografía se realiza permitiendo que una mezcla de moléculas que interesa separar interactúe con un medio o matriz de soporte, denominado fase estacionaria. Un segundo medio (la fase móvil), que es inmiscible con la fase estacionaria, sube por capilaridad a través de ésta y arrastra las moléculas en la muestra. Como las distintas moléculas en la muestra tienen diferentes propiedades entre ellas, la fase móvil arrastrará a los componentes con cierta eficiencia; por tanto, los sustratos que tienen interacciones más intensas (fuertes) con la fase móvil serán eluidos más rápidamente que los que interactúan preferente con la fase estacionaria. El parámetro utilizado para comparar la eficiencia con que cada compuesto se denomina factor de retención ( $R_f$  en ecuación 1), y se define como el desplazamiento relativo de la muestra respecto del solvente (Streigel y Hill, 1996). Se representa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_f = \frac{\text{Distancia recorrida por el soluto } (d_1)}{\text{Distancia recorrida por la fase móvil } (d_2)} \quad (1)$$

El factor de retención es un parámetro cuantitativo, proporciona la identificación y dilucidación de propiedades de afinidad de un compuesto en función del eluyente o disolvente empleado. El cálculo se hace a partir de la distancia que recorre la muestra sobre la cromatoplaqueta, dividida entre la distancia que recorre el disolvente empleado. Así, entre mayor sea el valor de  $R_f$  en el análisis del sistema cromatográfico, mayor será la afinidad del compuesto con el disolvente (Acevedo-Ramos et al., 2003).

### Cálculo la diferencia de energía relativa de Hansen (RED)

La diferencia de energía relativa de Hansen (RED, por sus siglas en inglés) se correlaciona con el factor de retención de una cromatografía en capa fina mediante la ecuación 2. La RED ayuda a ampliar la resolución en las mediciones obtenidas a partir de  $R_f$ , debido a que permite discriminar muestras bajo criterios estadísticos de análisis (Campos-Díaz, 2011:119).

$$RED = \frac{1-R_f}{R_f} \times 100 \quad (2)$$

Se considera una buena afinidad al tener valores de  $RED \leq 16$ , lo cual permitirá establecer parámetros que ayuden a la identificación de resinas con las cinco mezclas de disolventes empleadas.

Las muestras establecidas como patrones se corrieron por triplicado, y permitió calcular los promedios y desviaciones estándar de los factores de retención ( $R_f$ ) y de la RED.

## Resultados y discusión

### Reproducción de corladuras

A continuación se muestran los resultados de las diferentes probetas obtenidas, y donde se aplicaron las corlas reproducidas en el laboratorio (véase Figura 1). Todas se secaron después de un mes de haberse aplicado la prueba, y las películas presentaron diferentes características de color, grosor y dureza. Para el análisis cromatográfico se tomó una muestra por cada tipo de corla sin colorear y otra con pigmento, sumando un total 16 muestras recabadas.

*Parámetros Rf y RED de las muestras patrón obtenidos mediante cromatografía en capa fina*

En la Tabla 2 se muestran los resultados estadísticos del parámetro Rf más afín a las moléculas de los disolventes; en otras palabras, los más cercanos a la unidad. Sin embargo, con esta serie de datos no es posible caracterizar las corlas empleadas porque los valores de Rf son muy cercanos entre ellos, a pesar de que muestran pequeñas desviaciones estándar (véase Tabla 2).

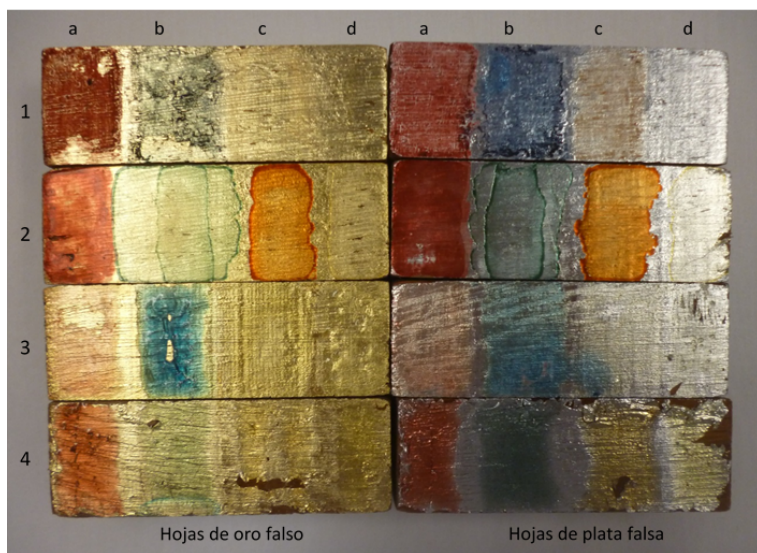


Figura 1. Serie de probetas con cuatro tipos distintos de corlas aplicadas sobre hojas de plata y oro falso: 1) M5, 2) M50, 3) M37 y 4) M12; coloreadas con tres pigmentos: a) laca de garanza, b) azul de Prusia, c) sangre de drago y d) sin pigmento. Orlando Martínez Zapata, 2014.

Clave de la corla	I		II		III		IV		V	
	Acetato de etilo:hexano 3:1		Butanona :hexano 3:1		Acetato de etilo:butanona :hexano 1:1:1		Acetato de etilo:butanona :hexano 2:3:5		Acetona: acetato de etilo :etanol 2:2:1	
	Rf	S	Rf	S	Rf	S	Rf	S	Rf	S
M5	0.97	0.01	0.94	0.00	0.97	0.01	0.96	0.01	0.93	0.01
M5LG	0.96	0.00	0.94	0.01	0.95	0.04	0.96	0.01	0.92	0.00
M5AP	0.96	0.01	--	--	0.96	0.00	0.95	0.01	0.92	0.01
M5SD	0.96	0.02	0.96	0.02	0.95	0.02	--	--	0.90	0.03
M12	0.96	0.00	0.95	0.01	0.97	0.00	0.97	0.01	0.93	0.01
M12LG	0.94	0.03	0.92	0.04	0.97	0.01	0.97	0.01	0.94	0.01
M12AP	0.97	0.00	0.96	0.01	0.97	0.00	0.96	0.01	0.94	0.01
M12SD	0.95	0.04	0.97	0.01	0.95	0.02	0.98	0.00	0.93	0.02
M37	0.93	0.01	0.93	0.01	0.95	0.01	0.94	0.01	0.95	0.02
M37LG	0.93	0.01	0.93	0.01	0.95	0.00	0.94	0.01	0.95	0.01
M37AP	0.93	0.00	0.93	0.01	0.96	0.01	0.95	0.01	0.93	0.01
M37SD	0.94	0.01	0.95	0.01	0.95	0.01	0.97	0.01	0.95	0.01
M50	0.96	0.00	0.95	0.02	0.96	0.00	0.95	0.01	0.96	0.03
M50LG	0.94	0.01	0.94	0.02	0.94	0.01	0.94	0.01	0.94	0.03
M50AP	0.95	0.01	0.95	0.01	0.95	0.01	0.94	0.01	0.95	0.01
M50SD	0.96	0.01	0.95	0.01	0.96	0.01	0.95	0.01	0.95	0.00

Tabla 2. Valores promedio de Rf y sus desviaciones estándar obtenidos de 16 muestras de corlas en cinco mezclas binarias y terciarias de disolventes. Orlando Martínez Zapata, 2014.

*Uso de la RED en la identificación de corlas*

En la Tabla 3 se muestran los promedios y las desviaciones estándar de la RED, y aparecen redondeadas a la unidad para facilitar su análisis. A diferencia de los Rf, visto en la Tabla 2, estos nuevos valores manifiestan una mayor heterogeneidad entre los diferentes tipos de recetas. Sin embargo, la incorporación de un pigmento no modifica notoriamente el valor de la RED. Esto se entiende como una cercanía entre los valores promedio y una desviación

estándar alta, lo cual dificulta la correspondencia para cada pigmento utilizado. Esto se atribuye a las pequeñas cantidades de pigmento necesarias para colorear las corlas que no llega a ser medible en la cromatopla. Con lo anterior se descarta la posibilidad de caracterizar en este método el tipo de pigmento o colorante empleado en una corla.

Clave de la corla	I Acetato de etilo:hexano 3:1		II Butanona :hexano 3:1		III Acetato de etilo:butanona :hexano 1:1:1		IV Acetato de etilo:butanona :hexano 2:3:5		V Acetona: acetato de etilo :etanol 2:2:1	
	RED	S	RED	S	RED	S	RED	S	RED	S
M5	3	1	6	0	3	1	8	2	4	1
M5LG	4	0	7	1	3	1	9	0	4	1
M5AP	4	1	0	0	4	0	9	4	5	1
M5SD	5	2	4	2	5	2	11	1	2	0
MI2	4	0	5	1	3	0	7	1	3	1
MI2LG	7	3	6	0	3	1	6	1	3	0
MI2AP	3	0	4	1	3	0	6	0	4	1
MI2SD	3	0	3	2	5	2	7	2	2	0
M37	7	1	5	0	5	1	5	2	6	1
M37LG	7	1	4	2	6	1	7	3	7	1
M37AP	7	0	4	1	6	1	6	1	6	1
M37SD	6	2	4	1	5	1	5	0	6	1
M50	8	1	4	1	4	0	7	3	6	1
M50LG	8	0	4	2	6	1	7	3	7	1
M50AP	7	0	4	1	6	1	6	1	6	1
M50SD	7	1	4	1	5	1	5	0	6	1

Tabla 3. Valores promedio de RED y sus desviaciones estándar obtenidos de 16 muestras de corlas en cinco mezclas de disolventes binarios y terciarios. Orlando Martínez Zapata, 2014.

Agrupando todo el conjunto de datos de RED obtenidos de cada receta reproducida, sin importar el pigmento empleado (12 muestras por receta), se obtuvieron intervalos de distribución con un nivel de confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ),

cuyos resultados se muestran en la Tabla 4. En la Figura 2 se muestra un esquema con los intervalos de RED asociados a cada receta de corla usada como referencia; el esquema permite realizar una identificación preliminar y rápida.

Los intervalos propuestos no llegan a ser totalmente precisos, ya que aparecen diversas zonas de traslape para dos o tres tipos de corlas, según la mezcla de disolvente. Estos traslapes se deben a que las mezclas de disolventes recomendadas no logran separar de manera suficiente cada una de las corlas en la cromatopla —cabe recordar que estos materiales son de multicomponentes y, por consiguiente, resultan más complejos que el uso de resinas puras—; en consecuencia, para corroborar los resultados se recomienda emplear análisis complementarios, como la espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier.

Clave de la corla	I Acetato de etilo:hexano 3:1		II Butanona :hexano 3:1		III Acetato de etilo:butanona :hexano 1:1:1		IV Acetato de etilo: butanona :hexano 2:3:5		V Acetona: acetato de etilo :etanol 2:2:1	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
M5	4.3	3.2	7.6	6.0	4.0	2.9	5.1	3.2	9.0	7.4
MI2	3.9	2.7	5.7	4.1	3.7	2.9	3.7	2.7	7.5	6.0
M37	7.8	6.9	5.1	4.0	5.9	3.8	6.3	4.8	7.3	5.2
M50	8.1	7.1	4.8	3.5	5.8	4.4	6.7	5.3	6.1	4.5

Tabla 4. Valores máximos (max) y mínimos (min) de los intervalos de distribución con un nivel de confianza de 95% ( $\alpha = 0.05$ ) de cuatro tipos de corlas con cinco tipos de mezclas binarias y terciarias de disolventes. Orlando Martínez Zapata, 2014.

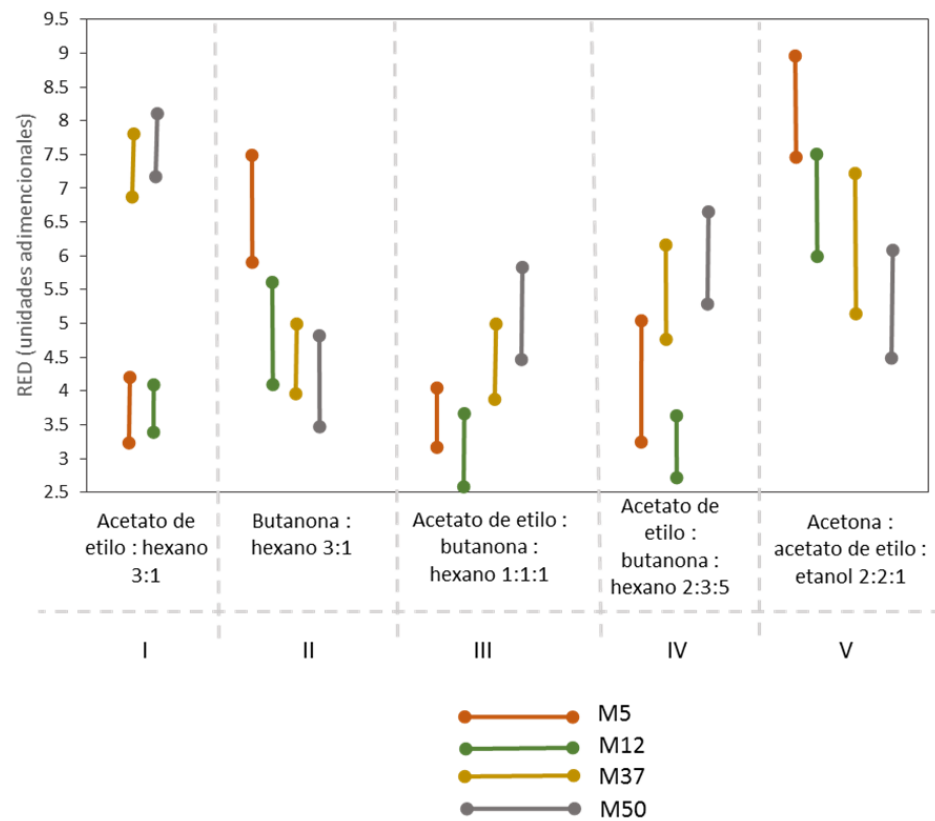


Figura 2. Esquema para la identificación de corlas mediante intervalos de RED característicos de cada receta usando cinco mezclas de disolventes. Orlando Martínez Zapata, 2014.

### Casos de estudio

Para comprobar la efectividad de la metodología propuesta se analizaron las corlas de tres esculturas policromadas, donde se determinó de antemano la presencia de zonas con corladuras.

La toma de muestras se realizó por los propios estudiantes a cargo de las obras; tres de ellas se consiguieron de muestras guardadas de los análisis puntuales y se extrajeron con un bisturí, lo cual provocó una mínima intervención. Durante las pruebas de limpieza se obtuvieron cuatro muestras adicionales, al recuperar los hisopos de algodón para su análisis.

Las tres esculturas policromadas provienen de la Misión Pastoral de San Bartolomé Cuautlalpan, Zumpango, Estado de México, y posiblemente datan del siglo XVII; éstas son el Apóstol tonsurado, san Pedro y san Andrés. En la Figura 3 se muestra la ubicación de la toma de muestras. Los hisopos y pequeñas cantidades de muestras se introdujeron en tubos de ensayo, se les agregó 2.5 ml de disolvente, permitiendo su disolución por un lapso de 24 horas; posteriormente se observó su fluorescencia con luz UV para confirmar la disolución de las muestras con los disolventes utilizados.



Figura 3. Ubicación de la toma de muestras de corlas de tres esculturas policromadas provenientes de la Misión Pastoral de San Bartolomé Apóstol, San Bartolo Cuautlalpan, Zumpango, Estado de México, restauradas en el Seminario Taller de Escultura Policromada de la ENCRyM: a) Apóstol tonsurado, b) san Pedro, c) san Andrés. Estudiantes de la Licenciatura en Restauración, generación 2012. Las imágenes fueron tomadas de los informes de restauración con el permiso de la titular del taller, M. Fanny Unikel Santoncini, 2014.



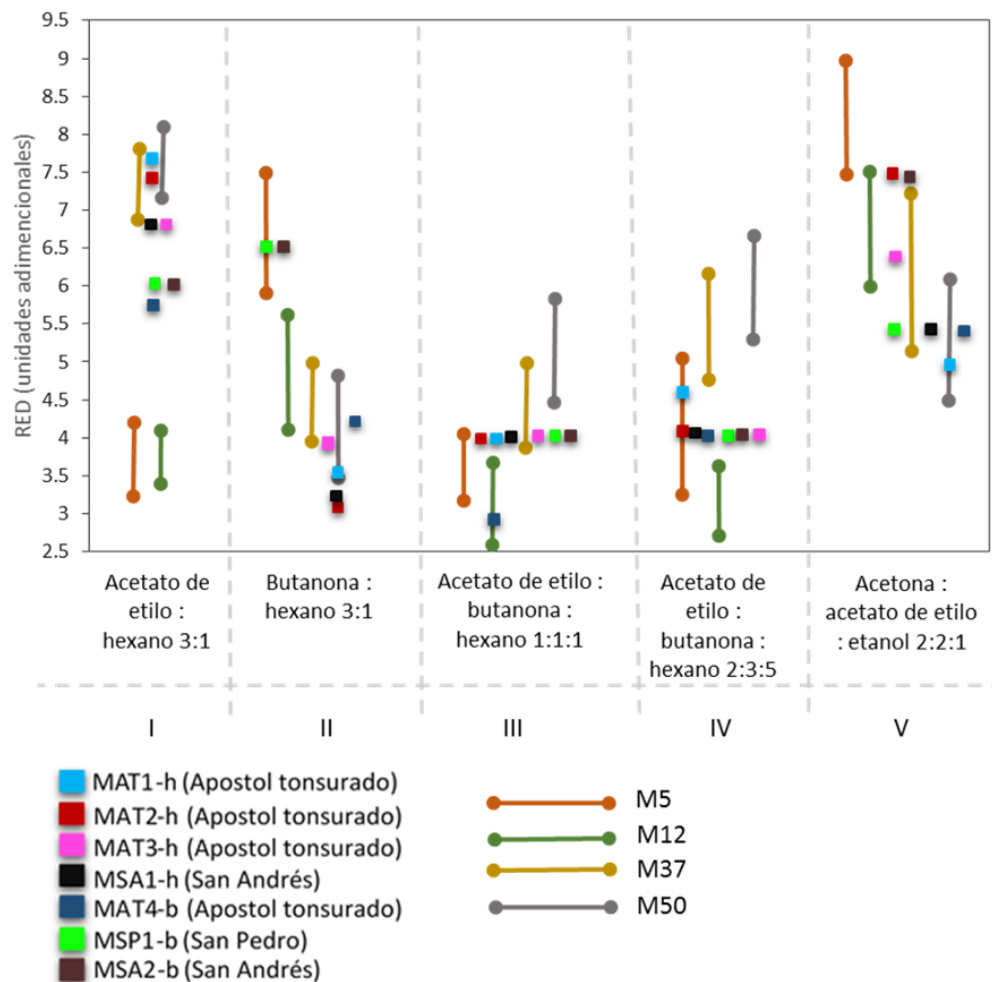


Figura 4. Ubicación de los parámetros de RED sobre los intervalos de las muestras patrón. Orlando Martínez Zapata, 2014.

Las muestras se colocaron con un capilar en cinco cromatoplasmas distintas, las cuales fueron eluidas en las cinco mezclas de disolventes propuestas. Los experimentos se realizaron por triplicado y se obtuvieron los Rfs y RED para cada muestra. En la Figura 4 se muestra el esquema de identificación y se ubican los valores promedios de RED de las corlas de las esculturas estudiadas.

Al realizar la suma de frecuencias para cada escultura, en el caso de la escultura del Apóstol tonsurado se obtiene una mayor cantidad de correspondencias con la receta M37, posteriormente con M50, M5 y por último M12, lo cual quiere decir que los parámetros de RED de las muestras problema se asemejan más a las de una corla compuesta por goma laca.

En las esculturas de san Andrés y san Pedro, se encontraron los mismos resultados, asociando sus corlas a la receta M5, seguida por las recetas M37 y M12, por lo que la corla de esta escultura podría estar compuesta por colofonia y aceite de linaza.

## Conclusiones

Al utilizar los resultados de las investigaciones documentales y experimentales propuestas por las restauradoras Roxana Romero Castro y Lyla Patricia Campos Díaz, se logró establecer una primera propuesta metodológica para la identificación preliminar de corlas presentes en esculturas novohispanas. El método se comprobó con muestras tomadas con un hisopo de algodón y con pequeñas cantidades de muestras obtenidas durante los análisis puntuales. En los tres casos de estudio de esculturas, restauradas en el STREP, se pudo determinar la aplicación de dos tipos de corlas compuestas por materiales de origen natural: una con resina colofonia y aceite de linaza, y otra con goma laca. El método todavía requiere ciertas modificaciones que permitan una mayor separación en los intervalos asignados a cada receta, además de que debe ser complementado con otros métodos de análisis para su confirmación.

## Bibliografía

Acevedo-Ramos, Rodrigo *et al.* (2003), “Identificación de barnices en pintura de caballete por cromatografía en placa fina (TLC) y espectroscopia infrarroja (FTIR)”, *Conserva*, núm. 7, pp. 97-119

Campos-Díaz, Lyla Patricia (2011), “Identificación de barnices por cromatografía de capa fina”, tesis de licenciatura en Restauración”, ENCRyM-INAH, México.

Domínguez, Xorge (1975), *Cromatografía en papel y en capa delgada*, Washington, D.C., OEA.

De la Fuente, Luis Ángel (1999), “Los metales plateados como policromía (las corladuras): análisis-experimentación y restauración”, tesis de doctorado, Universidad del País Vasco, Vizcaya.

Giannini, Cristina y Roberta Roani (2008), *Diccionario de restauración y diagnóstico*, San Sebastián, Nerea.

Matteini Mauro y Arcangelo Moles (2001) *Ciencia y restauración. Método de investigación* Sevilla, Nerea/Junta de Andalucía.

\_\_(2001) *La química en la restauración*, San Sebastián, Nerea.

Orellana, Francisco Vicente (1755), *Tratado de barnices y charoles*, Valencia, Imprenta de Joseph García.

Plesters, Joyce (1956), “Cross-sections and chemical analysis of paint samples”, *Studies in Conservation*, vol. 3, núm. 2, pp. 110-157.

Romero-Castro, Roxana (2003), “Corladuras como técnica decorativa en escultura sobre madera policromada novohispana: usos, materiales y recetas”, tesis de licenciatura en Restauración, ENCRyM-INAH.

Santini, L. (1944), *Los mejores métodos para fabricar barnices y lacas de todas clases*, Barcelona, Ossó.

Streiegl, Mary F. y Jo Hill (1996), *Thin-Layer Chromatography for Binding Media Analysis*, Los Ángeles, The Getty Conservation Institute.