Polonia

Estudios
Latinoamericanos

Sociedad Polaca de Estudios Latinoamericanos

ISSN 0137-3080

Original title / título original: *Resultados de las investigaciones realizadas en los terrenos del Parque Arqueológico Machu Picchu (Perú) por la Misión Arqueológica y de Conservación polaca enviada por el Ministerio de la Cultura y el Patrimonio Nacionales y por el Ministerio de Asuntos Exteriores (República de Polonia) en el año 2008*

Author(s)/ autor(es):

Rafał Czerner, Jacek Martusewicz

Published originally as/ Publicado originalmente en:

Estudios Latinoamericanos, 32 (2012), pp. 131-191

DOI: <https://doi.org/10.36447/Estudios2012.v32.art7>

Estudios Latinoamericanos is a journal published by the Polish Society for Latin American Studies (Polskie Towarzystwo Studiów Latinoamerykanistycznych).

The Polish Society for Latin American Studies is scholarly organization established to facilitate research on Latin America and to encourage and promote scientific and cultural cooperation between Poland and Latin America.

Estudios Latinoamericanos, revista publicada por la Sociedad Polaca de Estudios Latinoamericanos (Polskie Towarzystwo Studiów Latinoamerykanistycznych).

Sociedad Polaca de Estudios Latinoamericanos es una asociación científica fundada con el fin de desarrollar investigaciones científicas sobre América Latina y participar en la cooperación científica y cultural entre las sociedades de Polonia y América Latina.

Resultados de las investigaciones realizadas en los terrenos del Parque Arqueológico Machu Picchu (Perú) por la Misión Arqueológica y de Conservación polaca enviada por el Ministerio de la Cultura y el Patrimonio Nacionales y por el Ministerio de Asuntos Exteriores (República de Polonia) en el año 2008

Rafał Czerner y Jacek Martusewicz

Resumen

En agosto de 2008 la Misión Arqueológica y de Conservación polaca llevó a cabo investigaciones en el Parque Arqueológico de Machu Picchu. El objetivo fue analizar el estado de conservación de los elementos de piedra de algunos monumentos de Machu Picchu: Torreón, Tumba Real, Roca Sagrada, Intimachay, Templo del Cóndor y Wayna Picchu. El análisis se realizó desde dos puntos de vista, como un análisis arquitectónico del estado de conservación de las paredes y los bloques de piedras y como un análisis de restauradores de depósitos y daños en la superficie de piedra. Durante el trabajo en el sitio de Machu Picchu se tomaron algunas muestras para su posterior análisis en laboratorio. La investigación de laboratorio se centró en la composición de minerales de piedra y diferentes tipos de depósitos identificados en la superficie de piedra. También se hizo la descripción básica de los depósitos microbiológicos. En el caso del Torreón, un registro gráfico del estado de conservación se preparó en el Sistema de Información Geográfica (SIG). Las conclusiones presentan recomendaciones para la conservación y propuestas de nuevas investigaciones.

Palabras clave: Machu Picchu, conservación, arquitectura, SIG

Abstract

THE RESULTS OF RESEARCH CONDUCTED BY THE POLISH ARCHAEOLOGICAL AND CONSERVATION MISSION SENT BY THE MINISTRY OF CULTURE AND NATIONAL HERITAGE AND MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS (REPUBLIC OF POLAND) IN THE AREA OF THE ARCHAEOLOGICAL PARK OF MACHU PICCHU (PERU) IN 2008

In August 2008, the Polish Archaeological-Restoration Mission carried out research in the Machu Picchu Archaeological Park with the aim of analyzing the state of preservation of stone elements of some of Machu

Rafał Czerner ■ Politechnika Wrocławska; correo-e: rafal.czerner@pwr.wroc.pl

Jacek Martusewicz ■ Akademia Sztuk Pięknych w Warszawie; correo-e: jacek.martusewicz@asp.waw.pl

Picchu's monuments: Torreón, Tumba Real, Roca Sagrada, Intimachay, Templo del Cóndor as well as Wayna Picchu. The analysis was made from two perspectives: an architectural analysis of the state of preservation of the walls and block of stones and a restorer's analysis of the deposits and damage to the stone surface. During work at the Machu Picchu site, samples were taken for further laboratory analysis. The laboratory investigation focused on the composition of the minerals contained in the stone and the different types of deposits identified on the surface of the stone. A basic description of the micro-biological deposits was also made. In the case of Torreón, its state of preservation was registered in a graphic form in the Geographic Information System (GIS). The conclusions present recommendations for conservation and proposals for further investigation.

Key words: Machu Picchu, conservation, architecture, GIS

La misión arqueológica y de conservación mencionada en el título de este trabajo se llevó a cabo en agosto de 2008 y fue organizada por el Centro de Estudios Precolombinos (en adelante OBP por sus siglas en polaco) de la Universidad de Varsovia y por la Sociedad Polaca de Estudios Latinoamericanos (en adelante PTSL por sus siglas en polaco). Al frente de la misma estuvo el profesor de la Universidad de Varsovia Mariusz Ziółkowski, director del OBP. El doctor Jacek Martusewicz, conservador de obras de arte, vicedecano de la Facultad de Conservación y Restauración de Obras de Arte de la Academia de Bellas Artes de Varsovia, fue el responsable de la peritación tecnológica y de conservación, mientras que el profesor de la Universidad Politécnica de Wrocław Rafał Czerner, del Instituto de Historia de la Arquitectura, el Arte y la Técnica (Facultad de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Wrocław), se encargó de la peritación en el campo de la conservación de edificios y construcciones y de las exposiciones. El licenciado Marek Jeziorowski llevó a cabo la documentación de la conservación (ubicación de los deterioros, información sobre el estado de objetos determinados y lugares donde se recogieron muestras) y la complementó con fotografías digitales y dibujos.

En los trabajos de la misión tomaron parte las siguientes personas:

Profesor Mariusz Ziółkowski (director).

Profesor Rafał Czerner.

Doctora Grażyna Bąkowska.

Doctor Jacek Martusewicz.

Licenciado Marek Jeziorowski.

Licenciado Maciej Sobczyk.

1. Torreón

1.1. Deterioros en la estructura de las paredes

1.1.1. Bloques de las paredes desplazados

Causas de los deterioros

Bloques de granito compuestos de cuarzo, feldespato y biotita (muestras T-1 y T-2), labrados con precisión. La estructura de las paredes ha sufrido alteraciones lo cual se manifiesta sobre todo por el desplazamiento de los bloques –movidos principalmente de manera horizontal a lo largo de la fachada (separados entre sí) o en perpendicular a la línea del muro (retirados de la fachada) –, aunque también por curvaturas en el plano vertical y, más raramente, en el horizontal. La causa de estas alteraciones ha sido el hundimiento del bloque de piedra en el cual se asientan las paredes de la parte este de la construcción.

Tareas de conservación propuestas

Monitorización de la geometría de la estructura, con el objetivo de comprobar si el hundimiento de las rocas y los muros continúa o no. Los resultados de los controles realizados hasta ahora muestran que dicho proceso se ha detenido, pero es conveniente seguir efectuando comprobaciones. Convendría hacerlo de manera discreta y precisa, y el mejor método para lograrlo sería colocar pequeños clavos de nivelación a distancias comprobadas.

1.1.2. Bloques de las paredes agrietados o partidos

Causas de los deterioros

La causa es la erosión de la piedra, con el subsiguiente debilitamiento de la estructura y la disminución de la resistencia. La presión de los bloques de las filas superiores sobre los elementos situados más abajo, cuya estructura se hallaba debilitada, hizo que en estos aparecieran grietas y que, en consecuencia, a menudo se desprendieran fragmentos de los mismos. En casi todos los casos, el trazado y la dirección de esas grietas está en concordancia con la lógica de la construcción del edificio y con la distribución de fuerzas en la estructura de los muros. Es habitual que, en las paredes inclinadas hacia dentro del edificio (algo característico en la arquitectura inca), las fuerzas de compresión actúen con mayor intensidad en la parte interior que en la exterior, y que la tensión sea allí mayor; por esa razón los deterioros aparecieron únicamente en el lado interior, al mismo tiempo que el debilitamiento de la estructura de la piedra. Sin embargo, unas pocas grietas tienen una causa diferente, guardando relación con el ya mencionado hundimiento de las paredes y con el desplazamiento de los bloques.

Tareas de conservación propuestas

- Volver a fijar en su sitio original a cada uno de los fragmentos desprendidos de los bloques. Exceptuando la zona alrededor del vano de la ventana de la parte este de la pared norte, no es necesario desmontar los bloques para fijar en ellos los trozos desprendidos. Entre los bloques no situados en la mencionada zona los que sufren mayores deterioros son el del dintel de la ventana de la pared este y otros tres bloques de la misma fila adyacentes a este, dos al norte y uno al sur del mismo. Los fragmentos desprendidos de ellos pueden ser fijados nuevamente sin tener que desmontarlos, aunque después de quitar los bloques de las dos filas inmediatamente superiores, operación esta última que en cualquier caso proponemos con objeto de colocar bajo dichos bloques el aislante horizontal de la corona del muro (de todas formas se hallan muy sueltos, no están bien ajustados). En cambio, desmontar el citado dintel y los bloques adyacentes no sería recomendable, debido a la importante función que desempeñan en el aspecto de la fachada (o sea, al otro lado del muro), a su perfecto acoplamiento y a la total ausencia de deterioros en su cara externa. Para realizar el pegado proponemos resina epoxídica y pernos de acero inoxidable o de fibra de vidrio.
- En los bloques y los fragmentos desprendidos, impermeabilizar las superficies que van a ser unidas, con el objetivo de reforzarlas y también para evitar que la resina utilizada como adhesivo penetre en el interior de la piedra.
- Tapar las grietas más grandes, sobre todo las que provocaron el desprendimiento y el desplazamiento de fragmentos. Se trata tanto de prevenir futuros deterioros como de evitar que penetre agua.
- Se recomienda preparar una masilla a base de resinas de poliéster o bien resinas epoxídicas, que además contenga gran cantidad de relleno hecho con piedra muy triturada recogida en los alrededores del sitio. Al escogerse la resina se debe tener muy en cuenta la resistencia a los cambios de color por la acción de la radiación ultravioleta (UV), muy intensa a la altitud en la que se encuentra el sitio.
- Los materiales a utilizar en los trabajos antes mencionados (resinas, masillas, impregnantes), deberían ser antes probados sobre muestras y sobre el terreno, en zonas del sitio poco expuestas.

1.1.3. Erosión superficial de la piedra

Los bloques de piedra y la roca del interior del Torreón están sometidos a intensos procesos erosivos típicos de la meteorización del granito. Se analizaron en el laboratorio análisis de muestras de las estratificaciones y del material pétreo

tomadas en el sitio, y en base a sus resultados se han podido constatar los siguientes fenómenos:

- Aumenta la porosidad sub-superficial del granito, causada sobre todo por los procesos de desintegración del feldespato (caolinización) y, en menor grado, por la desintegración del cuarzo (Figs. 11, 12).
- Las piedras ricas en feldespato están sometidas al proceso de caolinización. Tiene lugar principalmente por la acción del agua y del dióxido de carbono, lo cual se ve favorecido por la presencia de productos húmicos procedentes de la descomposición de materias orgánicas (Bolewski *et al.* 1991: 139) que rebajan el pH y hacen aumentar aún más la cantidad de dióxido de carbono. El efecto final de la caolinización es la formación de arcillas caolíníticas y de sílice, además de los correspondientes carbonatos (sódico, potásico, cálcico, entre otros).
- La porosidad de los bloques de granito que sufren erosión hace que la superficie de la piedra se mantenga húmeda, lo cual favorece el desarrollo de algas y líquenes.
- Tiene lugar un proceso de meteorización de la biotita (menos intenso que en el caso del feldespato y del cuarzo), cuyos estratos se transforman parcialmente en el llamado «oro de los gatos» (etapa de oxidación del hierro de la biotita) que le da al material detrítico un color herrumbroso (Figs. 10, 11).
- Aparece una gran cantidad de compuestos ferrosos (probablemente de limonita).
- Independientemente de la presión causada por la estructura de la construcción, hay fractura y desmoronamiento de la piedra debido a la mala conductividad térmica de la roca. Este hecho es particularmente visible en el lado suroeste de la roca interior del Torreón.
- Cuando la superficie del granito se calienta por efecto de los rayos solares, el calor se propaga con mayor rapidez de forma paralela a la superficie que perpendicularmente, hacia el interior de la roca. La dilatación de la piedra por el calor provoca la aparición de tensiones interiores que son la causa de la exfoliación del granito –desprendimiento de laminillas o de partes más grandes–; se separan de una forma característica, en paralelo a la superficie (Fig. 1).
- A su vez, cuando la roca se enfría y se contrae, se producen tensiones perpendiculares a la superficie que provocan la desintegración de los bloques, cosa que se manifiesta en forma de fisuras en la superficie de la roca.

Llama la atención la presencia en la superficie de los bloques de dos tipos diferentes de estratos en cuanto a su color: negros y herrumbroso-rojizos. Tras inventariarlos se ha comprobado que los estratos de color herrumbroso-rojizo aparecen en las partes más protegidas de la lluvia (huecos en el muro y la superficie

situada inmediatamente junto a ellos, bordes rotos de bloques como los que se encuentran, por ejemplo, en el vano de la ventana de la parte este de la pared norte); en cambio, en el lado exterior de los muros no se registra su presencia.

Estratos de color negro. Tienen un carácter compuesto. Son la combinación de estratos minerales (feldespato meteorizado, cuarzo y biotita) y biológicos (colonias de líquenes de color amarillo) (muestra T-6). La piedra registra gran porosidad y rugosidad a consecuencia de la desintegración de la superficie del granito, convirtiéndola en un lugar propicio para el desarrollo de microorganismos, debido a la acumulación de humedad en los poros surgidos. Además, esos poros favorecen la entrada de minúsculas raicillas y hacen que los organismos vegetales arraiguen con fuerza. Según se desprende de las observaciones al microscopio de la muestra tomada, las raicillas sirven de apoyo a los granos de cuarzo, feldespato y biotita esparcidos a resultas de la meteorización. En la superficie predominan los granos negros de la biotita, que son los más ligeros y permanecen en la superficie cuando los demás descienden por la acción del agua. Son los responsables del color negro de estos estratos.

Estratos herrumbroso-rojizos. La naturaleza de estos estratos es similar al de los anteriores (muestra T-2 en apéndices), aunque presentan una mayor cantidad de compuestos ferrosos, que probablemente provengan de la meteorización de la biotita. En el caso de la formación de la limonita permanece en la superficie. Tampoco se disuelve en agua. El feldespato visible en la muestra tiene una coloración marrón claro. Probablemente sean precisamente esos compuestos ferrosos y el feldespato los responsables del color de estos estratos, que a simple vista se interpreta como herrumbroso-rojizo.

Las razones de las diferencias de color en los estratos posiblemente tengan que ver con la humedad variable de las distintas partes de los muros del Torreón. Parece que los estratos negros están presentes en los lugares más expuestos a que la lluvia arrastre los productos procedentes de la meteorización del granito, especialmente los granos de feldespato desintegrados y los compuestos ferrosos. En las zonas de estratos negros también es probable que aparezca mayor cantidad de algas y líquenes.

Causas de los deterioros

La causa de la erosión de la superficie de la piedra es sobre todo el proceso natural de meteorización del granito del cual están hechos los bloques con que se construyó el Torreón. El proceso de meteorización provocó un considerable aumento de la porosidad, que a su vez creó unas condiciones propicias para el desarrollo de algas y líquenes. La existencia de estas formas biológicas contribuyó a que la humedad de la piedra aumentara. Además, posiblemente estas plantas se hinchan con el agua, y al incrementar su volumen ayudan a que desciendan los granos des-

integrados de los minerales meteorizados. No es descartable que las algas y los líquenes en su desarrollo puedan causar la aparición de sustancias húmicas las cuales hacen aumentar la acidez del medio en la superficie del granito y la cantidad de dióxido de carbono, y con ello aceleran los procesos de meteorización (en especial el del feldespato).

Tareas de conservación propuestas

- Ampliar las investigaciones sobre los estratos biológicos (algas y líquenes), con el objetivo de establecer los medios más eficaces para combatirlos y la durabilidad de los preparados elegidos.
- Determinar el grado de limpieza de la superficie de la piedra.
- Elegir agentes hidrófugos y fortificantes adecuados. En principio podrían servir los del grupo de los impregnantes de silicio orgánico. Se recomienda analizar la efectividad y el grado de penetración en la piedra de los impregnantes propuestos; esto debe hacerse tanto en laboratorio como en el propio yacimiento, escogiendo para ello pequeños fragmentos de piedra.

1.1.4. Deterioros en el vano de la ventana en la parte este de la pared norte

Causas de los deterioros

La causa directa de los desperfectos parece ser la alta temperatura, o quizá la caída de un rayo que habría provocado un debilitamiento de la estructura y propiciado la formación de grietas. En efecto, como consecuencia del debilitamiento de la estructura aparecieron grietas, cuyo trazado en todos los casos se deriva de la distribución de las fuerzas que actúan en la estructura; la dirección de estas grietas está en concordancia con sus trazados. En las paredes, con la característica inclinación hacia el interior de la construcción, se da una mayor tensión en el lado interior, y por ese motivo surgieron en aquel lugar las grietas. Así ocurre en todas las paredes, aunque en esta zona concreta los deterioros son especialmente numerosos. Del mismo modo, debido a la inclinación de las jambas hacia el interior del vano –el cual se va estrechando de abajo hacia arriba–, también ellas están lógicamente expuestas a sufrir el agrietamiento. Por su parte, la causa del desplazamiento de los bloques, separados o curvados, fue el hundimiento de la roca sobre la cual están asentados, al igual que en el caso de las demás paredes. Los bloques más deteriorados de la jamba oeste se encuentran muy agrietados, y las partes despegadas están bastante desplazadas. Si se dejan en el estado actual y no se efectúa una restauración íntegra, existe la posibilidad de que en el futuro, y como resultado de la inevitable acción de esas mismas fuerzas, todos los fragmentos desprendidos se caigan, e incluso podrían llegar a derrumbarse parcialmente los bloques que rodean el vano. Todo depende de si el proceso de deterioro se detiene definitivamente.

Tareas de conservación propuestas

- Monitorización de la geometría de la estructura, con el objetivo de comprobar si el hundimiento de las rocas y los muros continúa o no. A pesar de que actualmente se considera que este proceso ha quedado detenido, es conveniente continuar el control y basar en sus resultados la decisión de poner en práctica las tareas de conservación que a continuación se explican. Naturalmente, también se pueden realizar por motivos estéticos y de cara al público.
- Hacer una descripción exacta de la zona deteriorada del muro, incluyendo mediciones de todas las separaciones, para que sea posible volver a colocar todos los elementos en su lugar exacto una vez desmontados.
- Desmontar la parte del muro en la que se encuentra el vano deteriorado, con objeto de realizar la restauración de los elementos de piedra que lo forman (fortalecer los fragmentos desprendidos y pegarlos). En las figuras 2 y 3 se incluye la extensión del área a desmontar en las caras interna y externa, algo imprescindible en este tipo de operaciones. Se ha querido reducir esa área al mínimo, pero de manera que sean desmontados todos los bloques partidos en dos o más fragmentos (que después han sufrido un desplazamiento) y que por tanto se consideran especialmente deteriorados. A continuación se debería reforzar sus estructuras, para luego unir los fragmentos y volver a montar los bloques. A pesar de que el área a desmontar es la mínima posible, sus dimensiones no dejarían de ser considerables, y por tanto la decisión debe sopesarse con cuidado. La operación resulta complicada debido al engranaje que conforman los bloques de las diferentes capas. En principio se debería proceder de manera que en el momento de desmontar cada bloque no repose ningún otro elemento sobre él. La propuesta aquí presentada contiene una excepción a esta premisa, lo cual plantea dudas sobre si puede ser puesta en práctica; se trata de uno de los bloques de la cara externa, encajado entre dos bloques situados fuera del área destinada a ser desmontada, por lo cual habría que ampliar dicha área en caso de que se optara por quitar el mencionado bloque.
- Limpiar de estratos biológicos (y de otros que se encuentren tras analizar las muestras) los bloques conservados.
- Reforzar los elementos desmontados (sus fragmentos) impregnándolos con productos indicados para tal fin, por ejemplo impregnantes de silicio orgánico.
- Pegar los bloques rotos con resinas de poliéster o epoxídicas, y usar también pernos de acero inoxidable o de fibra de vidrio.
- Montar nuevamente los elementos quitados (reconstruir la parte del muro desarmada). Al hacerlo, no conviene corregir las separaciones provocadas por el hundimiento del muro, ya que no se puede revertir este proceso (aun-

que probablemente se haya detenido), ni se puede corregir la geometría del muro. Únicamente se puede sopesar la posibilidad de ajustar el bloque torcido que conforma el antepecho del vano en su parte oeste, para que cuadre con la superficie de la pared.

1.2. El humedecimiento de las paredes del Torreón y de la Tumba Real situada debajo. Penetración del agua en el interior de los muros

Problemas de conservación y sus causas

El problema es el considerable humedecimiento de las paredes interiores de la Tumba Real, debajo del Torreón, a consecuencia del cual se desarrollan líquenes y algas y aparece precipitación salina. El humedecimiento de las paredes del propio Torreón es menos importante, aunque también en ellas aumentan por esta razón los líquenes y otros residuos en las zonas donde se concentra la humedad, alrededor de las grietas y de otros puntos por los que sale agua al exterior del muro.

La causa de este humedecimiento probablemente sea la entrada de agua al interior del muro y su filtrado a través del suelo del Torreón, cubierto de arcilla. Como la arcilla grasa utilizada es un material poco permeable y teóricamente debería ser suficiente para detener el paso del agua, entra dentro de lo probable que su erosión y la aparición de pequeñas fisuras provocaran una pérdida de estanqueidad en el suelo. Los análisis comparativos realizados entre muestras tomadas de la capa del suelo inca original (muestra T-3 superior del apéndice), del mortero de arcilla inca aplicado en las juntas de los bloques de la entrada a la Tumba Real (muestra T-4 del apéndice) y del suelo de arcilla del Torreón, hecho con posterioridad (muestra T-3 inferior del apéndice), permiten afirmar que la masa de arcilla utilizada en época más reciente es similar a las otras dos en lo referente a sus cualidades; sin embargo, aparecen diferencias desde el punto de vista cuantitativo (ver el punto Análisis comparativo de las muestras T-3 [superior] y T-3 [inferior] del apéndice). La presencia en la arcilla inca de una mayor cantidad de relleno en forma de material clástico permite suponer que pudiera ser más resistente al agrietamiento causado por los repetidos procesos de humedecimiento y secado de la superficie. Por su parte, en la capa superior (más reciente) del suelo de arcilla aparece una cantidad casi dos veces mayor de sustancias coloidales ferruginosas, lo cual hace pensar que su resistencia a la acción del agua es menor. Al mismo tiempo, no se confirmaron las informaciones según las cuales se habría añadido cemento o cal a la masa de arcilla preparada para ese suelo. Merece la pena preguntarse en este punto si existe la posibilidad de que las sustancias coloidales ferruginosas pasaran desde la capa más reciente del suelo hasta la superficie de las paredes de la Tumba Real a través de rendijas ocultas, y con ello aumentara la presencia de hierro en los estratos visibles en las paredes, estratos con un intenso color herrumbroso-ocre. Se puede observar que

el agua entra en la Tumba Real principalmente a través de un fragmento horizontal del techo (una laja de piedra que se halla directamente debajo del mencionado suelo de arcilla). También influye en este humedecimiento el relieve de la superficie del suelo del Torreón, cuya geometría no es del todo regular. Si bien es cierto que el suelo tiene la pendiente correcta para conducir el agua hacia el orificio de desagüe situado en el centro de la pared norte, y que se inclina en esa dirección desde casi todas las paredes, existe sin embargo una excepción, que es la esquina noroeste, donde la inclinación del suelo es algo incorrecta y envía el agua hacia el interior del muro norte. Esto ocurre por encima de una fila de bloques en la cual ambas caras del muro están construidas de manera independiente, lo cual facilita la entrada de agua al interior.

El agua también penetra en la estructura del muro a través de su corona. Originariamente, la fila que coronaba el muro estaba hecha con grandes lajas de piedra de anchura igual al espesor del muro, inclinadas en dirección al interior del Torreón (es la parte en la que los bordes de las paredes de los muros inclinados sobresalen). Esas lajas encajaban muy bien entre sí, gracias a lo cual la corona del muro evitaba que el agua se filtrara, y la desviaba hacia el interior de la torre, de donde salía por el mencionado orificio de desagüe. Esta estructura solo se ha conservado relativamente entera en el muro oeste y en la parte oeste del muro norte, pero incluso en esos puntos las lajas se han separado ligeramente. En los demás lugares en que se mantiene la corona, las lajas de esa fila superior están muy sueltas, con mucho espacio entre ellas. Sin embargo, en gran parte de los muros no se han conservado dichas lajas. La fila situada más abajo está formada por bloques separados para la cara interna y para la externa, y el espacio surgido en medio permite el paso del agua, que humedece las paredes del Torreón y se filtra hasta la Tumba Real.

Existe también la posibilidad de que además el agua del canal que corre junto a la pared norte del Torreón y de la cascada que forma, salpique y llegue al interior del muro del edificio, sin embargo no parece que la proximidad del canal y de la cascada constituyan una causa importante del humedecimiento del Torreón y de la Tumba Real.

Tareas de conservación

- Hacer una descripción exacta de la parte superior de los muros.
- Desmontar provisionalmente las dos filas superiores de bloques del muro de la parte este del Torreón, esto es, en el lugar donde la corona ha perdido su estanqueidad. Esto es necesario para poder colocar el aislante, cosa que se debería hacer por debajo de esas dos filas, ya que la situada más arriba se halla incompleta en esa parte del muro: si el aislante se colocara sobre la corona la impermeabilización no sería plena, y si se colocara entre la corona y la fila siguiente quedaría a la vista (desde arriba) al faltar bloques en la fila superior.

- Limpiar de tierra, musgo y líquenes los elementos desmontados y el resto del muro.
- Colocar un aislante por debajo de las dos filas superiores. Existen varios materiales aislantes que pueden entrar en consideración. El más indicado es la tradicional lámina fina de plomo, colocada en seco. Es un material muy moldeable y se puede ajustar perfectamente a la superficie de los bloques de piedra (utilizando un martillo de madera o de goma). Otra ventaja es su alta resistencia a los agentes químicos. Además, en caso de necesidad se puede retirar sin problema alguno. Otra opción es el uso de materiales más modernos. Uno de ellos, barato y también fácil de retirar, sería una lámina gruesa de polietileno, que igualmente se coloca en seco y además es incolora. Otros materiales modernos son las masillas selladoras, que se extienden sobre la superficie y después se solidifican en forma de membrana impermeable, que conserva su elasticidad dentro de la escala de temperaturas habituales en esta región. Sin embargo, estas masillas se adhieren a la superficie tratada y por ello resultan más difíciles de retirar si fuera preciso hacerlo con posterioridad. En caso de ser utilizadas, convendría antes tapar o rellenar los espacios entre los bloques (junturas verticales), para lograr una superficie uniforme sobre la cual extender la masilla. En todo caso, esto no es absolutamente necesario, ya que la propia masilla puede pasar al plano vertical, luego al horizontal, subir por el siguiente plano vertical y volver para formar una banda elástica continua, una vez solidificada. Conviene armar con malla de fibra de vidrio las partes de la superficie superior situadas sobre las junturas antes de aplicar la masilla.
- Colocar nuevamente los bloques de las filas desmontadas (siguiendo la descripción realizada en el primer paso).
- Quitar la arcilla del suelo en el interior del Torreón, en la zona en la cual se filtra el agua hasta el techo de piedra de la Tumba Real, y de ahí al interior de la misma. Esto debe realizarse con gran precaución, de manera que se pueda reconocer y analizar la estructura del suelo original.
- Examinar el techo de piedra de la Tumba Real después de dejarlo al descubierto, con el objeto de estudiar los caminos que sigue el agua que llega hasta esta y a continuación se filtra a través del mismo. Es preciso comprobar si hay espacios o grietas que facilitan el paso del agua o si, al contrario, existen barreras que hacen que el agua se concentre sobre el techo, impidiendo que salgan por otro lado. Pudiera resultar –aunque no necesariamente deba ser así– que aquí se encuentre la causa principal del humedecimiento del techo y de las paredes de la Tumba Real.
- Reparar, donde sea preciso, los defectos estructurales observados durante el examen del techo, si se encontrara alguno (cerrar grietas, eliminar barreras, facilitar la salida del agua concentrada sobre el techo hacia el exterior de los muros, etc.).

- Volver a cubrir la superficie sobre el techo con el fin de restablecer el suelo del Torreón.
- Darle al nuevo suelo una geometría correcta, de manera que desde todos sus puntos el agua corra hacia el canal de desagüe que atraviesa la pared norte por el centro. También se debe comprobar que el fondo de ese canal no esté cubierto de barro (y por tanto elevado), y de ser así habría que rebajarlo, para facilitar la salida del agua.
- La estanqueidad del nuevo suelo se podría completar colocando bajo la arcilla una membrana sintética aislante. Hay diferentes materiales disponibles en el mercado. Sin embargo, podría aparecer un problema añadido, como sería la presencia bajo el suelo de humedad y agua que llegue hasta allí por otro camino (por ejemplo, como se ha indicado anteriormente, a través de la corona de los muros y de los propios muros, o bien procedente del canal adyacente, o desde el otro lado de la roca o de la pared, etc.). Si tal fuera el caso, un aislamiento excesivo impediría que la humedad se evaporara por arriba. Por ello, lo ideal sería que el aislante fuera semi-permeable, que impida el paso del agua hacia el interior del suelo, pero permita que la humedad interna se evapore. Sería preciso estudiar los materiales de este tipo disponibles en el mercado (por ejemplo, el revestimiento aislante a base de bentonita «Vortex»). Una solución perfecta, usada a veces para preservar sitios arqueológicos, y que aquí es posible utilizar (ya que existe la posibilidad de emplear una capa aislante bastante gruesa entre el techo de la Tumba y el suelo del Torreón), sería aplicar arcilla expansiva –que se dilate por efecto de la humedad, por ejemplo un granulado de arcilla a base de bentonita¹– sobre una estera, malla o no-tejido con agujeros, y cubrirla con otra malla o no-tejido, sobre la cual va la capa de arcilla que conforma el suelo propiamente dicho. La arcilla de bentonita, encerrada por las mallas en un espacio determinado y con un peso encima, en contacto con el agua se dilata hasta tomar la forma de una capa impermeable, mientras que cuando está seca se mantiene suelta y permeable. Aquí tiene una importancia fundamental encerrar la arcilla en un volumen determinado y preciso.
- Rehacer el suelo de arcilla con su aspecto original, pero rectificando la geometría de la superficie. En caso de que se tomara la decisión de eliminar el segundo suelo (el elaborado en época más reciente), o de colocar una nueva capa aislante, existe la posibilidad de volver a extender la capa original de arcilla inca. Para ello, los fragmentos retirados deben ser triturados y humedecidos con el objetivo de preparar una masa de consistencia adecuada para ser moldeada.
- Analizar e inspeccionar detenidamente el comportamiento del agua que corre por el canal situado fuera del Torreón junto a su pared norte, con el objetivo de comprobar si llega algo hasta el muro. En caso necesario, habría que

subsanan este problema corrigiendo la geometría del suelo entre el canal y la pared, e impermeabilizar dicho suelo de forma similar a lo indicado para el del Torreón.

2. Roca sagrada

Se trata de una roca natural (probablemente labrada parcialmente) ubicada en la zona norte del yacimiento arqueológico de Machu Picchu. Es de granito, y contiene cuarzo, feldespato, biotita y pequeñas cantidades de moscovita (ver muestra RS-5 del apéndice). La roca tiene forma de bloque plano alargado, asentado en vertical. Eje horizontal en dirección noreste-suroeste.

Sus dimensiones son las siguientes: altura máxima desde el zócalo 360 cm; anchura máxima en el zócalo 873 cm; profundidad en la base 40 cm aproximadamente.

Alrededor de la roca se construyó un zócalo con bloques de granito irregulares, de unos 62 cm de alto y 71 cm de ancho.

Estado de conservación

En la superficie de la roca se ven claramente particiones provocadas por grietas que corren en direcciones aproximadamente verticales (Fig. 4). Un hecho que llama la atención es la evidente diferencia en el estado de conservación de los dos planos de la roca.

El plano que se halla en el lado noreste es el peor conservado. En este se pueden distinguir varios tipos característicos de deterioro. En su parte central hay una importante exfoliación del material pétreo. La red de grietas traza espacios de 10 a 15 centímetros de diámetro, que muestran tendencia a desprenderse. Se trata de fragmentos de piedra planos, cuya superficie de fractura es paralela a la de la roca. En varios puntos son claramente visibles daños recientes. Las aristas a lo largo de las grietas son afiladas y tienen hasta 10 milímetros de grosor. Al sur y al norte de esta área también son visibles importantes agrietamientos, pero sus aristas están redondeadas. En la zona sur estas grietas son más profundas.

El plano descrito se encuentra cubierto por estratos negros, presentes en toda su superficie con excepción de la parte central. En la cresta de la roca estos estratos adquieren un tono más oscuro y son ligeramente más gruesos. Además, en las zonas donde aparecen se observan líquenes de color gris claro de varios centímetros de diámetro, y también concentraciones menores de estratos de color herrumbroso. Al otro lado de la cúspide, en dirección norte, se ven varias grietas profundas que corren en dirección vertical.

El plano paralelo a este se halla cubierto por completo de estratos similares. También aquí en la parte superior hay estratos más oscuros, presentes casi hasta la mitad de la roca. En la zona norte se observa una profunda grieta. En la estrecha cresta de la roca son visibles profundas fisuras, en las cuales crece musgo.

Causas de los deterioros

El análisis del estado de conservación del objeto permite apuntar varias causas para explicar los procesos de deterioro observados. Todos están relacionados con las condiciones naturales del sitio.

- Como causa principal se debe señalar la insolación recibida por el objeto, debido a su orientación. Se produce un rápido calentamiento del lado nores-te de la roca en las horas matutinas. El brusco cambio de temperatura se ve además intensificado por el rocío o por la presencia regular de lluvia, que enfrían la piedra (Wright y Zegarra 2000: 55). A consecuencia de estos cambios se produce la exfoliación (Fig. 5) y la desintegración del granito del bloque, relacionada con la mala conductividad térmica de la roca. El mecanismo de este fenómeno ya quedó explicado en el análisis de las causas del deterioro del Torreón. La cresta de la roca está expuesta a estos mismos factores de deterioro.
- Llamen la atención las diferencias en la aparición de los estratos negros. Su ubicación en la roca ha sido descrita más arriba.
- Los estratos negros (ver muestras RS-1 y RS-2 del apéndice) están compuestos sobre todo de biotita que no ha sufrido totalmente la meteorización, y por eso conserva el color negro. Durante la meteorización se transforma en compuestos de limonita de color herrumbroso (contenido de óxidos de hierro que también han sido identificados). Los granos de biotita se depositan en la superficie del estrato, sobre un lecho de cuarzo. Como aglutinante actúan productos salidos de la descomposición del feldespato, como el sílice (Figs. 21, 22) o también en parte compuestos ferrosos (Figs. 24, 25, 26). Un elemento añadido de estos estratos es la presencia de organismos biológicos (Fig. 23).
- La observación de la distribución de la humedad en la superficie de la Roca Sagrada durante las lluvias permite señalar que los lugares que más agua de lluvia reciben coinciden con aquellos donde hay presencia de estratos negros. Por esta razón, probablemente haya que poner en relación su naturaleza con el hecho de que la lluvia se lleve parte de los productos surgidos de la meteorización del granito. Se trata sobre todo del feldespato meteorizado. Por otro lado, la frecuente humidificación favorece la precipitación de la sílice coloidal, la cual adhiere las partículas de biotita a la superficie de los granos

- de cuarzo. Naturalmente, tales condiciones de humedad ayudan a que se desarrollen estratos biológicos.
- Los estratos grises, que con frecuencia aparecen en forma de cúmulos, tienen una naturaleza básicamente biológica (muestras RS-3, RS-4 y RS-6 del apéndice). Se trata de líquenes y algas que viven en la superficie erosionada del granito. El análisis al microscopio revela la presencia de los diversos minerales (cuarzo, feldespato, biotita). Para hacer una identificación detallada de estos estratos sería preciso realizar análisis microbiológicos especializados. Las fotografías microscópicas tomadas son un importante punto de partida para esos análisis. Es preciso tener en cuenta que, tanto las condiciones de humedad –una cantidad de precipitaciones relativamente regular y abundante– como las de temperatura –temperaturas mínimas que rondan los +10°C (Wright y Zegarra 2000) –, favorecen el desarrollo de los distintos estratos biológicos.
 - En lugares puntuales de la superficie de la roca aparecen pequeñas manchas rojizas. También es posible advertirlas en sitios de los que hace relativamente poco tiempo se han desprendido fragmentos de roca. Probablemente se trate de compuestos ferrosos producto de la meteorización de la biotita.

Tareas de conservación propuestas

Los factores relacionados con las condiciones naturales del sitio influyen en los procesos de desintegración que afectan a la Roca Sagrada. Dichos procesos vienen actuando ininterrumpidamente desde el momento en que fue colocado aquí el objeto. Una de las tareas de conservación primordiales en este caso debe ser ralentizar los procesos naturales de deterioro de la manera más eficaz posible. Eliminar totalmente estos procesos resulta imposible en las condiciones actuales del sitio, que al mismo tiempo son las únicas adecuadas tomando en consideración el contexto histórico del lugar y el hecho de que se trata de un fragmento del paisaje, de una peña, al cual se le ha dado una distinción especial por el contexto religioso que este lugar tenía para los incas.

Las tareas de conservación deberían centrarse en dos aspectos al mismo tiempo: por un lado, reforzar la estructura de la piedra a la vez que se eliminan los agentes biológicos destructivos (musgo, líquenes, algas), y por otro lado, proteger las partes ya deterioradas del objeto. Habría que renunciar a llevar a cabo trabajos de reconstrucción, y en caso de recurrir a la utilización de rellenos debería hacerse solo para proteger el objeto. Se trata en particular de evitar que en las fisuras y grietas penetre agua de lluvia y tierra que pueda servir de lecho para el musgo. Es especialmente importante asegurar las pequeñas grietas de la parte noreste. Es preciso realizar pruebas para estimar la posibilidad de inyectar productos que fijen las placas de piedra que se están desprendiendo y para preparar masillas con

las cuales cerrar las grietas. Se recomienda el empleo de resinas acrílicas, de poliéster o epoxídicas (dependiendo de la profundidad y la anchura de las grietas). No se recomienda usar pastas minerales debido a que podría entrar sal en la estructura de la roca meteorizada, y se correría el riesgo de que el aglutinante fuera sacado hacia la superficie.

En caso de tomarse la decisión de aplicar impregnantes que refuercen toda la superficie de la Roca Sagrada, sobre todo debería tenerse en cuenta el margen temporal relativamente corto durante el cual los productos disponibles en el mercado conservan plenas sus propiedades hidrófugas (poco más de cinco años). Otro aspecto a valorar es la cantidad necesaria, que podrá determinarse realizando análisis para ver la capacidad de absorción de la roca.

3. Intimachay

3.1. Problemas de conservación y causas probables de los mismos

El problema básico es el considerable humedecimiento del interior de la cueva y el consecuente desarrollo de musgo, líquenes y algas, principalmente en la superficie de los muros construidos en los lados sur y este. La causa del humedecimiento es la entrada de agua entre los bloques de los que está construida la cueva. El agua llega desde las terrazas y los espacios de tierra situados por encima, y quizá también de la caverna contigua, en dirección norte. La razón de que la humedad se mantenga es que el agua no puede salir con facilidad de la cueva, puesto que el suelo de la misma se halla por debajo del nivel de la entrada y del terreno que la rodea. También resulta insuficiente el flujo del aire en el interior.

3.2. Sugerencias de conservación

Las propuestas presentadas aquí son en realidad consejos sobre hacia dónde enfocar la búsqueda de soluciones, no las soluciones mismas.

- Se debe comprobar la hipótesis sobre la llegada de agua desde la caverna contigua. En caso de ser cierta, habría que proteger los alrededores de la entrada a la otra cueva para evitar que llegue agua por esa vía.
- Levantar la tierra de la terraza situada sobre la caverna, para poder determinar las dimensiones de las rendijas formadas entre los bloques que conforman el techo, y en particular en la zona de la piedra que constituye la pared norte de la cueva.
- Preparar y llevar a cabo un aislamiento adecuado a las dimensiones de las rendijas. En cualquier caso, debe tenerse presente el hecho de que solo es posible conseguir un aislamiento completo en el caso de las ren-

dijas pequeñas, y que probablemente no se podrá detener del todo la entrada de agua.

- Al rehacer la terraza, se debería preparar el desagüe de la superficie de manera que el agua no se dirija a las inmediaciones de la entrada a la cueva.
- Realizar un sondeo delante de la pared frontal de la caverna (noreste), profundizando hasta más abajo del nivel del suelo de la misma. El objetivo sería comprobar si la estructura de esta pared no contiene grietas, hendiduras o rendijas entre los bloques, cosa que permitiría conducir el agua desde el suelo de la cueva hasta el exterior. Si efectivamente se encontraran, sería preciso dejarlas expeditas, ampliar el sondeo excavado hasta el borde de la terraza, drenar el fondo y guiar el agua para que salga fuera del muro de contención. Cubrir el sondeo con material permeable (por ejemplo arena) hasta el nivel en el que aparezcan las rendijas en la pared de la caverna, encima colocar una estera o malla, y cubrirlo todo con material impermeable (arcilla y tierra). Cubrir también el suelo de la cueva con material permeable.
- Estudiar las rendijas entre los bloques que forman el techo de la cueva, para contemplar la posibilidad de pasar por ellas un tubo de ventilación, en el punto más alto posible del interior. Si fuera ello posible, habría que ocultar la salida del tubo entre las estructuras murales expuestas al norte. El tubo activaría la circulación del aire en el interior de la cueva (desde la entrada –en sombra– hasta la salida del tubo, al sol).

4. Templo del Cóndor

4.1. Problemas de conservación y causas probables de los mismos

Se han detectado dos problemas básicos, cuyo nivel de peligrosidad es diferente. Uno es la erosión de la roca conocida como Cabeza del Cóndor, cuya superficie además está cubierta de polvo. El segundo es el agrietamiento, sobre todo vertical, de las rocas que conforman las alas del monumento, y en especial las importantes grietas de la roca del lado norte. Esto último hace temer que la roca pueda fracturarse y que a consecuencia de ello se derrumbe en gran parte, arrastrando con ella las estructuras murales construidas encima.

4.2. Sugerencias de conservación y de búsqueda de soluciones

- Limpiar de algas y líquenes la superficie de la Cabeza del Cóndor, empleando medios mecánicos y químicos (biocidas). Tras la limpieza, reforzar la superficie de la piedra con sustancias hidrófugas y fortalecientes. La elección de los productos debe hacerse en base al análisis de las muestras del material pétreo y de los estratos biológicos tomadas en el yacimiento.

- El análisis de las grietas de las rocas que forman las alas del cóndor es, considerando su escala, una cuestión geológica, mientras que su solución ha de buscarse en la ingeniería de minas. En primer lugar se recomienda hacer un reconocimiento completo del estado actual de las rocas: recorrido de las grietas en su interior y estática de los bloques de piedra. Para ello será indispensable una descripción tridimensional de las rocas, en base a la cual se podrá determinar la distribución de la masa y la localización del punto de equilibrio. Esto permitirá contestar a la pregunta principal, esto es, si realmente existe peligro de derrumbe. De ello deberá depender el alcance de los posibles trabajos de protección.

5. Wayna Picchu

El reconocimiento preliminar de las condiciones en que se encuentran las edificaciones ubicadas en la cumbre de Wayna Picchu, y los análisis del material pétreo allí recogido, permiten confirmar la presencia de factores destructivos similares a los detectados en los bloques de granito utilizados en Machu Picchu. Están relacionados con los procesos naturales de meteorización del granito (muestra W-1 del apéndice y Figs. 6, 7, 8, 9). No obstante, da la impresión de que quizás aquí sea más rápido el desarrollo de los procesos de meteorización, debido a las condiciones de temperatura y de humedad derivadas de la localización de la cumbre.

Teniendo en cuenta que las eventuales tareas de conservación se verían muy limitadas por las dificultades para transportar materiales, se recomienda volver a tratar este problema una vez concluida cierta etapa de trabajos en Machu Picchu. La experiencia allí obtenida constituirá un importante punto de partida para tareas que habrán de realizarse en un terreno mucho más complicado.

6. Conclusión

Todo apunta a que el deterioro de los distintos objetos del Parque Arqueológico de Machu Picchu tiene un origen natural, ligado a los procesos de meteorización del granito aquí presentes, definidos por las condiciones climáticas reinantes en el lugar. Un segundo grupo de factores que influyen en el deterioro está relacionado con la conducción del agua de lluvia y con la presencia natural de humedecimientos locales en los objetos. Por esta razón, es preciso hacer especial hincapié en la monitorización de dichos fenómenos. Las tareas de conservación que eventualmente se emprendan deberían tener un carácter local. Para establecer las prioridades en su realización hay que determinar cuál es el factor destructivo que más rápidamente actúa, y así centrar los trabajos en su debilitación. El presente informe trata de indicar lugares donde se podría intervenir, y propone métodos de manera introductoria, pero se recomienda efectuar antes pruebas sobre el terreno en lugares

de menor importancia histórica. Las conclusiones derivadas de esas pruebas deben arrojar luces tanto sobre los propios resultados obtenidos en ellas, como sobre la posibilidad de repetir las medidas de conservación elegidas. La importancia de las labores de prevención es fundamental. Aparte de esto, se debe aprovechar la información obtenida gracias a los trabajos arqueológicos realizados hasta ahora en el sitio con el fin de recuperar en su totalidad, o hasta donde sea posible, el sistema de desagüe existente en el lugar originariamente. La combinación de los trabajos arqueológicos con los de conservación resulta en este caso la solución ideal. Se debe resaltar el hecho de que las labores realizadas en esa dirección hasta la fecha han ofrecido resultados positivos.

Referencias citadas

Bolewski, Andrzej, Mieczysław Budkiewicz y Piotr Wyszomirski
1991 *Surowce ceramiczne*. 396 pp. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.

Wright, Kenneth R. y Alfredo Valencia Zegarra
2000 *Machu Picchu. A civil engineering marvel*. 144 pp. American Society of Civil Engineers, Reston

Notas

- ¹ Bentonita sódica, arcilla de bentonita: roca sedimentaria limosa surgida de la metamorfosis de cenizas y tobas volcánicas, cuyo principal componente es la montmorillonita (silicato de aluminio hidratado). La bentonita puede absorber una cantidad de agua nueve veces mayor que su masa y hasta doce veces mayor que su volumen. Los aislamientos anti-humedad se hacen con granulado de bentonita. Precisan ser cubiertos con una capa de compresión, lo que evita que el agua derrubie el granulado y garantiza la estanqueidad.

APÉNDICE 1

Análisis de las muestras de roca y de mortero recogidas en el yacimiento arqueológico de Machu Picchu y de la muestra de roca recogida en Wayna Picchu en el año 2008

Irena Koss

1. Índice de muestras

W-1: piedra, Wayna Picchu.

1.1. Muestras recogidas en Machu Picchu

Las muestras con el símbolo T corresponden al Torreón

T-1: piedra
T-2: piedra
T-3: arcilla (superior)
T-3: arcilla (inferior)
T-4: mortero de arcilla
T-5: estratos biológicos
T-6: estratos negros
T-7: estratos grises

Las muestras con el símbolo RS corresponden a la Roca Sagrada

RS-1: estratos negros
RS-2: estratos negros
RS-3: estratos orgánicos (verde claro)
RS-4: líquenes
RS-5: piedra
RS-6: estratos biológicos

2. Metodología empleada en los análisis

En el examen de las muestras de rocas, morteros y estratos se utilizaron métodos microscópicos y análisis instrumental.

Se realizó un análisis microquímico y de microcristales usando un microscopio estereoscópico marca Nikon de aumento máximo 100x, y un microscopio biológico, también marca Nikon, de aumento máximo 680x.

Se llevaron a cabo secciones finas para los análisis petrográficos, que fueron observadas con luz transmitida, luz polarizada, nicoles paralelos y nicoles cruzados, con aumento máximo de 480x.

Se preparó una documentación fotográfica analógica basada en las secciones finas, en un microscopio Nikon con adaptador de polarizador, y otra digital, en un microscopio estereoscópico (luz reflejada) marca Nikon.

También se llevó a cabo un análisis difractométrico DRX para determinar la composición de fases de las muestras. Los resultados están incluidos en el Apéndice 2.

Los resultados de los estudios han sido imprimidos y pasados a un formato electrónico (PDF).

2.1. Muestra W-1, roca, Wayna Picchu

Descripción macroscópica. Muestra de piedra constituida por varios fragmentos, color gris claro, dura.

Descripción microscópica. Clastos de granito. Son visibles granos de cuarzo, de feldespato y de biotita. En algunas partes de la muestra se ve detrito herrumbroso. Parte de las escamas de biotita aparecen en forma de «oro de los gatos».

2.1.1. Descripción de la sección fina

Al microscopio es visible una roca compuesta de cuarzo, feldespato y biotita. Aparece también moscovita en pequeñas cantidades. Estructura fanerocristalina, porfídica. Los granos de cuarzo y feldespato presentan un importante grado de desintegración granular. El sistema de grietas resultante se aprecia con mayor claridad en los granos de cuarzo, y en los de feldespato solo al ser observados con mucho aumento. El feldespato aparece caolinizado en diferentes grados.

2.1.2. Conclusiones

La muestra analizada es granito, roca ígnea plutónica de estructura fanerocristalina y porfídica. Textura no homogénea y porosa, como resultado de las variaciones experimentadas por los granos de cuarzo y feldespato a causa de la meteorización. El cuarzo y el feldespato presentan desintegración granular; el feldespato, además, sufre caolinización (transformación en caolín, sílice y carbonatos por la acción del agua y del dióxido de carbono). La biotita no muestra claramente corrosión por limonita, pero en cambio aparecen escamas transformadas en «oro de los gatos» (efecto de la oxidación del Fe^{2+} en Fe^{3+}). Aparecen pequeñas cantidades de moscovita (Figs. 6, 7, 8, 9).

2.2. Muestra T-1 (roca)

Descripción macroscópica. Muestra de roca de color gris, compacta, cubierta por un estrato gris oscuro, casi negro, de poca consistencia en algunas partes.

Descripción microscópica. Muestra de roca cubierta por un estrato vegetal (musgo, líquenes, etc.) y por una sustancia micro-cristalina de naturaleza terrosa, presumiblemente arcilla. La superficie de la roca está muy desintegrada, no hay cohesión entre los granos. Los granos de feldespato se desprenden siguiendo los planos de exfoliación. Las escamas de biotita se transforman parcialmente en «oro de los gatos».

2.2.1. Descripción de la sección fina

Al microscopio se ve la roca granítica, compuesta de cuarzo, feldespato y biotita, además de pequeñas cantidades de moscovita. Estructura fanerocristalina, porfídica. Textura no homogénea y parcialmente porosa. Los granos de feldespato presentan caolinización y desintegración granular, visible en especial en las orillas. Los granos de cuarzo sufren desintegración granular en un grado relativamente bajo. Las escamas de biotita tampoco muestran signos de meteorización química. No se han detectado anillos de limonita.

2.2.2. Conclusiones

La roca analizada es granito de biotita. Pertenece a las rocas ígneas plutónicas. La estructura es fanerocristalina, de grano irregular, porfídica. Textura no homogénea, parcialmente porosa. La porosidad está provocada por los procesos de meteorización, principalmente por la desintegración granular del feldespato. El cuarzo, la biotita y la moscovita no muestran cambios importantes por la meteorización.

La roca analizada es similar a la descrita en la muestra W-1. Presenta un panorama algo distinto en cuanto a la meteorización, debido básicamente a la mayor desintegración granular del feldespato (Figs. 10, 11, 12).

2.3. Muestra T-2 (roca)

Descripción macroscópica. Muestra de roca compuesta por un fragmento liso de 3 a 4 milímetros de grosor. La superficie exterior se halla cubierta por un estrato desigual gris-verde. La cara inferior es uniforme, de color beige.

Descripción microscópica. Muestra de granito. Superficie exterior cubierta principalmente por un estrato biológico y en parte mineral. El estrato tiene diversas tonalidades. Aparecen cúmulos de color verde y blanco-beige. Están combados. Se separan de la superficie inferior. La superficie inferior de la muestra se halla cubierta por una sustancia uniforme, de microcristales finos y color beige.

2.3.1. Análisis microquímico y de microcristales

Capa superior. Recubre la superficie sin demasiada compresión, se desprende fácilmente con la cuchilla. Con 3M HCl aparece una ligera reacción de disolución con emanación de gas. El estrato se hincha, como si fuera de goma o de plástico. No se detecta recristalización de yeso. Reacción positiva de notable intensidad ante la presencia de iones Fe^{3+} de $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Reacción positiva de mediana intensidad ante la presencia de silicatos.

Capa inferior. En lo referente a las reacciones químicas, la sustancia se comporta de manera similar a la capa superior, a pesar de las diferencias existentes entre ambas en el aspecto macroscópico. La reacción ante la presencia de silicatos es de mayor intensidad.

2.3.2. Conclusiones

Muestra de granito de composición y estructura similares a las de las muestras descritas anteriormente. Resulta complicado determinar el color de la roca. Parece destacar la pigmentación del feldespato de color marrón claro. La muestra la constituye un fragmento liso cubierto a ambos lados por estratos. Los dos estratos se diferencian en su aspecto externo, pero ambos contienen principalmente sustancias biológicas que se hinchan con facilidad por la acción del agua y del 3M HCl; en ellos aparece una notable cantidad de formas esféricas verdes, probablemente algas. Se ha detectado también una pequeña cantidad de calcita y un alto contenido de silicatos, sobre todo en forma de sustancias arcillosas. Se ha detectado la presencia de una notable cantidad de compuestos ferrosos, probablemente de limonita.

2.4. Muestra T-3 (arcilla –superior)

Descripción macroscópica. Muestra muy blanda, en forma de pequeños terrones de diferentes tamaños, tonalidad beige claro, muy ligera, de aspecto homogéneo.

Descripción microscópica. Sustancia microcristalina de tono beige claro.

2.4.1. Reacciones microquímicas y microcristaloscópicas

La muestra no experimenta hinchamiento en el agua. Se da un ligero desmoronamiento, pero la sustancia se rompe solo al presionar con la cuchilla. Son visibles granos de cuarzo, de biotita y de moscovita, así como cúmulos amarillos, probablemente feldespato caolinizado. Con 3M HCl aparece una ligera disolución con emanación de gas. Se aprecia una fragmentación de la muestra en escamas, pero sin reacción de hinchamiento. La gota se vuelve mate. Predomina una sustancia marrón-herrumbrosa, microcristalina o amorfa. También quedan granos de cuarzo, de feldespato cao-

linizado, de biotita y de moscovita. Reacciones positivas de muy alta intensidad ante la presencia de iones Fe^{3+} y de limos. Reacciones negativas con solución de Lugol ante la presencia de almidón y dextrina, y con ninhidrina ante la presencia de sustancias proteicas.

2.4.2. *Análisis instrumental – difracción de rayos X (DRX). Apéndice 2*

Como resultado del análisis realizado se obtuvo la siguiente composición de fases de la muestra: predominio del cuarzo, después illita/moscovita, cloritas/caolinita, plagioclasas, feldespato potásico y calcita. Aparece un notable contenido de sustancias amorfas, tal y como indica la línea del gráfico, muy elevada en relación con el eje horizontal.

2.4.3. *Conclusiones*

La muestra estudiada es arcilla compuesta principalmente de cuarzo y, en cantidades mucho menores, plagioclasa, feldespato potásico y sustancia arcillosa (illita y caolinita). Aparecen también cloritas y calcita. La calcita está presente en cantidades mucho menores que la sustancia arcillosa y que el cuarzo, lo cual sugiere que se trata de uno de los componentes de la arcilla, más aún si tenemos en cuenta la presencia en ella de una notable cantidad de plagioclasas, de cuya descomposición podría surgir la calcita. No parece muy plausible la posibilidad de un añadido de aglutinante calcáreo. La arcilla incluye un importante contenido de sustancias amorfas; probablemente se trate de óxidos e hidróxidos de hierro.

2.5. Muestra T-3 (arcilla – inferior)

Descripción macroscópica. La muestra aparece en forma desmenuzada, aunque también contiene fragmentos más compactos. Tiene color marrón y es más oscura que la arcilla de la muestra T-3 (superior).

Descripción microscópica. Sustancia de microcristales finos que contiene granos de cuarzo, feldespato, biotita y moscovita. El panorama es muy similar al de la muestra T-3 (superior).

2.5.1. *Reacciones microquímicas y microcristaloscópicas*

En agua no se ha observado un hinchamiento perceptible. Presencia de granos de cuarzo, feldespato caolinizado, biotita y moscovita. Con 3M HCl aparece una fuerte reacción de disolución con emanación de gas (aunque de corta duración), lo cual indica la presencia de calcita. La muestra se disgrega, la gota se vuelve claramente mate, contiene sustancia microcristalina o amorfa color herrumbroso-marrón, así

como granos de cuarzo, feldespato y micas. Reacciones positivas de muy alta intensidad ante la presencia de iones Fe^{3+} y de limos. Reacciones negativas con solución de Lugol ante la presencia de almidón y dextrina, y con ninhidrina ante la presencia de sustancias proteicas.

2.5.2. *Análisis instrumental – difracción de rayos X (DRX). Apéndice 2*

Como resultado del análisis realizado se obtuvo la siguiente composición de fases de la muestra: predominio del cuarzo, cantidades notables de feldespato potásico y plagioclasa, illita/moscovita, caolinita, calcita, cloritas. Aparece un notable contenido de sustancias amorfas, como indica la elevación de la línea del gráfico.

2.5.3. *Conclusiones*

La muestra analizada es arcilla en cuya composición predomina el cuarzo, la plagioclasa, el feldespato potásico, así como los minerales arcillosos (illita y caolinita), la calcita y las cloritas. Contiene también una sustancia amorfa, presumiblemente óxidos e hidróxidos de hierro. No se ha detectado la presencia de gomas vegetales ni de aglutinantes calcáreos.

2.6. *Análisis comparativo de las muestras T-3 (superior) y T-3 (inferior)*

Las composiciones cualitativas de las muestras T-3 (superior) y T-3 (inferior) trazadas por la difracción de rayos X son muy similares entre sí. En ambas muestras aparece como principal componente el cuarzo, a continuación los feldespatos potásicos, plagioclasas, illita-moscovita, cloritas-caolinita, calcita y sustancia amorfa. El cuarzo predomina en ambas muestras, pero en la muestra T-3 (inferior) aparece mayor cantidad de material clástico (principalmente en forma de feldespatos potásicos y de plagioclasas), que no posee propiedades aglomerantes. El contenido de las sustancias con un carácter aglomerante, como la illita, la caolinita y eventualmente la calcita, es parecido en ambas pruebas, por lo que las probabilidades de hincharse y absorber líquido son en la muestra T-3 (inferior) relativamente menores que en la T-3 (superior). A parte de esto, la cantidad de sustancias amorfas (nivel de fondo) en la muestra T-3 (superior) es aproximadamente dos veces mayor que en la T-3 (inferior). Probablemente se trate de sustancias coloidales ferruginosas, que pueden ser más sensibles a la reacción química del agua.

En la muestra T-3 (superior) no se detectó la presencia de minerales cementosos durante el análisis difractométrico.

En ambas muestras, la presencia de la calcita es ambigua (origen primario o un pequeño añadido de aglutinante calcáreo).

2.7. Muestra T-4 (mortero de arcilla)

Descripción macroscópica. La muestra la conforma una sustancia suelta y homogénea, de color herrumbroso-marrón.

Descripción microscópica. Se aprecia una masa homogénea microcristalina de color beige. Algunos (pocos) clastos de cuarzo y mica.

2.7.1. Reacciones microquímicas y microcristaloscópicas

En agua la sustancia se disgrega. No se ha observado hinchamiento. Con 3M HCl no se observa reacción de disolución con emanación de gas. Tampoco se ha detectado re-cristalización de yeso. Reacción positiva de muy alta intensidad ante la presencia de iones Fe^{3+} y positiva ante la presencia de limos. Reacción negativa con ninhidrina ante la presencia de sustancias proteicas. Reacción ambigua con solución de Lugol ante la presencia de almidón y dextrina. Da la impresión de que cada uno de los terrones por separado está teñido de color violeta-rojo.

2.7.2. Análisis instrumental – difracción de rayos X (DRX). Apéndice 2

Como resultado del análisis realizado se registró la siguiente composición de fases de la muestra: predominio del cuarzo, a continuación feldespato potásico, plagioclasas, illita-moscovita, clorita-caolinita y calcita.

2.7.3. Conclusiones

La muestra analizada es mortero hecho con arcilla. Contiene principalmente granos de cuarzo, de feldespato potásico y de plagioclasa (componentes clásticos). Los materiales arcillosos son la illita y la caolinita. Aparece una notable cantidad de cloritas y muy poca de calcita. Notable contenido de sustancias amorfas (la línea del gráfico se eleva notablemente, en relación con el eje horizontal). Reacción ambigua ante la presencia de gomas vegetales (almidón y dextrina). Resulta muy difícil apreciar los cambios de color de la muestra en solución de Lugol. No es descartable un añadido de adhesivo vegetal (es preciso realizar un análisis instrumental: radiación infrarroja FTIR o cromatografía de gases). Sería precisa una mayor cantidad de material para analizar.

2.8. Comparación con las muestras T-3 (superior) y T-3 (inferior)

La composición cualitativa de la muestra es básicamente la misma que las de ambas muestras T-3, pero se registran diferencias cuantitativas. Predomina el cuarzo. Las cantidades de feldespatos potásicos y de plagioclasas están más cercanas

a las de la muestra T-3 (superior). En cambio, la presencia de cloritas es mucho más alta que en las muestras anteriores, y es especialmente notoria la poca cantidad de calcita registrada.

La información sobre el contenido de gomas vegetales es ambigua.

Las tres muestras contienen una notable cantidad de sustancias amorfas. Sin duda se trata sobre todo de compuestos ferrosos (óxidos e hidróxidos de hierro), pero también puede haber otras sustancias.

2.9. Muestra T-5 (estrato biológico)

Descripción microscópica. Se aprecian organismos vegetales desecados, sujetos por las raíces a los granos de cuarzo y feldespato (Figs. 13, 14, 15).

2.10. Muestra T-6 (estrato negro)

Descripción macroscópica. La muestra aparece en fragmentos de diferentes tamaños. Color no uniforme (gris-blanco-negro).

Descripción microscópica. La descripción de la muestra es compleja. En realidad, cada fragmento tiene un aspecto diferente. Se trata de una combinación de estrato biológico y estrato mineral. Aparecen pequeñas plantas que forman principalmente cúmulos circulares de color amarillo, probablemente líquenes. Las raicillas se han introducido por las grietas de la roca, y enganchados a ellas aparecen granos de cuarzo, de feldespato y de biotita. En todos los fragmentos de la muestra, escamas relativamente grandes de biotita –transformadas parcialmente en «oro de los gatos»– constituyen un estrato negro. Parte de las escamas de biotita se han vuelto mate y se desmenuzan (Figs. 16, 17, 18).

2.11. Muestra T-7 (estrato gris)

Descripción macroscópica. Muestra en forma de fragmentos de varios milímetros cada uno. Superficie en forma de coliflor, de color gris claro.

Descripción microscópica. En la superficie de la muestra se observan principalmente líquenes esféricos blancos, unidos a granos de cuarzo y biotita. También aparecen cúmulos de una sustancia verde, probablemente algas. Se ha observado también la presencia de una sustancia blanca de carácter «algodonoso».

2.11.1. Reacciones microquímicas y microcristaloscópicas

La muestra es muy ligera. Flota sobre la superficie de la gota, no se disuelve y presenta hinchamiento insignificante. Tras calentar la gota, el hinchamiento aumenta ligeramente. Se hace visible la estructura filamentosa de la sustancia de

carácter «algodonoso». No se trata de sal soluble en agua. Con 3M HCl no se ha registrado ninguna reacción manifiesta. Tras calentar, las sustancias presentes en el estrato se vuelven plásticas, «gomosas». No se ha detectado re-cristalización de yeso. Reacción positiva de baja intensidad ante la presencia de iones Fe^{3+} . En una concentración de HNO_3 tiene lugar un fuerte oscurecimiento de las partes orgánicas. Comportamiento similar al registrado con 3M HCl. Tras calentar, fuerte disolución con emanación de gas. Reacción positiva ante la presencia de silicatos. La mayor parte de la muestra se disuelve, permanecen los granos de cuarzo y las partes de sustancia herrumbrosa.

Reacción negativa con solución de Lugol y con ninhidrina.

2.11.2. Conclusiones

El estrato tiene una naturaleza principalmente biológica (líquenes, algas). Presencia de silicatos, probablemente en forma de sustancia arcillosa o de sílice, soluble en una concentración de HNO_3 calentada. La sustancia herrumbrosa la conforman compuestos ferrosos, en gran parte procedentes de la meteorización de la biotita (Figs. 19, 20).

2.12. Muestra RS-1 (estrato negro)

Descripción macroscópica. Muestra no uniforme, de color gris-negro-blanco.

Descripción microscópica. Muestra de roca granítica cubierta por un estrato. Presencia de cuarzo, feldespato y biotita. Sobre la superficie, un estrato de estructura no uniforme. Se compone principalmente de cúmulos de una sustancia negra, básicamente biotita y también de cúmulos blancos, básicamente orgánicos. Bajo la sustancia negra aparecen cúmulos de sustancia herrumbrosa. La muestra es relativamente dura, las escamas de biotita blandas.

2.12.1. Reacciones microquímicas y microcristaloscópicas

En agua no se han registrado reacciones visibles. Las bolitas verdes de algas se hinchan. Se aprecian granos de cuarzo y escamas de biotita. Con 3M HCl no se ha detectado reacción de disolución. No se ha detectado recristalización de yeso. Se aprecia una sustancia microcristalina o amorfa tipo gel. Reacción positiva de mediana intensidad ante la presencia de iones Fe^{3+} ; también en la masa gelatinosa del material detrítico. En una concentración de HNO_3 no se ha registrado reacción de disolución con emanación de gas. Reacción positiva de poca intensidad ante la presencia de silicatos. Reacción mayormente negativa con 4N NaOH en frío. La sustancia microcristalina se hincha, igual que en una concentración de HNO_3 . Solo después de calentarla a alta temperatura la sustancia se disgrega.

2.12.2. Conclusiones

El estrato analizado se compone principalmente de biotita y de sustancia ferruginosa, probablemente limonita resultado de la oxidación de parte de la biotita. La sustancia gelatinosa presente en el estrato muy probablemente sea sílice, producto de la descomposición del feldespato y en parte de la biotita. Aparte de los componentes minerales, aparecen organismos que forman parte del estrato biológico (Figs. 21, 22, 23).

2.13. Muestra RS-2 (estrato negro)

Descripción macroscópica. Muestra en forma de capas lisas negras.

Descripción microscópica. Muestra de roca que contiene principalmente granos de cuarzo y biotita con diferente grado de meteorización. Los feldespatos no son visibles. Aparecen numerosos daños en la superficie, que pueden ser debidos a la meteorización y al desprendimiento de los feldespatos. Los cúmulos de sustancia negra son similares a los descritos en la muestra anterior, exceptuando el hecho de que su número es mucho mayor. No forman un estrato continuo, sino cúmulos de diferentes grosores y formas. En la composición de estos estratos también entran escamas de moscovita y granos de cuarzo, muy pequeños y desintegrados. En la superficie de la roca, principalmente de cuarzo, aparecen bajo los cúmulos negros manchas herrumbrosas, probablemente de limonita (resultado de la oxidación de la biotita). Parte de las escamas de biotita acabarán en forma de «oro de los gatos» por la erosión que sufren. También aparece un estrato biológico, principalmente en forma de algas verdes esféricas.

2.13.1. Reacciones microquímicas y microcristaloscópicas

En agua, el tono del estrato se vuelve claramente herrumbroso; absorbe líquido y se extrae fácilmente con el escalpelo. Tras calentar, no se han registrado reacciones adicionales. En el agua se hace evidente la observación de que los principales componentes son la biotita y el cuarzo. Con 3M HCl no se ha detectado reacción de disolución con emanación de gas. Tampoco se ha registrado re-cristalización de yeso. Son visibles bolitas verdes de algas, así como pequeñas plantas herrumbrosas y minúsculos fragmentos de cuarzo, feldespato y biotita. Presencia de muchos restos orgánicos. Reacción positiva de alta intensidad ante la presencia de iones Fe^{3+} . En una concentración de HNO_3 , al igual que en anteriores muestras, tiene lugar un importante hinchamiento del estrato. No se disgrega y conserva un evidente tono herrumbroso. Tras calentar, parte de la sustancia coloidal se disuelve, queda un sedimento rojo-amarillo, muy fino, en forma coloidal (probablemente material detrítico de compuestos ferrosos). Con 4N NaOH no se ha

detectado reacción de hinchamiento, como en anteriores muestras, pero el estrato también se ablanda y se quita con facilidad de la superficie.

2.13.2. Conclusiones

Estrato mineral-biológico. Los principales componentes son la biotita (muy desmenuzada y desintegrada) y el cuarzo. Aparece una notable cantidad de compuestos ferrosos, producto de la meteorización de la biotita. Hay muy poca sílice coloidal. Los compuestos ferrosos son los principales elementos de unión en el estrato. De entre las sustancias orgánicas, las más visibles son las algas (Figs. 24, 25, 26).

2.14. Muestra RS-3 (estrato orgánico, verde claro)

Descripción macroscópica. La muestra se presenta en fragmentos muy pequeños, de color no uniforme (tonos grises, blancos y negros).

Descripción microscópica. Se trata de un estrato muy poco uniforme. Aparecen cúmulos orgánicos blancos, similares a los de la muestra T-7. La sustancia orgánica aparece además en otras formas distintas. Aparte de los elementos orgánicos, presencia también de cuarzo, feldespato meteorizado y una masa de escamas de biotita (Figs. 27, 28).

2.15. Muestra RS-4 (líquenes)

Descripción macroscópica. Muestra en forma de fina capa (escama), de origen vegetal.

Descripción microscópica. Sólo se aprecian organismos vegetales con formas circulares características.

2.15.1. Reacciones microquímicas

Con agua y con 3M HCl no se han registrado reacciones manifiestas. Ante la evidencia de que se trata claramente de un estrato biológico, se renunció a continuar los análisis microquímicos.

2.15.2. Conclusiones

Estrato biológico compuesto principalmente de líquenes (Figs. 29, 30, 31).

2.16. Muestra RS-5 (roca)

Descripción macroscópica. Muestra de roca de color gris claro, compacta.

Descripción microscópica. Muestra de granito que contiene cuarzo, feldespato, biotita y una pequeña cantidad de moscovita.

2.16.1. Descripción de la sección fina

En la sección se aprecia el mismo tipo de piedra que la descrita en las muestras W-1 y T-1. Se trata de piedra granítica, que contiene cuarzo, feldespato, biotita y pequeñas cantidades de moscovita. Estructura fanerocristalina, de grano irregular, porfídica. Textura no homogénea, parcialmente porosa. De entre todos los componentes minerales, el feldespato evidencia la mayor cantidad de transformaciones por meteorización: caolinización, exfoliación (descamación, grietas paralelas), desintegración granular. Granos de cuarzo en buen estado de conservación y los que aparecen en las orillas evidencian desintegración granular. La biotita tampoco evidencia transformaciones por meteorización destacables. No se han detectado anillos de limonita.

2.16.2. Conclusiones

La muestra analizada es roca granítica que contiene cuarzo, feldespato, biotita y pequeñas cantidades de moscovita. Estructura fanerocristalina, de grano irregular, porfídica. Textura no homogénea, porosa debido al avanzado proceso de meteorización del feldespato (exfoliación, desintegración granular, caolinización). Los granos de cuarzo evidencian esporádicamente desintegración granular. La biotita no tiene anillos de limonita y no evidencia transformaciones por meteorización (Figs. 32, 33, 34, 35).

2.17. Muestra RS-6 (estrato biológico)

Descripción macroscópica. Muestra en forma de pequeños fragmentos, no uniforme, color gris claro.

Descripción microscópica. Se trata de un estrato de idéntico aspecto al que aparece en la muestra T-7. Se aprecian las formas circulares de los líquenes.

2.17.1. Conclusiones

Estrato biológico compuesto principalmente de líquenes (Figs. 36, 37).

APÉNDICE 2

1. Difracción de rayos X. Descripción del método usado

La difracción de rayos X es un método de análisis que permite determinar la composición mineral de la roca de un modo relativamente rápido y preciso, en particular en los casos en que no es posible identificar por otros medios (por ejemplo al microscopio) dicha composición, o bien esta resulta muy dudosa.

El análisis radiográfico solo se emplea en el examen de sustancias cristalinas; no permite distinguir, por ejemplo, la arcilla amorfa Al_2O_3 , las sílices SiO_2 , los betunes o los compuestos coloidales amorfos de Fe.

Otra limitación del método es el hecho de que solo resulte fiable examinar la composición mineral de rocas que no contengan más de 8 o 9 minerales. La gran ventaja del método de difracción es la rapidez con la que se realiza y la facilidad con que se preparan las muestras para el análisis. Basta con triturar en un molinillo o en un mortero de ágata unos 2 g de piedra, preparar la muestra en polvo mediante un sencillo procedimiento, realizar el análisis y, en un tiempo relativamente corto, determinar su composición mineral (siempre y cuando dicha composición no sea excesivamente compleja, y no surjan complicaciones imprevistas que dificulten la apreciación).

El método de difracción de rayos X resulta especialmente útil para examinar la composición mineral de las rocas arcillosas y del aglutinante arcilloso de las rocas clásticas, y también para identificar los minerales carbonatados o salinos, los sulfatos, etc., difíciles de apreciar con claridad por métodos tradicionales, por ejemplo a través de métodos ópticos.

El análisis por difracción de rayos X aprovecha precisamente el fenómeno de la difracción de los rayos X en los planos atómicos de la red cristalina de los diversos componentes minerales de la roca. La fuente de rayos X es una lámpara de Cu (o bien de Co, Fe, según sea necesario). Los rayos X se pueden monocromatizar con la ayuda de filtros o de monocromatizadores cristalinos. Los rayos X monocromáticos, por ejemplo Cu K_α , con longitud de onda $\lambda = 0,154\text{nm}$, emitidos por la lámpara, inciden sobre la muestra en polvo de la roca, colocada en un porta-muestras especial. Allí quedan dispersados y amplificados tras difractarse desde el grupo de planos atómicos

que, con ese ángulo de incidencia, cumplen justamente la condición de interferencia constructiva definida en la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Donde:

n = orden de reflexión

λ = longitud de onda de los rayos X

d = distancia interplanar $d(hkl)$ entre los planos de dispersión

θ = ángulo entre la dirección de los haces incidentes y los planos de dispersión.

Cada sustancia cristalina ofrece un mapa de difracción propio en forma de conjunto de reflexiones de los haces dispersados $d(hkl)$ (dependientes de los parámetros de la celda elemental y del tipo de red) y una intensidad I (dependiente, entre otros, de la clase de átomos que crean los enlaces atómicos. Se confronta en tablas los valores de $d(hkl)$ con las intensidades de los haces dispersados. Los datos de las distancias interplanares $d(hkl)$ se aprovechan para identificar los minerales. La identificación se lleva a cabo comparando distancias interplanares conocidas pertenecientes a minerales dados (archivadas en la base de datos mineralógica de la ASTM) con las distancias interplanares obtenidas con los exámenes difractométricos.

En la base de datos de la American Society for Testing and Materials (ASTM) todos los compuestos (minerales) están ordenados según el tamaño de $d(hkl)$ calculado en las 3 líneas consecutivas de mayor fuerza en la radiografía de una sustancia dada.

Para preparar el polvo de la muestra, la trituramos por ejemplo en un mortero de ágata hasta conseguir granos de 5 a 10 μm . Cuanto mejor esté molida la muestra, mayor será el número de partículas individuales orientadas al azar, y por consiguiente las reflexiones serán más fuertes y estarán mejor definidas.

En el método del polvo, la muestra de roca, molida muy finamente, se comprime en seco en un porta-muestras especial (a mano o mediante algún aparato adecuado), sin añadir agentes aglomerantes, y se coloca en la cámara del difractómetro de polvo.

Para determinar cualitativamente la composición del mineral en las muestras a examinar, se ha usado el método del análisis de fases por rayos X. Los exámenes se llevaron a cabo en un difractómetro de rayos X modelo PW3710 de la marca Philips, y se empleó el programa informático PC-APD.

El análisis se realizó tomando como base los siguientes parámetros de medida:

- Lámpara de rayos X Cu K α
- Corriente anódica de 30 mA
- Tensión de inducción de 40 kV

- Espectro angular analizado de 4 – 50 [$^{\circ}2\Theta$]
- Velocidad de escaneo de 0.02 [$^{\circ}2\Theta$]

El programa informático Philips PC-APD permite también realizar el análisis cuantitativo de la composición mineral de las rocas y los sedimentos cristalinos, aprovechando el conjunto de materiales de referencia para difracciones de rayos X (minerales modelo).

2. Composición mineral de la roca. Muestra T-3 (superior)

Análisis por el método de difracción de rayos X.

(Espectro angular del análisis: 4 – 50° 2 Θ).

3. Composición mineral de la roca. Muestra T-3 (inferior)

Análisis por el método de difracción de rayos X.

(Espectro angular del análisis: 4 – 50° 2 Θ).

4. Composición mineral de la roca. Muestra T-4 (mortero de arcilla)

Análisis por el método de difracción de rayos X.

(Espectro angular del análisis: $4 - 50^\circ 2\Theta$).

Registro gráfico del estado de conservación de los objetos elegidos del sitio Machu Picchu (Figs. 38-46)

El análisis de los fenómenos destructivos ha sido realizado con el fin de proponer un procedimiento de conservación dirigido a estabilizar y reforzar los bloques de granito, y también a proseguir la monitorización del estado de conservación de los objetos.

Antes de llevar a cabo el examen del estado de conservación, se prepararon mapas calibrados provisionales de los objetos elegidos. Los planos necesarios para recopilar datos sobre el terreno fueron realizados en base a fotografías. Para la documentación de los trabajos y de la monitorización del estado de conservación se han utilizado estándares de sistemas CAD/GIS, en los que se archivaron y se prepararon los datos recogidos en el lugar. Todos los datos recogidos fueron tratados con el sistema MapInfo y pasados a archivos CAD dxf, para que sean accesibles. Serán útiles a la hora de seguir reuniendo datos sobre cada objeto, lo que permitirá una monitorización continua del estado de conservación del material histórico y hará posible una documentación detallada de los trabajos realizados. Los archivos en formato PDF adjuntos al informe tienen un carácter aproximativo. Para futuros trabajos sería útil detallar los planos que conforman el mapa base que hace posible una reproducción precisa del estado real. Hasta ahora han sido realizados ya muchos trabajos enfocados en esa dirección, lo cual permite preparar con bastante rapidez el material de referencia. Están disponibles los resultados del escaneado láser de todo el yacimiento realizado en 2008 por el equipo de A. Vranich. Las imágenes de nube de puntos por ordenador, utilizadas en este informe como miniaturas para la localización orientativa de los objetos tratados, han sido tomadas de los materiales que los diversos autores facilitan en internet. Con el visto bueno de los encargados de esos datos, sería posible preparar rápidamente secciones y ortofotoplanos adecuados de todos los objetos en los cuales se realizarán en el futuro labores de conservación, que además sustituirían a los bocetos aproximativos usados para reunir los datos. Esto permitiría estandarizar rápidamente el sistema de documentación, que facilitará el control permanente de los fenómenos perjudiciales y la preparación de métodos de prevención.

En el análisis se tuvieron en cuenta las capas descritas en la leyenda del registro gráfico del estado de conservación. Los datos recopilados permiten preparar un programa de trabajos de conservación para los objetos indicados por la dirección del Parque Arqueológico de Machu Picchu: el Torreón, la Tumba Real y la Roca Sagrada.

Las capas del registro gráfico fueron presentadas en forma digital en formato MapInfo. Después fueron pasadas al formato CAD dxf y así están accesibles para futuras utilizaciones. Los datos que muestran fueron recogidos durante la semana

que duró el reconocimiento del estado de conservación de los objetos elegidos del Parque Arqueológico de Machu Picchu. Los bocetos usados para la representación gráfica de los deterioros fueron preparados durante esa misma semana a partir de fotos calibradas, y ajustados al plano general del sitio, presentado también en formato CAD. Se trata de cortes bidimensionales de los muros tratados y tienen un carácter aproximativo.

Marek Jeziorowski

(Recogió los datos: G. Bąkowska, R. Czerner, M. Jeziorowski, J. Martusewicz, M. Sobczyk) Registro gráfico del estado de conservación de los objetos elegidos del sitio Machu Picchu.

Figura 1. Encajando los fragmentos desprendidos de una roca ubicada en el interior del Torreón.

Figura 2. Extensión del área a desmontar en las caras interna y externa (Torreón).

Figura 3. Extensión del área a desmontar en las caras interna y externa (Torreón).

Figura 4. Roca Sagrada, vista superior. Se observan las grietas de la roca y los lugares donde crecen líquenes y musgo con mayor intensidad.

Figura 5. Roca Sagrada, fragmento de la roca en su lado noreste. Exfoliación de la superficie de la piedra. En la parte central se observa una merma en la roca debido al reciente desprendimiento de un fragmento plano.

Figura 6. Corte W-1. 84x aumentos. Granito, cristales de cuarzo, feldespato y biotita.

Figura 7. Corte W-1. 84x aumentos. Desintegración granular del cuarzo y del feldespato.

Figura 8. Muestra W-1. 84x aumentos. Fuerte meteorización del feldespato, caolinización.

Figura 9. Corte W-1. 84x aumentos. Granos de cuarzos desintegrados, feldespato caolinizado, estratos de biotita.

Figura 10. Corte T-1. 84x aumentos. Granito. Granos de cuarzo y feldespato, capas de biotita.

Figura 11. Corte T-1. 84x aumentos. Granos de feldespato muy caolinizados, capas de biotita, granos de cuarzo desintegrados.

Figura 12. Corte T-1. 84x aumentos. Granos de feldespato caolinizados, granos de cuarzo desintegrados.

Figura 13. Muestra T-5. Fotografía digital, microscopio estereoscópico, luz reflejada. Estratos biológicos (probablemente algas).

Figura 14. Muestra T-5. Fotografía digital. Luz reflejada. Sustancias biológicas (algas), así como biotita muy desmenuzada y clastos de cuarzo y de feldespato.

Figura 15. *Luz reflejada. Estrato biológico.*

Figura 16. *Muestra T-6. Luz reflejada. Escamas negras de biotita, principal componente del estrato.*

Figura 17. Muestra T-6. Luz reflejada. Escamas negras de biotita, principal componente del estrato.

Figura 18. Muestra T-6. Luz reflejada. Escamas negras de biotita cubiertas por un estrato biológico de color verde (algas).

Figura 19. Muestra T-7. Luz reflejada. Cúmulos esféricos de líquenes, así como algas verdes.

Figura 20. Muestra T-7. Luz reflejada. Lo mismo que en la foto anterior.

Figura 21. Muestra RS-1. Luz reflejada. Base con granos de cuarzo. Granos de biotita muy desmenuzados, pequeños granos de cuarzo y sustancias biológicas.

Figura 22. Muestra RS-1. Luz reflejada. Lo mismo que en la foto anterior.

Figura 23. Muestra RS-1. Luz reflejada. Escamas de biotita desmenuzadas sobre granos de cuarzo; organismos biológicos.

Figura 24. Muestra RS-2. Luz reflejada. Base compuesta principalmente de granos de cuarzo; estrato de granos desmenuzados de biotita y cuarzo; sustancias biológicas.

Figura 25. Muestra RS-2. Luz reflejada. Lo mismo que en la foto anterior.

Figura 26. Muestra RS-2. Luz reflejada. Escamas de biotita y granos de cuarzo muy desmenuzados, unidos probablemente con sílice; organismos vegetales.

Figura 27. Muestra RS-3. Luz reflejada. Estrato biológico: líquenes y algas.

Figura 28. Muestra RS-3. Luz reflejada. Estrato biológico: líquenes y algas.

Figura 29. *Muestra RS-4. Luz reflejada. Estrato: líquenes.*

Figura 30. *Muestra RS-4. Luz reflejada. Estrato: líquenes.*

Figura 31. Muestra RS-4. Luz reflejada. Estrato: líquenes.

Figura 32. Muestra RS-5. Sección. Luz transmitida. 84x aumentos. Feldespath, granos de cuarzo, escamas de biotita.

Figura 33. Muestra RS-5. Sección. Luz transmitida. 84x aumentos. Feldespato muy caolinizado; desintegración granular de los granos de cuarzo.

Figura 34. Muestra RS-5. Sección. Luz transmitida. 84x aumentos. Fuerte caolinización del feldespato, escamas de biotita, cuarzo.

Figura 35. Muestra RS-5. Sección. Luz transmitida. 84x aumentos. Lo mismo que en la foto anterior.

Figura 36. Muestra RS-6. Luz reflejada. Estrato biológico: líquenes.

Figura 37. Muestra RS-6. Luz reflejada. Estrato biológico: líquenes.

Figura 38. Capas del registro gráfico del estado de conservación de los objetos elegidos en el Parque Arqueológico de Machu Picchu – leyenda.

Figura 39. Registros gráficos del estado de conservación: Torreón.
(Interior – Pared occidental. Fecha: 04-10.08.2008).

Figura 40. Registros gráficos del estado de conservación: Torreón.
(Interior – Pared norte. Fecha: 04-10.08.2008).

Figura 41. Registros gráficos del estado de conservación: Torreón.
(Interior – Sureste pared. Fecha: 04-10.08.2008).

Figura 42. Registros gráficos del estado de conservación: Torreón.
(Exterior – Paredes: sur y este. Fecha: 04-10.08.2008).

Figura 43. Registros gráficos del estado de conservación: Torreón.
(Exterior – Pared norte. Fecha: 04-10.08.2008).

Figura 44. Registros gráficos del estado de conservación: Tumba Real.
(Interior - Parte sur. Fecha: 04-10.08.2008).

Figura 45. Registros gráficos del estado de conservación: Tumba Real.
(Interior - Paredes: occidental y norte. Fecha: 04-10.08.2008).

Figura 46. Roca Sagrada: lugares de recogida de muestras.