

# Examen global de la escultura



# Examen global de la escultura

## 3.1. Introducción

La historia de El Giraldillo ha quedado grabada en su piel. En él han dejado su huella tanto el efecto de los agentes ambientales como las actuaciones humanas a las que se ha visto sometido, desde su fabricación hasta las reparaciones que ha sufrido. Utilizando los instrumentos adecuados es posible llegar a conocer lo que ha sucedido a lo largo del tiempo, y estos medios son las técnicas derivadas de las ciencias experimentales.

El uso de una gran variedad de métodos de investigación ha permitido conocer la historia de la escultura, plasmada en su estado material, desde la escala microscópica hasta la macroescala, desde el punto de vista de la composición de los materiales que lo forman y cómo se han transformado hasta la definición de su comportamiento físico y mecánico en respuesta a los estímulos externos.

La primera fase del estudio de un bien cultural normalmente es la que se denomina de examen global y es la que se lleva a cabo con métodos basados en determinaciones físicas, aplicados directamente sobre la obra, sin alterarla ni modificarla.

Las técnicas no destructivas se basan en la aplicación de energía a la obra (normalmente en forma de radiación electromagnética, pero también como energía mecánica) y la “observación” de la forma en que esta energía interacciona con ella. Éstos son los métodos denominados de *examen*, ya que, en la mayoría de los casos, se obtiene una imagen de la estructura física de la obra. En función del tipo de energía que se utilice deberán emplearse distintos instrumentos para interpretar los resultados; en el caso de la radiación electromagnética, sólo una pequeña porción del espectro corresponde a la visible, el resto no puede ser apreciado por el ojo humano. Cuando se utiliza energía mecánica, en forma de ultrasonidos, éstos tampoco son perceptibles por el oído, por lo que se hace necesario un instrumento que actúe como receptor.

En el caso del Giraldillo, se han efectuado diversos estudios no destructivos, que, junto con la inspección visual, han permitido conocer su estado de conservación así como la posible técnica de fabricación y las intervenciones que ha sufrido. Todos estos datos relativos a la estructura física de la escultura se han recogido en una detallada cartografía temática, que ha permitido tener una visión global muy útil para definir las intervenciones necesarias.

## 3.2. Estudio radiográfico

La mayoría de los métodos de examen se basan en la aplicación de radiación electromagnética, que interacciona con la obra de distinta forma según sea la longitud de onda de dicha radiación. Las radiaciones de mayor longitud de onda (infrarrojo, visible y ultravioleta) se reflejan en su mayor parte, y la observación (bien directa, bien con instrumental específico) de esta radiación reflejada permite el estudio de la superficie de los objetos.

Los rayos gamma, que coinciden en parte con los rayos X, tienen una longitud de onda mucho menor que la radiación UV y, por tanto, una altísima energía, por lo que son capaces de atravesar los objetos, en distinta forma según la densidad de los materiales que los conformen. La detección de esta radiación que atraviesa el objeto proporciona información de todo el volumen del mismo, no sólo de la superficie. Éste es el fundamento de la realización de radiografías y gammagrafías. La diferencia entre ambas técnicas se debe a que los rayos gamma pueden alcanzar mayores energías que los rayos X producidos en los equipos convencionales, por lo que su uso es necesario en el caso de materiales muy absorbentes, como el metal o la piedra.

Cuando un haz homogéneo de rayos X o gamma atraviesa un objeto, la radiación va perdiendo intensidad a medida que va siendo absorbida por los materiales que constituyen dicho objeto;

Rosario Villegas Sánchez  
José M<sup>a</sup> Gallardo Fuentes  
*Escuela Técnica Superior  
de Ingenieros*

Raniero Baglioni  
Ana Bouzas Abad  
Auxiliadora Gómez Morón  
*Instituto Andaluz del  
Patrimonio Histórico*

esta absorción es diferente en función de los materiales que encuentra, por lo que la radiación que sale ya no es homogénea, y lleva en ella de forma latente la imagen del objeto. Cuando incide sobre la película radiográfica, esta imagen latente la impresiona y, tras el revelado, queda de manifiesto.

Por tanto, la radiografía se puede considerar como la imagen de la sombra de un objeto que ha sido interpuesto en el recorrido de un haz de radiación entre la fuente y la película. En la imagen radiográfica las zonas claras (reciben menos radiación) corresponden a las partes de mayor espesor o densidad y las más oscuras (reciben más radiación) a partes menos densas y/o de menor espesor. También hay que tener en cuenta para la interpretación de radiografías, que el objeto es atravesado en su totalidad y esto da lugar a una imagen compleja por la superposición de las diversas partes que lo componen.

Para producir una sombra más nítida y verdadera del objeto deben cumplirse las siguientes condiciones:

- La fuente debe ser lo más aproximada a un punto como sea posible, para aumentar la definición de la radiografía.
- La fuente debe estar tan alejada del objeto como sea necesario, especialmente en el caso de piezas gruesas. A grandes distancias la definición radiográfica mejora y la imagen se aproxima más al tamaño real del objeto.
- La película debe estar lo más próxima posible al objeto, normalmente se coloca en contacto con él, y en planos paralelos.
- La radiación debe estar dirigida perpendicularmente a la superficie de la película.

Normalmente el examen radiográfico se utiliza en el estudio de la escultura en bronce tanto para determinar su estado de conservación como para entender mejor la técnica de elaboración. Se puede observar el estado de la epidermis en zonas cubiertas por una capa de corrosión y concreciones, defectos de origen en la fundición o los aparecidos a lo largo del tiempo,

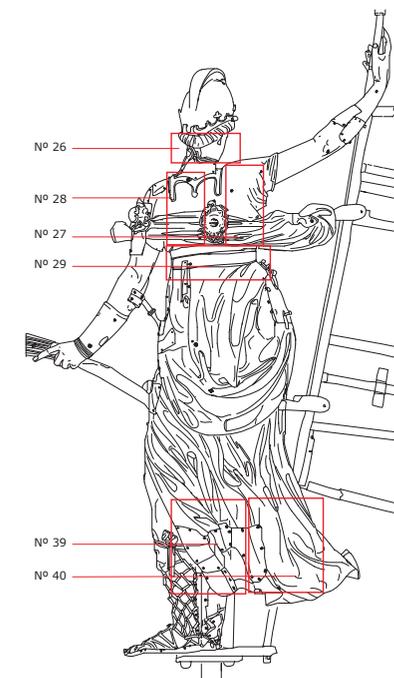
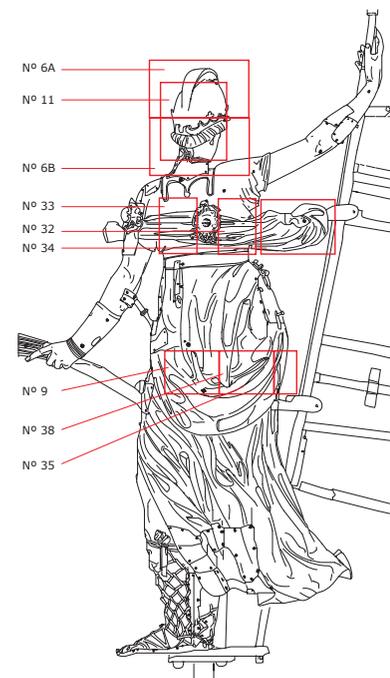
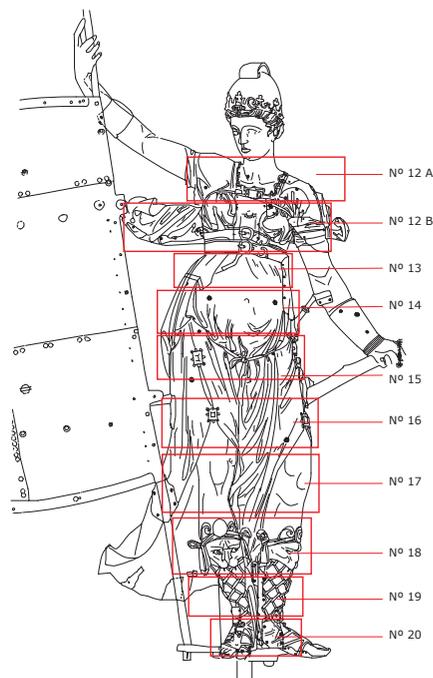
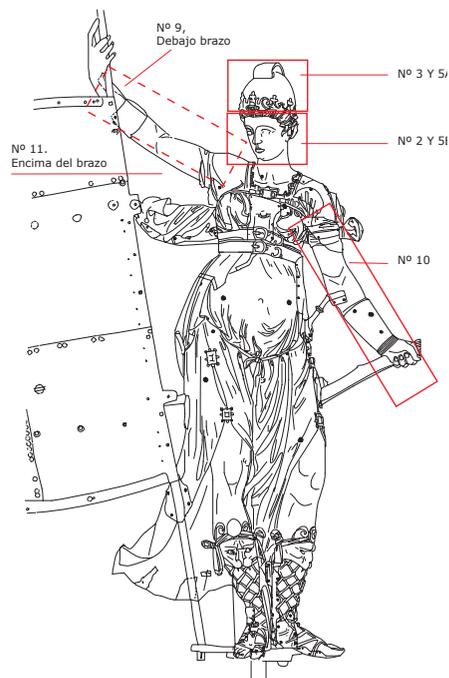
así como las restauraciones o reparaciones sufridas. Igualmente se pueden apreciar las piezas que la componen, los puntos y tipo de soldadura y anclaje, la presencia de restos de tierra de fusión o cualquier otro elemento interno. Por lo tanto esta técnica presenta dos enfoques, uno de cara al conocimiento histórico y tecnológico y otro hacia el estado de conservación y la restauración.

La radiación gamma, usada en este estudio, es emitida por la desintegración de sustancias radiactivas y alcanza grandes energías. En este caso se ha empleado Iridio-192, que presenta cuatro líneas de emisión características en torno a 0,4 MeV.

La elección de esta técnica frente a los Rayos X está condicionada por el material constitutivo de la escultura y el espesor del mismo (en torno a 1 centímetro e incluso superiores). Esto implica una gran absorción, por lo que es necesaria una radiación más energética que pueda atravesar la escultura.

En oposición a esta “superioridad” de la radiación gamma, aparecen algunas desventajas respecto de los Rayos X, la mayoría relacionadas con temas de Seguridad en el Trabajo, y una relativa a la calidad de las radiografías obtenidas, que presentan menos contraste, con lo que algunos detalles del examen pueden quedar inapreciados.

El estudio radiográfico se ha realizado en dos etapas, por la empresa Norcontrol. Una primera fase, que incluyó la mayor parte del trabajo, se llevó a cabo antes de comenzar la restauración; la superficie estudiada se indica en la figuras 3.1, 3.2 y 3.3. La segunda parte de las radiografías se completaron cuando se comenzó la extracción de la estructura interna y quedaron accesibles en la escultura zonas que antes no lo eran. Estas placas se indican en la figura 3.4. También se radiografiaron la tinaja, la peana, la palma y el banderín, total o parcialmente, obteniéndose escasas indicaciones de defectos o discontinuidades, en algún caso reparada, como se indica en el capítulo 8 (figuras 3.5 a 3.8).



La actividad disponible en la fuente se encontraba en torno a los 50 curios, con valores precisos que se indican en cada placa. La película utilizada es Structurix D7 DW de Agfa, en forma de película continua de 30 cm de anchura, cortándose a las dimensiones necesarias para adaptarla a las características de cada zona. En aquellas zonas de menor superficie o de más difícil acceso se han empleado placas de 30 x 40 cm, de 10 x 40 cm, o incluso se han cortado trozos de película a un menor tamaño para conseguir que la placa se ajuste lo mejor posible a la morfología de la escultura. En algunos casos se utilizaron pantallas de plomo para absorber la radiación difusa y obtener una imagen más nítida. El revelado de la película se ha realizado utilizando una procesadora automática Agfa.

El estudio se ha efectuado a base de tomas parciales, colocando la fuente a la distancia necesaria para cubrir la zona a radiografiar. Siempre que fue posible se realizó la radiografía colocando la fuente en el interior de la escultura y las placas adheridas a la superficie exterior. De esta forma se han podido estudiar el cuello, gran parte del torso y la parte delantera de los muslos.

En aquellas otras zonas donde esta disposición no es factible, como la cabeza, los brazos o las piernas, se han realizado las tomas a doble pared, es decir, irradiando las dos superficies de la figura al mismo tiempo. Con esta técnica la interpretación es más complicada, puesto que se superponen las imágenes de ambas caras. Para compensar esta complicación en algunos casos se

Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4. Distribución de placas radiográficas en la escultura. Frontal I, Frontal II, Dorsal I y Dorsal II.

(Autora: Ana Bouzas Abad)

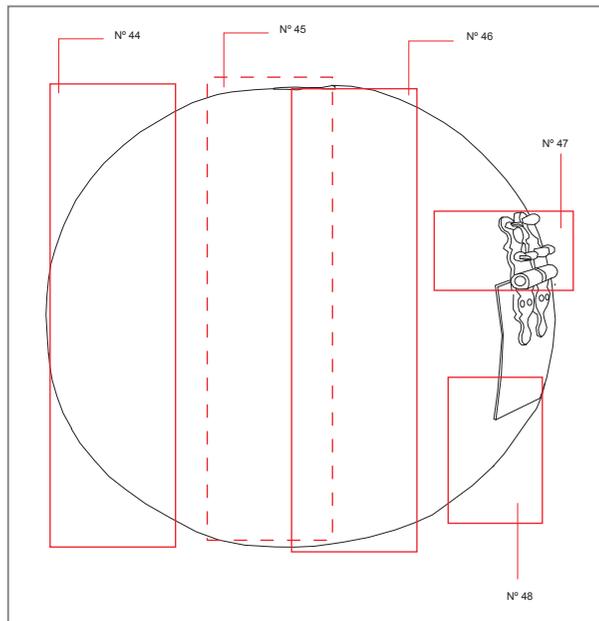


Figura 3.5. Distribución de placas radiográficas en la Bola.

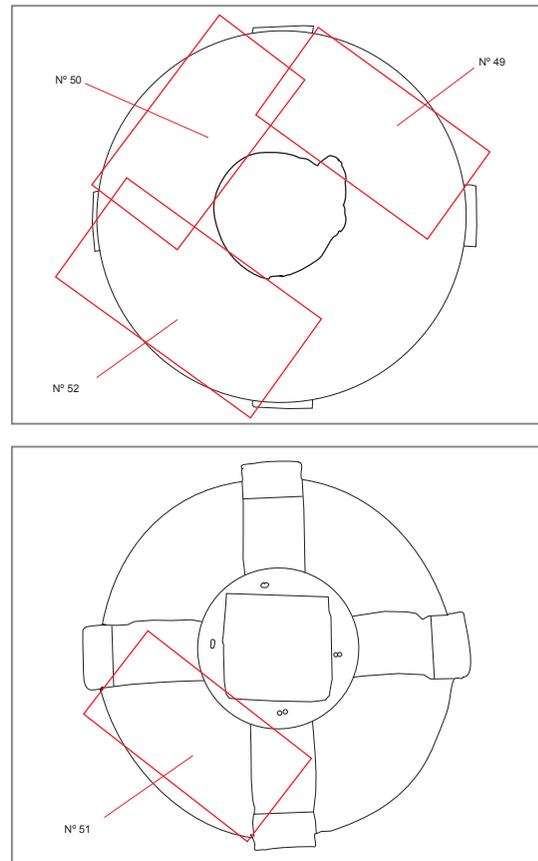


Figura 3.6. Distribución de placas radiográficas en la Peana.

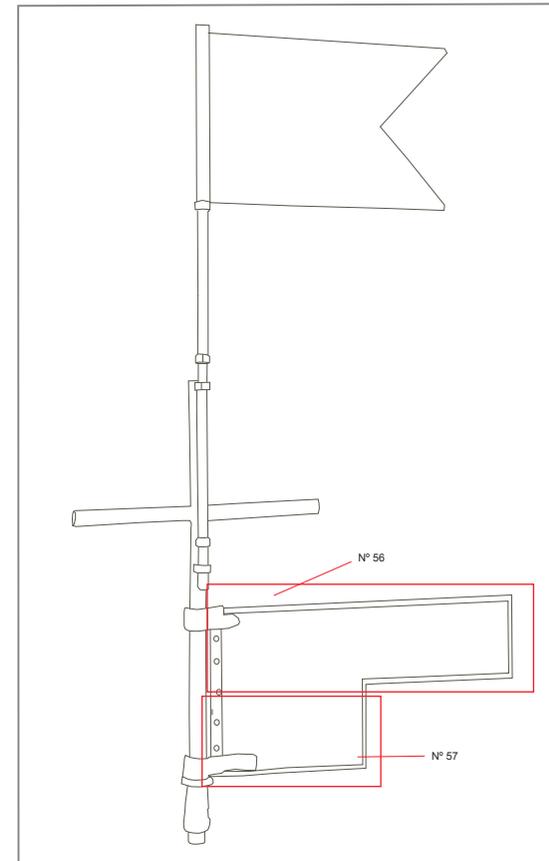
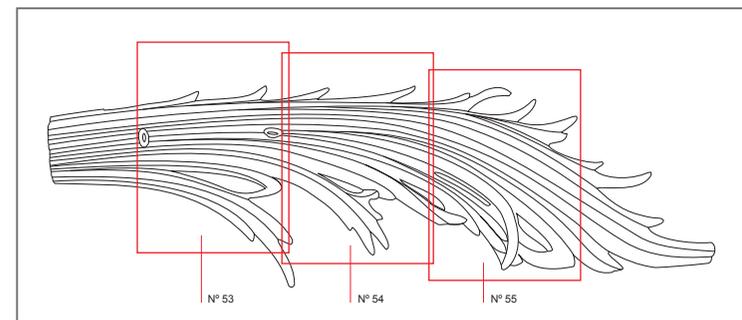


Figura 3.8. Distribución de placas radiográficas en el Banderín.



Figura 3.7. Distribución de placas radiográficas en la Palma.  
(Autora: Ana Bouzas Abad)



han efectuado dos tomas en direcciones perpendiculares, para una mejor localización de la información.

En general puede apreciarse la porosidad que presenta la aleación en numerosas zonas, excepto la cabeza. También se aprecian numerosas discontinuidades (grietas, fisuras, lagunas) en prácticamente toda la escultura. Algunas de ellas deben de haberse originado durante la fabricación de la escultura, ya que fueron reparadas en origen con la realización de un cajeadado para introducir los correspondientes injertos. No se ha detectado la presencia de soldaduras originales entre distintas piezas, lo que confirma la elaboración de la escultura en una sola pieza. Si se aprecian, sin embargo, las soldaduras realizadas en la década de 1980, cerrando grietas o lagunas de grandes dimensiones.

Se observan numerosos tornillos y remaches para sujeción de las chapas y apósitos colocados para cubrir algunas de las grietas y lagunas más grandes. En algunas de las placas (según la colocación durante la irradiación) se aprecian las barras de la estructura interna o de las duelas longitudinales de refuerzo. En la tabla 3.1 se recogen los datos técnicos relativos a la realización de las distintas placas.

Tabla 3.1. Relación y características de las radiografías

Radiografía	Distancia fuente-película (cm)	Tiempo de exposición	Disposición película-fuente
<b>Escultura</b>			
1A	40	55 s	Placa detrás de la cabeza; fuente delante
1B	40	2 min. 45 s	
2	40	2 min. 45 s	Placa delante de la cara; fuente detrás
3	40	2 min. 45 s	Placa delante de la frente; fuente detrás
4A, B, C	80	14 min.	Placas en perfil derecho; fuente a la izquierda
5A, B	80	15 min.	Placas en la cara; fuente detrás
6A, B	80	15 min.	Placas detrás de la cabeza; fuente delante
7A, B	80	15 min.	Placas en perfil izquierdo; fuente a la derecha
8A, B	80	15 min.	Placas en perfil derecho; fuente a la izquierda
9	80	15 min.	Placas debajo de brazo derecho; fuente arriba
10	80	15 min.	Placas debajo de brazo izquierdo; fuente arriba
11	80	15 min.	Placas detrás de brazo derecho; fuente arriba
12A, B	80	15 min.	Placas encima del pecho; fuente detrás escultura
13	25	35 s	Placa alrededor escultura; fuente dentro
14	30	45 s	
15	30	45 s	
16	30	55 s	Placa encima de la escultura; fuente dentro
17	25	50 s	
18	80	16 min.	Placa encima de piernas; fuente detrás escultura
19	80	16 min.	
20	80	16 min.	
21	80	15 min.	Placa a la derecha de la cara; fuente a la izquierda
22	30	55 s	Placa en el interior, entre la escultura y pletinas de refuerzo; fuente fuera
23	30	55 s	
24	30	55 s	
25	30	55 s	
26	15	10 s	Placa alrededor cuello; fuente dentro
27	30	55 s	Placa dentro escultura; fuente fuera
28	30	55 s	
29	30	55 s	

30	20	20 s	Placa sobre el hombro derecho; fuente dentro
31A, B	25	25 s	Placas sobre el hombro izquierdo; fuente dentro
32	20	20 s	Placa fuera, derecha de la espalda; fuente dentro
33	20	20 s	Placa fuera, izquierda de la espalda; fuente dentro
34	60	10 min.	Placa detrás del lazo; fuente delante (doble pared)
35	20	20 s	Placa fuera, lateral derecho; fuente dentro
36	20	20 s	Placa fuera, lateral izquierdo; fuente dentro
37	20	20 s	Placa fuera, lateral derecho; fuente dentro
38	20	20 s	
39	30	55 s	Placa detrás de la cola; fuente delante
40	30	55 s	
42 I, D	20	20 s	Placas fuera; fuente dentro
43 I, D	20	20 s	
<b>Tinaja</b>			
44, 45, 46, 47, 48	50	35 s	Placas fuera; fuente dentro
<b>Peana</b>			
49, 50, 51, 52	30	20 s	Placas fuera; fuente dentro
<b>Palma</b>			
53, 54, 55	60	55 s	
<b>Banderín</b>			
56, 57	60	35 s	

Los detalles más significativos del examen radiográfico de las distintas zonas del Giraldillo se recogen en las figuras 3.9 a 3.18 y se comentan a continuación.

Figura 3.9. Cabeza, perfil (Radiografía 7, realizada a doble pared). Se aprecia porosidad en una pequeña zona de la mejilla. No se observan fisuras ni otras discontinuidades. Es la zona de la escultura con mayor calidad en el metal.

Figura 3.10. Hombro derecho (Radiografía 30, placa encima del hombro, fuente dentro). Aquí se recoge una vista de la parte superior del hombro derecho, la cabeza estaría situada a la izquierda

de la imagen. Se observan diversas fisuras y dos lagunas, una de ellas de gran tamaño situada al comienzo del brazo. Igualmente aparecen los distintos orificios de los tornillos que sujetaban las chapas que cubrían este hombro. En la zona central de la imagen se encuentra un área con porosidad.

Figura 3.11. Hombro izquierdo (Radiografía 31, placa encima del hombro, fuente dentro). Vista equivalente a la anterior, estando la cabeza a la derecha de la imagen. Se aprecian los mismos defectos que en el caso anterior, fisuras y laguna próxima al comienzo del brazo, porosidad, distribuida por gran parte de la superficie, y orificios de tornillos. Además, aquí se observan pequeñas manchas blancas, que podrían corresponder a segregaciones de plomo (al ser este metal de mayor densidad que el bronce, absorbe mayor cantidad de radiación).

Figuras 3.12 y 3.13. Brazo derecho (Radiografías 9 y 11, realizada a doble pared), vistas perpendiculares. Se aprecian varias fisuras en la zona interna del codo, donde también aparecen orificios de tornillos. Se observan las dos pletinas longitudinales de refuerzo. En la muñeca existe una gran laguna, que está cubierta con una chapa metálica de pequeño espesor, que rodea todo el brazo, sujeta con diversos tornillos.

Figura 3.14. Brazo izquierdo (Radiografía 10, realizada a doble pared). En esta toma, desde el hombro hasta el antebrazo, se ve la barra de la estructura interna que atraviesa horizontalmente la escultura, el nudo que cubre el fragmento que aún quedaba de la estructura original y, hacia abajo, el resto del brazo relleno de plomo, que impide la observación del bronce. Este relleno se efectuó para reforzar el brazo, que ha sufrido diversas fracturas a consecuencia del peso de la palma no correctamente compensado.

Figura 3.15. Abdomen. Esta figura muestra una composición con las radiografías 12B, 13, 14 y 15, realizadas con las placas fuera del Giraldillo y la fuente dentro. En el borde superior se encuentra el cojinete y la cruceta de apoyo del eje, de donde parten hacia

abajo las barras laterales de la estructura. En torno a la hebilla del cinturón hay numerosas grietas que se convierten en lagunas de grandes dimensiones en la zona derecha. A la derecha se aprecia una masa irregular muy absorbente que probablemente sea un derrame de plomo del empleado en el relleno del brazo. La zona central muestra abundante porosidad.

Figura 3.16. Cinturón. Esta imagen es un detalle de la anterior. Se observa la hebilla con las grietas que la rodean. La que se dirige hacia el ángulo inferior izquierdo ha sido reparada con la realización de un cajeado e injertos, por lo que se debió de producir en el momento de la elaboración de la escultura. Se observan numerosos poros y algunas pequeñas manchas blancas de segregaciones de plomo.

Figura 3.17. Extremo de la cola (Radiografía 39, realizada a pared simple). En esta imagen hay una gran distorsión, ya que la compleja morfología de la superficie impide el ajuste de las placas a

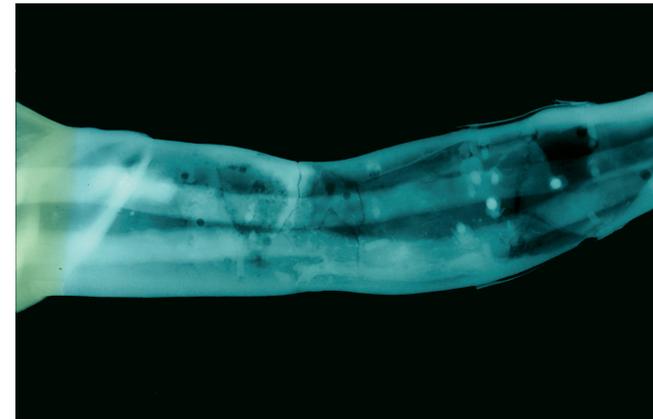
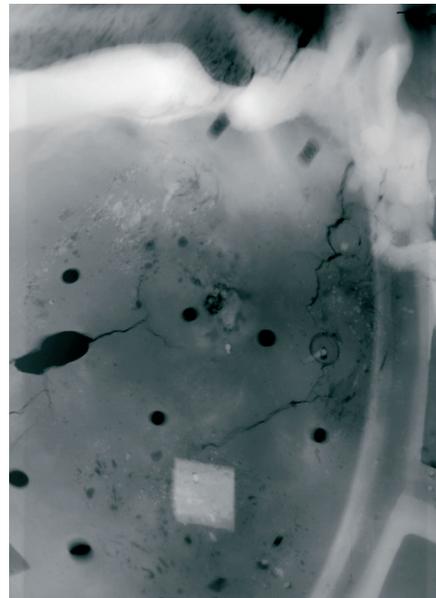
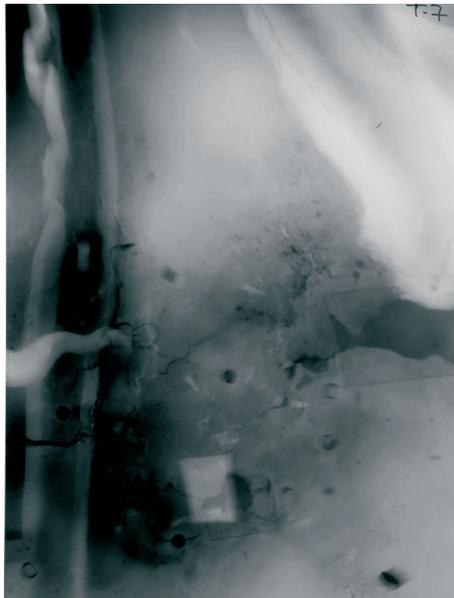


Figura 3.14. Radiografía del brazo izquierdo (Radiografía 10, realizada a doble pared). Se aprecia la barra de la estructura y el brazo relleno de plomo.

Figura 3.9. Radiografía de la cabeza, perfil.

Figura 3.10. Radiografía del hombro derecho. Muestra fisuras, lagunas, orificios de tornillos y porosidad.

Figura 3.11. Radiografía del hombro izquierdo. Muestra fisuras, lagunas, orificios de tornillos y porosidad. Posibles segregaciones de plomo.

Figuras 3.12 y 3.13. Radiografías del brazo derecho, vistas perpendiculares. Se aprecian fisuras y orificios de tornillos, y las dos pletinas longitudinales de refuerzo.

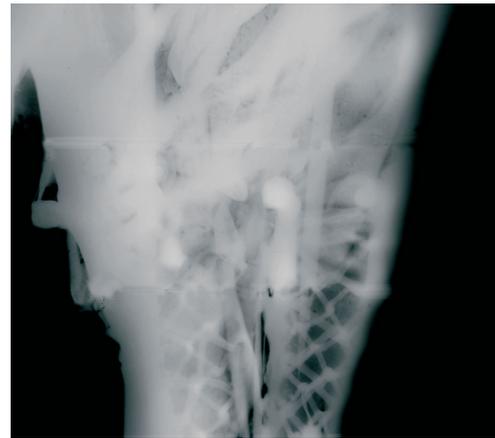
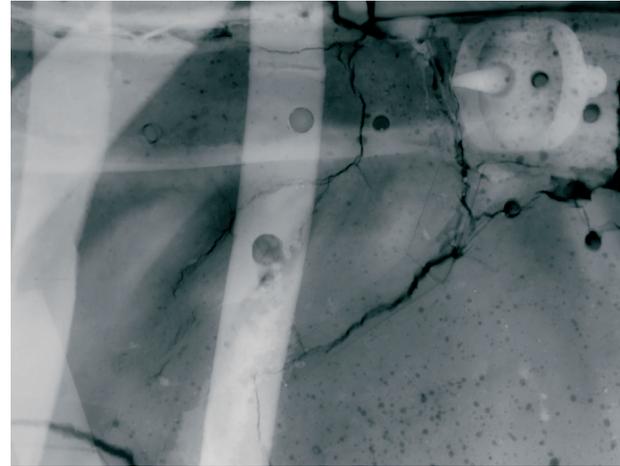
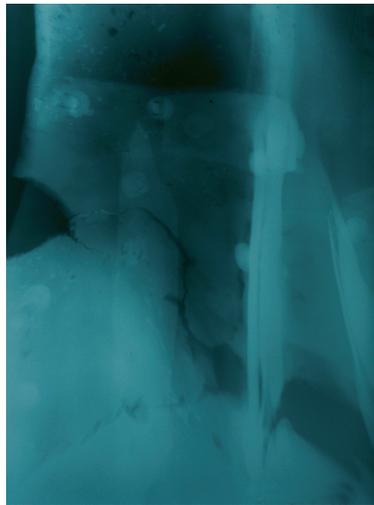
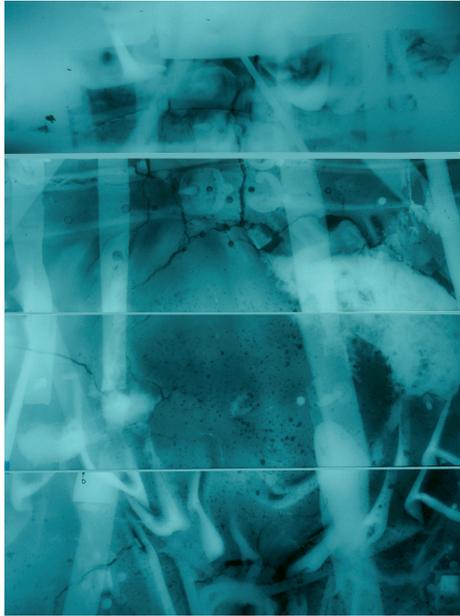


Figura 3.15. Radiografía del abdomen. En la zona superior se encuentran el cojinete y la cruceta de apoyo del eje, de donde parten hacia abajo las barras laterales de la estructura. Grietas y lagunas y abundante porosidad.

Figura 3.16. Radiografía del cinturón, detalle de la anterior. Grieta reparada con injertos.

Figura 3.17. Radiografía del extremo de la cola. Se observan grandes lagunas y fisuras, así como las chapas de reparación, unidas con tornillos y remaches.

Figura 3.18. Radiografía de las piernas. Entre ambas hay una gran pérdida de material, cubierta con chapa. La barra vertical izquierda ha perdido el extremo debido a la corrosión, la barra derecha está completa.

la misma. Se observan grandes lagunas y numerosas fisuras, así como las chapas empleadas para reparar estas discontinuidades, unidas con tornillos y remaches.

Figura 3.18. Piernas. En esta figura se muestra una composición de las radiografías 18, 19 y 20, que cubren desde las rodillas hasta casi los tobillos. Están realizadas con la fuente detrás y las placas delante de las piernas, a doble pared, por lo que se superponen las dos superficies, anterior y posterior de la escultura, además de todos los elementos internos. Entre las dos piernas se aprecia una gran pérdida de material, cubierta con una chapa de cobre. En la pierna izquierda se ve claramente la barra vertical de la estructura interna con el extremo que ha desaparecido debido a la corrosión, mientras que la barra derecha sí está completa.

### 3.3. Reflectografía IR

La respuesta de los materiales frente a la radiación infrarroja es diferente a la que producen cuando se iluminan con luz visible. Capas que son opacas a la radiación visible, porque la reflejan de forma difusa, se hacen transparentes cuando se iluminan con radiación IR, de mayor longitud de onda. Iluminando un objeto de esta forma, se consigue que se produzca la reflexión de la radiación en una superficie inferior, con lo que pueden apreciarse detalles que están ocultos al ojo humano. Esto se produce en superficies cubiertas con películas muy finas, como las policromías, los barnices, o capas de suciedad.

Una de las técnicas que utilizan la radiación IR es la reflectografía, que se realiza iluminando el objeto con una lámpara incandescente. La radiación reflejada por el mismo es detectada por un sistema sensible a la radiación de longitud de onda de alrededor de 2000 nm. El sistema detector transforma la radiación IR en una imagen visible que se muestra sobre una pantalla de televisión o bien puede digitalizarse para su grabación.

Esta técnica se ha empleado para la inspección del lábaro que, según fuentes históricas, había tenido decoración pictórica. Con ella pudieron apreciarse restos del dibujo, coincidente con el que aparecía en el grabado de 1782, si bien eran tan débiles que no pudo tomarse ninguna muestra en cantidad suficiente para realizar análisis de los materiales empleados en la elaboración del mismo. En la figura 8.49 se observan algunos fragmentos de dicho dibujo.

### **3.4. Medida de la velocidad de ultrasonidos. Determinación de espesores**

La medida de espesores en un bronce como El Giraldillo no resulta fácil. Los procedimientos de metrología dimensional convencionales, es decir, calibres, compases, micrómetros, etc. sólo son aplicables en las cercanías de huecos o roturas que permitan introducir el equipo de medición que alcance ambas caras de la “piel” de bronce. En donde ha sido posible se han tomado algunas medidas con los procedimientos anteriores. De especial utilidad han sido estas medidas para permitir la calibración del método de medida mediante ultrasonidos que finalmente se ha utilizado en la gran mayoría de las determinaciones.

La medida de espesores mediante ultrasonidos hace uso de equipos que pueden emitir pulsos sonoros de duración extremadamente corta y detectar el eco producido al rebotar dicho pulso en la pared opuesta de la pieza a inspeccionar. Por tanto, mediante esta técnica sólo es necesario acceder a una de las caras del bronce, generalmente la cara externa, evitando los problemas de accesibilidad de las medidas con calibres u otros medios mecánicos. El espesor puede calcularse conocida la velocidad de propagación de las ondas sonoras en el bronce de El Giraldillo y el retardo entre la emisión del impulso y la recepción del eco. A esta técnica se le conoce como técnica de contacto con el procedimiento de impulso-eco. En un apartado posterior se des-

criben con mayor detalle los equipos y condiciones usados en las mediciones.

Un problema añadido consiste en la determinación de la velocidad de transmisión del sonido en el bronce de la estatua. Aunque existen datos tabulados para muy diversos materiales, la naturaleza tan peculiar del bronce fundido por Bartolomé Morel hace necesario determinar en este material concreto las velocidades de propagación, tal como se explica más adelante.

Se incluye, por último, una discusión de los resultados obtenidos en la que se trata de interpretar el proceso de fundición a la luz de las medidas realizadas.

Se han utilizado dos equipos de ultrasonidos, uno de ellos digital, el USN 50L y el otro analógico, el USM2, ambos de Krautkramer®. Estos equipos utilizan la mencionada técnica de impulso-eco para la inspección. En realidad no sería estrictamente necesario el uso de esta clase de equipos para una simple medición de espesores, ya que dichos aparatos se usan principalmente para la detección de defectos en piezas industriales. Para ello, no sólo determinan el retardo en la recepción del eco, sino que presentan en una pantalla el perfil del eco, o de los ecos recibidos, permitiendo observar la presión acústica del eco devuelto y la duración del mismo. Se disponía también de equipos, como el DM-2 de Krautkramer®, que haciendo uso de una técnica similar presentan directamente en una pantalla digital el espesor detectado por el instrumento. No obstante, dada la heterogeneidad estructural del bronce, resultó necesario interpretar el conjunto de los ecos recibidos para determinar el que correspondía al rebote en la cara opuesta del espesor de bronce. En efecto, se producen multitud de ecos en la abundante porosidad que presenta el bronce, en segregaciones de plomo, grietas, etc. También pueden aparecer ecos procedentes de superficies límite entre zonas con muy diverso tamaño de grano, etc. Todos estos factores hacen que el uso de un equipo automático de medición de espesores, como el DM-2, resulte frecuentemente confuso en la interpreta-

ción de los espesores dados por el mismo. Por otra parte, sólo la experiencia de un operador bien entrenado puede distinguir en cada momento el eco correspondiente al espesor del bronce en la pantalla de los equipos usados.

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas en el párrafo anterior, se han probado diversos palpadores con diámetros de 25 mm y de 12 mm, así como distintas frecuencias, 1MHz, 2 MHz y 5 MHz para elegir el que permitiera las medidas más fiables. Como se sabe, un palpador en ultrasonidos es el elemento que produce la emisión del impulso sonoro y, a la vez, es capaz de detectar el eco recibido. Se trata, pues, de una pieza fundamental del equipo de medida. Dado el gran tamaño de grano que tienen estos productos fundidos y la gran cantidad de plomo de la fundición de El Giraldillo, las frecuencias más elevadas de 2 y 5 MHz producían fuertes atenuaciones, de forma tal, que en muchas ocasiones era imposible determinar el espesor por no aparecer eco alguno. Este efecto es bien conocido en inspección por ultrasonidos. Además el palpador de 1 MHz que se usó tenía un mayor diámetro, lo que se traduce en la emisión de una mayor potencia sonora y, a su vez, en una mayor altura de los picos de la señal del eco. Una ventaja adicional del palpador de 1 MHz es que no detecta defectos de tamaños pequeños, ya que existe una relación entre la longitud de onda del sonido emitido (inversamente proporcional a la frecuencia) y el tamaño mínimo de las imperfecciones detectables. Por ello, se eliminan muchos de los ecos procedentes de pequeñas imperfecciones de la fundición de bronce y se clarifica el resultado del examen. Además, los palpadores usados han sido del tipo emisor-receptor dado que se hacía necesario medir espesores relativamente pequeños (hasta 3 mm) con una presión sonora suficientemente elevada lo que genera dificultades cuando se usa un palpador más convencional como el llamado palpador normal.

Se han obtenido prácticamente los mismos resultados con ambos equipos de ultrasonidos, siempre que se tenga en cuenta la irregularidad superficial interna que presenta la estatua.

Para realizar la calibración ha sido necesario medir mecánicamente dos espesores suficientemente distintos y fácilmente accesibles en la propia estatua para usarlos como espesores patrón del bronce de El Giraldillo. Fue necesario utilizar dos espesores, puesto que el palpador empleado es del tipo emisor-receptor, que necesita de dos espesores para poder realizar la calibración.

El primero de los puntos elegidos se ha situado en el costado derecho, justo al lado de la portezuela de acceso al interior de la estatua. En este punto se ha medido con ayuda de un calibre un espesor de 7 mm. El segundo punto de calibración se ha elegido en la espalda, al lado de uno de los tornillos de sujeción del apóposito que tapa la salida de la cruceta por la espalda. En este lugar se midió, con ayuda de calibre, un espesor de 19,5 mm.

Con la calibración efectuada, el equipo digital permitió la determinación de la velocidad de propagación del sonido en el bronce de El Giraldillo. Los resultados se incluyen en un apartado posterior.

Como quiera que las medidas de espesor se requerían para ayudar en el cálculo de tensiones, así como en la interpretación del proceso de fundición, se ha tratado de hacer un barrido suficientemente extenso de la estatua. Se han trazado imaginariamente líneas perimetrales en planos perpendiculares al eje de giro, cada diez centímetros de altura. En cada línea se han tomado valores separados entre sí unos veinte centímetros. No obstante, diversas dificultades han impedido hacer el barrido completo previsto.

Las mediciones se han realizado usando una amplificación de la presión acústica de 70 dB en ambos equipos. En el equipo digital, más moderno, con mayor eficiencia acústica, se ha tomado como medida del espesor la del primer eco que superase el 40% de la altura de la pantalla. En el caso del equipo analógico se ha considerado como medida del espesor la del primer pico cuya altura superase el 60% de la altura de la pantalla. Aún en estas condiciones la gran cantidad de segundas fases de plomo existentes en el material han producido una gran cantidad de

ecos, tanto antes como posteriores al eco de fondo, es decir, al eco que determina el espesor del material. En muchos puntos de la fundición ha resultado imposible determinar el espesor por la inexistencia de ecos claros de la altura necesaria. Este hecho se atribuye a que una gran parte de la energía sonora se disipa en los innumerables ecos producidos en la porosidad e inclusiones de plomo, por lo que no llega a la pared interna de la piel una cantidad suficiente de energía sonora como para producir un eco claro. En estas ocasiones se ha tratado de elegir un punto de medida lo más cercano posible al lugar original, en el que se obtuviera un eco con claridad.

Por otra parte, la superficie interna del material tiene una morfología muy rugosa (diríase que abrupta, característica de la cara interna de un producto fundido a la cera perdida). Por dicha razón, se han observado diferencias del orden de las décimas o hasta los milímetros en las medidas de espesor en una misma zona. Por otra parte, en algunas localizaciones el espesor dado es extremadamente bajo, y corresponde, según se ha comprobado en las radiografías, a apósitos o chapas que tapan agujeros en la fundición original de El Giraldillo. Desde luego, no puede descartarse que en algún lugar el eco que se ha tomado por el del espesor pudiera corresponder a alguna inclusión de plomo de gran tamaño, aunque se ha puesto especial cuidado en que el valor dado no sea un valor obtenido en un solo punto sino en una zona suficientemente amplia, de uno o dos centímetros alrededor del punto señalado. Además, siempre que ha sido posible, se han tenido delante las gammagrafías para comprobar que no existe inclusión grande de plomo en el lugar donde se hace la medida de espesor.

Otras zonas, como el brazo izquierdo o parte de la capa no han podido ser medidas. En el primer caso, por estar completamente macizado con plomo. En el segundo, por la gran cantidad de apósitos presentes. En las zonas donde el bronce representa los pliegues del manto, las correas y adornos de las sandalias, etc., la medición ha sido muy difícil por la imposibilidad de asentar adecuadamente el palpador en las superficies curvas.

En la inspección con ultrasonidos es necesario usar un acoplante, es decir, una substancia de consistencia líquida o gelatinosa que permita que los impulsos ultrasónicos pasen del palpador a la pieza sin quedar atenuados en el aire atrapado entre ambos elementos. Inicialmente se usó una cola a base de carboximetilcelulosa. Sin embargo, se ha observado que conforme se aplicaba el acoplante y se procedía a realizar la medida desplazando el palpador sobre la superficie del bronce para encontrar el mejor eco, el acoplante se tornaba de una tonalidad verdosa, indicando que algún proceso de corrosión o disolución se estaba produciendo. Realizado un análisis XRD del polvo de celulosa antes de formar la pasta, se comprobó que tenía un contenido de cloruro sódico suficientemente elevado como para que pudiesen producirse las ligeras corrosiones que se han observado en las zonas de aplicación del acoplante. Por ello, con posterioridad a las medidas, se ha procedido a una profusa limpieza de la zona con agua jabonosa. Una vez detectado el problema, para el resto de las medidas se usó un acoplante exento de cloruros.

Gracias al equipo digital utilizado, ha podido determinarse la velocidad de propagación del sonido en este material, que ha resultado ser aproximadamente de 5100 m/s. Esta velocidad es claramente superior a la del cobre puro, posiblemente como consecuencia del contenido de estaño, arsénico y antimonio, que deben incrementar las características elásticas del material.

Por su parte, los espesores medidos varían desde algunos milímetros hasta unos 3 cm. Como se ha indicado en párrafos anteriores, se ha puesto especial cuidado en que los valores inferiores no estén falseados por la presencia de apósitos o chapas ni de inclusiones de plomo subsuperficiales. Por su parte, los espesores mayores indicados se refieren a zonas de espesor relativamente constante. No cabe duda que, en las zonas que representan pliegues de los ropajes, la fundición tiene aún mayores espesores, lo que es fácil de deducir observando cómo por el interior de la estatua dichos pliegues no son copiados con la misma geometría.

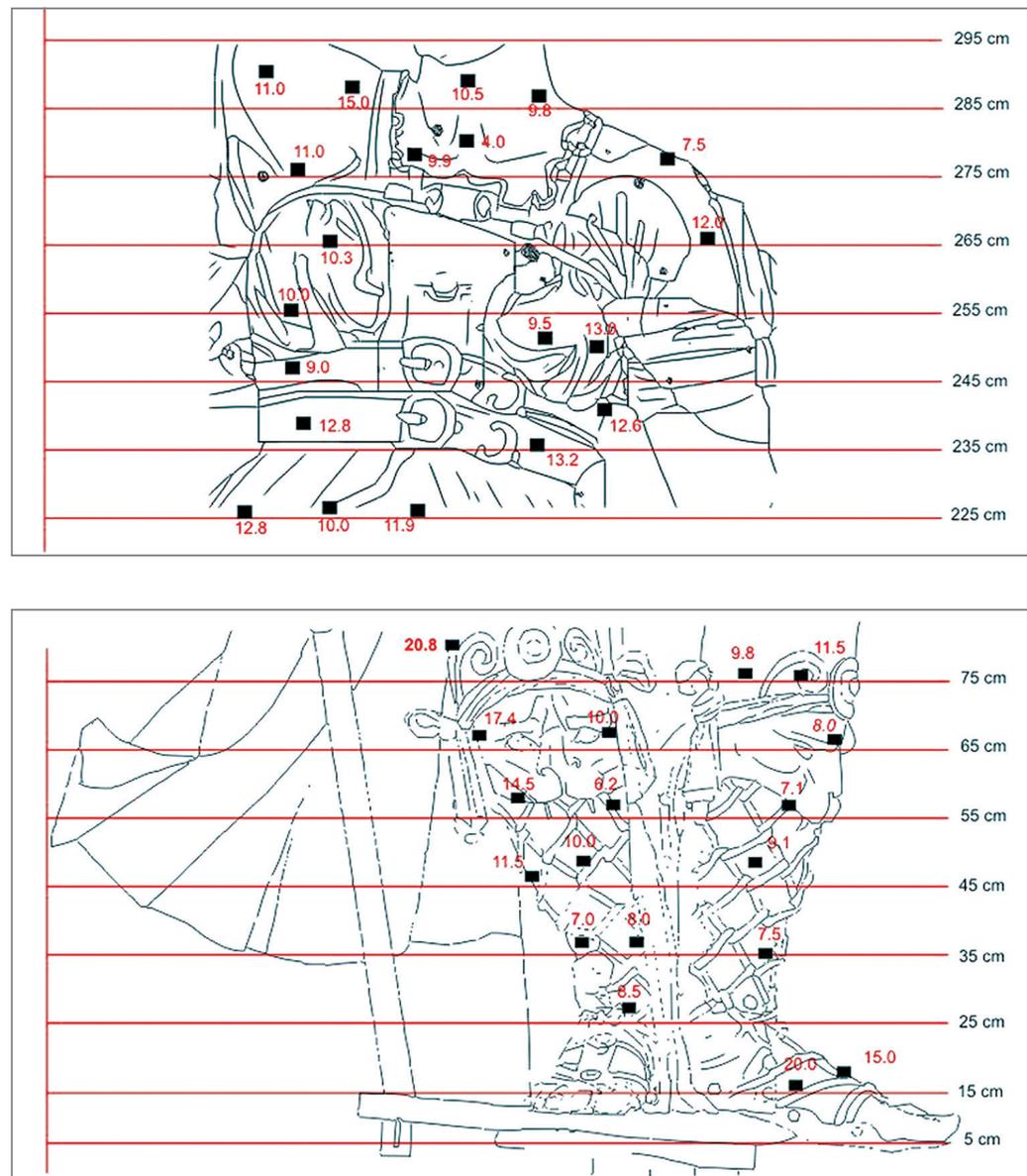


Figura 3.19. Mapas de espesores del pecho y las piernas. Valores en milímetros.  
(Autora: Ana Bouzas Abad)

Se han preparado mapas detallados de espesores indicando los puntos exactos de medición en relación a la altura de la estatua y el espesor medido, como el que se recoge en la figura 3.19, correspondiente a la zona de las piernas y del pecho. También se ha preparado un mapa resumen que permite identificar de forma global los espesores de la fundición, el cual aparece en la figura 3.20.

Los espesores son relativamente homogéneos produciéndose cambios graduales entre distintas partes de la fundición. No obstante, es interesante mencionar dos detalles importantes. Por un lado, el bajo espesor que se obtiene entre los tobillos de la figura en relación a las zonas circundantes de los pies, o a la cara externa de los gemelos. De hecho, la observación visual realizada en su momento a través del alojamiento del vástago, permitió confirmar que en esta zona entre los tobillos hay una falta de material, lo cual se confirma también con la radiografía correspondiente. Entre otras, pueden proponerse dos razones para este hecho, a saber, un movimiento o desmoronamiento parcial del núcleo de fundición, o la solidificación prematura del cobre por un fallo en la alimentación. Precisamente el Perseo de Cellini, fundido dos décadas antes, experimentó un defecto en el vaciado del talón de la estatua, precisamente por la distancia hasta la alimentación del caldo líquido y el enfriamiento sufrido por el mismo hasta llegar a los pies. No obstante, en el caso de El Giralddillo, se ha comprobado que la composición en la parte más baja es más rica en plomo, con lo que la fluidez del caldo estaría asegurada. Por ello, nos inclinamos a creer que el defecto pudo estar relacionado con un movimiento o fallo del núcleo de fundición.

Una segunda observación se refiere a la transición entre el vuelo de la capa y la propia figura. Podría decirse que dicha transición tiene lugar entre una altura de unos 135 cm en el lado derecho de la figura y una altura de 95 cm en el lado izquierdo, siguiendo una línea inclinada. En la zona mencionada los espesores van aumentando progresivamente hasta que se produce la separación entre el vuelo del ropaje y las corvas en las piernas. Esta geometría viene a indicar que la capa también fue fundida simultáneamente

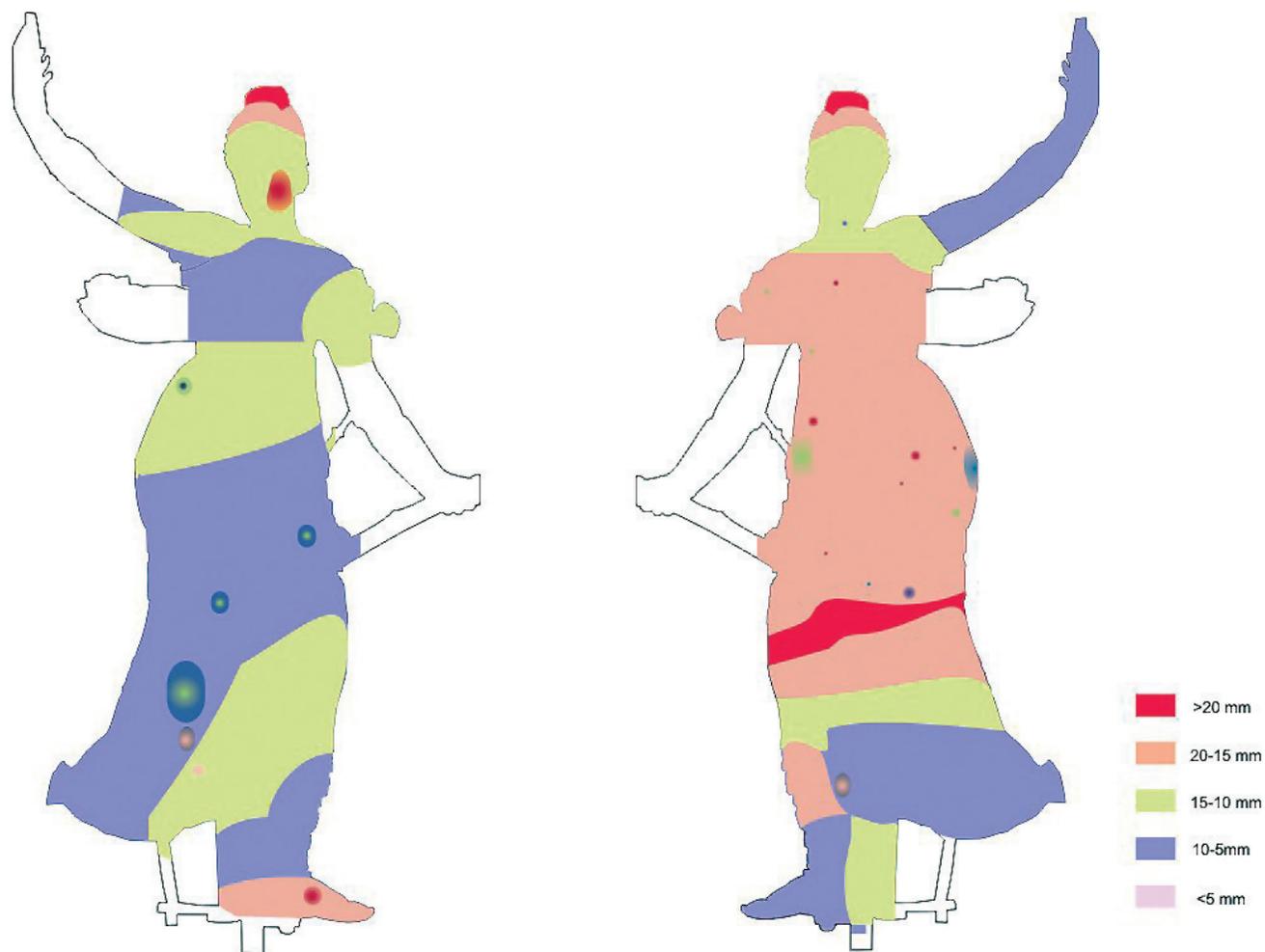


Figura 3.20. Mapa resumen de distribución de espesores.

al resto de la figura, lo que plantea una cuestión técnica singular, a saber, la metodología de preparación del molde a partir de la figura de cera. En la actualidad se entiende bien el procedimiento para producir una figura hueca de bronce, pero hay poca bibliografía acerca de cómo crear una parte "exenta" unida a la figura hueca, como el vuelo de la capa descrito.

Por último indicar que en la espalda de la estatua se han medido espesores ligeramente superiores que en la parte delantera correspondiente.

### 3.5. Cartografía temática

Una vez recopilada toda la información, y analizados los métodos de examen empleados, se plasmaron todos los datos gráficamente: alteraciones, patologías e intervenciones anteriores presentes en la escultura y en los elementos complementarios, obteniéndose lo que se ha denominado cartografía temática.

Se puede decir que esta cartografía se ha basado principalmente en un barrido fotográfico de la escultura tanto por su cara an-

terior, posterior y sus laterales. Se dividió la escultura en nueve zonas: brazo derecho (BD), cara (C), nudo de tela (NT), torso (T), abdomen (A), brazo izquierda (BI), muslos (M), piernas (P), palma (PM), tinaja (TJ) y peana (PE) y lábaro (LB), para que la representación de todas las alteraciones fuese lo más clara, manejable y accesible posible dado el gran tamaño de la escultura. Esta división en zonas se recoge en la figura 3.21.

Se ha utilizado un programa informático donde se han realizado gráficos para poner de manifiesto las diferentes patologías, a través del color y de diferentes texturas. De cada una de las zonas de la escultura se han realizado dieciséis gráficos (anterior y posterior), y también del resto de los elementos que le acompañan, lábaro, banderín, tinaja, peana, y palma.

En estos gráficos se ponen de manifiesto diversos aspectos: datos técnicos (espesores, medidas, etc.), las intervenciones anteriores (anclajes, perforaciones, roblones, tornillos modernos, soldaduras, injertos, refuerzos, apósitos, reintegraciones cromáticas, reintegraciones volumétricas, adhesivos y restos de moldeo), el estado de conservación (grietas, fisuras, microfisuras, lagunas, poros, pérdidas de volumen, deformaciones estructurales, incisiones, cortes, rayados, desgastes, abrasiones, agresiones antrópicas, etc.). Algunos de ellos se recogen en el capítulo 8.

### 3.6. Estudios y controles ambientales

El Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico ha desarrollado técnicas de diagnóstico y control medioambiental para la conservación preventiva, con una metodología operativa, tanto en laboratorio como “in situ”, que ha sido empleada a lo largo de todo el proceso de conservación y restauración de la escultura, para estudiar el comportamiento de la obra en relación con el medio ambiente que la rodea.

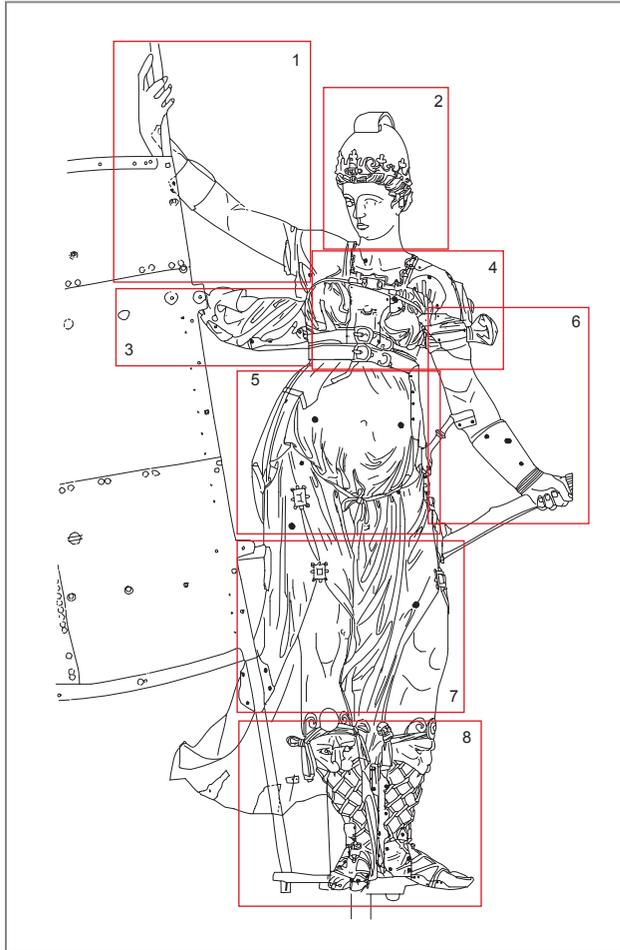
Para una correcta valoración de la influencia climática sobre la obra de arte se debe realizar una medición continua en el tiempo, por lo menos a lo largo de un año, para que se registren las variaciones termohigrométricas durante el cambio de las estaciones, ya que es precisamente en estos cambios estacionales cuando se producen mayores variaciones en los parámetros climáticos, siendo oportuno conocer las incidencias sobre el objeto en estudio y sobre el espacio que lo alberga.

Se ha realizado un seguimiento microclimático de forma continua del ambiente del taller donde se ha realizado la intervención de restauración, manteniéndolo en unas condiciones constantes de temperatura y humedad relativa aptas para la conservación de la obra. Además, se ha efectuado un estudio pormenorizado del comportamiento que presenta el microambiente interno de la escultura en relación con el ambiente exterior, y de la influencia de estas condiciones internas en su conservación.

Dicho estudio se ha realizado en las instalaciones del taller de arqueología entre el 3 de diciembre de 2001 y el 14 de enero de 2002. En este período de tiempo, típicamente invernal, ha de reseñarse la ola de frío que tuvo lugar a partir del día 15 de diciembre, junto con días de lluvia alternos sucediéndose a partir de esta última fecha y finalizando el 3 de enero con precipitación muy intensa.

Se decidió la realización de este estudio en las condiciones extremas que ofrece el invierno, época que reúne la casuística de lluvias y bajas temperaturas, a fin de constatar el riesgo de condensación en la superficie de la escultura, hecho que podría darse en climas como el de Sevilla, con épocas en las que se presenta una gran diferencia de temperaturas máxima y mínima diarias y elevada humedad ambiental.

Para la realización de este estudio se dispuso de una central climática CLIMART 90 de adquisición automática de parámetros microclimáticos (temperatura y humedad relativa). Tres de las sondas se colocaron en el interior de la escultura y la cuarta en



el exterior, para tener una referencia de comparación. Las cuatro sondas de que consta la central climática disponen, cada una, de dos canales de medición, uno de temperatura y otro de humedad relativa. Los ocho canales memorizan los datos según un tiempo prefijado de 15 minutos. Las sondas se ubicaron como se recoge en la Tabla 3.2. En la figura 3.22 se indica su colocación.

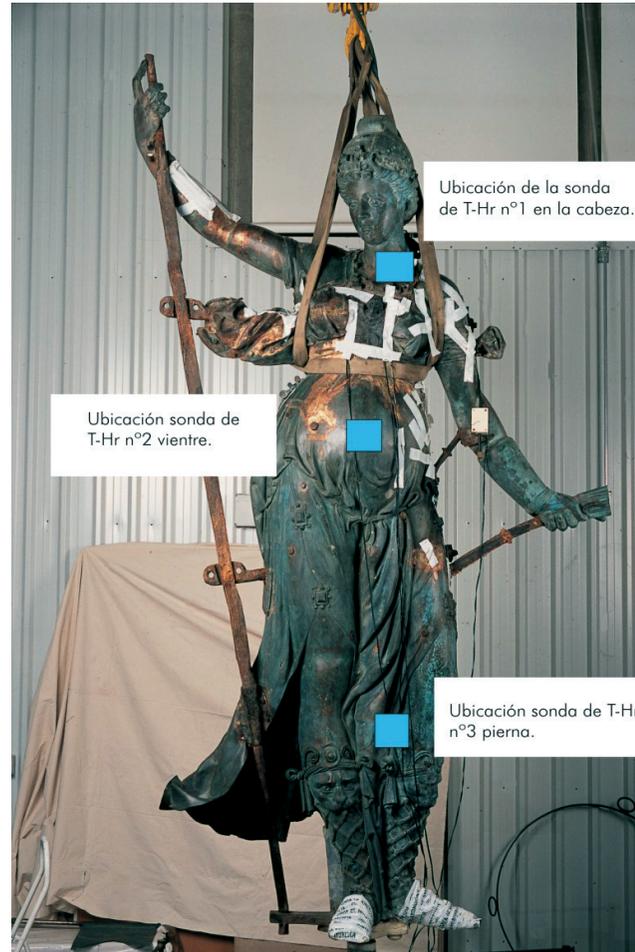


Figura 3.21. División de zonas para la cartografía temática.

(Autora: Ana Bouzas Abad)

Figura 3.22. Ubicación de sondas para medidas termohigrométricas. Se observa el cierre de los orificios de ventilación.

(Foto: José Manuel Santos)

Tabla 3.2. Colocación de las sondas microclimáticas

Numeración sondas	Localización	Altura desde el suelo (m)
1	Exterior	3,5
2	Cabeza Interior	5,0
3	Cintura Interior	3,0
4	Pies Interior	1,5

La primera parte de este estudio se realizó en el Giraldillo dejando abiertos todos los orificios para favorecer el intercambio con el exterior. A partir del día 13 de diciembre de 2001 se cierran con cinta aislante todos los huecos de la escultura, como se observa en la figura 3.22, con la intención de estudiar los cambios que pudieran producirse en el microclima interior en ausencia de ventilación. Con ello se pretendía obtener conclusiones sobre el comportamiento del Giraldillo para poder definir si en la intervención debía dejarse o no aberturas que posibilitasen la ventilación de la escultura.

En la metodología de elaboración de los datos resulta muy importante el procedimiento estadístico, del cual se obtiene el cálculo de las medias diarias y horarias, así como sus curvas relativas. Las gráficas, representadas para cada valor, determinan la variabilidad de los parámetros dentro de la escala de medida. En este estudio se analizan dos tipos de gráficas, horarias y diarias.

Representando gráficamente las medias diarias puede observarse el comportamiento de las variables termohigrométricas evaluadas a lo largo de un mes. Por lo tanto, es posible la determinación de los días concretos en los que un fenómeno específico se ha manifestado, modificando el estado ambiental general.

Para obtener las gráficas horarias se realizan medias a lo largo del mes de las magnitudes en cada periodo horario. En este tipo de gráficas los resultados aparecen mucho más uniformes, presentando extremos menos acusados ya que las medias realizadas amortiguan los valores que se han alejado del promedio. Las medias horarias representan el día medio típico, índice determinante

para la localización cualitativa, además de cuantitativa, de los momentos del día en que aparece un fenómeno. Ello permite caracterizar exactamente el período en el que el comportamiento del ambiente determina fenómenos relevantes para el estudio y no debidos a una casualidad.

Además de la media, también se calcula la desviación típica, cuya representación gráfica permitirá establecer la medida en que las magnitudes se apartan de la media, determinando así las zonas más estables climáticamente de la escultura. Es lógico que no se estudie esta desviación para las medias horarias, ya que no va a facilitar ninguna información importante al ser mucho más estable que las medias diarias.

Durante el periodo de estudio se han tomado cada 15 minutos los valores correspondientes a:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa (HR) es el cociente entre la presión parcial del vapor de agua a una temperatura T y la presión total del vapor a saturación a la misma temperatura T. Equivale al porcentaje de humedad.

A partir de los datos anteriores se han calculado los valores de las siguientes magnitudes derivadas:

- Temperatura del punto de rocío (Td) corresponde a la temperatura de saturación de una masa de aire que se enfría a presión constante sin que varíe su cantidad de vapor, es decir, la temperatura a la cual se produciría condensación de agua líquida.
- Humedad absoluta (HA), en una mezcla de vapor de agua y de aire seco, es la relación de la masa del vapor de agua al volumen de aire húmedo que la contiene.

Los valores obtenidos se han completado con la realización de un estudio estadístico en el cual se ha puesto de manifiesto la estabilidad de las magnitudes que se han medido, ya que se han calculado las medias diarias y horarias y la desviación típica correspondiente a cada conjunto de datos.

Las magnitudes medidas (temperatura y humedad relativa) presentan mayor variación, es decir se alejan más de la media, en el exterior que en el interior de la escultura. Esto es lógico porque la estructura amortigua las posibles variaciones en los valores de temperatura y humedad relativa. También habría que considerar los valores de los coeficientes de conductividad térmica del metal y del aire, ya que el aire presenta mayor inercia térmica, es decir, se calienta o se enfría más lentamente que el metal.

Las variaciones de temperatura en el interior de la escultura siguen la pauta de los valores externos, aunque en la cintura la temperatura se mantiene una media de 1,2°C por encima de los valores registrados en el exterior, la cabeza y los pies (figura 3.23).

Se observa que apenas existen diferencias entre los valores de temperatura registrados en el exterior y en la cabeza. Los valores de temperatura medidos en la cintura son los que más se alejan de los demás y, cuando se cierran los huecos del Giraldillo, las diferencias entre la temperatura de la cintura y las demás temperaturas (exterior, cabeza y pies) se intensifican.

La comparación de las medidas de humedad relativa de la cabeza y la cintura o el exterior y la cintura da diferencias muy altas, sobre todo a partir del día 13 de diciembre, momento en que se cierran los huecos de la escultura. (figura 3.23)

Cuando la escultura se deja sin ventilación se observa una gran desestabilización en la humedad relativa, ya que la desviación típica aumenta considerablemente. Hay que tener en cuenta la coincidencia de este hecho con el descenso de las temperaturas debido a la ola de frío que se produjo en esos días.

Los fenómenos de condensación se producen siempre que el aire desciende de temperatura a un nivel igual o inferior a su punto de rocío, o cuando el vapor contenido en el aire se encuentra en contacto con un objeto cuya temperatura es inferior al punto de rocío. Cuando se den diferencias de 2°C (al menos) entre la temperatura

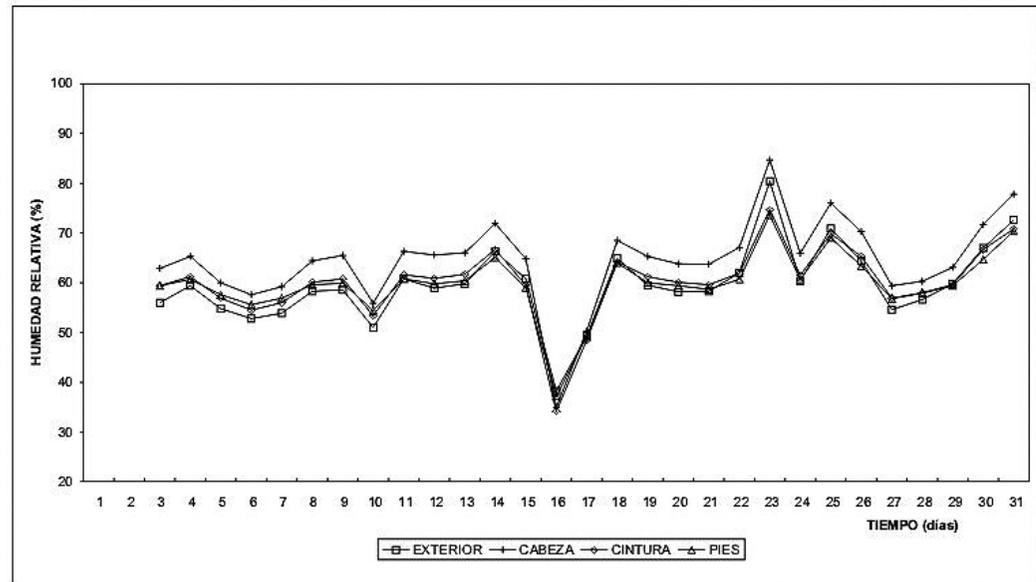
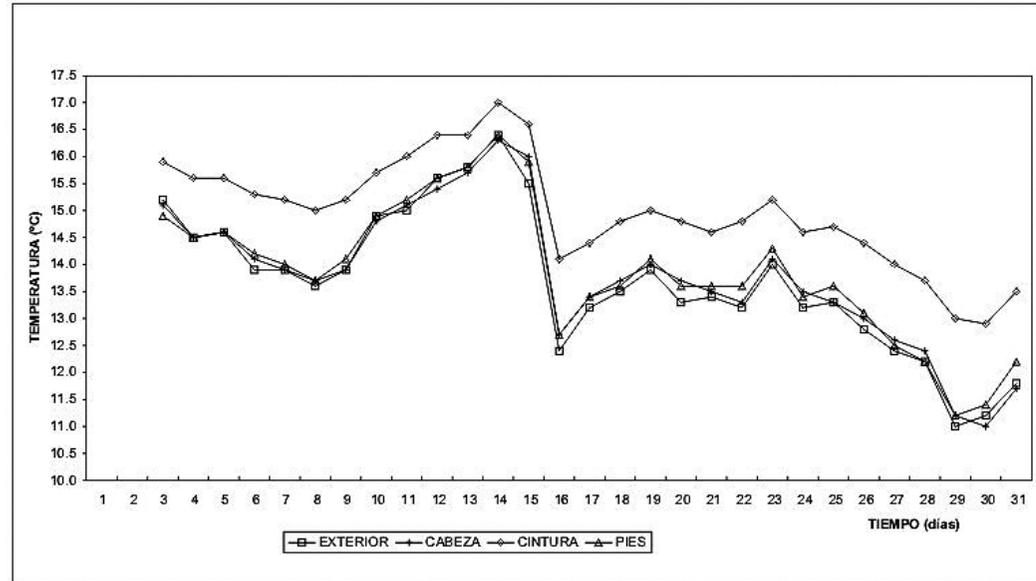


Figura 3.23. Valores de temperatura y humedad en el interior y el exterior de la escultura.

del punto de rocío y la temperatura ambiente habrá peligro de condensaciones. El Giraldillo puede haber sufrido este fenómeno en los días 23 de diciembre y del 1 al 3 de enero, ya que existen diferencias de más de 2°C entre las magnitudes comentadas.

Si se dieran condensaciones, son más probables en la cabeza, y el nivel donde existe menos probabilidad de que ocurran es en la cintura, (ya se ha comentado el hecho de que la cintura se mantiene a una temperatura superior que el resto).

No se observa que el fenómeno de condensación haya podido aparecer cuando existía ventilación en el Giraldillo, ya que la diferencia entre ambas temperaturas ( $T$  y  $T_a$ ) se mantuvo por encima de los 6°C.

El resultado de un estudio de este tipo debe ser definir una propuesta de conservación preventiva que incluya aquellas operaciones o medidas complementarias que sean necesarias adoptar con vistas a garantizar la conservación en el tiempo del bien intervenido.

## Bibliografía

2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Non-destructive testing, microanalytical methods and environment evaluation for study and conservation of works of art. Perugia, 17-20 Apr. 1988.

3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Non-destructive testing, microanalytical methods and environment evaluation for study and conservation of works of art. Viterbo, 4-8 Oct. 1992.

4<sup>th</sup> Int. Conf. on Non-destructive testing, microanalytical methods and environment evaluation for study and conservation of works of art. Berlin, 1994.

Cuando se trata de bienes culturales no es posible hablar de condiciones microclimáticas ideales o de “estándar de conservación”, pero, en general, se considera que una escultura en bronce no debe estar sometida a rápidas variaciones microclimáticas en períodos de tiempo cortos. Con el Giraldillo en su lugar original, conseguir evitar los cambios bruscos de temperatura y humedad será muy difícil, por lo que sólo será posible minimizar alguno de los factores que afecten en mayor medida a su estado de conservación una vez acabada la intervención.

La conclusión que se desprende del análisis anteriormente realizado, apunta a la necesidad de que la escultura del Giraldillo tenga ventilación al menos en la cabeza y en los pies, así los fenómenos de condensación se darían en menor medida y se evitarían los procesos de corrosión y la formación de sales que podrían afectar al estado de conservación de la escultura.

GILARDONI, A.: X-Ray in art, Gilardoni SpA, Mandello Lario, Lecco, 1994.

GÓMEZ, M.L.: La restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte. Cuadernos Arte Cátedra. IPHE. 1998.

LANG, J.; MIDDLETON, A.: Radiography of cultural material. Butterworth-Heinemann series in conservation and museology. 1997.

MATTEINI, M.; MOLES, A.: Ciencia y restauración. Ed. Nerea-Junta de Andalucía. 2001.