

# LA GEOLOGÍA, EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA Y GEODINÁMICA EXTERNA DE LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU, CUSCO-PERÚ

Víctor CARLOTTO<sup>1,2</sup>, José CÁRDENAS<sup>2</sup> y Lionel FIDEL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INGEMMET, Lima, Perú. Email : vcarlotto@ingemmet.gob.pe

<sup>2</sup> Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Perú

## RESUMEN

La ciudad inca de Machupicchu se sitúa dentro del santuario histórico de Machupicchu, en la Cordillera Oriental del sur del Perú; está a 2.450 m s.n.m., 500 m por encima del río Urubamba que corta la cordillera y forma un cañón, con clima cálido de ceja de selva. La geología, con afloramientos graníticos y bloques de granitos apilados, forma un paisaje de caos granítico, sobre el que fue construida la ciudad inca de Machupicchu. La evolución geológica plio-cuaternaria muestra una exhumación muy rápida de la cordillera, la que condicionó los fenómenos geodinámicos que dieron la geomorfología actual y los fenómenos geodinámicos que afectan a la ciudad inca de Machupicchu. Durante la ocupación inca, los andenes con sistemas de drenajes y las construcciones con techos permitían una evacuación eficaz de las abundantes aguas de lluvias; sin embargo, este no es el caso actualmente, ya que las construcciones no tienen techo y gran parte de los drenajes no funcionan, generando infiltraciones, asentamientos, erosión superficial, sufusión, derrumbes, caída de rocas y deslizamientos superficiales. Los levantamientos geológicos al detalle y los estudios específicos en varias zonas (conjuntos) permiten dar recomendaciones para una adecuada evacuación de las aguas pluviales y evitar las infiltraciones o la erosión superficial, mediante drenajes y pisos impermeables.

Palabras clave: *Geología, Geomorfología, Geodinámica externa, Machupicchu, Perú.*

**ABSTRACT:** *Geology, Morphologic Evolution and Geodynamic Phenomena of Machupicchu Inca City, Cusco-Perú.* Machupicchu, the Inca city, is located in the Eastern Cordillera of southern Peru, at 2,450 meters above sea level, and 500 m above the Urubamba River, which cuts through the Cordillera and originates a canyon with tropical mountain climate. The local substrate consists of granite outcrops and large irregularly-piled granite boulders -granitic chaos - over which the Inca city of Machupicchu was built. The Plio-Quaternary geological evolution shows a very fast exhumation of the Cordillera which determined the geodynamic phenomena, the same that originated the current geomorphology and now affect the Inca city. During Inca occupation, the drainage system of terraces and thatched-roof buildings allowed an efficient evacuation of the abundant rainfall water. However, this is no longer the case: buildings have no roof and most of the terrace drainages are not functional, leading to strong infiltration, surface erosion, suffusion, subsidence, rock falls and shallow landslides. Detailed geological surveys and site-specific studies in several areas of the city allow suggesting recommendations for an adequate evacuation of rain water with drainages and impermeable surfaces to avoid infiltration and surface erosion.

Keywords: *Geology, Geomorphology, External Geodynamic, Machupicchu, Peru.*

## INTRODUCCIÓN

El santuario histórico de Machupicchu (32.592 hectáreas) es un conjunto natural y cultural de primer orden clasificado en el inventario mundial de la UNESCO incluye la ciudad inca del mismo nombre. Este santuario está localizado en plena Cordillera Oriental del sur del Perú, con nevados que superan los 6.000 m como el Salcantay. Sin embargo, la ciudad inca de Machupicchu está situada a 2.450 m s.n.m. mostrando el verdor típico de selva. Este

contraste se debe a que el río Urubamba corta la cordillera y forma un cañón donde el río cruza el santuario, entre 2.450 y 1.800 m s.n.m. lo que permitió el desarrollo de un paisaje impresionante, caracterizado por laderas empinadas a muy empinadas, a veces verticales, en montañas agrestes, como las que rodean a la ciudad inca. A esto se suma la geología y geomorfología con rocas graníticas fracturadas y bloques de granitos apilados formando "caos graníticos", que ofrecen al paisaje un contexto asombroso y único. Este lu-

gar, tan hermoso y a la vez tan abrupto, fue escogido por los incas para construir la gran ciudad de Machupicchu.

El santuario y la ciudad inca, se ubican en el distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba y departamento o región de Cusco. La única vía de acceso directa desde Cusco a la ciudad inca de Machupicchu es la línea férrea que recorre una distancia de 112 km. También se puede llegar a ella por los caminos incas que parten desde Chilca y Mollepata, o por carretera desde Santa Teresa (Fig. 1), utilizando el nue-

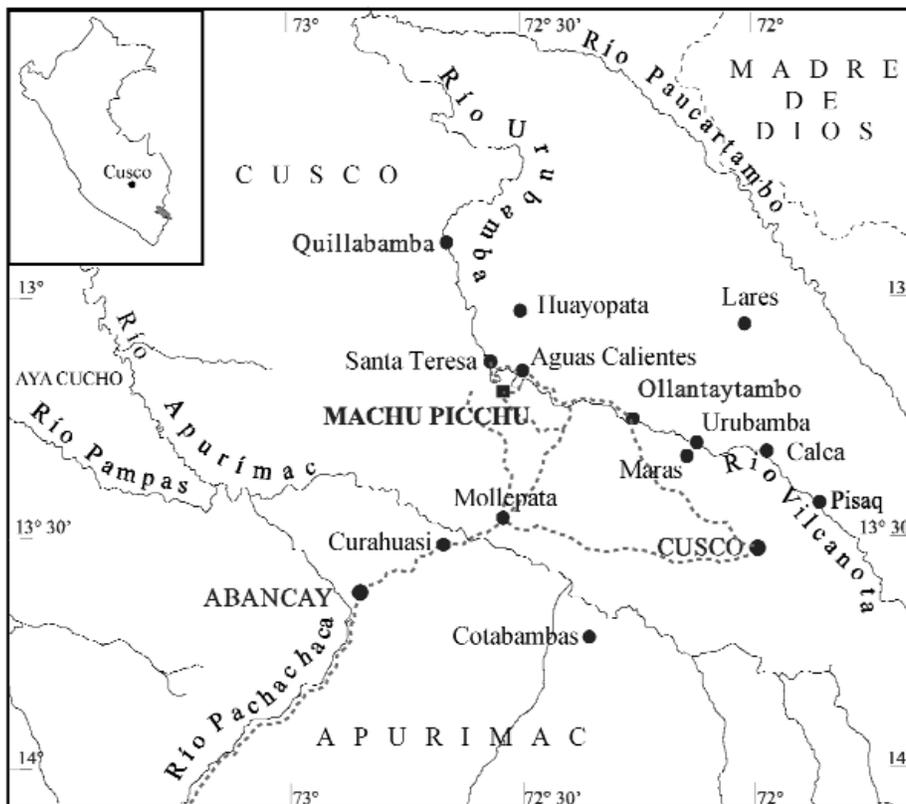


Figura 1: Mapa de ubicación de Machupicchu.

vo puente Carrilluchayoc.

En este artículo primero se trata el contexto físico, es decir la fisiografía o características del relieve, el clima y la geología del santuario histórico de Machupicchu. Luego se describe la geología de la ciudad inca, resaltando el macizo granítico y el caos granítico sobre el que fue construida la ciudad. En base a dataciones recientes se trata de interpretar la evolución tectónica Plio-Pleistocena, donde una exhumación muy rápida levanta el batolito de Machupicchu y provoca fenómenos, principalmente erosivos que le dan la configuración actual al terreno, como el desarrollo del cañón de Urubamba, así como los deslizamientos y también la formación de los caos graníticos.

A partir del conocimiento de la geología se describen los fenómenos de geodinámica externa o peligros geológicos que afectan a la ciudad, mencionando para cada caso los problemas más importantes y señalando las recomendaciones necesarias. Finalmente, se presenta rápidamente la hi-

pótesis catastrófica planteada por una misión japonesa, pero que otras misiones de investigación han descartado.

## GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

El río Vilcanota o Urubamba atraviesa la Cordillera Oriental del sur del Perú (Fig. 2), denominada localmente Cordillera Vilcabamba, y forma el cañón del Urubamba. Las vertientes suroeste y noreste del valle son bastante empinadas y tienen cumbres importantes, entre las que resaltan los nevados Salcantay (6.264 m s.n.m.) y Huamantay (5.459 m s.n.m.) al suroeste, y los nevados Verónica (5.750 m s.n.m.) y Bonanta (5.024 m s.n.m.) al noreste (Fig. 3). Al pie de los nevados se observan glaciares, valles en U, morenas, y otras evidencias de glaciaciones recientes y antiguas.

La mayoría de sitios arqueológicos, incluyendo los caminos y la ciudad inca de Machupicchu, se emplazan en la vertiente

suroeste del río Urubamba, que se caracteriza por ser muy accidentada, debido principalmente a las laderas con pendientes empinadas y los grandes desniveles que originó el río, sobre el macizo de rocas intrusivas del batolito de Machupicchu.

La Cordillera Oriental es una unidad morfoestructural que contrasta con el Altiplano en el sur del Perú (Fig. 2). Está formada principalmente por rocas metamórficas del Paleozoico inferior, rocas intrusivas de edad pérmica-triásica, así como rocas sedimentarias de edad mesozoica y cenozoica. Se caracteriza por presentar terrenos elevados y accidentados formando nevados como el Salcantay que marca el límite sur del santuario. Las principales formas desarrolladas en esta unidad son, por una parte, circos y valles glaciares, y por otra, morrenas que corresponden a formas de acumulación muy frecuentes, que se encuentran distribuidas a lo largo de las cadenas de nevados. Los valles en U, de mediana longitud, reciben durante todo el año las aguas provenientes de los deshielos, y destacan las nacientes de los valles de Aobamba y Kusichaca o Wayllabamba (Fig. 3). Las partes altas de los nevados corresponden a las elevaciones más prominentes y exhiben pendientes empinadas a muy empinadas, y en ocasiones producen aludes o deslizamientos que forman flujos detríticos (aluviones) como el ocurrido en Aobamba el año de 1998 (Carlotto *et al.* 1999).

En la parte sur del santuario destacan también el Corihuayrachina (5.404 m), Paljay (5.125 m), Tocarohuay (5.910 m), Amparay (5.418), Chaupiloma (5.339 m) y Padreyoc (5.771 m). Esta cadena de nevados sigue la dirección este-oeste y está conformada principalmente por rocas metamórficas del Paleozoico inferior, con excepción del nevado Salcantay que se levanta sobre rocas intrusivas de edad permo-triásica (Fig. 3). Los nevados tienen crestas agudas y flancos irregulares de fuerte pendiente, que contribuyen a la deglaciación que resulta del calentamiento global.

La Cordillera Oriental se encuentra disecada en el santuario por quebradas o valles

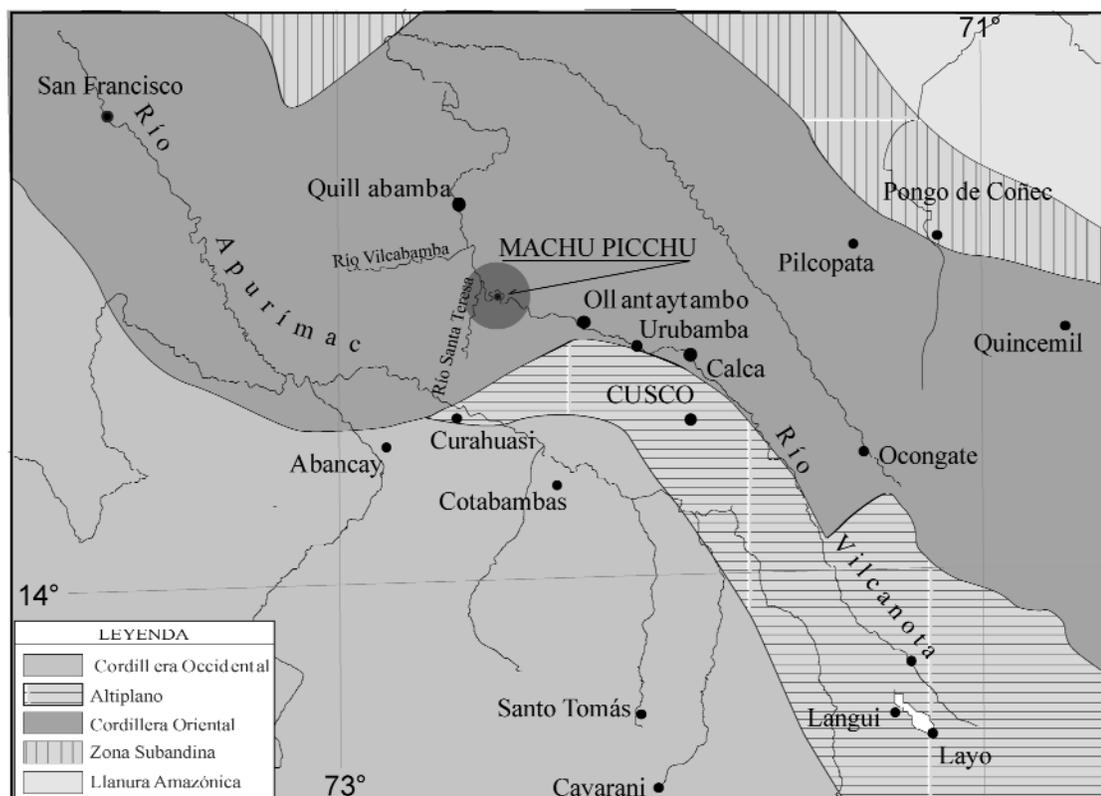


Figura 2: Mapa fisiográfico de la región sur del Perú incluyendo la zona de Machupicchu.

que son transversales al río Urubamba, donde desembocan. En la vertiente norte, las más importantes son las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo, en cuya desembocadura se localiza el poblado de Machupicchu o Aguas Calientes (Fig. 3), que es la capital del distrito. En la vertiente sur, las quebradas Aobamba y Kusichaca son los límites naturales del santuario, mientras que la de Pacaymayo se encuentra en la parte central (Fig. 3). Estos valles o quebradas son producto de la erosión glaciaria y la permanente erosión fluvial de los terrenos, y constituyen los colectores de las aguas provenientes de las montañas.

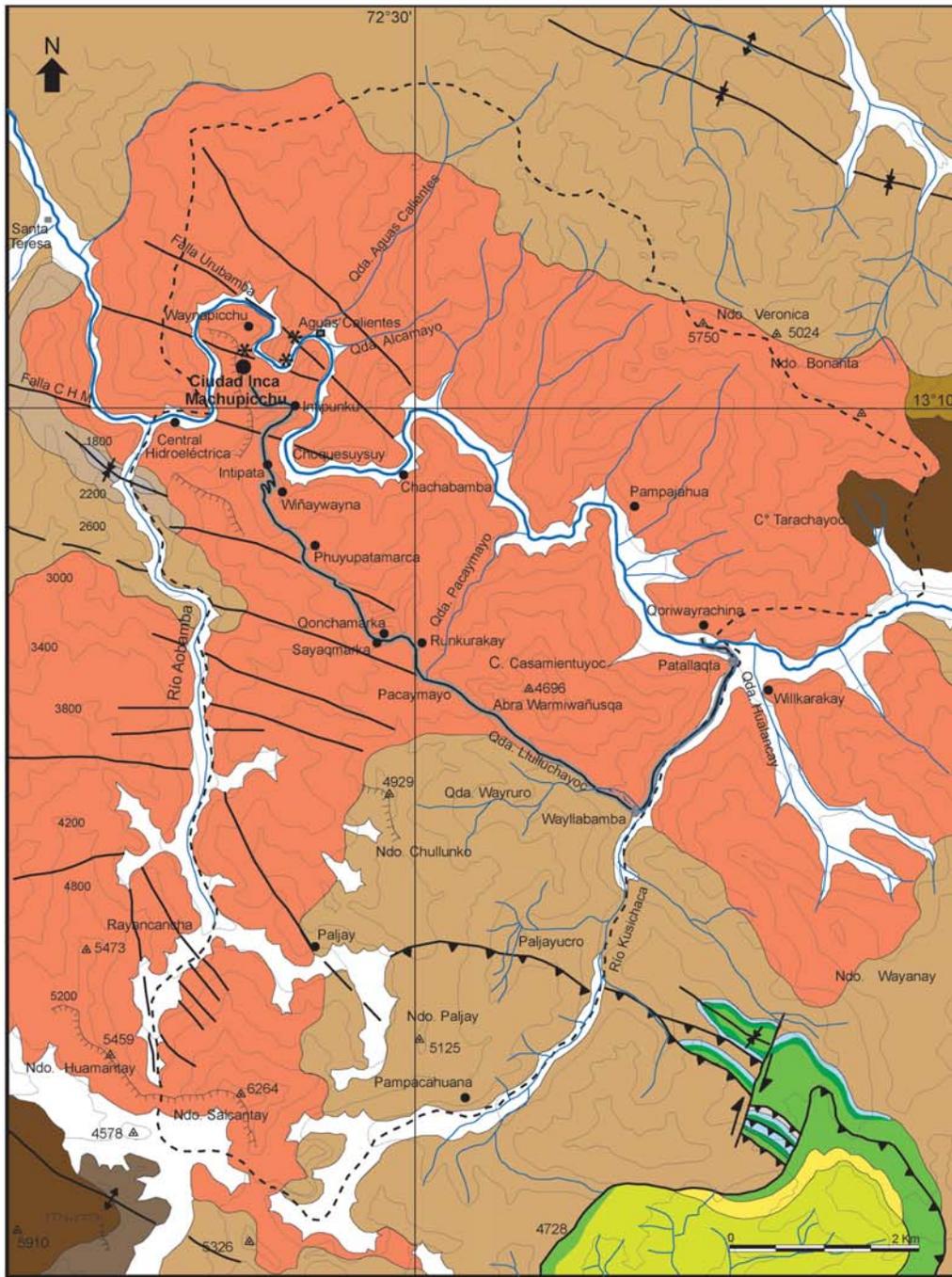
## CLIMA Y BIODIVERSIDAD

El clima en el santuario histórico de Machupicchu presenta muchos contrastes debido a la existencia de diferentes franjas climáticas relacionadas con los cambios altitudinales y la variada configuración morfológica del terreno. En forma general, el clima está caracterizado por la alternancia de una estación seca (abril a agosto) y otra con precipitaciones pluviales inci-

piantes (septiembre a diciembre), y finalmente tres meses con mucha lluvia (enero a marzo). En las zonas bajas la precipitación es abundante y se distribuye regularmente a lo largo del año.

Entre el piso de valle y aproximadamente la ciudad inca de Machupicchu, es decir, de 2.200 a 2.500 m s.n.m., el clima es cálido y húmedo, con un promedio de precipitación total anual de 2.000 mm y una temperatura media anual entre 16,5 y 14,5°C. La vegetación natural comprende una gran cantidad de especies arbóreas y arbustivas, además de helechos arbóreos, orquídeas, bromeliáceas y musgos, lo que otorga a la zona, características climáticas de "ceja de selva", a pesar de estar situada en plena Cordillera Oriental. En este contexto, la ciudad inca se caracteriza por estar rodeada de laderas con pendientes muy empinadas, con una vegetación tupida, gran abundancia de lluvias y fuerte humedad (80-90%). La temperatura media anual en la ciudad inca es de 18°C y la precipitación media anual de 2.010 mm, con una nubosidad muy fuerte, típica de la selva nublada.

Entre 2.500 y 4.750 m s.n.m., el clima varía de húmedo a subhúmedo y templado frío a frío, y frígido, con un promedio de precipitación total anual entre 600 y 1100 mm, y una biotemperatura media anual entre 18 y 1,5°C. La vegetación natural es variable, así, entre 2.500 y 3.800 m s.n.m. está conformada por bosques siempre verdes, con árboles altos (hasta 25 m) que conviven con otras formas de vida natural como trepadoras, epífitas, arbustos, etc. Entre 3.800 y 4.350 m s.n.m., el escenario vegetal está constituido por una abundante mezcla de gramíneas y otras hierbas de hábitat perenne; en algunas áreas algo planas predomina la vegetación de gramínoideas tipo pajonal e inclusiones de herbáceas tipo césped, como se observa en el Camino Inca Tradicional. Entre 4.350 y 4.750 m s.n.m. la vegetación está caracterizada por arbustos, semiarbustos y hierbas; en los lugares pedregosos o peñascosos hay líquenes y crustáceos. Entre 4.750 y más de 6.000 m s.n.m. la precipitación total anual variable gira alrededor de 800 mm, con una temperatura media anual inferior a 1,5°C. Corres-



LEYENDA

- |                     |   |                            |
|---------------------|---|----------------------------|
| MESOZOICO/CENOZOICO | Cuaternario                                 | Intrusivo (Permo-Triásico) |
|                     | Gp. San Jerónimo (Eoceno-Oligoceno)         |                            |
|                     | Fms. Quilque-Chilca (Paleoceno)             |                            |
|                     | Gp. Yuncaypata (Cretácico superior)         |                            |
|                     | Fm. Huancané (Cretácico inferior)           |                            |
|                     | Fm. Huambutío (Jurásico terminal)           |                            |
| PALEOZOICO          | Fm. San Gaban (Ordovícico terminal)         |                            |
|                     | Fm. Sandía (Ordovícico superior)            |                            |
|                     | Fm. San José (Ordovícico)                   |                            |
|                     | Fm. Veronica (Ordovícico)                   |                            |
|                     | Fm. Ollantaytambo (Ordovícico)              |                            |
|                     | Unidad indiferenciada (Cámbrico-Ordovícico) |                            |

SIMBOLOGIA

- Límite de santuario
- Camino Inca Tradicional
- Ríos y quebradas
- Sitio arqueológico
- Centros poblados
- Señal geodésica
- Falla
- Puntos de microtectónica
- Falla inversa
- Falla de rumbo
- Eje de pliegue de anticlinal
- Eje de pliegue de sinclinal

Figura 3: Mapa geológico del Santuario Histórico de Machupicchu y alrededores (Carlotto *et al.* 1999).

ponde a los sectores más altos de la Cordillera Oriental y a las zonas más abruptas. Aquí están presentes las cadenas de nevados representadas principalmente por el Salcantay y Verónica. Las únicas formas de vida observadas son algunas algas sobre la nieve misma, así como minúsculos líquenes y crustáceos que crecen sobre rocas de color oscuro, en los límites inferiores del nival y muy cerca de la tundra.

## GEOLOGÍA DEL SANTUARIO HISTÓRICO DE MACHUPICCHU

La mayor parte del santuario histórico de Machupicchu se halla sobre un conjunto de rocas ígneas intrusivas del batolito de Machupicchu, que está formado principalmente por granitos y granodioritas (Fig. 3) que han sido datados por Rb/Sr en  $246 \pm 10$  Ma (Egeler y De Booy 1961). Estas rocas se hallan cortadas por diaclasas y fallas, las que han jugado un papel determinante modelando la morfología y el aspecto que presentaba la zona cuando los incas llegaron al lugar. En el santuario afloran también rocas metamórficas del Paleozoico inferior, rocas sedimentarias de edad mesozoica y cenozoica, y depósitos cuaternarios como coluviales, fluviales y conos de deyección (Fig. 4). Sobre esos diferentes tipos de suelos y, en algunos casos, sobre los mismos afloramientos rocosos, se ha construido la mayoría de sitios arqueológicos, incluyendo la ciudad inca de Machupicchu y los caminos incas.

## GEOLOGÍA DE LA CIUDAD INCA

La ciudad inca de Machupicchu se localiza en los terrenos del santuario del mismo nombre; fue construida a una altura promedio de 2.450 m s.n.m., 500 m más arriba del valle del río Urubamba. La erosión del río en relación al levantamiento andino ha dado al valle, y particularmente a la ciudad inca y su entorno, características morfológicas particulares, con pendientes abruptas y valles cerrados que forman un gran meandro que corta el macizo rocoso

granítico (Fig. 3). A estas características se suman las condiciones climáticas, con abundantes lluvias, alta humedad, temperaturas cálidas y alta nubosidad, que han creado condiciones botánicas parecidas a las de la ceja de selva. Las precipitaciones azotan las vertientes empinadas, donde la gravedad tiene un papel muy importante, lo que explica la serie de procesos geológicos y geodinámicos como deslizamientos y los numerosos andenes construidos por los incas para la contención de las vertientes y su aprovechamiento en la agricultura. Los cerros Machupicchu, Waynapicchu y los alrededores, incluyendo la ciudad inca, están compuestos por rocas ígneas intrusivas del batolito de Machupicchu (Fig. 4). Un levantamiento geológico detallado a escala 1:500 de la ciudad ha permitido diferenciar cinco unidades cartografiadas: los granitos masivos, granitos muy fracturados y movidos por gravedad, bloques de granitos separados, y depósitos coluviales y material de relleno (Carlotto *et al.* 2007). Las tres primeras unidades cartografiadas representan a su vez etapas de la evolución geológica del sitio (Fig. 5).

### Granitos masivos

Constituyen el substrato de la ciudad inca y aparecen en sus alrededores, particularmente en los cerros Machupicchu y Waynapicchu (Fig. 4). Se trata del macizo rocoso granítico que forma parte del batolito de Machupicchu. El granito constituye la roca más abundante, de color blanco o gris, con textura granular holocristalina a veces porfirítica, compuesta por cuarzo, microclina, ortoclasa, plagioclasa, biotita, pero también se encuentra zircón, epidota y clorita. Las rocas ígneas se hallan cortadas por algunos diques de tonalita y vetas de talco serpentínico-clorítico. En efecto, en el camino inca entre los cerros Uñapicchu y Waynapicchu se ha reconocido un dique de tonalita de 0,30 m de espesor; esta roca presenta una textura de grano fino, es de tono gris claro a verde y está constituida por abundante plagioclasa, cuarzo, biotita, ortosa y hornblenda en menor proporción, con escasos máficos. Al sur de la ciudad inca y en la ladera septentrional del cerro

Machupicchu, existe una veta de talco serpentínico-clorítico, encajada en las paredes de un esquistos clorítico micáceo cuarzosos. El color del talco y del esquistos es verde oscuro a claro.

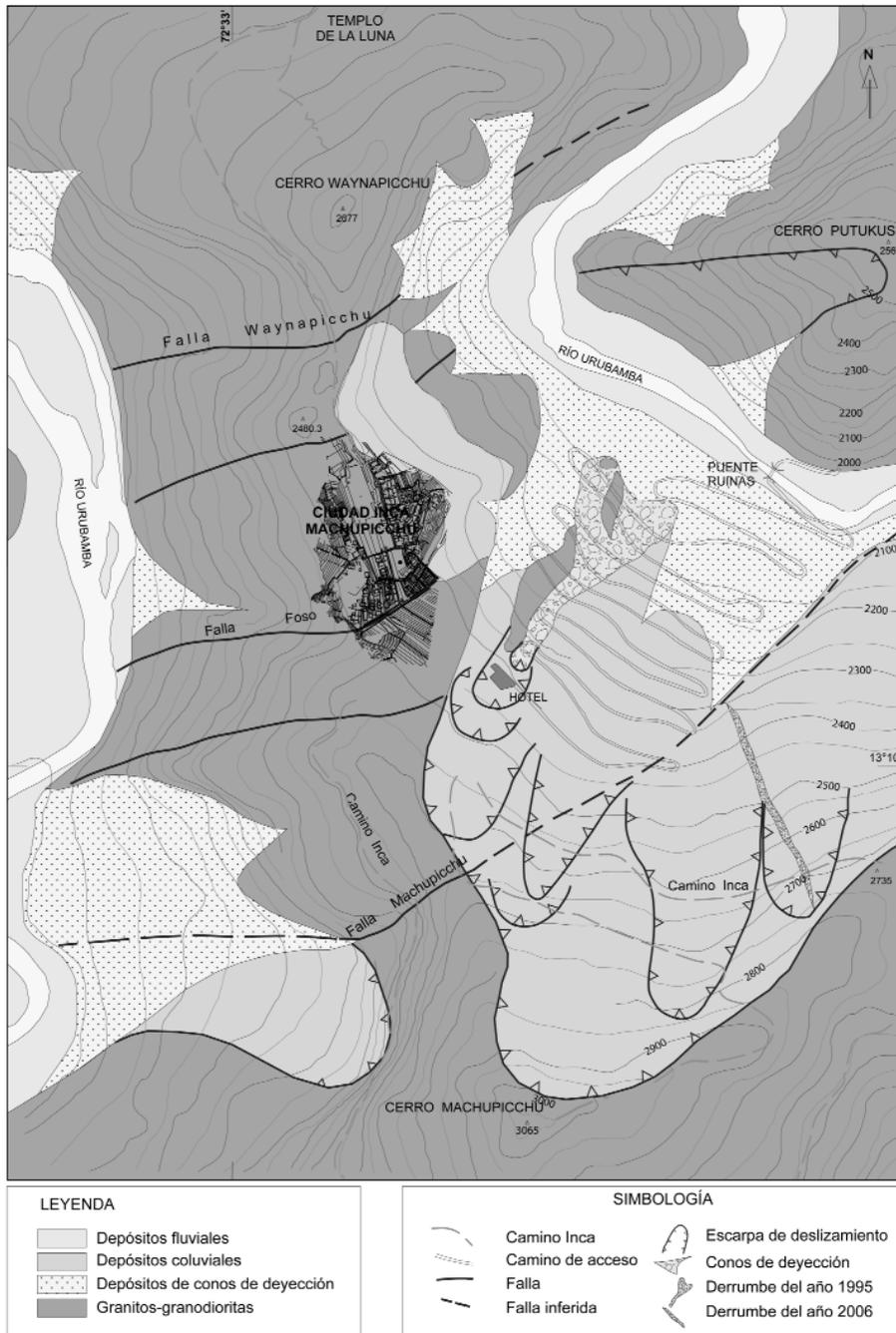
Los granitos afloran notoriamente en los bordes de la ciudad, particularmente en la ladera occidental, junto a los andenes, donde la topografía del terreno forma un fuerte precipicio hacia el río Urubamba. El afloramiento más importante se encuentra en el Conjunto 5 o Intiwatana, donde sobre el mismo macizo está labrada la famosa escultura lítica conocida como el "reloj solar". Además, parte de los andenes que bordean al Intiwatana se halla sobre la roca fija con pendientes mayores a 60°. Los granitos de Machupicchu están fuertemente fracturados por sistemas de diaclasas y fallas, que muestran tres direcciones principales: NO-SE, NE-SO y E-O. En general, los buzamientos de las fracturas son altos, con medidas entre 50° y 70°; estas fracturas son más o menos ortogonales y favorecen la desintegración de los bloques graníticos que son ayudados por el agua y la gravedad (Fig. 5a).

El granito ha sido utilizado por los incas para la construcción y constituye un buen material tanto por su composición como por su estructura (cortado por fracturas), que ha permitido una separación natural y también artificial en bloques paralelepípedos de diversos tamaños. El talco serpentínico clorítico ha sido utilizado como lascas, clavijas y losas; aún en nuestros días, los artesanos buscan esta roca como material para esculpir.

### Granitos muy fracturados y movidos por gravedad

Se denomina así a una unidad de granitos muy fracturados y que han sufrido un movimiento débil a muy débil por la gravedad. El agua que entra por las fracturas y la gravedad, hacen que los bloques de granitos más o menos paralelepípedos traten de separarse del afloramiento, pero sin haberse desprendido totalmente del substrato (Fig. 5b).

Estos materiales se presentan en algunos lugares de la ciudad inca, principalmente



**Figura 4:** Mapa geológico de la ciudad inca de Machupicchu y alrededores, tomado y modificado de Carlotto y Usselman (1989) y Carlotto *et al.* (1999).

en los conjuntos 17 del Cóndor, 15 de las Wacas, 16 de Morteros, al borde oeste del Conjunto de Andenes 9, y en el borde norte y este de la Plaza Mayor (Fig. 6). Varias de las construcciones incas tienen este material, algunas veces rodeadas por muros o andenes, como en el Conjunto del Cóndor. En otros casos, estos blo-

ques sobresalen y quedan al aire libre, como en el Conjunto de Andenes 9.

El origen de esta unidad puede considerarse como una etapa intermedia que sufren las rocas graníticas muy fracturadas, antes de convertirse, por efectos del intemperismo, en bloques de granitos separados; se formaron aprovechando las frac-

turas, la presencia de agua y la gravedad.

### Bloques de granitos separados: caos granítico

Son bloques de granitos totalmente separados de los afloramientos; se presentan con frecuencia en la ciudad, principalmente en el lugar denominado la cantera, situado al sur de la Plaza Sagrada (Fig. 5c), porque se cree que fue el lugar donde los incas explotaban el granito (Fig. 7). Esta afirmación es parcialmente cierta, ya que casi toda el área de la ciudad fue una gran cantera inca.

Esta unidad consiste en bloques de granitos de dimensiones que varían desde algunos decímetros hasta varios metros de diámetro, formando apilamientos y relieves irregulares, entre los que destacan pequeñas lomadas, como el sitio de la cantera o el Conjunto 6, que son los lugares más significativos. Otros sitios con bloques de granitos son los Conjuntos de Andenes 12 y 13, donde hay un componente importante de bloques caídos por efecto de gravedad en una ladera empinada (Fig. 6). De la cartografía detallada se desprende que, antes de la ocupación inca, la mayor parte del área de la ciudad estaba cubierta por bloques de granitos apilados y diseminados, que normalmente se conocen como caos granítico (Fig. 5c). Kalafatovich (1963) ya había interpretado la zona de la cantera como un caos granítico (Fig. 7), pero ahora sabemos que la mayor parte de la ciudad está construida sobre esta unidad (Carlotto 1993). Lo que más impresiona en Machupicchu son las obras de estabilización a todas las escalas, desde grandes conjuntos de andenes hasta muros que sostienen bloques graníticos grandes y algunos muy importantes, como el Torreón, que fue construido sobre un bloque de caos granítico. Aunque estos son ejemplos puntuales, toda el área de Machupicchu, se halla construida sobre bloques del caos granítico, en gran parte estabilizado por andenes y muros de contención.

El origen de esta unidad se explica en la figura 5 con los afloramientos de rocas que están muy fracturadas por sistemas de diaclasas y fallas más o menos ortogonales

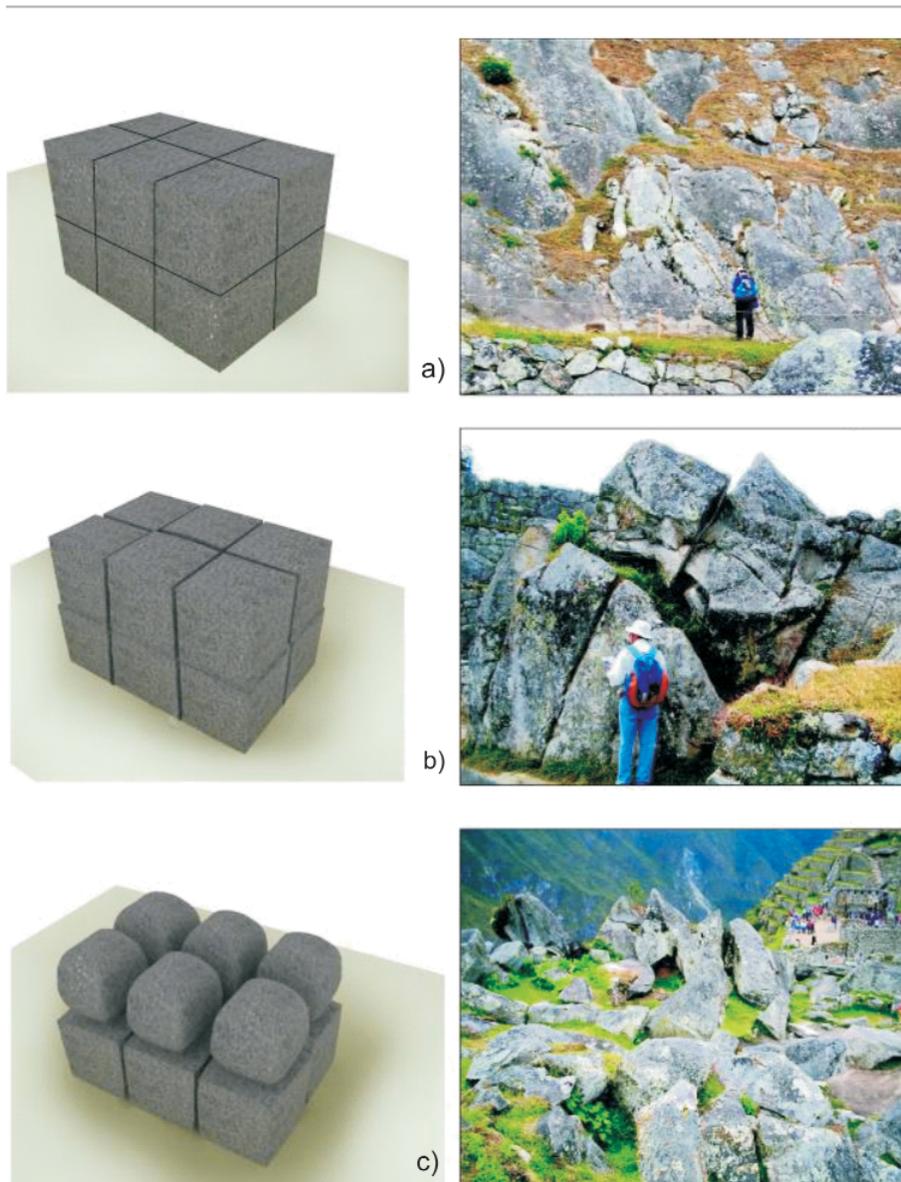
(a). De las diaclasas ortogonales se desprenden ligeramente bloques paralelepípedos por efecto del agua y la gravedad (b), y estos son erosionados progresivamente en las aristas y en las puntas, y tienden a suavizarse o redondearse, hasta formar bolones muy regulares y formar el caos granítico (c). A lo anterior hay que sumar el efecto de la gravedad, que hace caer o moverse los bloques. Esto se puede verificar en el sector denominado cantera, donde en la parte baja, hacia la ladera occidental, se ven los afloramientos de granitos (Fig. 7). Encima aparecen granitos muy fracturados, ligeramente movidos por la gravedad y finalmente se encuentran los bloques del caos granítico, en contacto progresivo. Los muros incas están fundados en la roca fija, luego rodean y estabilizan las partes del conjunto, pero sin llegar a completarlo, es decir, no rodean todo el caos, que seguramente fue el objetivo constructivo de la ciudad. Otro caso similar se observa al oeste de la Plaza Mayor, aunque aquí ya no se ven los afloramientos de granitos.

### Depósitos coluviales

Si bien los bloques de granitos son en parte de origen coluvial, se ha cartografiado como coluvial el manto superficial de suelos, que varía de espesor, desde algunos centímetros a varios metros de gravas arcillosas y bloques. Estos depósitos son producto de la descomposición *in situ* de las rocas, afectadas luego por la gravedad. Los materiales coluviales se observan en las zonas marginales de la ciudad inca, especialmente en el sector urbano oriental, y más ampliamente en el sector agrícola cerca del cerro Machupicchu, donde las gravas y bloques en una matriz areno-limosa corresponden a deslizamientos antiguos y recientes. Los incas construyeron sistemas de andenes para estabilizar estos depósitos. Finalmente, están cartografiadas también como coluviales las zonas arbóreas con abundante vegetación en los alrededores de la ciudad.

### Material de relleno-Construcciones

Corresponde a rellenos de depresiones, zonas de plataformas, sistemas de andenes



**Figura 5:** Origen del caos granítico: a) granitos fracturados en bloques; b) que tienden a separarse aprovechando las fracturas; c) que son erosionadas para formar el caos.

y construcciones que ocupan gran parte de la ciudad. El material de relleno está constituido por gravas arenosas que tienen la particularidad de haber sido trabajadas por la mano del hombre.

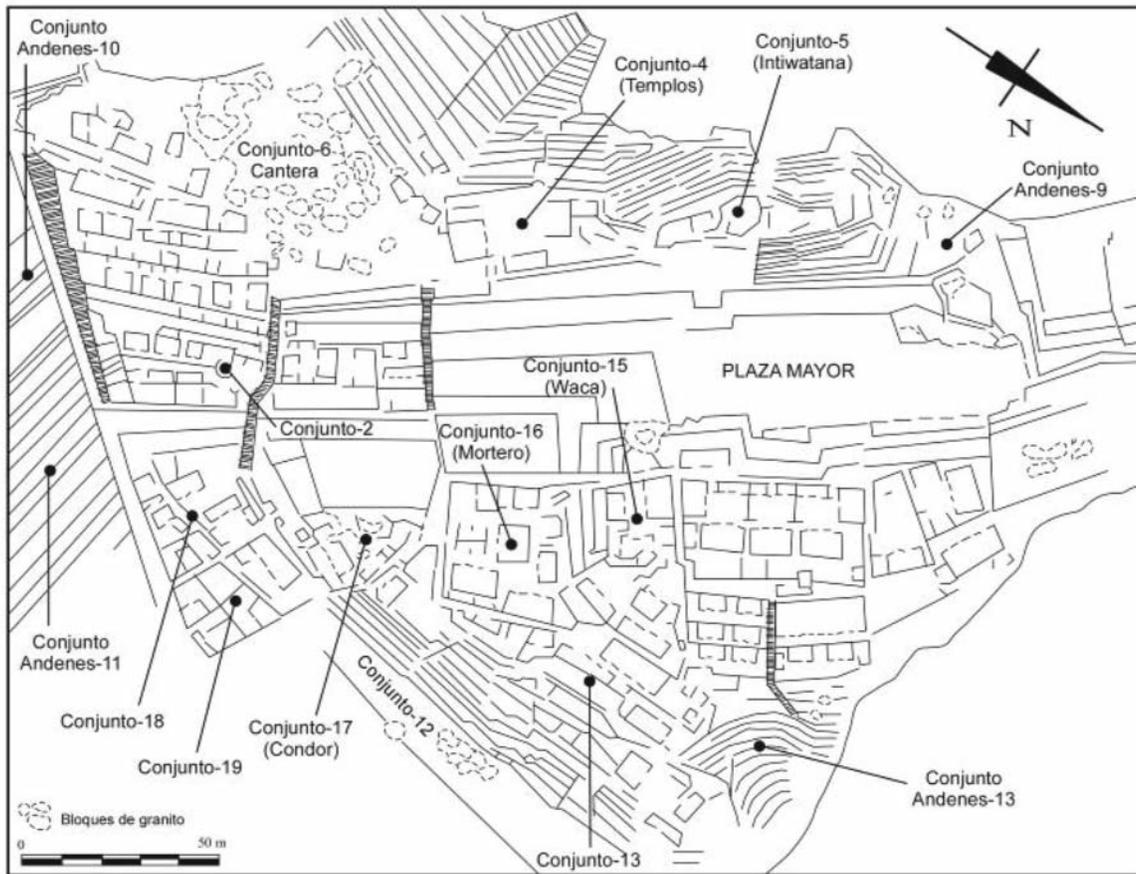
## GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El macizo granítico de Machupicchu se encuentra cortado o afectado por fracturas que pueden ser fallas o diaclasas. Estas han jugado un papel determinante modelando la morfología y el aspecto que pre-

sentaba la zona cuando los incas llegaron al lugar, así como el aspecto que muestra actualmente. Las estructuras que predominan son las fallas y las diaclasas.

### Fallas

Los estudios geológicos llevados a cabo por Carlotto *et al.* (1999) ponen en evidencia dos fallas regionales que inciden en la configuración morfológica de la zona de estudio (Fig. 3). Una de las fallas, de dirección NO-SE y escala kilométrica denominada luego Urubamba por Vilimek *et al.* (2005), pasa



**Figura 6:** Mapa de la ciudad inca de Machupicchu mostrando los conjuntos.

por parte del valle y controla la forma de meandro que tiene el río Urubamba. Otra falla, también de escala kilométrica y con dirección NO-SE, denominada Central Hidroeléctrica Machupicchu (CHM), es ligeramente paralela a la anterior, pero está situada más al sur y controla también el meandro (Carlotto *et al.* 1999, 2007).

Kalafatovich (1963) pone en evidencia un sistema de fallas con dirección NE-SO que cruza la ciudad, entre ellas destacan las fallas Waynapicchu, Machupicchu y una que se le conoce con el nombre de Foso Seco por coincidir con esta depresión que separa al sector urbano del agrícola (Fig. 4). Las fallas NE-SO, según Kalafatovich (1963), definen una minifosa que corresponde a gran parte de la ciudad inca de Machupicchu (Fig. 4).

La configuración de las fallas principales Urubamba y Central Hidroeléctrica Machupicchu, con dirección NO-SE, muestran un corredor estructural donde las fallas NE-SO de Machupicchu, Waynapicchu, Foso

Seco y otros, serían conjugadas en un sistema transcurrente sinistral. En efecto, los estudios de microtectónica en Machupicchu y alrededores (Carlotto *et al.* 1999) muestran planos de falla NO-SE con dos movimientos: uno transcurrente sinistral, que parece ser el más antiguo y el otro inverso que es posterior (Fig. 8).

#### **Diaclasas**

Otro elemento estructural en las rocas graníticas son las fracturas denominadas diaclasas. Se trata de fracturas sin desplazamiento, originadas por contracciones debidas al enfriamiento del magma, durante su consolidación dentro la corteza terrestre. Se han reconocido varios sistemas de direcciones de diaclasas, que afectan a las rocas graníticas del macizo de Machupicchu, produciendo un verdadero enjambre de fracturas. Las medidas de microtectónica muestran diferentes familias de fracturas, destacando el sistema NO-SE, luego los sistemas E-O y NE-SO

(Fig. 8). Es importante mencionar que durante las deformaciones tectónicas posteriores al emplazamiento de los granitos, los esfuerzos se han distribuido por las diaclasas y, por eso, es frecuente ver, en la mayoría de ellas, estrías de fallas en los diferentes planos. Por lo tanto, la combinación de fallas y fracturas hacen que el macizo rocoso granítico de Machupicchu haya tenido un comportamiento singular y heterogéneo en las diferentes etapas de intemperismo y erosión, facilitando las condiciones para formar verdadero caos granítico.

## **EVOLUCIÓN TECTÓNICA**

Para plantear un modelo de interpretación tectónica, recordemos que los estudios petrográficos y geoquímicos indican que el batolito se formó al interior de la corteza hace 246 millones de años, en un contexto de rift continental donde dominaban los esfuerzos en extensión o distensión que rompen la corteza (Fig. 9). Es po-

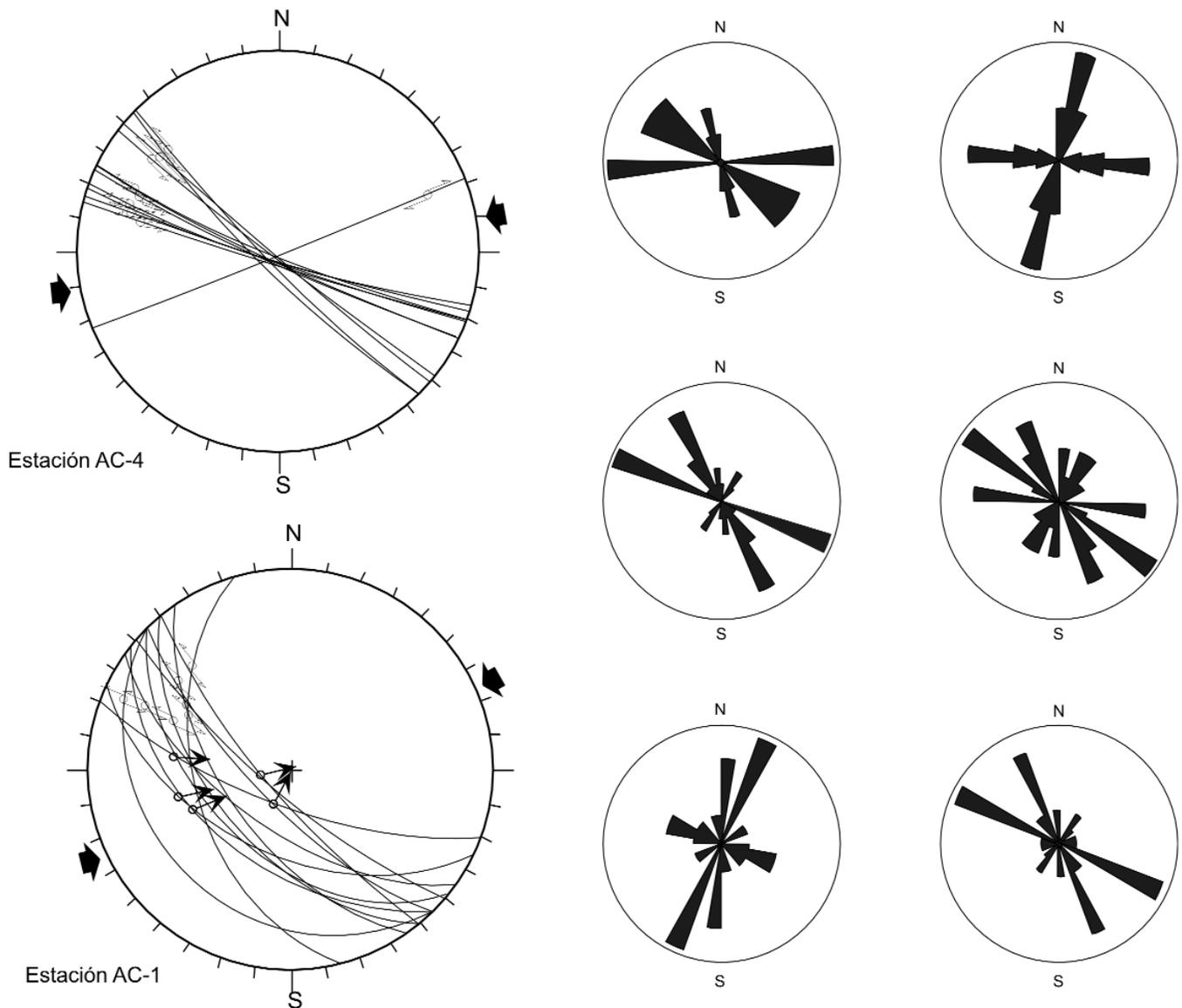


**Figura 7:** Caos granítico en el sector conocido como La Cantera.

sible que los movimientos sinestrales hayan estado relacionados al esfuerzo en extensión y, además, hayan controlado el emplazamiento de los cuerpos graníticos. En efecto, el emplazamiento del magma habría sido parcialmente sintectónico ya que en las rocas se observan estructuras con desarrollo de foliaciones y blastomilonita. Posteriormente, durante la evolución andina y particularmente en el Eoceno, entre 43 y 30 millones de años, las fallas NO-SE actuaron como fallas inversas e indican un esfuerzo compresivo regional NE-SO, como es bien conocido en la región de Cusco (Carlotto 1998). En esta época se produce parte del levantamiento de los Andes y por lo tanto la erosión de las rocas de la parte superior de la corteza. Sin embargo, es durante el Plio-Pleistoceno que ocurre una exhumación rápida que permite sacar al afloramiento los granitos desde la profundidad de la corteza. Consecuentemente, el río Urubamba se desarrolló; donde la intersección de fallas

NO-SE y NE-SO han controlado la configuración del río y particularmente el meandro que tiene en consecuencia un origen tectónico. Las fallas NE-SO han complementado el patrón estructural para la formación del meandro y la configuración de la ciudad, particularmente el graben o semifosa descrita por Kalafatovich (1963). Para comprender mejor este levantamiento y la configuración actual se ha tomado información nueva de dataciones por trazas de fisión en apatitos (FT). En efecto, Kennan (2008) recolectó muestras del granito de Machupicchu cerca de Aguas Calientes, a lo largo del camino inca y la línea férrea Cusco-Machupicchu. Las muestras colectadas sobre un rango de elevación de 1.500 a 4.500 m s.n.m., intentaban medir las tasas de exhumación del área, pero solo dos muestras, una a 2.100 m s.n.m. y la otra a 3.100 m s.n.m., proporcionaron suficiente apatito. Desafortunadamente, estas dos muestras están separadas por solo 1.000 m y ningún

apatito fue obtenido sobre elevaciones extremas de la transecta, frustrando la intención original del trazado de edad versus elevación que permitiría definir de manera más precisa la tasa de exhumación (Kennan 2008). Sin embargo, estos datos de dos puntos, sugieren una exhumación joven extremadamente rápida de  $> 1$  km/Ma durante el Plioceno tardío-Pleistoceno (alrededor de 2,2 Ma, Kennan 2008) pero podrían llegar hasta cerca de 5 km/Ma. Esto es ciertamente consistente con la aparentemente topografía juvenil, profundamente cortada del área de Machupicchu. Por otro lado, en el límite sur de la Cordillera Oriental y mas precisamente en los flancos sur y norte del río Apurímac, en el camino de acceso a Choquequirao (30 km al SO de Machupicchu), Van Heiningen *et al.* (2004 y 2005) obtuvieron edades de enfriamiento en apatito. Las edades de enfriamiento en el flanco sur son similares a aquellos del Batolito Andahuaylas-Yauri indicando una exhumación en el Mioceno



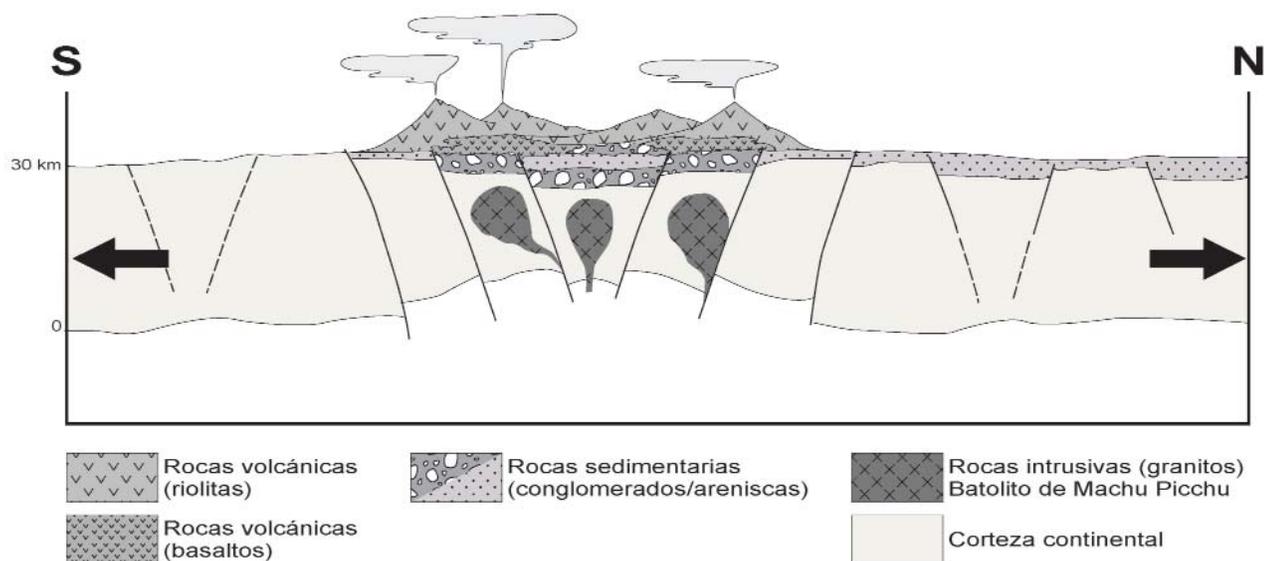
**Figura 8:** Diagramas mostrando la cinemática de fallas y dirección de diaclasas que afectan los granitos.

superior ( $7,3 \pm 1,0$  y  $6,5$  Ma), con tasas de alrededor  $1,5$  km/Ma. Por otro lado, en el flanco norte se han encontrado las edades más jóvenes con una exhumación durante el Plioceno tardío-Pleistoceno ( $1,9 \pm 0,2$  Ma), con tasas de alrededor  $5$  km/Ma. Esto muestra un movimiento diferencial entre ambos flancos y corrobora un movimiento cuaternario de la falla Apurímac. Lo más importante para el caso de estudio de Machupicchu, es que los datos del flanco norte del Apurímac son similares al del río Urubamba, ya que coincide casi exactamente con los valores de Kennan (2008). Esto quiere decir que

el batolito de Machupicchu tuvo una exhumación importante al límite Plioceno tardío-Pleistoceno con tasas de alrededor  $5$  km/Ma, asociado a una tectónica de basamento, es decir, en términos simples que el batolito de Machupicchu se levantó muy rápidamente como un gran y solo bloque hace aproximadamente  $2$  Ma. En consecuencia, los principales procesos de la evolución del paisaje actual comenzaron a actuar, o mejor dicho se reactivaron a partir de ese momento, es decir, los procesos erosivos y la formación del cañón del Urubamba.

Vilímek *et al.* (2005) han sintetizado de

manera clara estos principales procesos, definidos previamente por Carlotto y Usselman (1989), Carlotto (1993), Carlotto *et al.* (1999, 2007), Sassa (2001) y Sassa *et al.* (2005) que tienen que ver con la evolución del paisaje en el área de Machupicchu y son: 1) Levantamiento tectónico que incrementa los procesos exogenéticos, ahora sabemos una exhumación rápida y joven alrededor de  $2$  Ma (Kennan 2008), 2) Intensa erosión del río en una zona controlada por la tectónica antigua, es decir control de las fallas en zona de erosión, principal y particularmente en sitios de cruce de grandes fallas, por ejemplo para



**Figura 9:** Modelo de formación del batolito de Machupicchu en un contexto de rift continental durante el Permo-Triásico.

formar el meandro tectónico (Fig. 3), 3) Varios tipos de movimientos de ladera, y 4) Intensa meteorización a lo largo de zonas de rotura, formando por ejemplo, los caos graníticos (Carlotto 1993, Carlotto *et al.* 1999 y 2007).

En conclusión podemos decir que en la zona de estudio, las formas de erosión dominan el relieve pero con fuerte control estructural en la evolución del paisaje (Vilímek *et al.* 2005). La erosión intensa y profunda del río Urubamba ha creado un cañón en el que no existen terrazas fluviales, por lo rápido de la exhumación. Esto habría permitido establecer etapas antiguas en el desarrollo del proceso de erosión del río, que sigue zonas o lineamientos tectónicos mayores como las fallas Machupicchu, Waynapicchu y Urubamba (Carlotto 1993, Vilímek *et al.* 2005), bien registradas por las medidas estructurales (Fig. 8). En el cauce del Urubamba es posible encontrar rápidos en los sitios donde estas fallas principales cruzan el valle (Vilímek *et al.* 2005). El perfil longitudinal del río no está aún adaptado al levantamiento tectónico en la amplia región del batolito de Machupicchu. Entre las formas de relieve dominantes están las acumulaciones de los conos aluviales producto de huaycos o aluviones. Ahora sabemos que el batolito ha

sufrido una fuerte exhumación con tasas de alrededor 5 km/Ma al límite Plioceno-Pleistoceno, es decir a partir de esa época empezó lo principal de la erosión ligada al levantamiento andino (incisión del río Urubamba, desarrollo de grandes deslizamientos), así como los procesos de deposición particularmente los conos aluviales ligados a grandes aluviones. Adicionalmente, no habiendo evidencias de actividad sísmica ni neotectónica reciente, diremos que este levantamiento, como un gran bloque, controló la evolución geomorfológica regional, donde las zonas de debilidad como las fallas principales dominaron las zonas de mayor erosión por donde circuló el río Urubamba formando por ejemplo un meandro tectónico, por lo que se puede hablar de al menos la influencia pasiva de la tectónica sobre esta evolución (Vilímek *et al.* 2005).

Para finalizar, mencionaremos que a pesar de no haber evidencias de actividad sísmica, en nuestros días existe una preocupación muy difundida sobre los peligros sísmicos que podrían afectar al santuario y las construcciones incas, incluyendo la ciudad. Un examen detallado de la ciudad inca muestra que las fallas no presentan movimientos recientes, al menos los últimos 2 Ma, es decir, no están activas (las fallas activas generalmente producen sis-

mos). La región de Cusco presenta antecedentes sísmicos, tanto históricos como instrumentales, entre los que destacan aquellos ocurridos en 1950 y 1986, que estuvieron relacionados con el sistema de fallas activas que se alinean entre Cusco y Abancay (Fig. 1), que pasan por el sur del santuario, en el límite entre la Cordillera Oriental y el Altiplano. Sin embargo, en ningún caso la ciudad inca y la mayor parte del santuario fueron afectadas, tal como se puede ver en el mapa de isosistas de ambos sismos. A pesar de la intensidad registrada en los epicentros localizados en los alrededores de Cusco, que sobrepasó el grado VI y VIII en la Escala Modificada de Mercalli, el sitio de Machupicchu no fue afectado por ellos. En efecto, la intensidad alcanzó niveles mucho más bajos (entre II y III) a la altura de Ollantaytambo, localidad ubicada entre Cusco y Machupicchu (Fig. 1). Esto confirma, en ambos casos, que posiblemente el granito del batolito atenuó las ondas sísmicas (Bouchard *et al.* 1992). Además, en las construcciones incas no se han identificado daños por efectos sísmicos. En conclusión, las estructuras geológicas regionales más importantes en el santuario son las fallas tectónicas que la atraviesan, pero en ningún caso son fallas activas que puedan producir sismos y dañar las construccio-

nes incas (Carlotto *et al.* 1999).

## GEOMORFOLOGÍA LOCAL

La geomorfología de Machupicchu tiene un fuerte control estructural o tectónico. En efecto, se ha mostrado la existencia de dos fallas regionales NO-SE, denominadas Urubamba y Central Hidroeléctrica Machupicchu (Fig. 3), que forman un corredor estructural dentro del cual se han desarrollado las fallas NE-SO de Machupicchu, Waynapicchu, Foso Seco y otros (Fig. 4). Esta distribución tectónica ha influenciado la forma del río Urubamba, el meandro y particularmente el graben sobre el cual fue construida la ciudad. Además, las fallas controlan las laderas empinadas, donde se desarrollan deslizamientos como del cerro Machupicchu.

En terrenos graníticos, como es el caso de la ciudad inca de Machupicchu, el paisaje controlado por fallas y diaclasas ha originado relieves particulares con apilamientos de bloques de roca, dando lugar al caos granítico. Este tipo de relieve resulta de la intersección, algo perpendicular, de los sistemas de fracturas que en este caso son tres principales: NO-SE, NE-SO, E-O (Fig. 8), y delimitan bloques de formas más o menos paralelepípedas (Fig. 5a). Estos bloques se han preformado en profundidad ya que las diaclasas son producto del enfriamiento del magma. Luego de la fuerte exhumación al límite Plioceno-Pleistoceno, cuando las rocas salen a la superficie y se liberan de la carga que ejercían las masas rocosas suprayacentes al granito, son favorecidas por los efectos del intemperismo. En este contexto, las aguas de lluvias se infiltran siguiendo las fracturas, cuyas superficies además pueden estar alteradas con presencia de arcillas. En consecuencia, las aguas lavan o erosionan el material fino, sobre todo al nivel de los ángulos de intersección y dejan libres los bloques que van adquiriendo formas subredondeadas típicas en las rocas intrusivas (Fig. 5c). Los bloques ya redondeados o bolones formados de esta manera, pudieron entonces desprenderse, descender o caer lentamente por sim-

ple gravedad, apilándose unos sobre otros y formando verdaderos cúmulos o amontonamientos conocidos como caos granítico (Fig. 10).

Antes de la llegada de los incas, la morfología de la zona tenía una depresión (graben) irregular (Fig. 10a) entre los cerros Machupicchu y Waynapicchu, controlada por las fallas NE-SO. Esta depresión forma una cumbre (montura) con dirección casi N-S, que delimita dos laderas abruptas, una oriental y otra occidental, ambas miran al río Urubamba por efecto del meandro, ubicado 500 m más abajo.

La depresión irregular (graben) se caracterizaba por ser un sitio de gran caos granítico (Fig. 10b), con lomas y desniveles; los incas encuentran el lugar e inician la construcción de la ciudad, limpiando los bloques muy inestables, rellenando las depresiones, como la Plaza Mayor, estabilizando las laderas del caos mediante andenerías y muros, e instalando sistemas de drenajes para evacuar las aguas de lluvia que son importantes en la zona. Solamente después, y encima de estos sitios estabilizados, los incas iniciaron la construcción de templos y viviendas (Fig. 10c).

## FENÓMENOS DE GEODINÁMICA EXTERNA

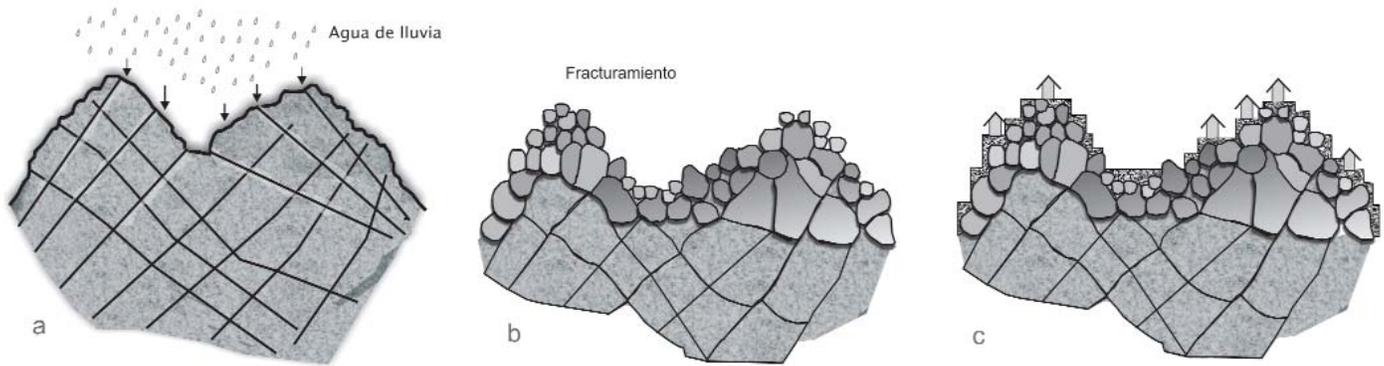
Gran parte de los trabajos de investigación que han realizado diversos autores (incluidos los de Carlotto y colaboradores), desde el año 1987 hasta el 2007, llegan a la conclusión que los fenómenos que afectan a la ciudad son de geodinámica externa, cuyo origen se relaciona con el agua y la gravedad. Hay dos tipos de circulación de las aguas subterráneas: uno de ellos es la circulación a través de planos de fallas y diaclasas en los granitos, que parece favorecer en algunos lugares a un drenaje natural muy eficiente; al parecer, fue utilizada por los incas, por ejemplo en el Conjunto Cóndor, o al noroeste y al este de la Plaza Mayor. Este tipo de circulación y drenaje de las aguas no suele tener consecuencias graves en la arquitectura, salvo cuando las diaclasas sirven de canal de concentración para las

aguas que reaparecen en la parte baja de las construcciones, donde pueden tener un efecto destructivo, tal como se observa en el Conjunto 19 o al sureste del Intiwatana, donde la abertura de una diaclasa antigua puede eventualmente producir la caída de un gran bloque de granito hacia la Plaza Mayor (Carlotto y Usselman 1989, Bouchard *et al.* 1992). El otro tipo, la circulación superficial bajo las construcciones, en el material de relleno o en el caos granítico, se relaciona con los problemas de conservación que aparecen en la ciudad y que serán presentados más adelante.

Para comprender mejor los fenómenos de geodinámica externa se debe recordar que la ciudad inca de Machupicchu fue fundada principalmente sobre un caos granítico, en una zona bastante inestable que los incas estabilizaron mediante andenes y muros, y solamente después comenzaron la construcción de viviendas y templos (Fig. 10c). Durante la ocupación inca, los andenes, y en general todas las construcciones, eran conservados mediante canales de drenaje dentro un sistema planificado de desagüe, que permitía la evacuación integral de las abundantes aguas pluviales, de la zona. Además, las viviendas tenían techos cuyas caídas estaban integradas a los sistemas de drenajes. Actualmente las construcciones no tienen techo y los sistemas de drenaje inca ya no funcionan. Los fenómenos de geodinámica externa identificados en la ciudad inca de Machupicchu se describen a continuación, mostrando los ejemplos más característicos con las principales recomendaciones.

### Asentamientos

Los asentamientos son desplazamientos verticales del suelo. Se originan por la sobrecarga o peso de las estructuras edificadas y los bloques de caos granítico en los suelos, que al saturarse con agua pierden su capacidad de carga, causando movimientos y reajustes de bloques. Otro caso de asentamiento ocurre donde existe caos granítico, ya que las aguas pluviales penetran por las fracturas o espacios abiertos, erosionando por sufusión parte del suelo existente, que puede ser el soporte de los



**Figura 10:** Caos granítico y propuesta hipotética de la construcción de la ciudad inca de Machupicchu: a) morfología del terreno donde las aguas de lluvia penetran las fracturas y fallas, y ayudan a la gravedad a separar los bloques de granito y b) formar el caos granítico; c) los incas encuentran el sitio de caos granítico y lo estabilizan mediante andenes, muros y plataformas, para luego construir sus templos, viviendas, almacenes, etc.

bloques y entonces estos se mueven o se asientan buscando un nuevo equilibrio. Los reajustes de bloques graníticos afectan las edificaciones que soportan, tal es el caso de la Puerta de las Sierpes que forma parte del Torreón y fue construida sobre un bloque de caos granítico. No obstante, el caso más emblemático en la ciudad inca es el asentamiento del muro norte del Templo Principal (Fig. 11).

En el Templo Principal existe un fuerte asentamiento diferencial de la parte este de la pared norte, que presenta separación de juntas de hasta 0,40 m entre los bloques de piedra labrada. En la parte oeste de la pared central norte se ven también pequeñas separaciones de juntas que parecen estar relacionadas con pequeños asentamientos diferenciales. Igualmente, en el Templo de las Tres Ventanas se observa el asentamiento de toda la fachada este (Fig. 12) y además un desajuste con las paredes norte y sur. La causa del desajuste de las piedras labradas es que el piso interno presenta una inclinación ligera hacia el este, permitiendo la concentración de agua en el punto de contacto con la pared. Como existe un desnivel entre la pared interna y externa, que en parte está relleno por suelo, este recibe las filtraciones que lo saturan y al aumentar de volumen ejerce una presión hacia el este, provocando la separación de las juntas que se observan en las paredes laterales. Las recomendaciones para la conservación de la Plaza Sagrada y Templos incluyen la

compactación del terraplén que ha sido perturbado por las diferentes excavaciones e impedir la infiltración de agua de lluvia, incluyendo los pisos de los templos, para lo cual se deben mejorar los pisos impermeables con una leve pendiente hacia el oeste para poder evacuar el agua fuera de los templos. Asimismo, se debe monitorear las separaciones de las juntas en los templos y otros conjuntos; es necesario colocar calces entre los bloques de la fachada posterior del Templo Principal para amortiguar y repartir mejor las presiones (Bouchard *et al.* 1992) y se debe evitar la presencia de agua en el recinto utilizado como jardín.

Finalmente, para impedir las filtraciones de las aguas, se propone un flujo de drenaje que debe adecuarse con los pisos impermeables (Fig. 13, Carlotto *et al.* 2007). El Conjunto 2 ocupa la parte sur del Sector Urbano (Fig. 6). El sitio principal del conjunto se compone de dos pisos: la primera planta se conoce como Tumba Real, mientras que la segunda planta se denomina Torreón o Templo del Sol (Recinto 2) que, dentro del recinto semicircular, es un bloque pétreo del caos granítico (Fig. 14). El recinto semicircular (Recinto 2) continúa en un amplio ámbito rectangular (Recinto 4), con hornacinas y vigas pétreas falsas de caras rectangulares y se comunica con la segunda planta de otro edificio, llamado el Aposento de la Ñusta (Recinto 5). Al norte del Torreón, separado por las fuentes litúrgicas, se encuentra el Recinto 1 ó Centro

Ceremonial (Fig. 15).

Los problemas geodinámicos, geotécnicos y las causas del deterioro en el Torreón, Tumba Real, Centro Ceremonial y Aposento de la Ñusta están relacionados con los problemas de infiltración. Las aguas provenían, y continúan haciéndolo de la rotura y las filtraciones del conducto subterráneo que distribuye el agua entre las fuentes litúrgicas, ubicado junto al Torreón. Por otro lado, gran parte de las aguas pluviales no se evacuan debidamente fuera del Conjunto 2, que recibe muchas filtraciones desde el callejón que pasa al oeste del Torreón, y también desde los pisos descubiertos. La cantidad de agua que se estanca, y que luego se infiltra, es importante. Estos fenómenos han generado la pérdida de capacidad de carga del suelo, y de esto derivan los hundimientos y los asentamientos diferenciales que se observan en los bloques. Estos movimientos han contribuido al desajuste de las paredes construidas al lado o encima de los bloques, como en el caso del Torreón. Por otro lado, el desarrollo de musgos y las manchas de humedad dentro de la Tumba Real son indicios de la presencia de agua en las paredes oeste y norte, y confirman la existencia de las infiltraciones.

Además de los asentamientos que repercuten en la mampostería del Torreón, las paredes de la Tumba Real, el Aposento de la Ñusta y el Centro Ceremonial, otros daños son las fracturas de la roca labrada de los muros de la Tumba Real, que se deben



**Figura 11:** Templo Principal, asentamiento diferencial de la pared interior norte.



**Figura 12:** Templo de las Tres Ventanas con separación de juntas en las paredes norte y sur debido a asentamientos. Vista tomada mirando al sur.

a una inadecuada repartición de la carga ejercida por el gran bloque sobre el que se instala el Torreón. En la parte superior de éste, las roturas son notables (Fig. 16) y parece posible que los bloques hayan sido debilitados por el calor originado por un antiguo incendio que mencionan algunos arqueólogos y cronistas.

Una de las medidas recomendables es cerrar los accesos al Torreón y no utilizar la escalera monolítica inca. Asimismo, para evitar las infiltraciones se debe impermeabilizar los pisos, sobre todo en la parte norte del Conjunto 2, y proteger las cabezas de muros para evitar infiltraciones directas en la mampostería. También se debe establecer un sistema de desagüe que permita canalizar las aguas pluviales fuera del sector, alejando el flujo de las bases de las construcciones, y se deben monitorear los conductos y fuentes litúrgicas refaccionadas, así como la Tumba Real, Torreón y Casa de la Ñusta, para establecer si estas medidas logran detener los asentamientos. Una medida adicional, y de carácter preventivo contra la humedad que satura la Tumba Real, es colocar una caja de cal viva y renovarla frecuentemente para limitar el crecimiento de musgos. Se recomienda además el registro de testigos, medir el grado de humedad, llevar un control y registro gráfico del crecimiento o del receso de los musgos presentes en esta estructura. Para resolver el problema de las infiltraciones se propone un sistema de drenaje (Fig. 15) propuesto por Carlotto *et al.* (2007). Finalmente, se debe dar tratamiento a las rocas de las cabezas de los muros que muestran intemperismo y disgregación de minerales, particularmente en la parte posterior de la Puerta de las Serpes (Fig. 16).

### Erosión superficial

La escorrentía de las aguas pluviales, en la superficie del suelo, origina problemas cuando las pendientes son empinadas y no tienen vegetación, ya que erosiona superficialmente el material presente, sea fino o ligeramente grueso. Como ejemplo, se puede citar al Intiwatana que hasta 1990 se encontraba muy expuesto, particular-

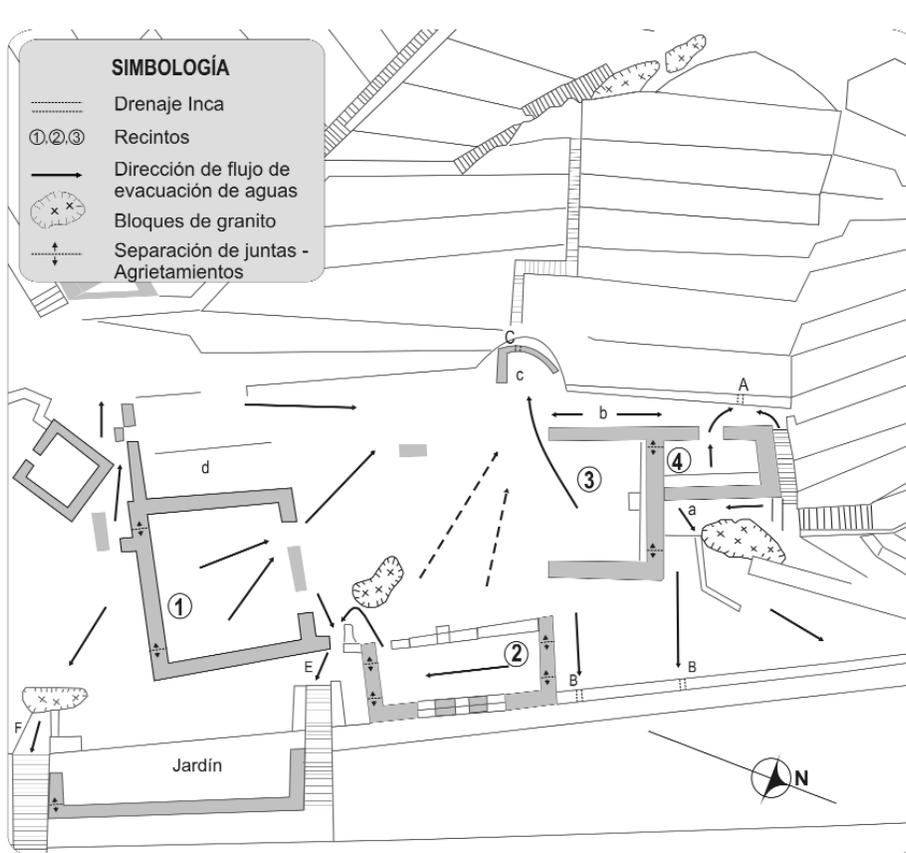


Figura 13: Propuesta de drenaje para la Plaza Sagrada y Templos (Conjunto 4). Tomado y modificado de Carlotto *et al.* (2007).

mente en la ladera oriental, donde la ausencia de una pared de andenería ponía en evidencia el comienzo de una fractura y un desmoronamiento peligroso por escorrentía y erosión superficial; actualmente un piso impermeable controla esta situación. Se ha identificado un punto muy peligroso en la plataforma y muro sur del Intiwatana (Fig. 17), que puede colapsar por la influencia del peso originado por la presencia masiva de turistas. La plataforma se encuentra sobre un muro con signos de deformación e infiltraciones de agua, en una ladera casi vertical con un desnivel de 20 m hacia la Plaza Mayor. En este caso se recomiendan pisos impermeables inclinados al sur y al oeste, para evitar la infiltración, así como la restauración del muro y volver a colocar los cordones de seguridad. Otras recomendaciones para el Intiwatana son seguir el sistema diagrama de drenaje (Carlotto *et al.* 2007) y la impermeabilización de los

pisos, aunque varios de ellos ya fueron realizados por el Instituto Nacional de Cultura-Cusco. También se deben estabilizar los desprendimientos de rocas y mantener en buen estado el sistema de andenes, tomando en cuenta los drenajes y la vegetación.

Otro ejemplo ocurre en el camino inca a Waynapicchu, que muestra huellas de lavado y erosión por efecto de las aguas pluviales que ponen a la luz las raíces de los árboles y arrastran rápidamente importantes cantidades de suelo.

### Sufusión

Es un proceso que genera pequeñas geofomas de colapso o hundimiento, de escala centimétrica a métrica, que se forman debido al lavado o erosión de material fino que sirve como matriz entre los bloques de granito. Esto ocasiona que los bloques se reacomoden y se muevan, afectando a las edificaciones levantadas sobre estos,



**Figura 14:** Vista panorámica del Torreón, Tumba Real, Centro Ceremonial y escalinata de acceso construidos sobre bloque del caos granítico.

como en el caso del Torreón. Este fenómeno se presenta también en la plataforma de los caminos, en los muros y en la base de los edificios, debido a la erosión del material fino que se halla como matriz en la base de la cimentación que ocasiona a su vez asentamientos y hundimientos (Fig. 18).

Como ejemplo mencionaremos el Conjunto 13 que es una agrupación de varios recintos localizados al borde oriental de la ciudad inca de Machupicchu (Fig. 6). La parte más septentrional de este conjunto es una de las zonas con mayores problemas de conservación pues varios muros han colapsado (Fig. 18) y otros tienen agrietamientos. En varios recintos se observan sitios con sufusión, así como rastros de zonas húmedas por empozamiento de las aguas pluviales. Los Recintos 7, 8, 9 y 10 se hallan bastante destruidos, ya que han perdido su inclinación original y en el interior de algunos se observan amontonamientos de piedras procedentes de los muros caídos (Fig. 18); la vegetación ha crecido bastante y contribuye a la destrucción de los muros. Las causas de estos problemas son la erosión de las cabeceras

de los muros por el agua de lluvia que ha debilitado la argamasa y ha producido el derrumbe de las paredes, y por otra parte, la concentración de aguas pluviales que han originado sufusión con posteriores asentamientos diferenciales y el colapso de los muros. Además, los andenes ubicados en el límite entre el Conjunto 13 y el Conjunto de Andenes 13 presentan problemas de separación de juntas y sufusión que desestabiliza los bloques de granito.

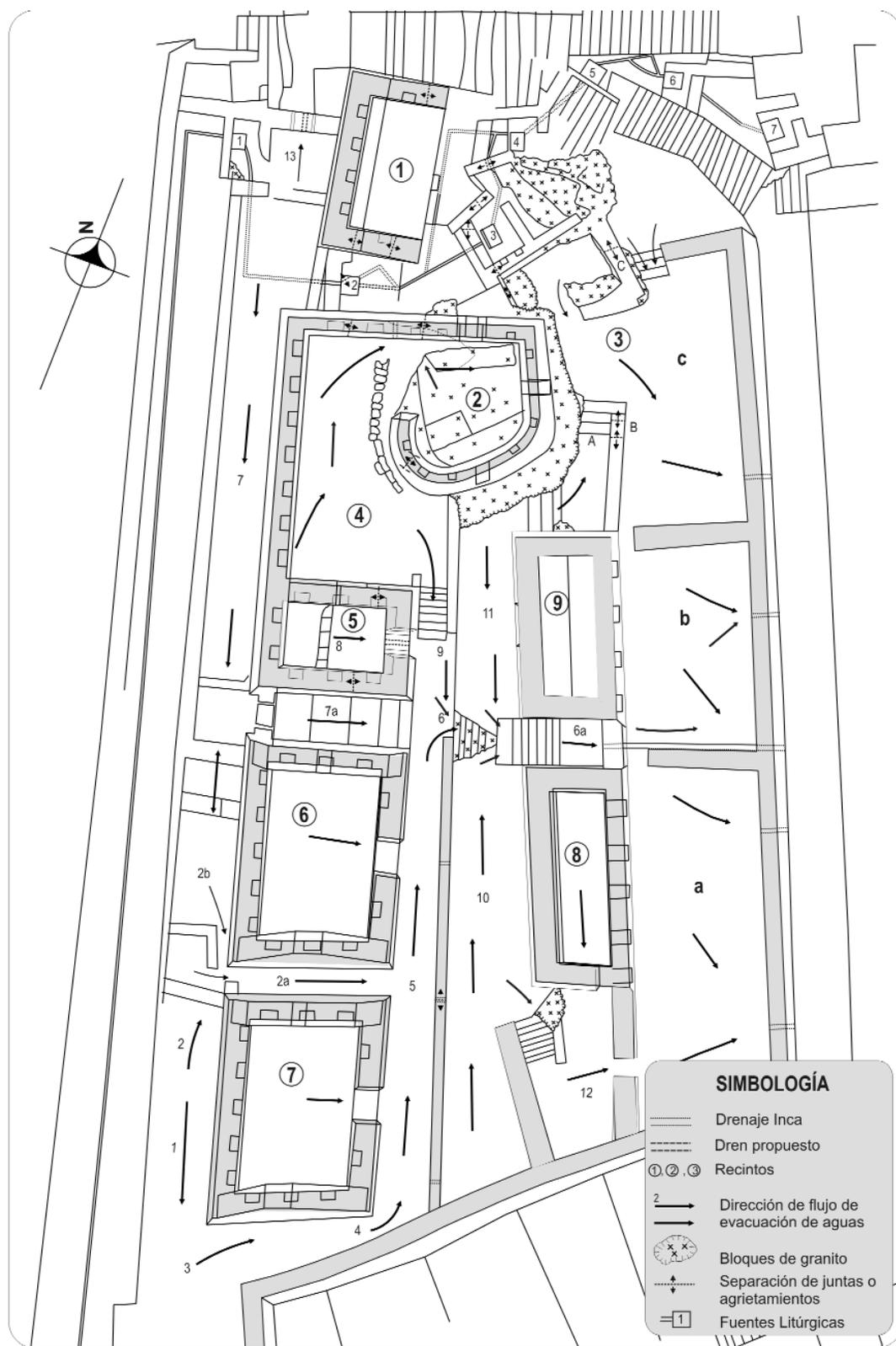
Los Conjuntos 18 y 19 se encuentran en mal estado de conservación, mostrando abandono de la mayoría de sus ambientes, en los que algunos muros han colapsado; otro factor que agrava esta situación es el crecimiento descontrolado de la vegetación que ha invadido los recintos. Las causas del deterioro están relacionadas también con el agua, que ha provocado el debilitamiento de la argamasa y el derrumbe de las paredes; además, la sufusión ha contribuido con el colapso de los muros. Se ha argumentado que estos conjuntos constituyen la zona de reserva de la ciudad inca de Machupicchu para futuras investigaciones arqueológicas con nuevas técnicas y metodologías, pero esto no

justifica la falta conservación.

Las recomendaciones para estos conjuntos consisten en realizar trabajos de drenaje de las aguas, la protección de las cabeceras de muros y los apuntalamientos.

### **Deslizamientos**

Los deslizamientos son desplazamientos o movimientos de masas de suelos o rocas en las laderas, debido principalmente a la gravedad y la presencia de gran cantidad de agua. En la ciudad inca y alrededores se observan varios deslizamientos superficiales, por ejemplo, en el sector de los andenes del borde noreste de la ciudad y en el sector agrícola. En la ladera noreste del cerro Machupicchu se ve un gran deslizamiento antiguo con signos locales de reactivaciones recientes que afectan al camino inca y la carretera de acceso a Machupicchu (Fig. 4). Actualmente, se puede observar deslizamientos pequeños, derrumbes, asentamientos y reptaciones que afectan el camino. Dentro de este contexto, la acción antrópica caracterizada por las actividades propias del turismo, como la construcción y ampliación del Hotel de Turistas que se halla en un deslizamiento menor y



**Figura 15:** Propuesta de drenajes para el Conjunto 2: Torreón, Tumar Real, Aposento de las Ñustas, tomado de Carlotto et al. (2007).

activo, y la construcción de la carretera Hiram Bingham, se consideran negativas ya que estas obras se hicieron sin criterios

técnicos favorables para la conservación de la ciudad inca de Machupicchu. Dentro los deslizamientos menores desta-

can el Conjunto de Andenes 13, ubicado en el sector oriental de la ciudad inca (Fig. 6), y que está conformado por 15 andenes.



**Figura 16:** Interior de la Puerta de las Serpes con separación de juntas y efectos de meteorización, además de los posibles incendios.

Estos andenes fueron diseñados y construidos por los incas para estabilizar un antiguo deslizamiento y cumplen esta función de manera eficiente (Fig. 19); su estado de conservación varía de regular a bueno, no obstante, se observan algunos daños en los andenes, pues los muros superiores desprendidos requieren ser restaurados.

### Reptación

Los fenómenos de reptación se presentan muy frecuentemente en las vertientes, donde los suelos saturados en agua se desplazan muy lentamente, a diferencia de los deslizamientos que son más rápidos. Uno de estos fenómenos se observa en los andenes del sector agrícola del Conjunto de Andenes 11, ubicado junto al foso seco. Aunque la gran mayoría de los andenes de este conjunto se encuentran en buen estado de conservación, algunos sitios específicos presentan problemas. Cerca del foso seco se ha reconocido un área estrecha de unos 4 m de ancho por 40 m de largo que corresponde a deslizamientos superficiales, tipo reptación, que

han destruido parcialmente unos 10 andenes (Fig. 20). La falta de medidas de rehabilitación ocasiona que, a partir de esta zona, comience la paulatina destrucción de la estructura de los andenes. En este caso, aparece también el papel importante del lavado y la erosión de los sedimentos finos por sufusión en la parte baja de la vertiente ocupada por los andenes, lo que resulta en un desequilibrio del manantío coluvial. La infiltración del agua y el drenaje insuficiente son los causantes de este fenómeno. Se recomienda reconstruir o restaurar los drenajes, así como impermeabilizar las áreas descubiertas y las plataformas de los andenes.

### Derrumbes y caída de rocas

Los derrumbes y caída de rocas son desprendimientos de material suelto, y masas o bloques de rocas, por efecto de la gravedad y se producen en las laderas bastante empinadas, relacionadas con cortes de talud o saturación de agua, que aprovechan las fracturas preexistentes. La diferencia entre uno y otro, es que el derrumbe

es una masa o conjunto de muchos bloques en cambio la caída corresponde a unos pocos, los que pueden estar solos o dentro de un derrumbe. Estos fenómenos son frecuentes en la carretera de acceso a la ciudad, como el ocurrido en 1995, o cerca de Intipunko en el año 2006 y que provocó el cierre del camino inca en ese sector (Fig. 21). En efecto, el 26 de diciembre de 1995 ocurrió un derrumbe con caída de rocas al pie del hotel de turistas y ocasionó la interrupción, por varios meses, de la carretera de acceso Hiram Bingham (Carlotto y Cárdenas 1996). El derrumbe corresponde a una parte pequeña del frente del deslizamiento mayor cuya escarpa se halla en la parte superior del hotel de turistas (Fig. 4) y originó la caída de bloques de hasta más de 70 toneladas, que rodaron pendiente abajo afectando la carretera en varios tramos. El origen del fenómeno estuvo relacionado a la infiltración de aguas superficiales y subterráneas, al rebose de las aguas de un reservorio captadas para el hotel, así como al talud muy empinado de rocas graníticas fracturadas y favoreci-



**Figura 17:** Fractura que corta el granito y permite la infiltración de aguas. En primer plano, rastros de erosión superficial del piso impermeable.

das por el corte de talud de la carretera en una zona de deslizamiento. Adicionalmente, la construcción y ampliación del hotel de turistas y de la carretera Hiram Bingham, así como la ampliación de una plataforma para el estacionamiento de buses, han desestabilizado los terrenos circundantes. Otro derrumbe importante ocurrió el 30 de marzo del 2006 causando la caída de rocas en el cerro Machupicchu a la altura de Intipunku, afectando parte del camino que, en este tramo, es el único paso directo para llegar a la ciudad desde Wiñaywayna, por lo que hubo una interrupción de dos meses (Cárdenas *et al.* 2006). El derrumbe ocurrió aproximadamente a las 11:30 pm e involucró bloques de granitos y material coluvial, lo que provocó el colapso de

23 m del camino inca cerca de Intipunku, a 2.675 m s.n.m. (Fig. 21). El derrumbe que incluyó bloques de granito y gravas llegaron inclusive hasta el quinto zigzag de la carretera de acceso a la ciudad inca (2.270 m s.n.m.), y afectó un canal de drenaje y varios árboles. Las causas de este derrumbe están relacionadas con la roca que se halla fuertemente fracturada y alterada, y con presencia de bloques de granito ya desprendidos del afloramiento a manera de caos granítico. La vegetación es escasa y no fija bien el material coluvial. En estas condiciones, el detonante fueron las aguas pluviales que saturaron el terreno y originaron el derrumbe.

## HIPÓTESIS DE LA MISIÓN JAPONESA: ¿MACHUPICCHU EN VÍAS DE DESAPARICIÓN?

En marzo del año 2001, el Ingeniero Forestal Kyoji Sassa de la Universidad de Kioto, Japón, y del Instituto de Investigaciones en Prevención de Desastres de la Universidad de Kioto (DPRI/KU), ofreció unas declaraciones a la revista *New Scientist* en las que indicaba que Machupicchu iba a colapsar en cualquier momento por un deslizamiento severo. A raíz de esta noticia, Machupicchu se convirtió el centro de la atención mundial; el equipo de investigadores japoneses, en coordinación con la UNESCO, sembró la alarma internacional al afirmar que la



**Figura 18:** Proceso de sufusión que ha causado el colapso de muros en este recinto (Conjunto13).



**Figura 19:** Deslizamiento estabilizado por los incas mediante las terrazas del Conjunto de Andenes 13.



**Figura 20:** Reptación que afecta a las terrazas agrícolas del Conjunto de Andenes 11.

ciudad inca de Machupicchu, considerada Patrimonio Mundial de la Humanidad, corría un riesgo inminente de desplome, luego de comprobar mediante medidas de extensómetros que un sector de la ladera se había desplazado 12 mm durante el mes de diciembre del año 2000.

Luego de varios estudios y principalmente del monitoreo de los extensómetros, la misión japonesa realizó varias publicaciones (Sassa 2001, Sassa *et al.* 2005) que concluyen señalando la existencia de posibles deslizamientos grandes y profundos que destruirían la ciudad inca de Machupicchu. Estas investigaciones indicaban la presencia, al menos de dos grandes planos de deslizamiento profundo a partir de la Plaza Mayor hasta el río Urubamba, por ambas laderas, este y oeste, y a lo largo de 500 m; se planteó que ambos deslizamientos se encontrarían activos y traerían abajo todo el cerro, incluyendo la ciudad inca, tal como se muestra en la figura 22. Para probar esta hipótesis, Sassa (2001) propuso el monitoreo con extensómetros

y la realización de perforaciones para medir la profundidad a la que se encontraría el plano de deslizamiento.

Las advertencias de la misión japonesa fueron desestimadas casi de inmediato, no solamente por las autoridades culturales peruanas, sino también por un equipo de investigadores de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco encabezados por el autor del presente artículo, quienes sustentaron sus observaciones en los foros nacionales e internacionales, y también en publicaciones de divulgación como *Geotimes* (Carlotto y Cárdenas 2001) y demostraron que estas ideas no tenían sustento científico ni base geológica porque las medidas de desplazamiento que indicaban los extensómetros estaban relacionadas con asentamientos y deslizamientos superficiales, como ha sido mostrado líneas arriba.

Luego de debates en los foros internacionales, la UNESCO dio gran importancia a la hipótesis de los japoneses, y surgió interés de equipos de diferentes naciona-

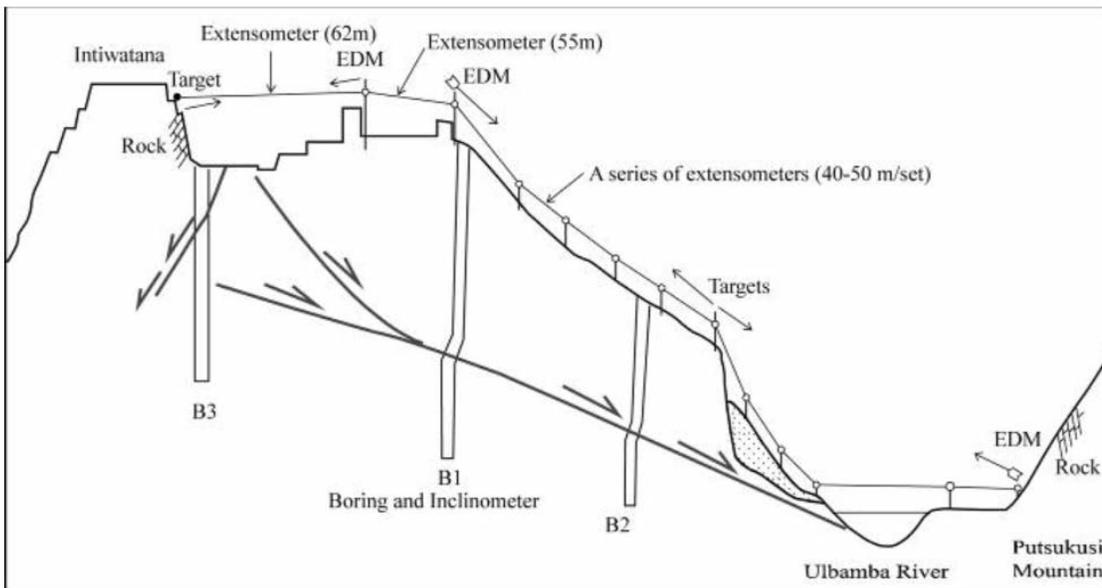
lidades (misión checa-eslovaca, italiana y peruano-canadiense) para determinar si existía o no este gran deslizamiento que destruiría Machupicchu. Durante un taller realizado en el distrito de Machupicchu (Aguas Calientes) en el año 2005, y luego de varios años de trabajo, cada equipo concluyó que no existen deslizamientos gigantes que destruirían Machupicchu. Sin embargo, la misión japonesa insiste en seguir investigando pues sostiene que las observaciones corresponden a movimientos precursoros, es decir que Machupicchu se deslizará en el futuro geológico, lo que no es novedoso pues la Cadena de los Andes está sometida a erosiones y en varios cientos de miles y millones de años irá desapareciendo, ayudada por deslizamientos y megadeslizamientos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ciudad inca de Machupicchu fue fundada principalmente sobre una morfología



**Figura 20:** Derrumbe del 2006 que afectó al camino inca, en el tramo Intipunko-ciudad inca.



**Figura 22:** Sección hipotética de Machupicchu que muestra los planos de deslizamiento que destruirían la ciudad inca (Sassa 2001).

de caos granítico, en una zona de abundantes precipitaciones pluviales, con laderas bastante inestable que los incas estabilizaron mediante andenes y muros, y solamente después comenzaron la construcción de recintos, viviendas y templos. Durante la ocupación inca, los andenes y en

general todas las construcciones, eran conservados mediante canales de drenaje dentro un sistema planificado de desagüe, que permitía la evacuación integral de las abundantes aguas pluviales. Además, las viviendas tenían techos cuyas caídas estaban integradas a los sistemas de drenajes.

Sin embargo, actualmente las construcciones no tienen techo y los sistemas de drenaje inca ya no funcionan, generando los problemas de geodinámica externa, cuyo origen está relacionado directamente con el agua y la gravedad. Los principales fenómenos de geodinámica externa

son: los asentamientos, la sufusión, los derrumbes, la caída de rocas, los deslizamientos superficiales, la erosión superficial y la reptación.

En consecuencia, las recomendaciones principales de urgente intervención son la adecuada evacuación de las aguas pluviales y evitar las infiltraciones o la erosión superficial, mediante drenajes y pisos impermeables, los que deben integrarse al sistema de drenaje inca que tiene que ser puesto en valor.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades del Instituto Nacional de Cultura-Cusco, en particular al Arqueólogo Fernando Astete, Director del Santuario Histórico de Machupicchu, por haber dado los permisos y las facilidades para la realización de los trabajos de investigación que desembocaron en esta publicación. Igual agradecimiento para las autoridades de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco que apoyaron a dos de los autores, como profesores universitarios. Finalmente a los directivos y geólogos del INGEMMET por haber hecho parte de los proyectos de investigación institucional, temas como el presentado y referentes a la protección y conservación del patrimonio arqueológico.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bouchard, J., Carlotto, V. y Usselman, P. 1992. Machupicchu: Problemas de conservación de un sitio de ceja de selva. Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos 21(3): 905-927, Lima.
- Cárdenas, J., Carlotto, V. y Oviedo, M. 2006. Caída de Rocas-derrumbe sucedido el 30 de marzo del 2006 en el Cerro Machu Picchu. Informe INC-Cusco, 12p., Cusco.
- Carlotto, V. 1993. La geología en la conservación del Santuario Histórico de Machupicchu. Seminario-Taller Internacional de Arqueología del Santuario Histórico Nacional y Sitio Patrimonio Mundial de Machupicchu: Estado de la cuestión y propuestas para un Plan Maestro, (inédito), 171-191, Cusco.
- Carlotto, V. 1998. Évolution Andine et Raccourcissement au niveau de Cusco (13-16°S) Pérou: Enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique. Tesis de Doctorado, Universidad de Grenoble, 158 p., Grenoble.
- Carlotto, V. y Cárdenas, J. 1996. Evaluación Geológica del derrumbe del 26-12-95 en la carretera Puente Ruinas-Machupicchu y zonas aledañas. UNSAAC, (inédito), 11 p., Cusco.
- Carlotto, V. y Cárdenas, J. 2001. Machu Picchu: A giant built on a fragile foundation. Geotimes 46(8): 22-24.
- Carlotto, V. y Usselman, P. 1989. Informes sobre la misión francesa de cooperación en Machupicchu: El marco físico de Machupicchu: Geología y Geomorfología de un sitio inca amenazado. Embajada de Francia, 18 p., Lima.
- Carlotto, V., Cárdenas, J. y Fidel, F. 2007. La Geología en la Conservación de Machupicchu. Boletín INGEMMET, Serie I Patrimonio y Geoturismo 1, 305 p., Lima.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Romero, D., Valdivia, W. y Tintaya, D. 1999. Geología de los cuadrángulos de Quillabamba y Machu Picchu. Carta Geológica Nacional INGEMMET, Boletín 127, Serie A: 319 p., Lima.
- Egeler, C. y De Booy, T. 1961. Preliminary Note on the Geology of the Cordillera Vilcabamba (SE Peru), with Emphasis on the Essentially Pre Andean Origin of the Structure. Geologie en Mijnbouw 40: 319-325.
- Kalafatovich, C. 1963. Geología de la ciudadela de Machu Picchu y sus alrededores. Revista Universitaria UNSAAC 121: 217-228, Cusco.
- Kennan, L. 2008. Fission Track ages and sedimentary provenance studies in Peru, and their implications for Andean paleogeographic evolution, stratigraphy and hydrocarbon systems. VI INGEPET, 13 p., Lima.
- Sassa, K. 2001. The Second Investigation Report on the Slope Instability in Inca's World Heritage in Machupicchu, Cusco, Peru. Rapport DPRI April, 24p., Kyoto.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., Wang, F., Benavente, E., Ugarte, D. y Astete, F. 2005. Landslide Investigation in Machu Picchu World Heritage, Cusco, Peru (C101-1), en: Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides, Springer, 25-38, Berlin, Heidelberg.
- Van Heiningen, P., Ruiz, G., Andriessen, P., Zuloaga, A. y Romero, L. 2004. Landscape evolution of the Apurímac River drainage basin. Southern Peru. 12° Congreso Peruano de Geología, Resúmenes Extendidos: 249-251, Lima.
- Van Heiningen, P.S., Carlotto, V., Zuloaga, A., Romero, L. y Andriessen, P. 2005. Oligocene to Pleistocene exhumation patterns across the Apurímac River drainage basin, southern Peru. 6th International Symposium Andean Geodynamic (ISAG), Extended Abstracts: 763-766, Barcelona.
- Vilímek, V., Zvelebil, J., Klimes, J., Vicko, J. y Astete, F. 2005. Geomorphological Investigations at Machu Picchu, Peru (C101-1), en: Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides. Springer, 49-54, Berlin, Heidelberg.

Recibido: 18 de junio, 2009

Aceptado: 27 de octubre, 2009