



PERÚ

Ministerio
de Energía y Minas

Instituto Geológico Minero
y Metalúrgico - INGEMMET

INGEMMET
Instituto Geológico Minero y Metalúrgico



Universidad Nacional
San Antonio Abad del Cusco

Boletín N°1 serie I Patrimonio y Geoturismo

Machu Picchu, 100 años de su reencuentro con el mundo 1911-2011

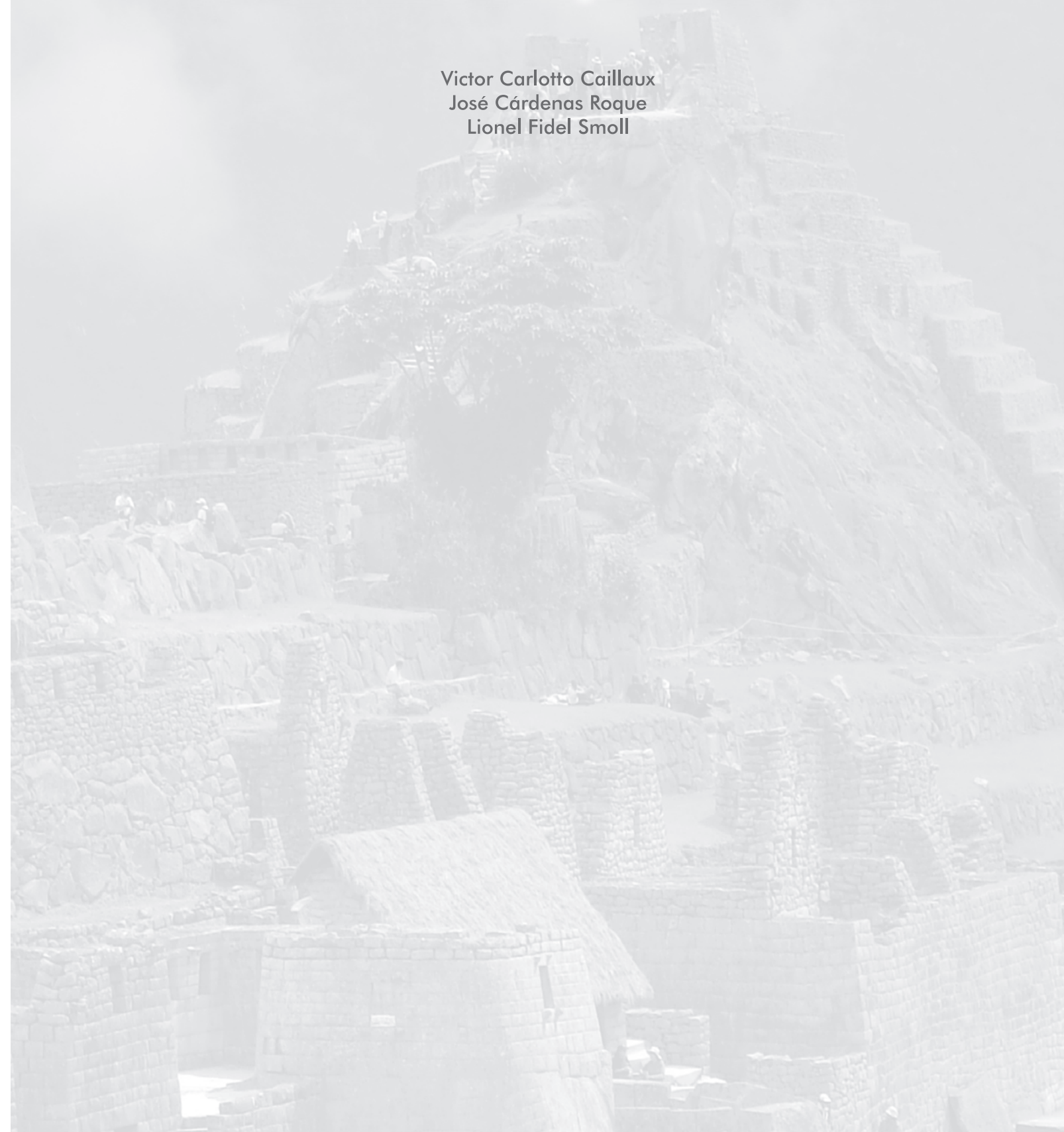
La Geología en la conservación de Machupicchu

Victor Carlotto Caillaux
José Cárdenas Roque
Lionel Fidel Smoll



La Geología en la conservación de Machupicchu

Victor Carlotto Caillaux
José Cárdenas Roque
Lionel Fidel Smoll



LA GEOLOGÍA EN LA CONSERVACIÓN DE MACHUPICCHU

Nº 1, Serie I, 2007

Hecho el Depósito Legal Nº 2007-11572

Razón Social: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
(INGEMMET)

Domicilio: Av. Canadá Nº 1470, San Borja, Lima- Perú

Segunda Edición, INGEMMET 2011

Se terminó de imprimir el xx de junio del año 2011 en los talleres de
Imprenta CANO s.r.l

© **INGEMMET**

Derechos Reservados. Prohibida su reproducción.

Directiva 2007

Presidente del Consejo Directivo: Jaime Chávez Riva Gálvez

Secretario General: Mario Huerta Rodríguez

Asesor Geocientífico: José Macharé Ordóñez

Directiva 2011

Presidente del Consejo Directivo: Walter Casquino Rey

Secretario General: Juan Carlos Lam Alvarez

Asesor Geocientífico: José Macharé Ordóñez

Comité Editor: José Macharé O., Víctor Carlotto C., Lionel Fidel S.,
Hernando Núñez del Prado, Humberto Chirif R.

Unidad encargada de la edición: Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo Geológico - Dirección de Geología Regional

Corrección Geocientífica: Víctor Benavides

Digitalización y SIG: Samuel Lu, Harmuth Acosta, Luis Cerpa

Revisión de mapas: José Cárdenas

Corrección de estilo: Glenda Escajadillo

Diagramación: Giovanna I. Alfaro Olivera

Referencia bibliográfica:

Carlotto, V., Cárdenas, J. , Fidel, L., (2007) La Geología en la
Conservación de Machupicchu. Boletín INGEMMET, serie I
Patrimonio y Geoturismo Nº1, 305p.

CONTENIDO

RESUMEN
ABSTRAC
PRESENTACIÓN

I. EL CONTEXTO FÍSICO DEL SANTUARIO HISTÓRICO DE MACHUPICCHU	9
1. Introducción	
2. Fisiografía	
3. Clima y biodiversidad	
4. Geología del Santuario Histórico de Machupicchu	
II. GEOLOGÍA DE LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU	35
1. Introducción	
2. Unidades geológicas	
3. Geología estructural	
4. Geomorfología	
5. Los fenómenos de geodinámica externa	
III. LOS PROBLEMAS GEODINÁMICOS DE LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU	57
1. Introducción	
2. Sector Urbano Subsector Alto	
3. Sector Urbano Subsector Bajo	
4. Sector Agrícola y Conjunto de Andenes	
5. Cerro Waynapicchu	
IV. ¿MACHUPICCHU EN VÍAS DE DESAPARICIÓN?: INVESTIGACIONES DE LAS MISIONES EXTRANJERAS Y PERUANAS	121
1. ¿Machupicchu en vías de desaparición?	
2. Misión japonesa: Investigación de deslizamientos en Machupicchu	
3. Misión de los países de la República Checa y Eslovaca: Investigaciones geomorfológicas en Machupicchu	
4. Misión italiana: Monitoreo, geomorfología y estabilidad de taludes de la ciudad inca de Machupicchu	
5. Misión peruana-canadiense: Geofísica de Resistividad 2D, Georadar (GPR) y Electromagnetismo en la ciudad inca de Machupicchu	
6. Misión peruana: Investigaciones geomecánicas y evaluación de las condiciones de estabilidad en la ciudad inca de Machupicchu	
7. Resultados del Taller Internacional de Machupicchu (Cusco-Perú)	
V. PELIGROS GEOLÓGICOS E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE DOS CAMINOS INCAS EN MACHUPICCHU	185
1. Peligros geológicos e impacto medioambiental en el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu	
2. Geología y geodinámica del Camino Sagrado en Machupicchu	
VI. PELIGROS GEOLÓGICOS EN OTROS LUGARES DEL SANTUARIO HISTÓRICO DE MACHUPICCHU	245
1. Introducción	
2. El distrito de Machupicchu (Aguas Calientes)	
3. Aluvión del Aobamba de 1998: un evento para no olvidar	
4. Geología, geodinámica y simulación de flujo Flo 2D para el mapa de peligros en la quebrada Runtumayo-Nevado Verónica (Cusco)	
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	299

RESUMEN

El Santuario Histórico de Machupicchu se sitúa en la Cordillera Oriental del sur del Perú, rodeado al norte por los nevados Verónica (5750 msnm) y Bonanta (5024 msnm) y, al sur, por el Salcantay (6264 msnm) y Huamantay (5459msnm). La ciudad inca está situada a 2450 msnm, 500 m por encima del río Urubamba, que corta la cordillera y forma un cañón con clima 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.

A lo largo de estas páginas, los fenómenos geodinámicos que afectan a la ciudad inca de Machupicchu - como los asentamientos, la sufusión, la erosión superficial, los derrumbes, la caída de rocas y los deslizamientos superficiales - son descritos minuciosamente. 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, erosión superficial, sufusión, asentamientos, etc. 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. Un mapa que reúne el inventario de los drenajes incas servirá para la restauración e implementación del sistema integral de drenaje.

A raíz de publicaciones y noticias que generaron alarma a nivel internacional al anunciar que la ciudad inca de Machupicchu corría el riesgo de colapsar a causa de un gran deslizamiento, varias misiones internacionales y peruanas realizaron investigaciones para evaluar estas afirmaciones. Además de presentar los resultados de estas investigaciones, en esta publicación se incluyen las conclusiones de un taller internacional organizado con tal fin, y que descartan la presencia de esos fenómenos destructivos.

Las evaluaciones de geodinámica externa del Camino Inca Tradicional y el Camino Sagrado han revelado deslizamientos, aluviones, caída de rocas, derrumbes, reptación de suelos, asentamientos, erosión superficial, erosión de ríos, así como sufusión, eventos que están relacionados con los efectos del agua y la intervención del hombre. Estos fenómenos ocasionan la destrucción parcial o total de algunas partes del camino. Asimismo, se ha identificado los impactos ambientales negativos que afectan al Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu. Luego, con el uso de matrices causa-efecto se ha realizado la evaluación de impacto ambiental de este camino por tramos, con énfasis en los fenómenos geodinámicos y actividades antrópicas que afectan al medio geobiofísico y sociocultural, y por último, se presentan las medidas de mitigación y prevención para proteger este patrimonio inca.

En el Santuario Histórico de Machupicchu existen numerosas zonas afectadas por fenómenos de geodinámica externa, por esto se presentan tres ejemplos que son importantes desde los puntos de vista de población, transporte e infraestructura. El poblado de Machupicchu (Aguas Calientes) es el centro urbano más importante y cercano al monumento histórico y está ubicado en la desembocadura de las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo, que presentan alto grado de peligrosidad por aluviones. En 1998, el aluvión de Aobamba destruyó la central hidroeléctrica de Machupicchu y continúa siendo un peligro, por lo que se debe impedir la fundación de cualquier centro poblado en su desembocadura. Finalmente, se presenta la evaluación del aluvión de la quebrada Runtumayo, que destruyó las carreteras y la línea férrea, único acceso directo a la ciudad inca de Machupicchu.

ABSTRACT

The Historical Sanctuary of Machupicchu is located in the Eastern Cordillera of southern Peru. It is surrounded to the north by the Veronica (altitude 5750 m) and Bonanta (altitude 5024 m) snowed peaks, and to the south by the Salcantay (6264 m) and Huamantay (5459 m). The Inca city is located at an altitude of 2450 m, 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.

Throughout these pages, we describe in detail the geodynamic processes affecting the Inca city of Machupicchu, such as subsidence, suffusion, surface erosion, rock falls, and landslides. 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, etc. Detailed geological surveys and site-specific studies in several areas of the city allow to suggest recommendations for an adequate evacuation of rain water with drainages and impermeable surfaces to avoid infiltration and surface erosion. A map with the inventory of Inca drainages will help restore and implement an integrated drainage system.

Several publications and news in the media generated an international alarm when it was announced that the Inca city of Machupicchu was at risk of collapse amidst a large landslide. Several international and Peruvian research groups undertook studies to assess the alleged problem. We herein provide the results of this research, including the conclusions of an international workshop organized for this purpose, and which minimize the probability of these destructive phenomena.

The assessment of external geodynamic processes and landforms along the Traditional Inca Trail and the Sacred Trail identified landslides, alluvial fans, rock falls, debris flows, soil creep, subsidence, surface erosion, fluvial erosion, and suffusion. These features are related with the effect of water and human intervention. These phenomena originate partial or total destruction of the trail. We have also identified negative environmental impacts affecting the Traditional Inca Trail and the Inca city of Machupicchu. Using cause-effect matrices, we have then undertaken the environmental impact assessment of this trail, emphasizing geodynamic phenomena and human activities affecting the natural and cultural environment. Finally, we present mitigation and prevention measures to protect this Inca heritage.

The Historical Sanctuary of Machupicchu has numerous areas affected by external geodynamic processes. We present three examples which are important from the point of view of the population, transportation and infrastructure. The town of Aguas Calientes is the closest most important urban area around the historical monument. This town is located at the mouth of the Aguas Calientes and Alcamayo creeks, both with a high risk of flash floods and debris flows. In 1998, the Aobamba flash flood and debris flow destroyed the hydroelectric plant of Machupicchu. The risk continues, so any further urbanization at the mouth must be avoided. Finally, we present an assessment of the Runtumayo Creek flood, which destroyed the road access and the train line, which are the only direct access to the Inca city of Machupicchu.

PRESENTACIÓN

Un geólogo que nació y vivió en el Cusco no puede ser ajeno o indiferente a la destrucción del patrimonio cultural o natural por las inclemencias del clima, los peligros geológicos o el paso del tiempo. Esta publicación es el resultado de más de 15 años de investigaciones constantes en Machupicchu, llevadas a cabo por dos de los autores, Víctor Carlotto y José Cárdenas, como profesores de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) y, entre 2004 y 2006 como INGEMMET, con la participación de Lionel Fidel, a partir de un convenio entre estas dos instituciones.

Las investigaciones se iniciaron a fines de la década de los ochenta e inicios de los años noventa, principalmente por iniciativa de los autores y eventualmente respondiendo a invitaciones del Instituto Nacional de Cultura INC-Cusco, luego de derrumbes o deslizamientos en los alrededores de la ciudad inca de Machupicchu. Por otro lado, gracias a los crecientes conocimientos sobre el tema, se realizaron algunos estudios específicos sobre los problemas que afectan a esta ciudad inca y al Camino Inca Tradicional, financiados en 1994 por la UNESCO, así como estudios regionales entre 1997 y 1999 para el INGEMMET. Asimismo, uno de los autores participó en el Plan de Ordenamiento Urbano del poblado de Machupicchu (1999-2000) y otro tomó parte en auditorías efectuadas por la Contraloría General de la República (2003). El año 2004, el INGEMMET participa en los estudios a raíz de los planteamientos de una misión científica japonesa, que indicaban que la ciudad inca corría el riesgo de desaparecer debido a un gran deslizamiento. Los años siguientes las investigaciones forman parte del Plan Operativo Institucional y consisten en estudios geofísicos y la elaboración de la cartografía geológica al detalle de Machupicchu, para ser aplicados en los planes de conservación de la ciudad inca; estos trabajos son presentados en este boletín. Esto permitió, además, optimizar los convenios internacionales de cooperación y, particularmente, la participación del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para la Comunidades Andinas (PMA:GCA) con el apoyo del Servicio Geológico de Canadá para la realización de importantes investigaciones geofísicas.

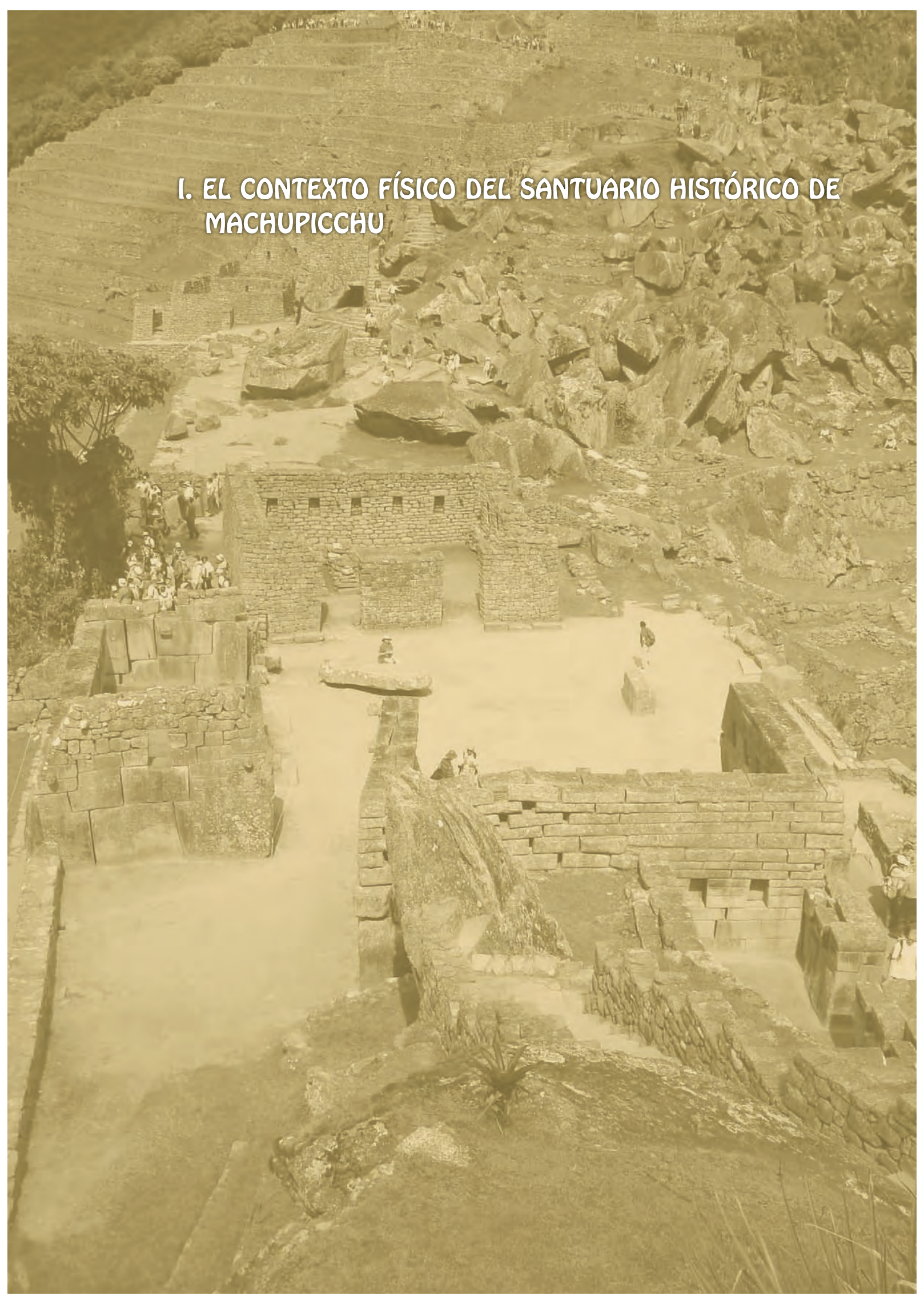
Muchos especialistas y misiones de investigación han pasado por Machupicchu, probablemente atraídos por la importancia del sitio, lo que justificó, en muchos casos, los financiamientos de estos trabajos a través de organizaciones de diferente índole. Así, a inicios de los años noventa, una primera misión japonesa concluye, entre otras cosas, que existen problemas sísmicos en la ciudad inca y que los daños causados en las construcciones deberían ser restaurados considerando técnicas antisísmicas usadas en Japón. Como respuesta la misión franco-peruana - integrada por J.F. Bouchard, P. Usselman y V. Carlotto - descarta la posibilidad de daños sísmicos y, más bien, relaciona los problemas geológicos de Machupicchu con los efectos del agua y la gravedad. En esa época no prosperó la propuesta de restauraciones antisísmicas, que incluso podía sorprender a las autoridades de turno. Sin embargo, años más tarde, a principios del 2001, el profesor K. Sassa, miembro de otra misión japonesa, planteó la existencia de grandes deslizamientos que destruirían la ciudad inca. Para comprobar esta hipótesis se formó un consorcio que debía realizar los

estudios de investigación específicos. En un taller organizado por el consorcio, a finales del año 2005, se concluye que en las condiciones actuales es improbable que ocurran deslizamientos de grandes dimensiones que destruirían la ciudad inca. A pesar de esas conclusiones, algunas misiones tratan de sorprender a la comunidad internacional exponiendo supuestos peligros catastróficos que afectarían a la ciudad inca, para seguir consiguiendo financiamiento utilizando el nombre de Machupicchu. Es lamentable que poco o nada de las sumas gastadas en investigaciones sofisticadas se haya invertido en la conservación relacionada con los verdaderos peligros que afectan a la ciudad inca.

El libro ha sido dividido en seis capítulos e involucra no solamente a la ciudad inca, sino también los caminos inca y las zonas con alto peligro dentro del santuario. El primer capítulo trata del contexto físico, es decir la fisiografía o características del relieve, el clima y la geología del Santuario Histórico de Machupicchu. El segundo capítulo consiste en la geología de la ciudad inca, resaltando el macizo granítico y el caos granítico sobre el que fue construida la ciudad. Luego se describen los fenómenos de geodinámica externa o peligros geológicos que afectan a la ciudad y que son comunes para el santuario. En el tercer capítulo se presentan los problemas geodinámicos de la ciudad inca, para ello se realizaron levantamientos geológicos y geodinámicos a escala 1:500 y 1:100, incluyendo los sistemas de drenajes y señalando en la mayoría de los casos las recomendaciones necesarias. En el cuarto capítulo se hace una síntesis de los resultados de las investigaciones realizadas por las diferentes misiones extranjeras y peruano-canadiense, con el fin de comprobar o desechar la existencia de grandes deslizamientos que destruirían la ciudad inca, tal como propone la misión japonesa. Como corolario de este capítulo se muestran las conclusiones del taller internacional llevado a cabo el 2005, en el poblado de Machupicchu, donde las diferentes misiones de investigación presentaron sus resultados, demostrando que no existen estos fenómenos catastróficos. En el quinto capítulo se presentan los resultados de las investigaciones realizadas en el Camino Inca Tradicional, trabajos que comenzaron el año 1984, y que fueron conducidos por J. Cárdenas y estudiantes de la UNSAAC a partir del 2003. En él se tratan la geología, los peligros, el impacto medioambiental del Camino Inca Tradicional y el Camino Sagrado, y se entregan las recomendaciones necesarias. En el sexto capítulo se muestran los peligros de aluviones y deslizamientos que afectan al poblado de Machupicchu (Aguas Calientes), los peligros de aluviones en la quebrada de Aobamba, tal como el que destruyó la Central Hidroeléctrica de Machupicchu el año 1998, y el aluvión de Runtumayo que interrumpió el acceso a la ciudad inca en el 2005.

Finalmente, a poco tiempo de haberse considerado a Machupicchu, testigo viviente de la grandeza del incanato, entre las siete maravillas del mundo, es motivo de orgullo para todos los peruanos y seguramente para todo el mundo, por cuanto es patrimonio cultural de la humanidad. Coincidiendo con este nuevo galardón, presentamos esta publicación como un homenaje a Machupicchu, pero es también un llamado de atención a las autoridades locales y nacionales para que realicen las acciones necesarias de conservación y eviten el deterioro lento pero inexorable de nuestro patrimonio milenario.

I. EL CONTEXTO FÍSICO DEL SANTUARIO HISTÓRICO DE MACHUPICCHU



I. INTRODUCCIÓN

El Santuario Histórico de Machupicchu se sitúa en plena Cordillera Oriental del sur del Perú (Fig. 1), con nevados que superan los 6000 m como el Salcantay, sin embargo, la ciudad inca está situada a 2450 msnm, 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 2450 y 1800 msnm, lo que permitió el desarrollo de un paisaje impresionante, caracterizado por laderas empinadas, a veces verticales, desfiladeros y montañas agrestes, como los que rodean a la ciudad inca. A esto se suma la geología con rocas graníticas fracturadas y bloques de granitos apilados formando “caos graníticos”, que ofrecen al paisaje un contexto asombroso y único. Este lugar, tan hermoso y a la vez tan, abrupto, fue escogido por los incas para construir la gran ciudad de Machupicchu.

El santuario se ubica en el distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba y departamento o región de Cusco. La única vía de acceso directo 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, utilizando el nuevo puente Carrilluchayoc.

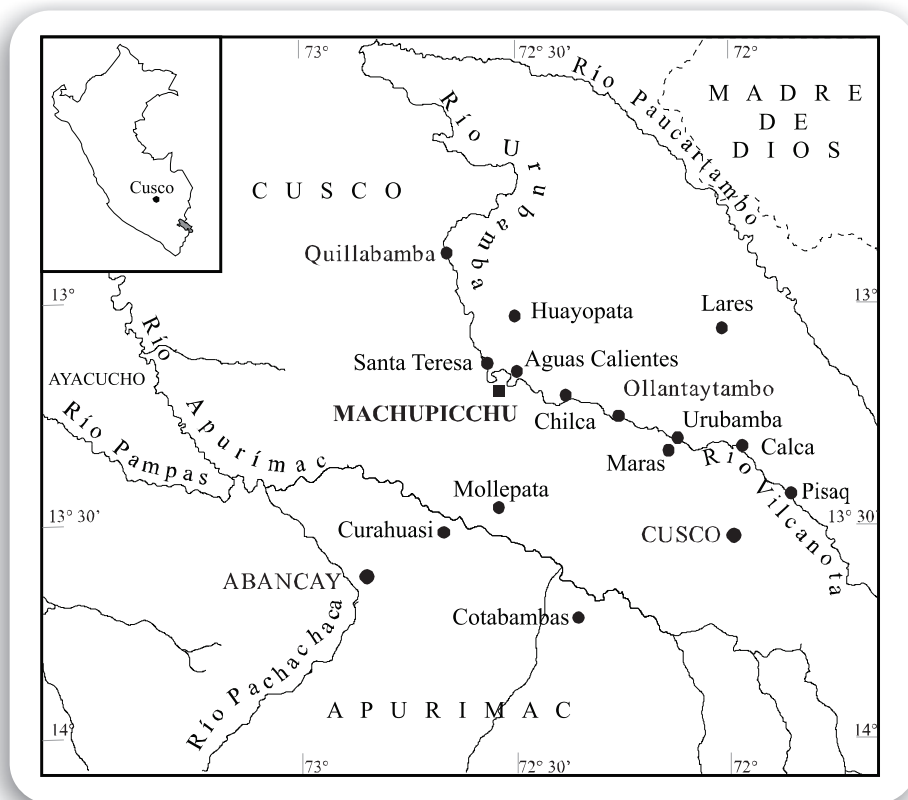


Fig.1. Mapa de ubicación de la ciudad inca de Machupicchu.

2. FISIOGRAFÍA

El río Vilcanota o Urubamba atraviesa la Cordillera Oriental del sur del Perú, denominada localmente Cordillera Vilcabamba, y forma el cañón del Urubamba (Fig. 2). Las vertientes suroeste y noreste del valle son bastante empinadas y tienen cumbres importantes, entre las que resaltan los nevados Salcantay (6264 msnm) y Huamantay (5459 msnm) al suroeste, y los nevados Verónica (5750 msnm) y Bonanta (5024 msnm) al noreste (Fig. 3). Al pie de los nevados se observan glaciares, valles en "U", morrenas, 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.

Cordillera Oriental

La Cordillera Oriental es una unidad morfoestructural fuertemente individualizada, 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,

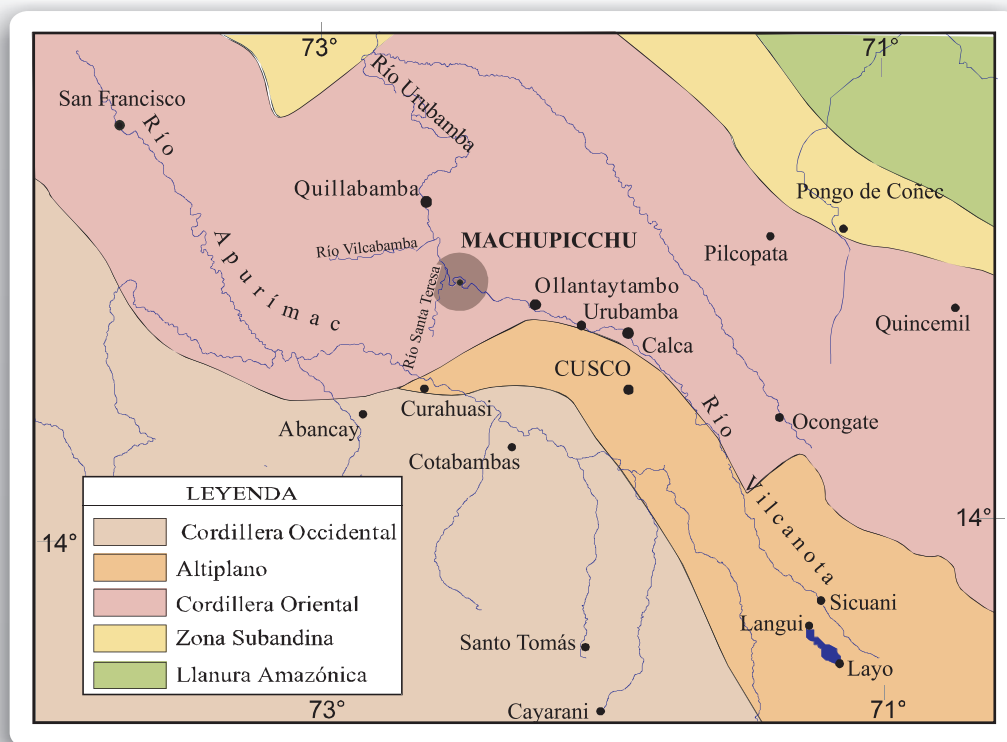


Fig. 2. Mapa fisiográfico de la región sur del Perú incluyendo la zona de Machupicchu.

formando nevados que sobrepasan 6000 msnm, 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 y muy empinadas, y en ocasiones producen aludes o deslizamientos que forman aluviones como el ocurrido en Aobamba el año de 1998.

En la parte sur del santuario destacan también el Corihuayrachina (5404 msnm), Paljay (5125 msnm), Tocarohuay (5910 msnm), Amparay (5418), Chaupiloma (5339 msnm) y Padreyoc (5771 msnm). 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 triásica. Los nevados tienen crestas agudas y flancos irregulares de fuerte pendiente, que contribuyen a la desglaciación que resulta del calentamiento global.

La Cordillera Oriental se encuentra disectada en el santuario por quebradas o valles 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 glaciar y la permanente erosión fluvial de los terrenos, y constituyen los colectores de las aguas provenientes de las montañas.

Aobamba

La quebrada o valle Aobamba es el límite oeste del santuario y tiene dirección sur a norte. Las aguas de este río nacen aproximadamente a 3500 msnm, en la confluencia de los ríos Orcospampa y Rayancancha, que nacen de los deshielos de los nevados Salcantay, Paljay, Huamantay y otros adyacentes; el Aobamba desemboca en el río Urubamba a 1700 msnm. En la mayor parte de su recorrido atraviesa rocas intrusivas del macizo de Machupicchu y en la parte final cruza rocas del Paleozoico inferior. Es un valle juvenil, con laderas muy empinadas. El año 1998 se formó un aluvión luego de varios deslizamientos al pie del Salcantay, que represó parcialmente el río Urubamba y destruyó la Central Hidroeléctrica de Machupicchu (Carlotto et al., 1999).

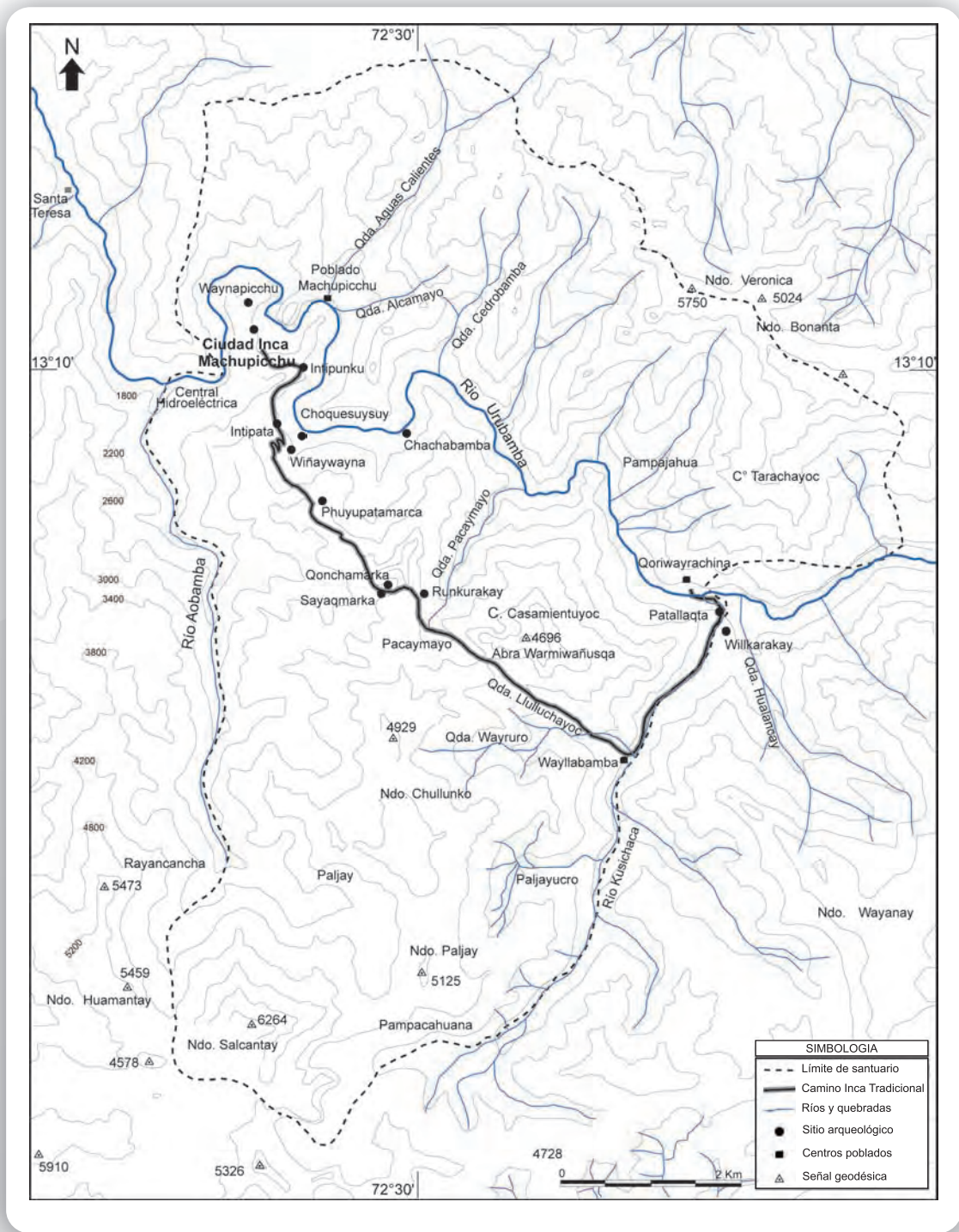


Fig. 3. Mapa de ubicación del Santuario Histórico y la ciudad inca de Machupicchu.

Kusichaca

El valle Kusichaca tiene una dirección aproximada noreste-suroeste. Las aguas de este río nacen en los nevados Salcantay y Paljay, y desembocan en el río Urubamba, a 2450 msnm. En gran parte de su recorrido corta rocas metamórficas y, en menor proporción, rocas ígneas intrusivas. Tiene laderas empinadas, aunque el piso de valle se hace un poco más amplio en algunos sectores. Cerca de su desembocadura, en la quebrada Hualancay, se observan productos de un megaluviación procedente del nevado Wayanay, que represó los ríos Kusichaca y Urubamba. Estos depósitos aluvionales se preservan incluso en Qoriwayrachina, en la margen derecha del río Urubamba, donde comienza el Camino Inca Tradicional.

Aguas Calientes

El valle o quebrada Aguas Calientes tiene una dirección aproximada noreste a suroeste; nace en la vertiente sur de la Cordillera Oriental, a una altura de 4300 msnm. En la parte alta está conformado por dos valles glaciares en forma de “U”: el Quishuarpata y Tunquihuaycco, que se unen a una altitud de 3200 msnm; en la parte alta del primero se encuentra la laguna Iscaycocha. En estos valles la topografía es suave y no presentan mucha erosión. A partir de la unión el valle se torna muy angosto; su desarrollo obedeció principalmente a efectos fluvio-glaciares, donde el relleno sedimentario es aluvial sobre granitos del batolito. Las laderas son verticales en algunos sectores y propensas a desarrollar caída de bloques, que ocasionalmente represan el valle y cuyo desembalse origina huaycos o aluviones que afectan al poblado de Machupicchu, como el ocurrido el 27 de abril del 2007.

Alcamayo

Este valle fluvial nace a 3900 msnm, tiene una dirección general noreste-suroeste; es de menor longitud y amplitud que el de Aguas Calientes; se desarrolla sobre rocas intrusivas y el relleno corresponde a bloques de granito y gravas aluviales. En la parte media se ven derrumbes y deslizamientos que originan aluviones, como el ocurrido el 10 de abril del 2004, que además de destruir parte de la población y la línea férrea, causó la muerte de 10 personas.

Abanico aluvial de Aguas Calientes-Alcamayo

Es una unidad morfológica, típica de cono o abanico aluvial, que se ha formado por la depositación de materiales procedentes de las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo, debido a la acumulación de varios depósitos de huayco o aluvión. En efecto, en el poblado de Machupicchu, construido sobre el cono, hay grandes bloques de rocas englobadas por gravas y una matriz limo-arenosa, que testifican que el material es del tipo “flujo de detritos”, de origen aluvional. Además, es

frecuente la presencia de aluviones, como los ocurridos el 2004 y 2007, siendo en consecuencia un poblado expuesto a peligro de aluviones.

Valle del río Urubamba-Canón del Urubamba

El valle del río Vilcanota o Urubamba es considerado como uno de los más importantes de la región y es conocido como el Valle Sagrado de los Incas. Atraviesa y recorta la Cordillera Oriental de sureste a noroeste en forma irregular, siguiendo algunas veces fallas geológicas antiguas que han favorecido el proceso de erosión. Este valle atraviesa el santuario entre 2450 y 1750 msnm (Fig. 3), en una longitud aproximada de 25 km. El tramo del río entre las quebradas Cedrobamba y Aobamba, denominado Cañón de Torontoy o Urubamba (Foto 1), presenta paredes empinadas y abruptas cortando el batolito de Machupicchu. La ciudad inca se localiza a 2450 msnm, a 500 metros por encima del río, en la parte interna de un “meandro”, y en el flanco suroeste del cañón, formando paredes y acantilados que incluso pueden ser verticales o superar los 90°. Esta configuración topográfica ha favorecido la formación de muchos deslizamientos, como los del cerro Machupicchu.



Foto 1. Cañón del río Urubamba entre Chachabamba y Choquesuysuy.

3. CLIMA Y BIODIVERSIDAD

El clima en el santuario presenta muchos contrastes debido a la existencia de diferentes franjas climatológicas 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 incipientes (septiembre a diciembre), y finalmente tres meses con mucha lluvia (enero a marzo). Sin embargo, en las zonas bajas la precipitación es abundante y se distribuye regularmente a lo largo del año.

El piso de valle del río Urubamba, ubicado entre 1700 y 2200 msnm, presenta clima húmedo, con un promedio de precipitación total anual entre 1800 y 2000mm y una biotemperatura media anual entre 18 y 24 °C. La vegetación se caracteriza por bosques siempre verdes, altos y tupidos, que contienen volúmenes considerables de madera, con árboles de hasta 30 m de altura; también hay plantas trepadoras, epífitas, arbustos y otras.

Entre el piso de valle y aproximadamente la ciudad inca de Machupicchu, es decir, de 2200 a 2500 msnm, el clima aún es cálido y húmedo, con un promedio de precipitación total anual de 2000 mm y una biotemperatura 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 (Foto 2), 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 es de 18 °C, la precipitación media anual es de 2010 mm y la nubosidad es muy fuerte, típica de la selva nublada.

Entre 2500 y 4350 msnm, el clima varía de húmedo a subhúmedo y templado frío a frío, con un promedio de precipitación total anual entre 600 y 1100 mm, y una biotemperatura media anual entre 18 y 6 °C. La vegetación natural es variable, así, entre 2500 y 3800 msnm 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. Luego, entre 3800 y 4350 msnm, 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, en la parte alta del valle Lulluchayoc o en Pacaymayo. Entre las especies forestales más comunes se observan árboles pequeños, en forma aislada o formando bosques residuales.

Entre 4350 y 4750 msnm el clima es muy húmedo y frígido, con un promedio de precipitación total anual entre 600 y 1000 mm, y una biotemperatura media anual entre 3 y 1.5 °C. La topografía es muy accidentada y ocupa las partes más altas del

santuario, superada solamente por la formación nival. Esta zona de vida encierra un potencial hídrico significativo por la presencia de lagunas. La vegetación es muy abundante y florística, caracterizada por arbustos, semiarbustos y hierbas; en los lugares pedregosos o peñascosos hay líquenes y crustáceos. Además, se encuentran arbustos erguidos cuya altura no excede 0.50 m.

Entre 4750 y más de 6000 msnm la precipitación total anual variable gira alrededor de 800 mm, con una temperatura media anual inferior a 1,5 °C. Corresponde 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 la 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.

En cuanto a la fauna silvestre, Machupicchu alberga una gran biodiversidad en el esplendoroso paisaje cubierto por una exuberante flora selvática y por la vegetación típica de puna y cordillera. Es posible encontrar especies únicas en el santuario, algunas en peligro de extinción y otras en situación vulnerable. Se han reconocido más de 420 especies de aves, entre las que resaltan el chihuanco, el colibrí, el picaflor, el gallito de las rocas y el cóndor. Entre los mamíferos destacan la nutria, el oso de anteojos y el puma, por estar en vías de extinción, así como la taruca, la vizcacha y el zorro andino. Son importantes también las decenas de especies de reptiles, anfibios y peces, y más de 400 especies de mariposas diurnas y nocturnas.



Foto 2. Orquídea
Masdevallia veintchiana,
Wakanki.

4. 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 de edad pérmica-triásica, encontrándose también rocas metamórficas del Paleozoico inferior, rocas sedimentarias de edad mesozoica y cenozoica, y depósitos recientes o suelos cuaternarios (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 y los caminos inca (Foto 3).



Foto 3. La ciudad inca emplazada sobre granitos del batolito de Machupicchu.

4.1 Estratigrafía

Para una mejor descripción presentamos las rocas sedimentarias por unidades litológicas, incluyendo las formaciones superficiales cuaternarias.

4.1.1. Rocas del Paleozoico inferior

Las rocas del Paleozoico inferior reconocidas en el santuario corresponden a varias unidades, la primera denominada Unidad Indiferenciada Cámbrica a Ordovícica basal, luego las formaciones Ollantaytambo, Verónica, San José y Sandia, todas del Ordovícico; y finalmente la Formación San Gabán del límite Ordovícico-Silúrico (Fig. 4).

Unidad Indiferenciada Cámbrica-Ordovícica basal

Al suroeste del santuario afloran micaesquistos, mármoles, cuarcitas, gneis y a nivel local anfibolitas, que son las rocas más antiguas y más deformadas de la región (Fig. 4). Se halla bajo la Formación Ollantaytambo del Ordovícico, por lo que se asume una edad cámbrica a ordovícica basal y sería un equivalente del Complejo del Marañón datado como Ordovícico basal. Es importante resaltar que los primeros estudios sobre estas rocas metamórficas, realizados por Heim (1948), Egeler y De Booy (1957, 1961) y Fricker y Weibel (1960), le atribuyeron una edad precámbrica por el fuerte metamorfismo, al igual que en la región de Pataz.

Formación Ollantaytambo

Esta unidad aflora en el sitio arqueológico de Ollantaytambo (Marocco, 1978; Carlotto et al., 1996) y se extiende lateralmente hacia el Santuario Histórico de Machupicchu (Fig. 4), particularmente hasta la quebrada Misquipuquio. Infrayace a los conglomerados de la Formación Verónica, que también se extienden al sur, hacia Silque y hasta los nevados de Moyoc, donde son sobreyacidos en discordancia angular por formaciones mesozoicas y cenozoicas.

La Formación Ollantaytambo está compuesta, en su parte inferior, por unos 100 m de brechas de andesitas (brechas hidroclásticas depositadas en el agua), de color oscuro, que afloran al pie del sitio arqueológico de Ollantaytambo. Encima se observan pizarras y esquistos verdes, intercalados con bancos de cuarcitas y niveles cineríticos verdes, con un espesor aproximado de 700 a 800 m.

En la quebrada de Silque y su prolongación al sur, Egeler y De Booy (1961) indican la presencia de una asociación de fósiles de graptolitos que fueron determinados por Strachman (Birmingham): *Gliptograptus* cf. *Dentatus*, *Glossograptus* sp., *Tetragraptus quadribrachiatus* y *Didymograptus* sp., que sugieren una edad Arenigiana. La existencia del Llanvirniano está probada por las asociaciones de graptolitos al sur del nevado Salcantay-Paljay (Fricker, 1960) y al norte del nevado

Moyoc o Cara Cruz; en este último lugar Egeler y De Booy (1961) encontraron: *Phyllograptus* cf. *anna*, *Didymograptus* aff. *bifidus*, *Glossograptus* cf. *holmi*, *Amplexograptus* cf. *confertus*, *Diplograptus* aff. *Priscus* y *Cryptograptus* cf. *tricornis* var. *schaeferi*. En consecuencia, la edad de la Formación Ollantaytambo es Ordovícica inferior.

Formación Verónica

Esta formación aflora en el abra de Málaga y se proyecta al nevado Verónica, de donde toma su denominación; hacia el oeste, se halla truncada por el batolito de Machupicchu (Fig. 4). La Formación Verónica está constituida por 480 m de conglomerados, que están compuestos casi exclusivamente por cantos de cuarcita bien redondeados, con matriz arenosa, que pueden corresponder a depósitos aluviales formados en el Ordovícico inferior.

Formación San José

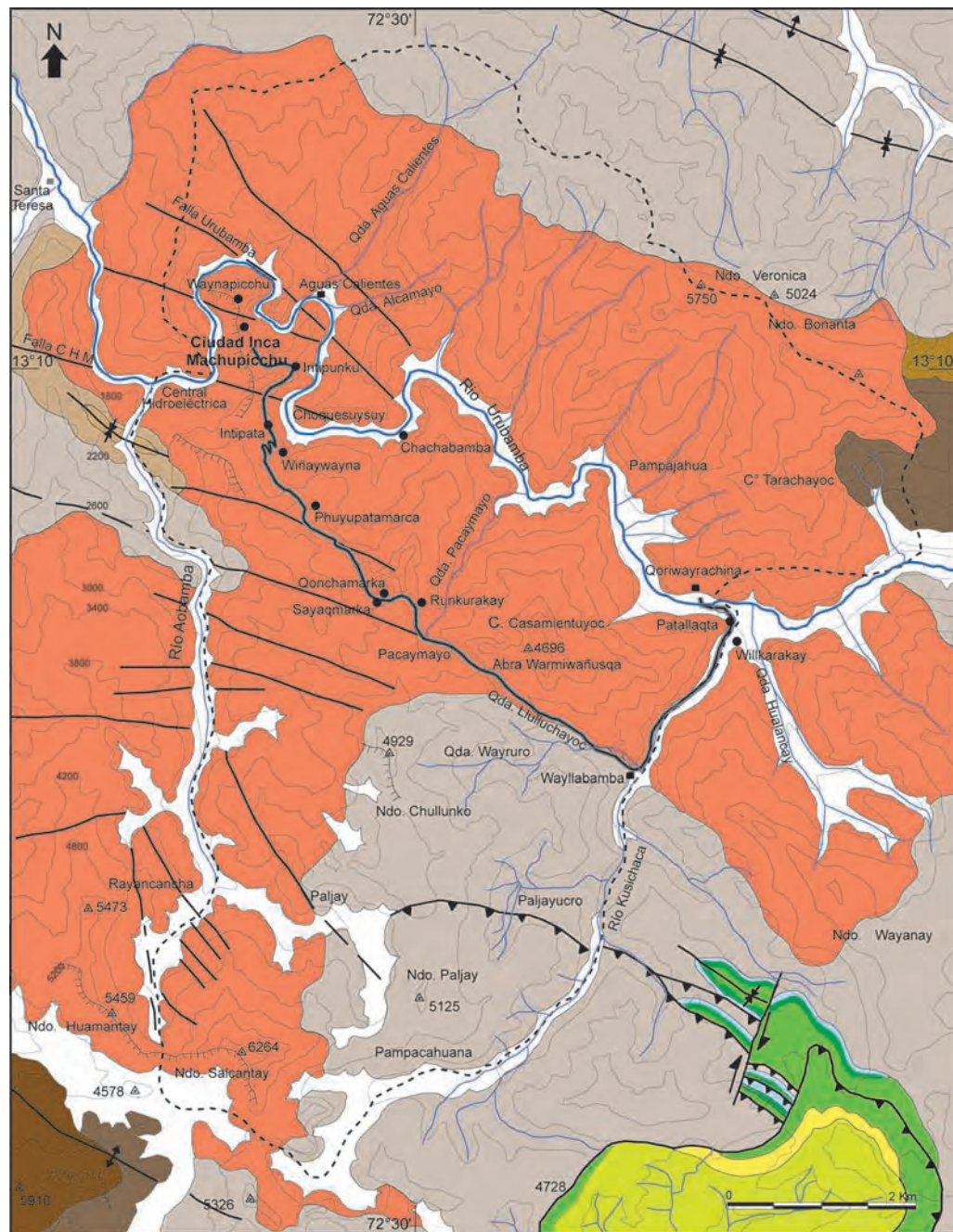
Aflora en el extremo norte del santuario y también al sur, desde Wayllabamba hasta el sureste del nevado Salcantay (Fig. 4). La unidad está constituida por pizarras micáceas y esquistos de color verde o negro, y en algunos lugares se halla intercalada con cuarcitas verdes. Todas estas rocas son de origen marino y actualmente forman pliegues. Cerca del nevado Verónica esta formación contiene fósiles de graptolitos *Didymograptus* sp. Cf. *D. nicholsoni* (Lapw) y el trilobites *Megalaspidella* sp. Cf. *M. kayseri* (Kobayashi), de edad Arenigiana superior (Marocco, 1978). En consecuencia, la Formación San José es en parte equivalente a la Formación Ollantaytambo, ambas del Ordovícico inferior a medio.

Formación Sandia

La Formación Sandia aflora en la quebrada Aobamba donde sobreyace a la Formación San José. Está compuesta principalmente por unos 200 m de cuarcitas de origen litoral y algo de pizarras marinas; las cuarcitas son finas, gris verdosas a negras y muestran un alto grado de metamorfismo, posiblemente térmico, incluso formando hornfels al contacto con los granitos. La edad asignada para esta unidad es Ordovícica superior (Caradociano).

Formación San Gabán

La Formación San Gabán ha sido identificada en el corazón de un sinclinal localizado en la quebrada Aobamba. Está conformada por micaesquistos de andalucita, esquistos, microconglomerados, pizarras, diamictitas y cuarcitas afectadas por un metamorfismo térmico ligado al batolito de Machupicchu. Estas diamictitas son consideradas como depósitos glaciares que se depositaron en el mar hace aproximadamente 440 millones de años, es decir en el límite ordovícico-silúrico.



LEYENDA		SIMBOLOGIA	
MESOZOICO/TERCERIZOICO	□ Cuaternario	--- Límite de santuario	— Camino Inca Tradicional
	■ Gp. San Jerónimo (Eoceno-Oligoceno)	— Ríos y quebradas	● Sitio arqueológico
	■ Fms. Quilque-Chilca (Paleoceno)	— Fm. Huancané (Cretácico inferior)	■ Centros poblados
	■ Gp. Yuncaypata (Cretácico superior)	■ Fm. Huambutio (Jurásico terminal)	▲ Señal geodésica
	■ Fm. Sandia (Ordovícico superior)	■ Intrusivo (Permo-Triásico)	— Falla
PALEOZOICO	■ Fm. San Gabán (Ordovícico terminal)	▲▲▲ Falla inversa	— Falla de rumbo
	■ Fm. Sandia (Ordovícico superior)	— Eje de pliegue de anticlinal	— Eje de pliegue de sinclinal
	■ Fm. San José (Ordovícico)		
	■ Fm. Veronica (Ordovícico)		
	■ Fm. Ollantaytambo (Ordovícico)		
	■ Unidad indiferenciada (Cámbrico-Ordovícico)		

Fig. 4. Mapa geológico del Santuario Histórico de Machupicchu y alrededores (Carlotto et al., 1999).

4.1.2. Rocas meso-cenozoicas

Al sur del nevado Wayanay afloran varias unidades sedimentarias que sobreyacen en discordancia angular al Paleozoico inferior (Fig. 4). Se trata de la Formación Huambutío (límite jurásico-cretácico) compuesta de areniscas finas y limonitas rojas, la Formación Huancané (Cretácico inferior) conformada por areniscas cuarzosas blancas, el Grupo Yuncaypata (Cretácico superior) formada por lutitas, yesos y calizas, y una potente serie de areniscas y lutitas rojas pertenecientes a las formaciones Quilque-Chilca (Paleoceno) y al Grupo San Jerónimo (Eoceno-Oligoceno).

4.1.3. Depósitos cuaternarios

Los depósitos cuaternarios se han desarrollado ampliamente sobre las rocas intrusivas del batolito y sobre las rocas metamórficas del paleozoico, cubriéndolos total o parcialmente en algunos sectores. Resaltan los depósitos fluviales, aluviales, glaciares, coluviales y eluviales.

Como producto de la descomposición in situ de las rocas se han formado bloques, gravas y arcillas que constituyen los suelos eluviales, que al ser arrastrados por efecto de la gravedad y de las aguas, forman los suelos coluviales, incluyendo dentro de estos al material deslizado y los bloques de granito. Este tipo de depósitos son frecuentes y se observan en la ciudad y caminos incas, y en las laderas. Las gravas con matriz areno-arcillosa depositadas por los ríos forman los depósitos aluviales y fluviales que se presentan no solamente en el río Urubamba, sino también en el Aobamba, Kusichaca, Aguas Calientes, entre otros. Las morrenas formadas por bloques englobados en una matriz gravo-arcillosa son los depósitos formados por los glaciares y están al pie de nevados como el Salcantay y Verónica.

4.2. Rocas ígneas del batolito de Machupicchu

La Cordillera Oriental de la zona de estudio está caracterizada por la presencia de varios cuerpos o macizos de rocas intrusivas, que forman el batolito de Machupicchu (Fig. 5). Este batolito, ubicado en plena deflexión de Abancay, se formó al interior de la corteza terrestre en el periodo Pérmico y Triásico, por enfriamiento de los magmas (roca fundida); ahora se halla en la superficie por efecto del levantamiento y erosión de la Cadena de los Andes.

El macizo sobre el que se emplaza el santuario es un cuerpo intrusivo de forma triangular, con una superficie de 244 km² que va desde el nevado Salcantay (Foto 4), y se extiende hasta Santa Teresa; en la parte norte de este triángulo se localiza la ciudad inca (Figs. 4 y 5). Los bordes norte y sur están en contacto con rocas metamórficas de la Formación San José (Ordovícico), mientras que el borde suroeste intruye rocas metamórficas de la Unidad Indiferenciada Cámbrica-Ordovícica. El granito ha sido datado por el método radioactivo Rb/Sr en 246 ± 10 millones de años (Priem: en Egeler y De Booy, 1961), es decir, Triásico inferior.

Examinadas a nivel macroscópico, las rocas son masivas, con textura fanerítica a veces pegmatítica de grano grueso, leucócratas, compuestas principalmente por ortoclasa, plagioclasa, cuarzo y hornblenda; estas rocas a veces contienen xenolitos de dioritas.

Al observarlas bajo el microscopio, utilizando el diagrama cuarzo-plagioclasa-feldespatos potásico Q-P-F (Fig. 6), encontramos rocas de diferente naturaleza petrográfica, pero que corresponden esencialmente a granitos, luego granodioritas, cuarzomonzodioritas, cuarzomonzonitas, y con menor frecuencia las cuarzosenitas y granitos alcalinos (Carlotto et al., 1999).

En general, los granitos son de color blanco o gris, con textura granular, holocristalina, a veces porfirítica, compuestos de cuarzo, microclina, ortoclasa, plagioclasa, biotita, así como zircón, epidota y clorita. A nivel específico, los granitos son de dos tipos: sienogranitos y monzogranitos. Los sienogranitos (Muestras: M-352, M-357, M-360, M-361, M-362, M-363 y P-141, Fig. 6) tienen textura granular subhedral de grano grueso, con presencia de ortoclasa perítica en cristales anhédricos, a veces con macla de carlsbad, con débil fracturamiento debido posiblemente a esfuerzos dinámicos, y que se encuentra débilmente alterada a arcillas; la microclina es anhedral y está débilmente alterada a arcillas;

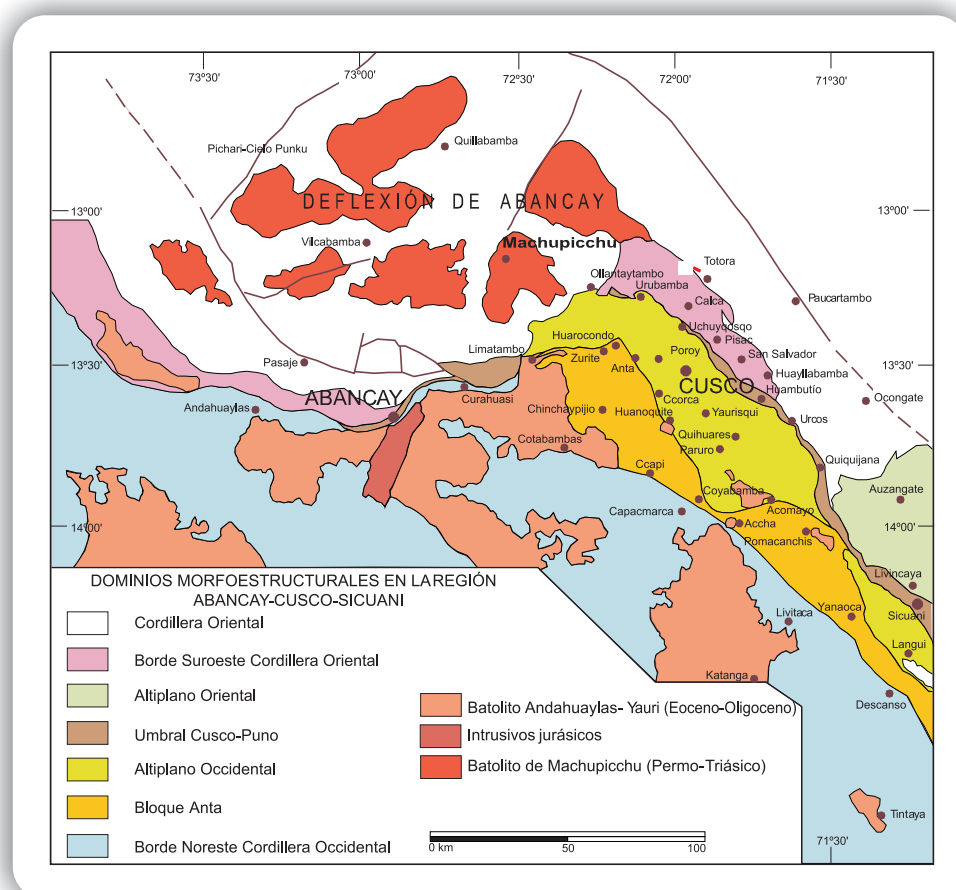


Fig. 5. Mapa morfoestructural de la región Abancay-Cusco-Sicuani con la ubicación del batolito de Machupicchu (Carlotto, 1998).



Foto 4. Nevado Salcantay sobre rocas intrusivas del batolito de Machupicchu. En primer plano aparece el afloramiento de esquistos de la Formación San José.

los cuarzos son anhedrales, con extinción ondulante, se hallan microfracturados y contienen feldespatos y esfena; la plagioclasa es una oligoclasa de forma subhedral a euhedral, con macla polisintética y combinada, y presenta débil alteración a sericita y arcilla; la biotita es anhedral a subhedral y está débilmente alterada a clorita, hematita y epidota; también se encuentran esfenas de origen secundario, y finalmente, hay magnetita e ilmenita.

Los monzogranitos (Muestras: M-128, M-358, M-359 y P-56, Fig. 6) tienen textura granular subhedral (Foto 5), con signos de deformación. La mineralogía se caracteriza por plagioclasa (andesina) subhedral, con maclas polisintéticas, carlsbad y periclina, a veces contiene biotita y hornblenda, y se encuentra débilmente fracturada. Los feldespatos potásicos como la ortoclasa, pertita y microclina son anhedrales a subhedrales, a veces con textura mirmequítica, contienen cuarzo y biotita, y pueden encontrarse ligeramente agrietados y tener débil alteración a sericita. La biotita es anhedral a subhedral y se altera débilmente a clorita; el cuarzo es anhedral, con extinción ondulante, a veces contiene zircón y biotita, y se halla ligeramente agrietado. La plagioclasa se altera medianamente a sericita y arcillas y la hornblenda es anhedral a subhedral y contiene al cuarzo y opacos; finalmente se tiene esfena, epidota o zoicita por alteración.

Las granodioritas (Muestras: M-3, M-100, M-103, M-364, M-365, P-23 y P-140, Fig. 6) tienen textura granular subhedral, de grano grueso a medio, con cristales de

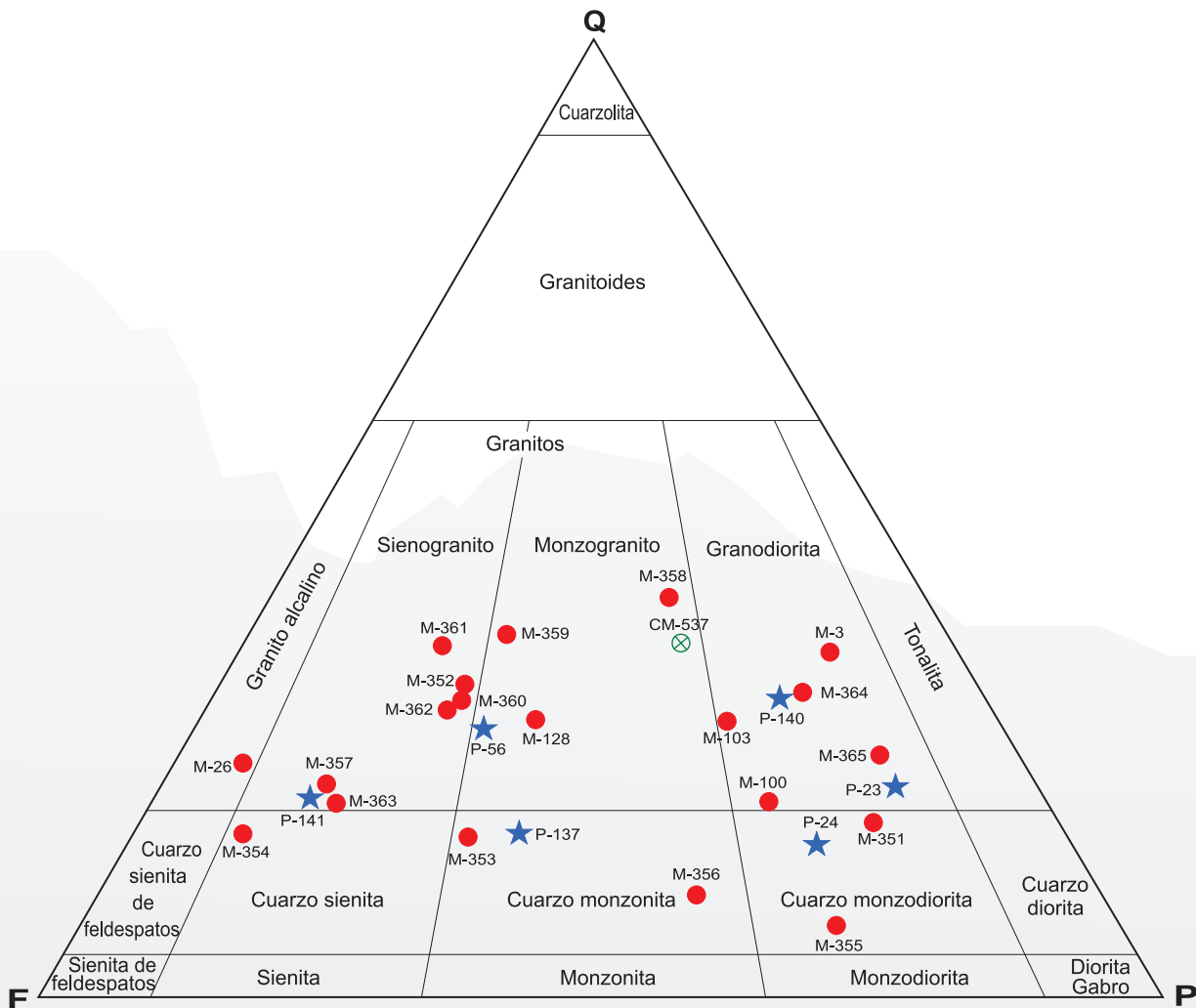


Fig. 6. Diagrama de cuarzo-plagioclasa-feldespato potásico(Q-P-F) de Streckeisen (1976) en el que se presentan muestras de las rocas del batolito de Machupicchu. Muestras de Carlotto et al. (1999) (●); (Carlotto et al., 1996) (★) y de Capdevila y Marocco (1969) (⊗).

plagioclasa sódica (oligoclasa) anhedral a subhedral, medianamente agrietada, a veces con textura mirmequítica, con maclas polisintéticas y carlsbad-polisintética, además se altera medianamente a sericita y débilmente a zoicita. El cuarzo es anhedral, con extinción ondulante, medianamente agrietado y se encuentra como relleno de intersticios; la ortoclasa es anhedral a subhedral, en intercrecimiento íntimo con el cuarzo; la microclina es granular o intersticial, a veces contiene esfena y cuarzo. La biotita es anhedral; también existe apatito euhedral dentro del cuarzo, plagioclasa y biotita, y se altera fuerte o medianamente a óxidos de hierro y clorita; la hornblenda es subhedral y se halla débilmente fracturada. Finalmente, está presente la ilmenita como mineral opaco.

Las cuarzomonzodioritas (Muestras: M-351, M-355 y P-24, Fig. 6) tienen una textura granular subhedral, de grano fino a medio, donde la plagioclasa va desde una oligoclasa a andesina subhedral, a veces zonada y presenta maclas polisintéticas y combinadas; la ortoclasa es anhedral a subhedral, a veces es perfitica y con textura mirmequítica. El cuarzo es generalmente anhedral con extinción ondulante, ligeramente agrietado por deformación, incluye a veces feldspatos y apatito. La biotita es subhedral. La hornblenda es anhedral y está débilmente alterada. Como minerales accesorios están la epidota, esfena y apatito en cristales subhedrales. Las plagioclasas se encuentran ligera a totalmente sericitizadas, las biotitas se hallan ligeramente alteradas a clorita y óxidos de hierro.

Las cuarzomonzonitas (Muestras: M-353, M-356 y P-137, Fig. 6), tienen textura holocristalina granular subhedral. La plagioclasa (oligoclasa) es subhedral, con macla polisintética, se encuentra flexurada y curvada debido a esfuerzos dinámicos y se nota fuerte a débilmente alterada a sericita; el cuarzo es anhedral, presenta

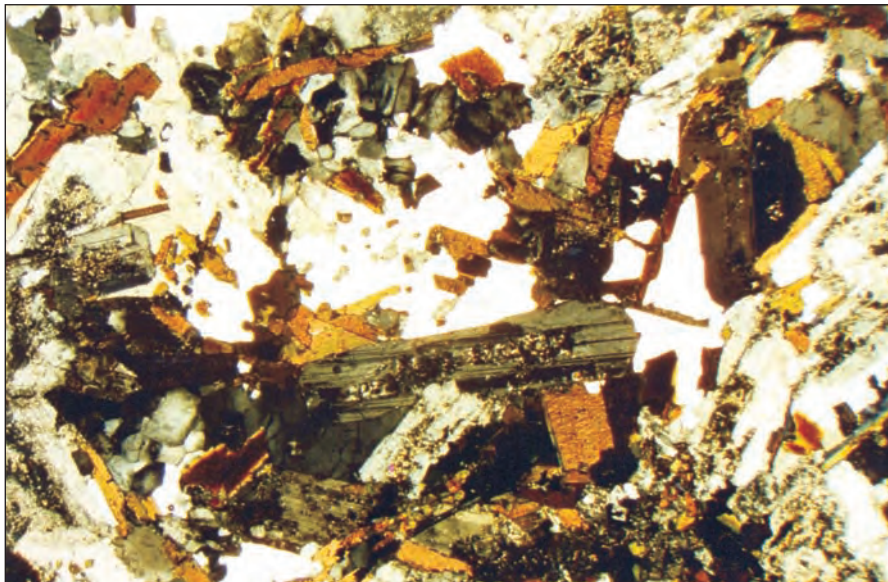


Foto 5. Monzonogranito del macizo de Machupicchu compuesto de ortoclasa, plagioclasa alterada a sericita y arcillas, cuarzo y biotita alterada a clorita (Muestra M-128). Ampliación x 8 (Nicoles cruzados).

extinción ondulante, contiene a veces a la plagioclasa y biotita, se halla microfracturado por deformación; la ortoclasa perfitica es anhedral a subhedral, contiene cuarzo y biotita, se encuentra microfracturada y se altera débilmente a arcillas; la biotita subhedral contiene al rutilo y circón, se altera a clorita, epidota y sericita; finalmente hay opacos por exsolución de biotita primaria.

La cuarzosienita (Muestra M-354, Fig. 6) tiene textura hipidiomórfica, compuesta por ortoclasa anhedral y poiquilítica, con macla de carlsbad y con alteración parcial a arcilla. El cuarzo es anhedral, como fenos y microfenocristales, con extinción ondulante y a veces se encuentra microfracturado. La plagioclasa (oligoclasa) es subhedral, con maclas polisintéticas, periclina y combinada, está parcialmente alterada a sericita. La biotita es anhedral y se observa parcialmente alterada a clorita y epidota.

La muestra M-26 (Fig. 6) es una roca pegmatítica de composición granito alcalino, con textura granular subhedral de grano grueso, con granos equidimensionales de microclina subhedral. La plagioclasa sódica (oligoclasa) es subhedral, a veces con textura mirmequítica y está parcialmente sericitizada. La biotita es subhedral, se halla parcialmente alterada a clorita y contiene apatito y opacos.

Dentro de la textura de los minerales, es importante destacar los efectos tectónicos nítidos, como la deformación, elongación y flexura de los componentes. Aparece también un leve efecto cataclástico en el cuarzo (Carlotto et al., 1999).

En los estudios regionales se realizaron análisis químicos de elementos mayores de varias muestras de los intrusivos permo-triásicos del batolito de Machupicchu (Carlotto et al., 1999; Fricker y Weibel, 1960; Marocco, 1978). En el Cuadro 1, en la relación K_2O/Na_2O (Molar) la gran mayoría de muestras dan valores menores a 1, indicando que las rocas son ricas en sodio (Carlotto et al., 1999). También se ha calculado la relación $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ (Molar) que da valores menores a 1, indicando que se trata de rocas metaluminosas con valores relativamente altos de Na_2O+K_2O , posiblemente de las series tipo I. Sin embargo, algunas muestras son peraluminosas, ya que sus valores son mayores a 1, tal como se ha reconocido en las rocas de la misma edad del sureste del Perú (Kontak et al., 1984; Clark et al., 1990). Estos magmas peraluminosos son del tipo S, y tienen origen en la corteza terrestre.

Para determinar la clasificación geoquímica se han vuelto a calcular los datos del Cuadro 1 al 100%, sin H_2O ni CO_2 de los óxidos utilizados en los diagramas clásicos, basados en los porcentajes del total de alcalinos ($Na_2O + K_2O$) versus sílice (SiO_2). Estos datos llevados al diagrama TAS (Fig. 7) muestran dos conjuntos: uno de granitos alcalinos y otro de granitos calco alcalinos (subalcalino).

En conclusión, los estudios petrográficos, químicos y de geología regional muestran que el batolito de Machupicchu se formó en la corteza continental en un contexto

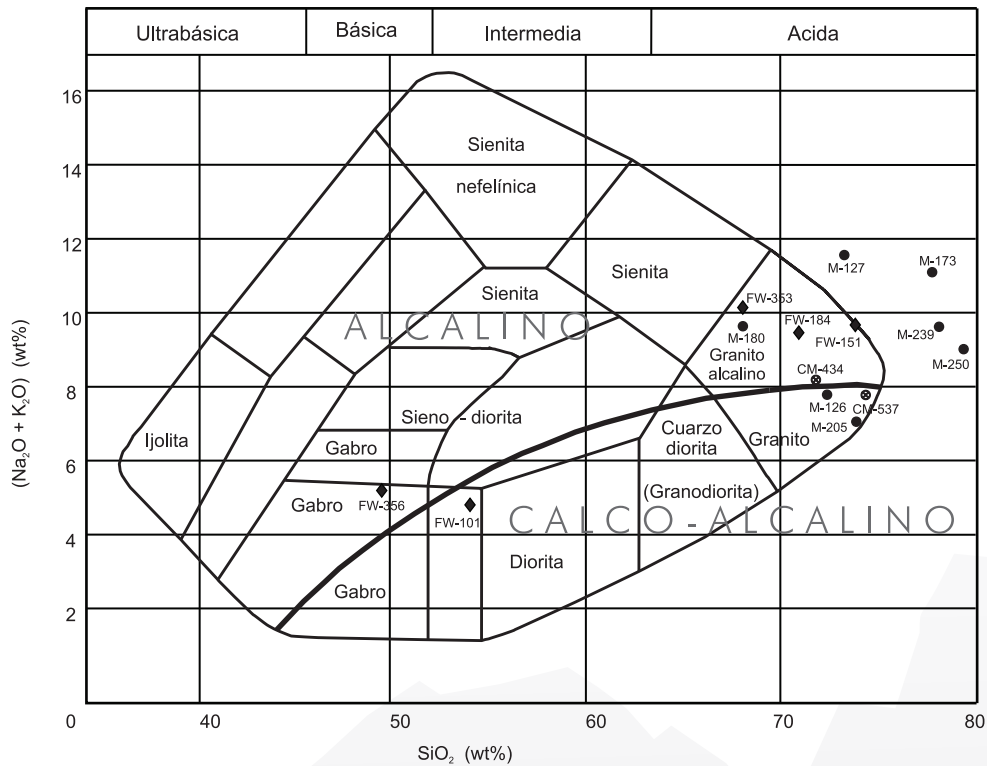


Fig. 7. Diagrama TAS de Cox et al. (1979), modificado por Wilson (1989) para las rocas del batolito de Machupicchu. Muestra de Carlotto et al. (1999) (●), además se incluyen las muestras de Fricker y Weibel (1960) (▲) y Capdevila y Marocco (1969) (◐).

tipo rift, es decir, el desmembramiento de la corteza debido a esfuerzos tectónicos en distensión o extensión que provocaron la formación de grabens y horsts durante el periodo geológico Pérmico superior-Triásico inferior (260-245 millones de años Ma), como se muestra en la Figura 8.

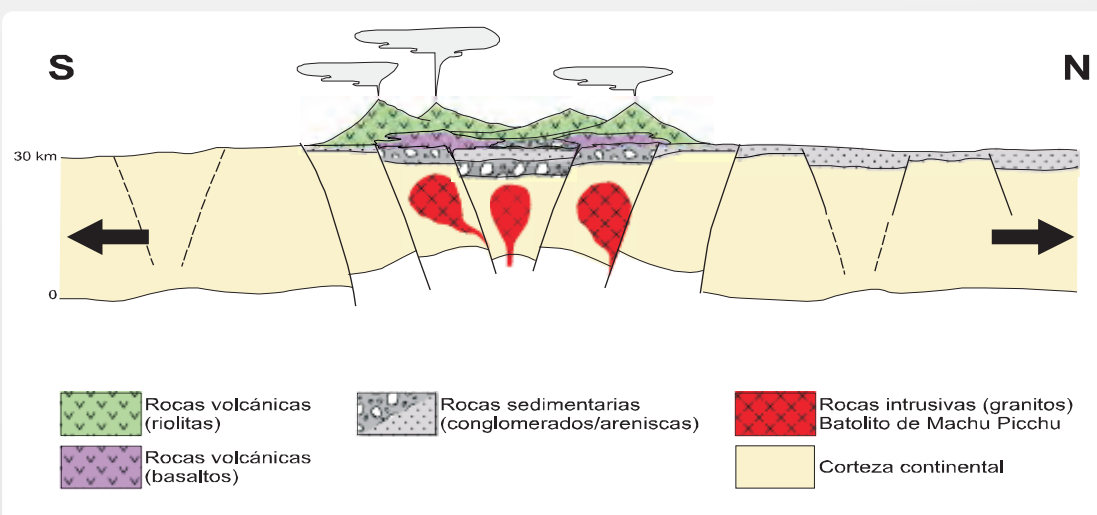


Fig. 8. Modelo de formación del batolito de Machupicchu en un contexto de rift continental durante el Permo-Triásico.

4.3. Geología estructural

Los trabajos de campo y la observación de fotografías aéreas (Carlotto et al., 1999) han permitido reconocer varios sistemas de fallas en el área del santuario. Los principales tienen orientación NO-SE y E-O; entre ellos resaltan dos fallas NO-SE algo paralelas, que controlan en parte la evolución del río Urubamba y particularmente la forma de "meandro" que hace el río en las inmediaciones de la ciudad inca. Esta forma de meandro también guarda relación con los sistemas de fallas de carácter local, con dirección NE-SO, como las denominadas Machupicchu y Waynapicchu (Kalafatovich, 1963). Se puede decir entonces que el meandro del río Urubamba tiene un control tectónico y no corresponde a una etapa senil de su evolución. Por otro lado, en los alrededores del santuario se han reconocido pliegues, es decir anticlinales y sinclinales de dimensiones kilométricas, que afectan a las rocas paleozoicas y meso-cenozoicas. Estas últimas también son afectadas por fallas inversas y de rumbo (Fig. 4).

Las estructuras que resaltan más a escala del afloramiento son las diaclasas (Foto 6), que son fracturas sin desplazamiento, originadas por contracciones debidas al enfriamiento del magma (roca fundida) durante la formación del batolito de Machupicchu. En este se han reconocido varios sistemas de direcciones de diaclasas que afectan las rocas, siendo las principales NO-SE, NE-SO y E-O (Fig. 9). Estas han producido un verdadero enjambre de fracturas, que junto con las fallas han influido en la evolución geomorfológica y en el aspecto que presenta actualmente la zona.

Incluso 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, es decir, no están activas (las fallas activas generalmente producen sismos). 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, pasan por el sur del santuario, en límite entre la Cordillera Oriental y el Altiplano. Sin embargo, en ningún caso la ciudad inca y la mayor parte del santuario fueron afectados, tal como se puede ver en el mapa de isosistas de ambos sismos (Figs. 10a y 10b). 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. 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 construcciones incas (Carlotto et al., 1999).



Foto 6. Bloques de granito en proceso de separación del afloramiento aprovechando las diaclasas que cortan la roca.

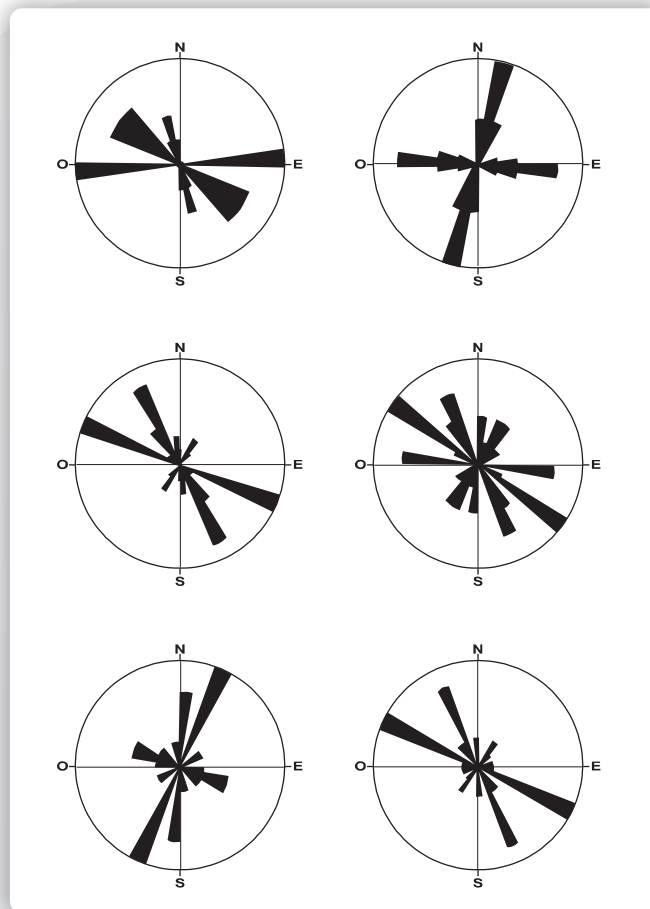


Fig. 9. Diagramas que muestran las direcciones de las diaclasas medidas entre Aguas Calientes y la ciudad inca de Machupicchu (Carlotto et al., 1999).

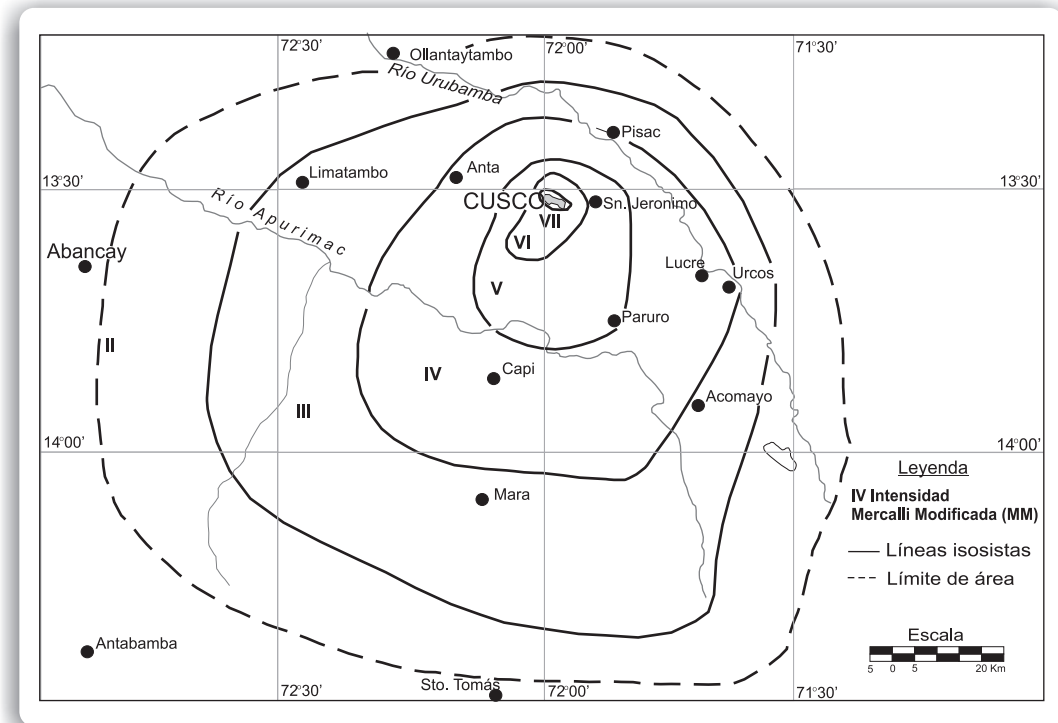


Fig. 10a. Mapa de isosistas del sismo del 21 de mayo de 1950 en Cusco (Silgado,1978).

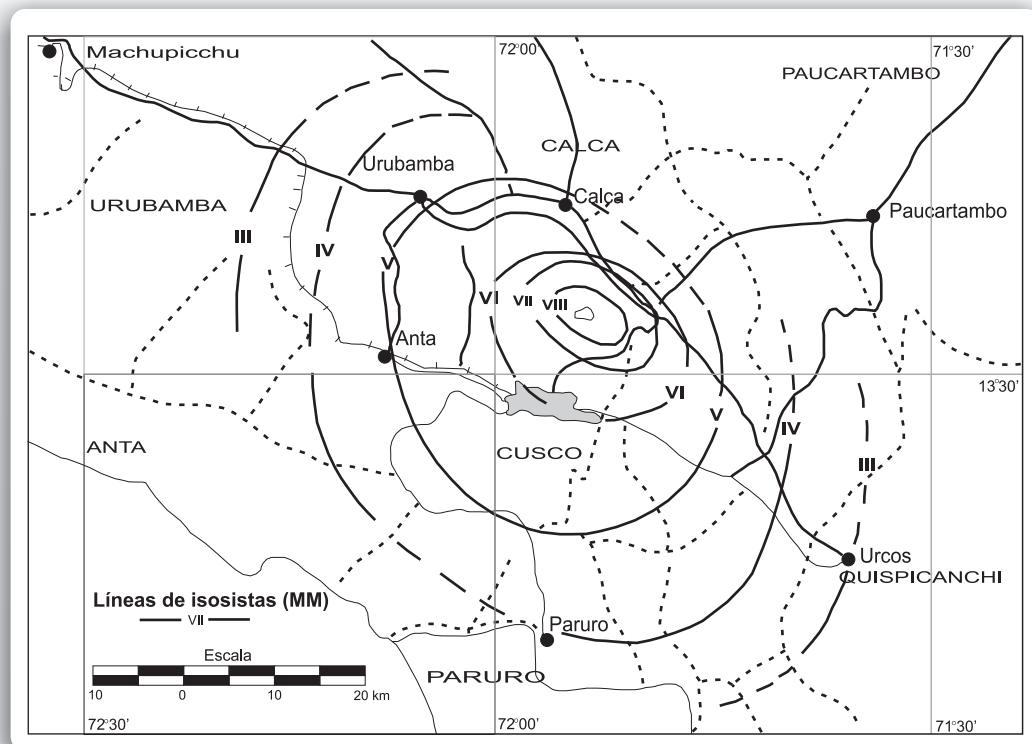
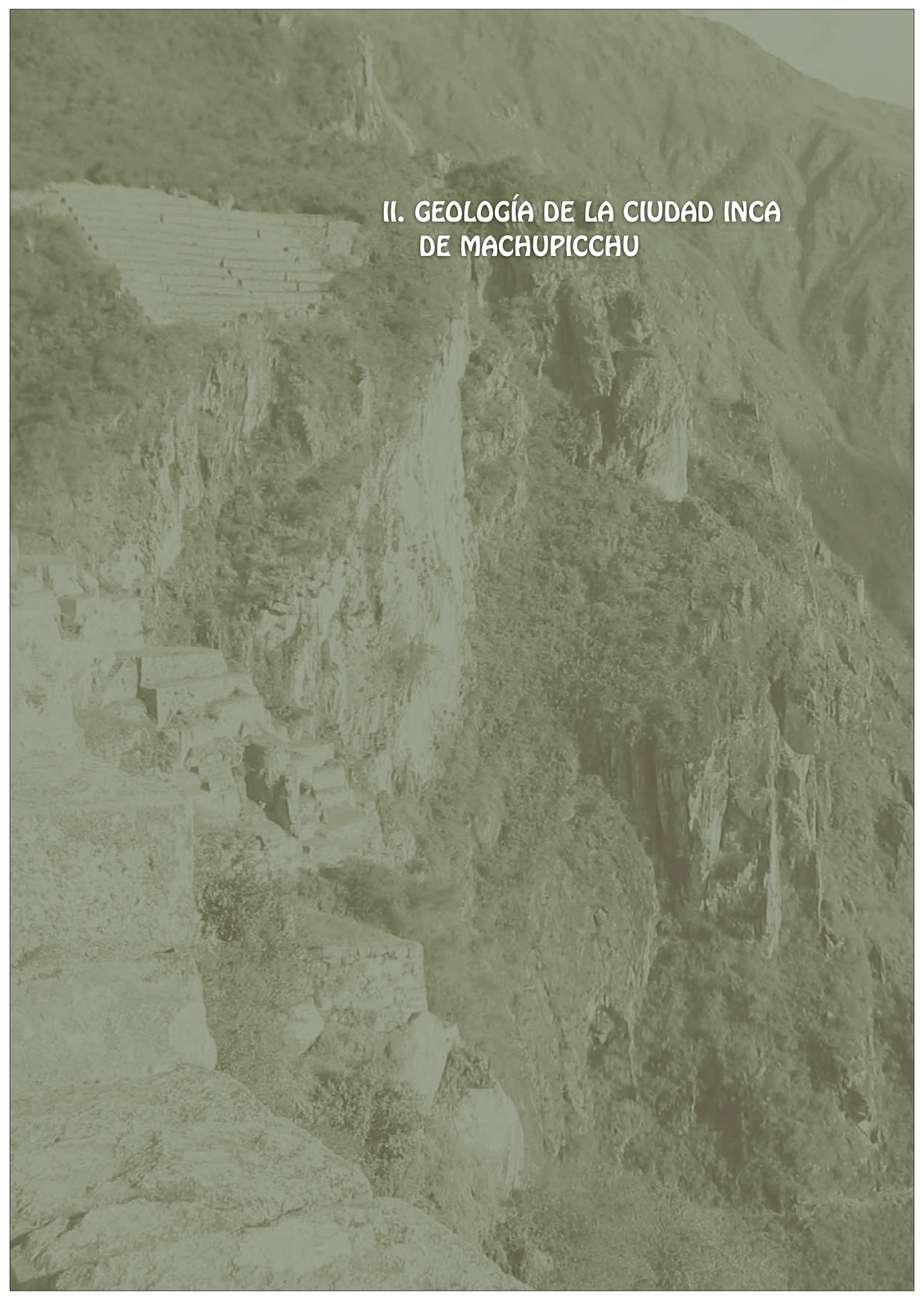


Fig. 10b. Mapa de isosistas del sismo del 5 de abril de 1986 en Cusco (Huaco et al.,1986).

An aerial photograph of the Machu Picchu archaeological site, showing the terraced stone structures and the surrounding rugged mountain terrain. The image is overlaid with a semi-transparent green filter.

II. GEOLOGÍA DE LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad inca de Machupicchu se localiza en los terrenos del santuario del mismo nombre; fue construida a una altura promedio de 2450 msnm, 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. 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 (Foto 7).

2. UNIDADES GEOLÓGICAS

Los cerros Machupicchu y Waynapicchu y los alrededores, incluyendo la ciudad inca, están compuestos por rocas ígneas intrusivas del batolito de Machupicchu (Fig. 11). Sin embargo, un levantamiento geológico detallado a escala 1:500 de la ciudad (Fig. 12) ha permitido diferenciar cuatro unidades cartografiables: los afloramientos de granitos, granitos muy fracturados y movidos por gravedad, bloques de granitos separados, depósitos coluviales y material de relleno.

Afloramientos de granitos

Constituyen el substrato de la ciudad inca y aparecen en sus alrededores, particularmente en los cerros Machupicchu y Waynapicchu. 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 esquisto clorítico micáceo cuarzoso. El color del talco y del esquisto es verde oscuro a claro.

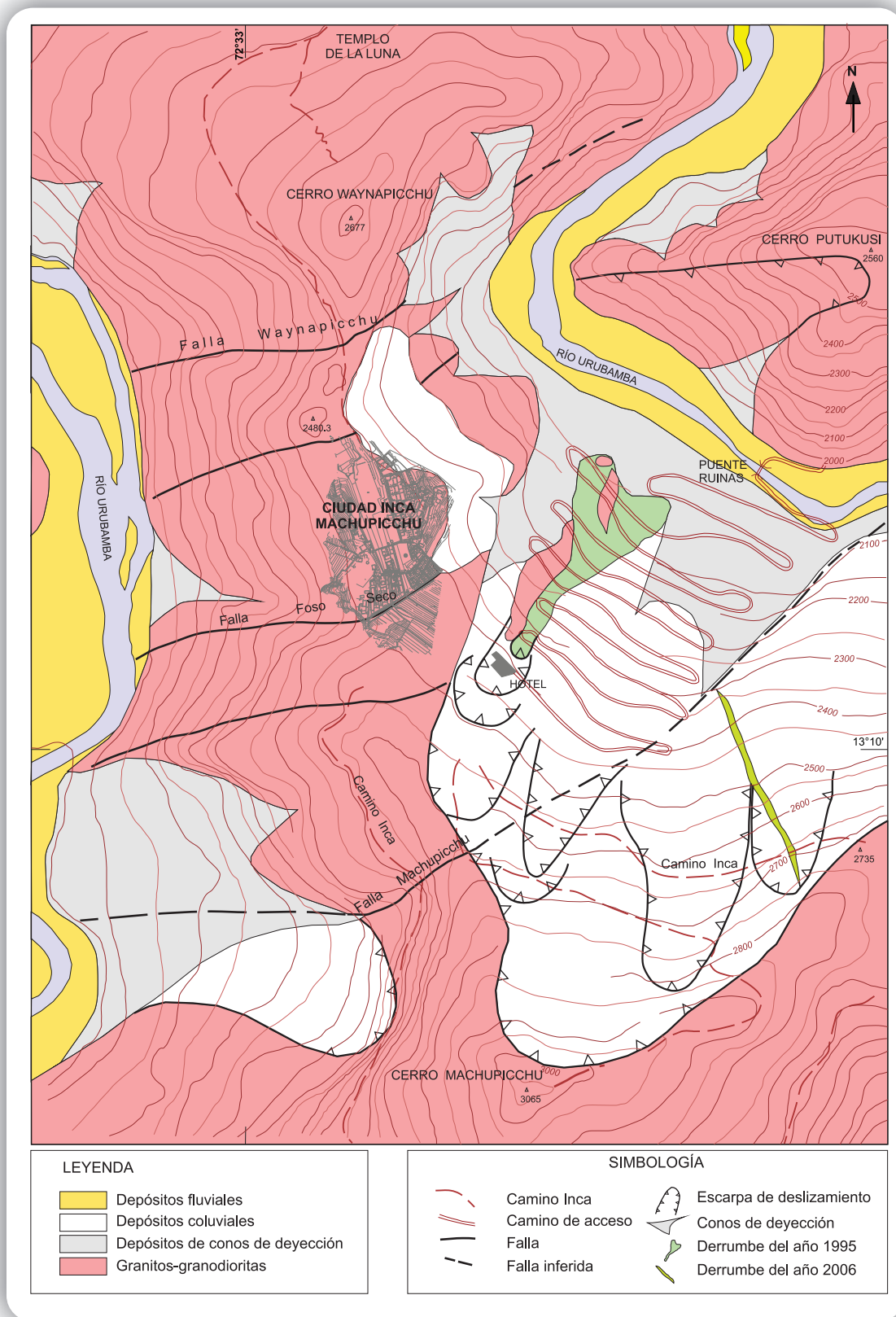


Fig.11. Mapa geológico de la ciudad inca de Machupicchu y alrededores, tomado de Carlotto y Usselman (1989) y Carlotto et al. (1999) modificado.

Los granitos afloran notoriamente en los bordes de la ciudad, particularmente en la ladera occidental, junto a los conjuntos de andenes (Fig. 12), donde la topografía del terreno forma un fuerte precipicio hacia el río Urubamba (Foto 7). Igualmente, los afloramientos están presentes bajo el muro y camino inca que conduce hacia el sitio denominado Catarata 1, y al pie del conjunto de andenes de la ladera oriental de la ciudad (Fig. 12). En todos los sitios mencionados anteriormente, los andenes se han fundado sobre los granitos fracturados y a veces sobre granitos masivos y estables. 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 (Fig. 9). 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



Foto 7. Andenes que estabilizan las laderas empinadas en la parte occidental de la ciudad inca de Machupicchu, Conjunto de Andenes 6.



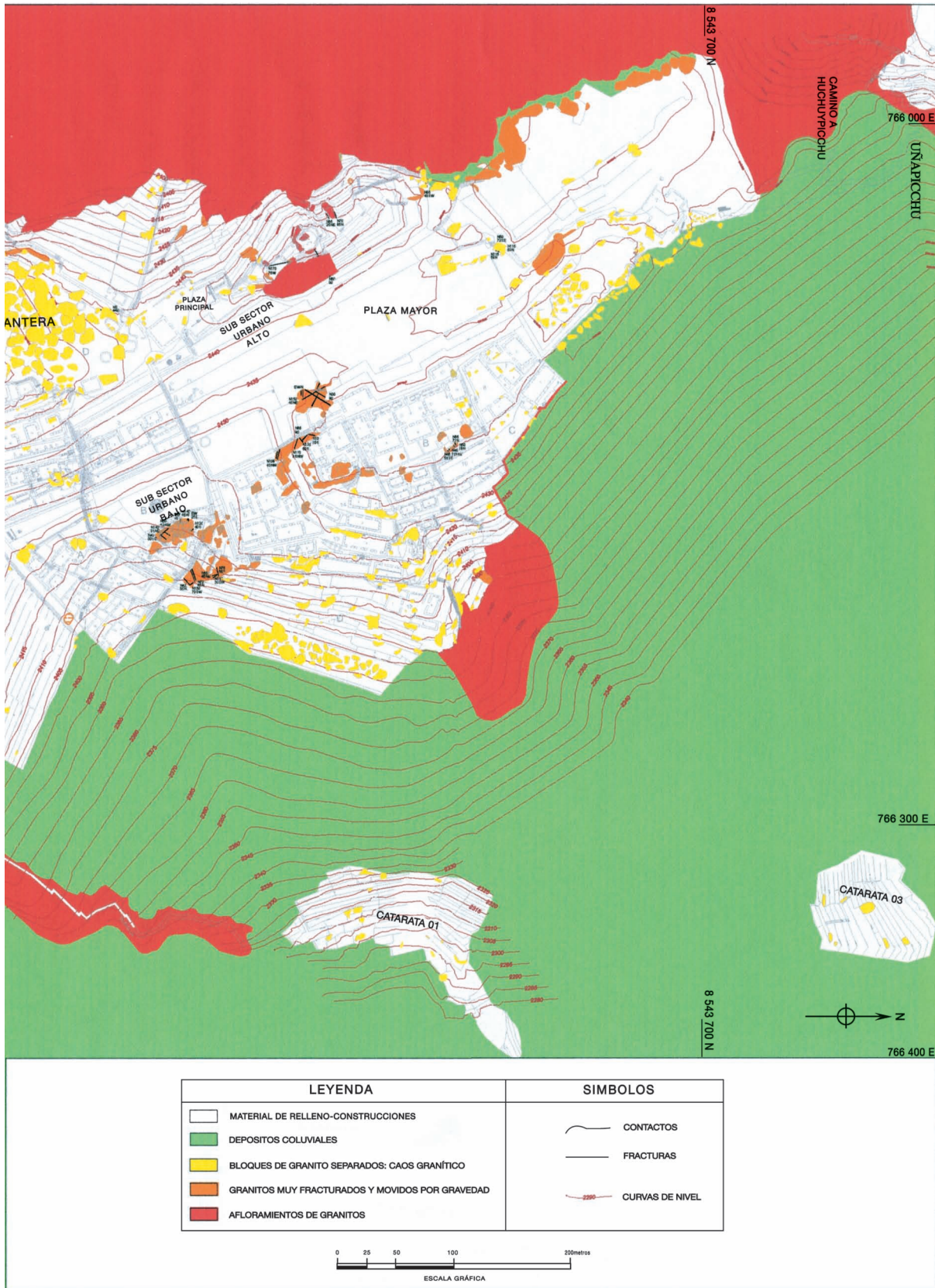


Fig.12. Mapa geológico de la ciudad inca de Machupicchu.

desintegración de los bloques graníticos que son ayudados por el agua y la gravedad (Foto 6 y Fig. 13).

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 lajas, 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. 13 y Foto 6). Desde el punto de vista ingenieril, este tipo de material ya no puede ser considerado como roca madre debido a que está movido, aunque sea levemente.

Estos materiales se presentan en algunos lugares de la ciudad inca, principalmente 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. 12). 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 bloques 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 fracturas, 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. 12), porque se cree que fue el lugar donde los incas explotaban el granito. 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

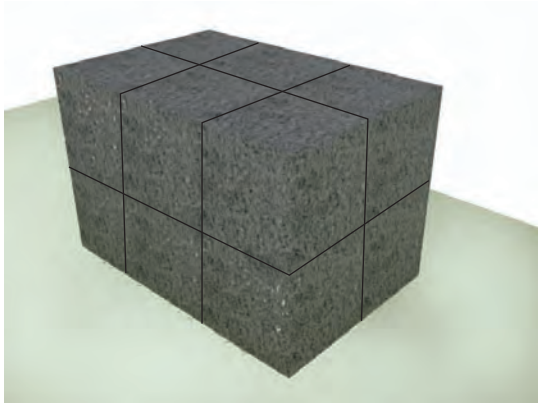
componente importante de bloques caídos por efecto de gravedad en una ladera empinada (Foto 8).

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. 12). Kalafatovich (1963) ya había interpretado la zona de la cantera como un caos granítico, pero ahora sabemos que la mayor parte de la ciudad formaba parte del caos granítico (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 del caos granítico se explica en la Figura 13 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 (Foto 11), donde en la parte baja, hacia la ladera occidental, se ven los afloramientos de granitos. 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 norte de la Plaza Mayor, en el Conjunto 6, aunque aquí ya no se ven los afloramientos de granitos (Foto 12).

a



b



c



Fig. 13. Origen del caos granítico: a) granitos fracturados en bloques, b) que tienden a separarse aprovechando las fracturas y c) son erosionadas para formar el caos granítico.

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 (eluvial), 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 (Fig. 12).

Material de relleno-Construcciones

Corresponde a rellenos de depresiones, zonas de plataformas, sistemas de andenes y construcciones que ocupan gran parte de la ciudad (Foto 9). El material de relleno está constituido por gravas arenosas que tienen la particularidad de haber sido trabajadas por la mano del hombre.

3. 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 presentaba la zona cuando los incas llegaron al lugar, así como el aspecto que muestra actualmente. Para poder entender la evolución geológica de Machupicchu, empezaremos con una descripción de las fallas geológicas regionales y locales, y posteriormente seguiremos con las diaclasas.

Las 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. 4). Una de las fallas, de dirección NO-SE, y escala kilométrica denominada luego Urubamba por Vilimek et al. (2005), pasa 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.



Foto 8. Bloques de granitos caídos en la ladera oriental de la ciudad inca de Machupicchu, Conjunto de Andenes 12.



Foto 9. Plataforma lograda mediante el relleno artificial hecho por los incas (izquierda) y otras plataformas en el Conjunto de Andenes 9.

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. 11). Las fallas NE-SO, según Kalafatovich (1963), definen una minifosa que corresponde a gran parte de la ciudad inca de Machupicchu.

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 otro inverso que sería posterior.

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. 8). Es posible que los movimientos sinistralen 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 en ese NE-SO, como es bien conocido en la región de Cusco (Carlotto, 1998). En esta época se produce el mayor levantamiento de los Andes y por lo tanto la erosión de las rocas de la parte superior de la corteza continental. Estos fenómenos han permitido sacar los granitos desde las profundidades de la corteza hasta la superficie.

Durante el levantamiento andino y erosión consecuente se formó el río Urubamba; la intersección de fallas NO-SE y NE-SO han controlado la configuración del río en la zona de estudio 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).

Las 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 o roca fundida, 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 (Foto 10), produciendo un verdadero enjambre de fracturas. Las medidas de microtectónica



Foto 10. Diaclasas verticales de dirección NO-SE que afectan al macizo granítico, en la ladera occidental del cerro Machupicchu.

muestran diferentes familias de fracturas, destacando el sistema NO-SE, luego los sistemas E-O y NE-SO (Fig. 9). 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. En conclusión, 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 verdaderos caos graníticos.

4. GEOMORFOLOGÍA

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. 4), que forman un corredor estructural dentro del cual se han formado las fallas NE-SO de Machupicchu, Waynapicchu, Foso Seco y otros (Fig. 11). 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 el 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. 9), y delimitan bloques de formas más o menos paralelepípedas (Fig. 13). Estos bloques se han preformado en profundidad ya que las diaclasas son producto del enfriamiento del magma. Luego del levantamiento andino, 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, que 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. 13). Los bloques ya redondeados, o bolones formados de esta manera, pudieron entonces desprenderse, descender o caer lentamente por simple gravedad, apilándose unos sobre otros y formando verdaderos cúmulos o amontonamientos conocidos como caos granítico (Fig. 14).

Antes de la llegada de los incas, la morfología de la zona tenía una depresión (guben) irregular (Fig. 14a) 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. 13b), 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. 13c).

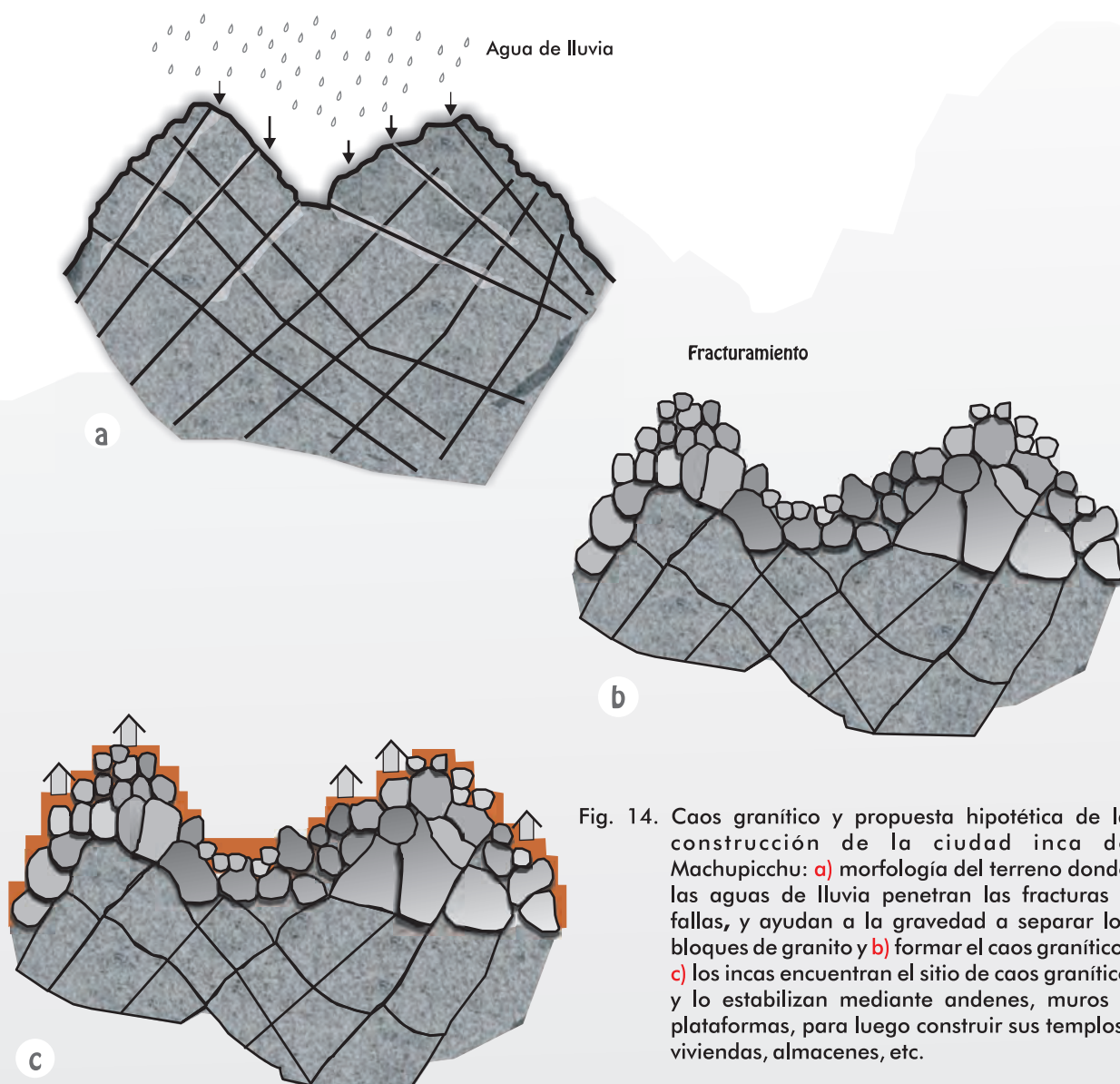


Fig. 14. Caos granítico y propuesta hipotética de la construcción de la ciudad inca de Machupicchu: **a)** morfología del terreno donde las aguas de lluvia penetran las fracturas y fallas, y ayudan a la gravedad a separar los bloques de granito y **b)** formar el caos granítico; **c)** los incas encuentran el sitio de caos granítico y lo estabilizan mediante andenes, muros y plataformas, para luego construir sus templos, viviendas, almacenes, etc.



Foto 11. Caos granítico en el sector conocido como la cantera. Nótese que los andenes estaban en plena construcción.



Foto 12. Caos granítico en el Conjunto 6 estabilizado con muros y andenes.

5. LOS 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. 14). 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. Sin embargo, 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.

Sufusión

Son pequeñas geoformas 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, 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 (Foto 13).

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, particularmente 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. 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 (Foto 14).

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 bloques y entonces estos se mueven o se asientan buscando un nuevo equilibrio. Los reacomodos 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 (Foto 15).

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 (Foto 16).

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 de la ciudad de Machupicchu (Foto 17).



Foto 13. Proceso de sufusión que ha causado el colapso de muros en este recinto del Conjunto 13.



Foto 14. Erosión superficial de los suelos en el camino inca que comunica a la ciudad inca con Waynapicchu.



Foto 15. Asentamiento de la pared norte del Templo Principal. Nótese la humedad del piso.



Foto 16. Deslizamiento de la ladera norte del cerro Machupicchu, sobre el que están construidos el camino inca y la carretera de acceso a la ciudad inca.

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. 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 (Foto 18).



Foto 17. Reptación que afecta a las terrazas agrícolas del Conjunto de Andenes 11.



Foto 18. Derrumbe del 2006 que afectó al camino inca, en el tramo Intipunko-ciudad inca.



III. LOS PROBLEMAS GEODINÁMICOS DE LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad inca de Machupicchu fue un importante centro urbano complejo (Foto 19), construido esencialmente con granitos labrados, de diferentes tamaños y formas geométricas. Consta de 19 conjuntos urbanos, situados en dos subsectores (alto y bajo), 13 conjuntos de andenes y el sector agrícola dividido en dos subsectores (Fig. 15).

Luego de haber presentado la geología y geodinámica externa que afectan a la ciudad, en esta parte mostraremos y describiremos los problemas por conjuntos, identificando las causas y ofreciendo, en la mayoría de los casos, las recomendaciones necesarias. Se ha preparado un mapa geodinámico y de drenajes de toda la ciudad inca a escala 1:500 (Fig. 16) y de algunos sectores a escala 1:100; en este mapa se muestra las escarpas de deslizamientos superficiales, como las del Conjunto de Andenes 13 o las del sector occidental del Intiwatana, en ambos casos estabilizados por andenes incas. También se dibujan las escarpas de deslizamientos inferidos, las zonas con reptación, como en el Conjunto de Andenes 11; así como las zonas que presentan fenómenos de sufusión, siendo las más notables las situadas en la ladera oriental de la ciudad, y particularmente en el Conjunto 19 y el Conjunto 13. Asimismo, se han cartografiado los canales incas de distribución de agua, los drenajes de evacuación



Foto 19. Vista panorámica de la ciudad inca de Machupicchu.

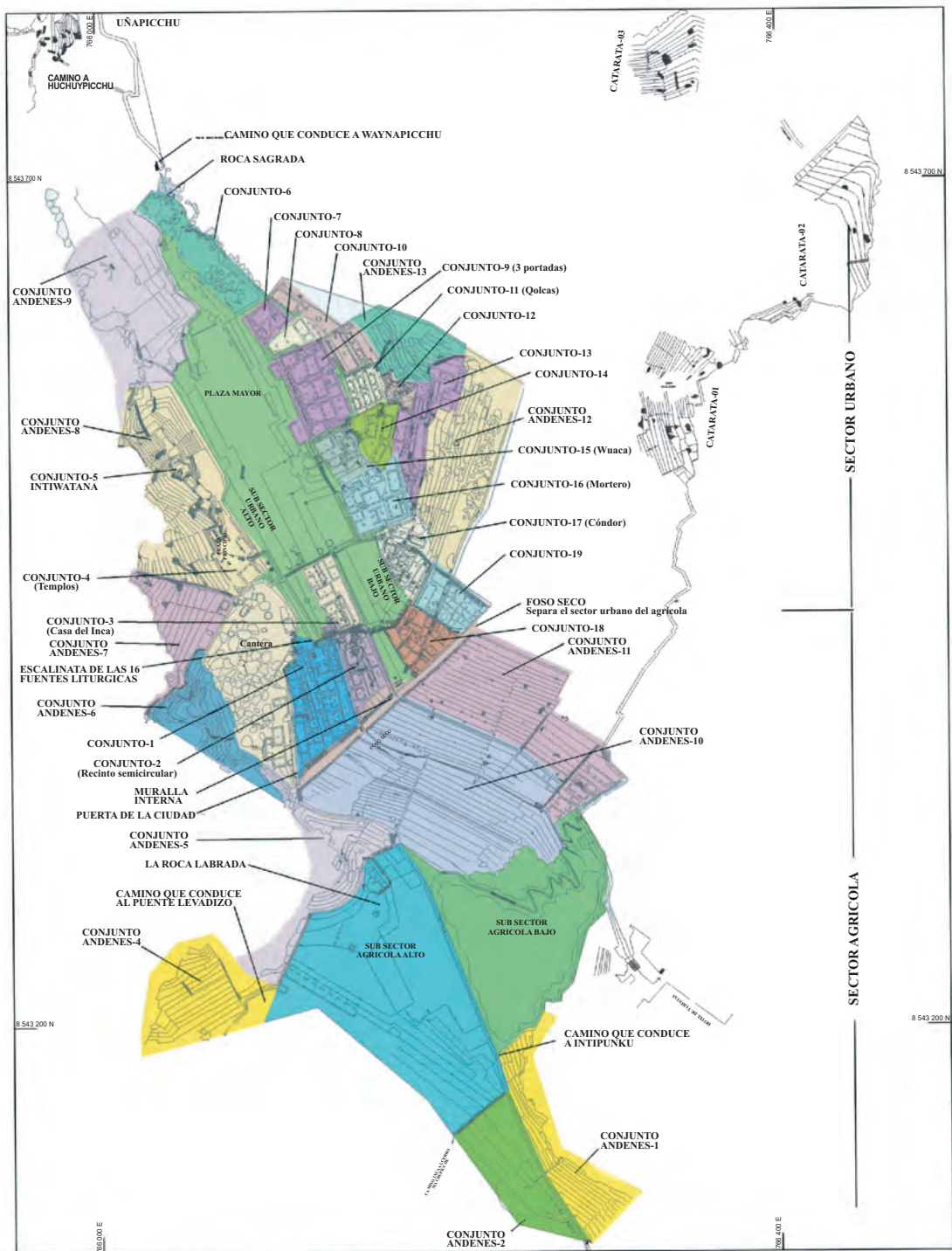


Fig. 15. Mapa de sectorización de la ciudad inca de Machupicchu. Tomado del Plan Maestro del Santuario Histórico de Machupicchu (2005)

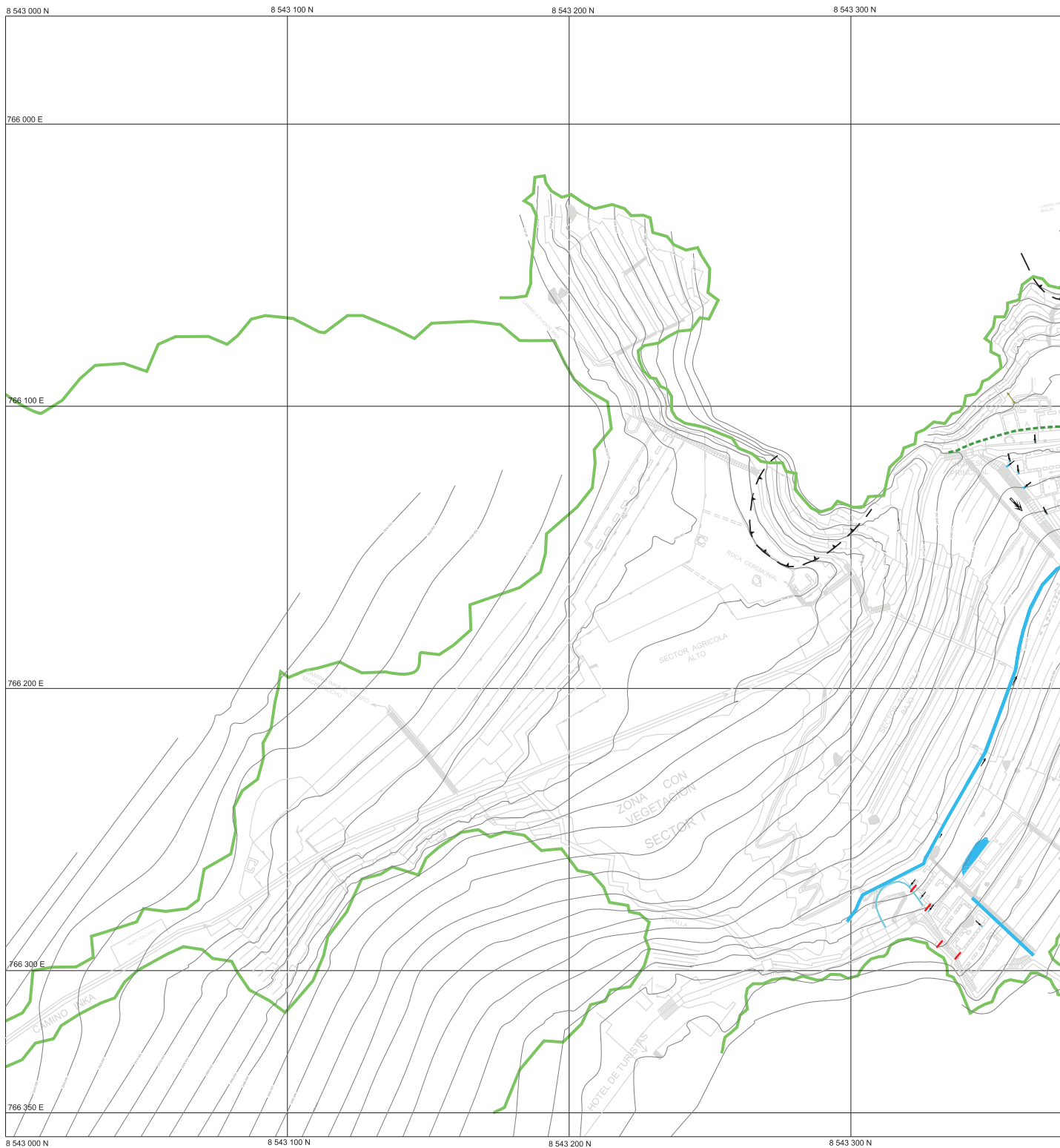
de aguas pluviales y las zonas donde hay infiltraciones importantes en las graderías, como las que se localizan en el muro occidental del Conjunto 16 o la que sube a los templos. Igualmente, se ha marcado el drenaje que funciona actualmente en forma parcial. Por otro lado, dentro de la morfología actual de la ciudad, se han determinado las divisorias de aguas, lo que permite interpretar mejor los sistemas de drenaje, así como definir las inclinaciones de los pisos. Finalmente, se muestran los agrietamientos o separación de juntas en los muros incas y los alineamientos de estos. La cartografía confirma que la ciudad inca no es totalmente estable debido a que en gran parte está construida sobre el caos granítico, cuyos bloques se están asentando y afectan las construcciones.

2. SECTOR URBANO-SUBSECTOR ALTO

El Sector Urbano se encuentra separado del sector agrícola por el foso seco; tiene una Plaza Mayor y dos plazas menores. Estos espacios abiertos marcan un eje central mediante una línea imaginaria que pasa por sus puntos medios, delimitando de esta manera dos subsectores en el Sector Urbano: el Subsector alto y el Subsector bajo (Fig. 15). En el Sector Urbano se encuentran la Puerta de la Ciudad, el Torreón o Templo del Sol, las Fuentes Litúrgicas, el Centro Ceremonial, la Tumba Real, el Aposento de la Ñusta, el Grupo del Rey, la Plaza Sagrada, el Templo de las Tres Ventanas, el Templo Principal, la Casa del Sacerdote, la Cámara de los Ornamentos, el Intiwatana, el Cóndor y el Mortero; varios de estos sitios presentan diferentes problemas de geodinámica externa que son presentados a continuación (Fig. 16).

Plaza Sagrada y templos: Conjunto 4

Este conjunto consta de tres edificios agrupados alrededor de un espacio cuadrangular denominado Plaza Sagrada, en el que se encuentran los templos, y consiste en una plataforma artificial, adecuada probablemente con relleno y localizada en una zona bien trabajada del caos granítico. Los tres edificios mayores son: El Templo Principal (Recinto 3), Templo de las Tres Ventanas (Recinto 2), la Casa del Sacerdote (Recinto 1), y una construcción rectangular denominada Cámara de los Ornamentos (Recinto 4) ubicada detrás del Templo Principal (Figs. 15, 18 y Foto 20). La topología de las unidades arquitectónicas de este conjunto, así como su morfología, estructura y asociación con contextos funerarios y piedras labradas, inducen a pensar en una función ceremonial o ritual.



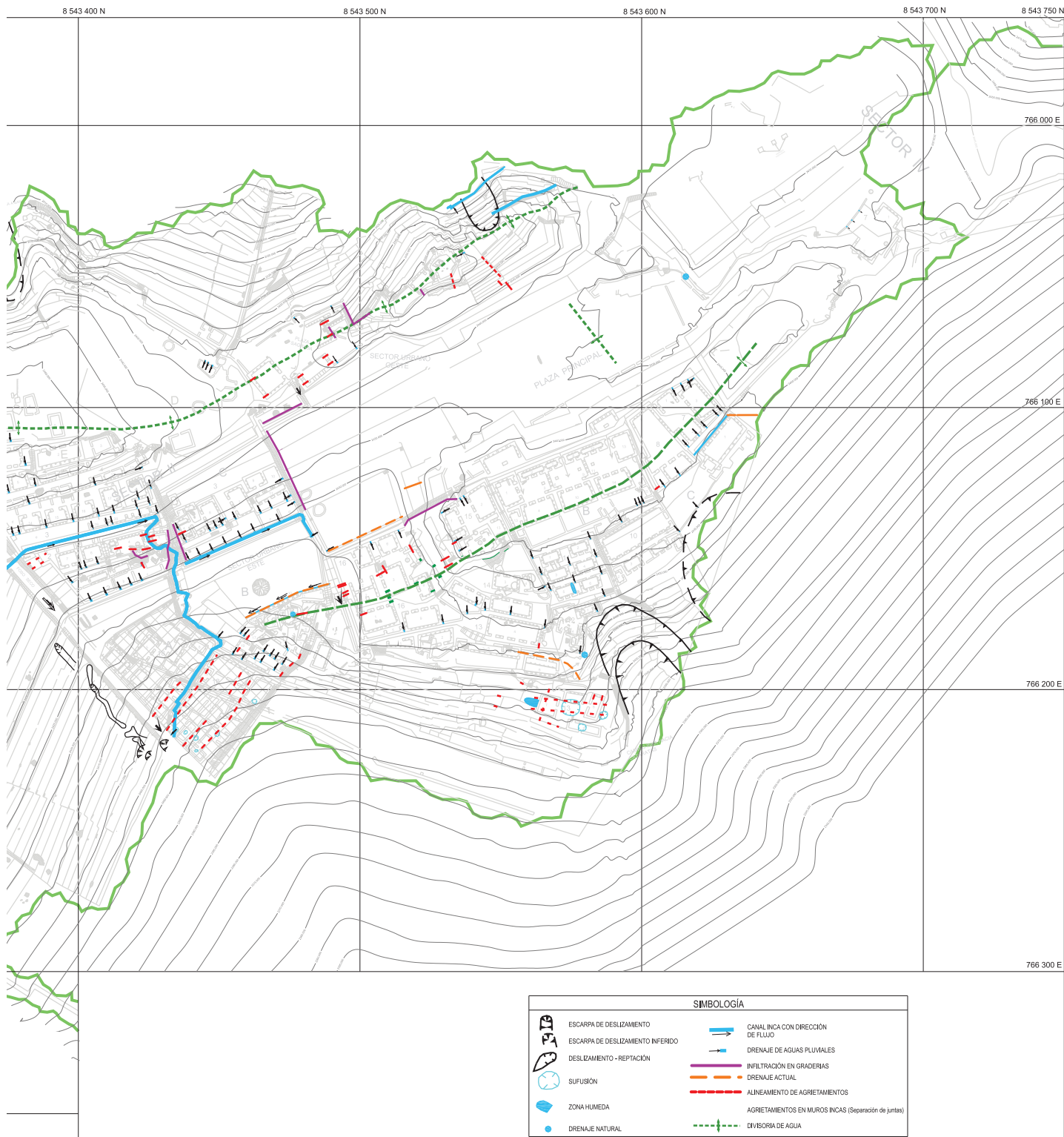


Fig. 16. Mapa geodinámico y de drenajes.



Foto 20. Conjunto 4 integrado por la Plaza Sagrada y los templos.

Templo Principal: Recinto 3

Se ubica al norte de la Plaza Sagrada, es de planta rectangular, tiene tres paredes, mide 11 m de largo por 8 m de ancho, y sus paredes son espectaculares, con formidables bloques labrados. Cada una de las dos paredes más cortas presenta cinco nichos trapezoidales, equidistantes y del mismo tamaño, a la misma altura desde el piso y con cautivante simetría. La pared norte muestra siete hornacinas trapezoidales; junto a esta pared, a manera de mesa, se encuentran tres bloques paralelepípedos (Foto 21).



Foto 21. Templo Principal. Nótese el asentamiento diferencial de la pared interior norte.

Existe un fuerte asentamiento diferencial de la parte este de la pared norte, que presenta separación de juntas hasta 0.40 m entre los bloques de piedra labrada (Fotos 15 y 21). En la parte oeste de la pared central norte se ven también pequeñas separaciones de juntas que parecen estar relacionadas con pequeños asentamientos diferenciales (Foto 21).

Cámara de los Ornamentos: Recinto 4

Este recinto tiene forma rectangular de tipo cancha con una entrada, muros de fino acabado y hornacinas trapezoidales en las paredes. En el muro sur, que colinda con la pared exterior norte del Templo Principal, se observa separación de juntas (Foto 22), que están relacionados con los problemas de inestabilidad descritos en el Templo Principal y particularmente con los asentamientos en el ala oeste del muro (Figs. 16 y 18).



Foto 22. Cámara de los ornamentos con separación de juntas en la pared interior sur.

Templo de las Tres Ventanas: Recinto 2

Se ubica al este de la Plaza Sagrada, tiene planta rectangular, está formado por tres paredes, y su amplio vano corresponde a todo el largo del recinto y se abre hacia la plaza (Foto 23). La pared este tiene tres ventanas y dos alacenas muy semejantes a las primeras; mide 2.20 m de altura interna y 5.20 m hacia la Plaza Mayor. Como materia prima se utilizaron enormes poliedros finamente esculpidos y unidos con precisión.



Foto 23. Fachada del Templo de las Tres Ventanas hacia la Plaza Mayor.

En el piso ubicado delante del templo, junto a la columna central, se encuentra la representación del signo escalonado, que es una pieza lítica con molduras en patillas y sus porciones laterales planas y bien pulidas. Las paredes laterales de este templo presentan separación de juntas hasta de 0.10 m, con inclinación al este (Fotos 24 y 25). El muro este, cuya fachada da hacia la Plaza Mayor, presenta también desajuste entre los bloques.

Las escalinatas adyacentes al muro sur del Templo de las Tres Ventanas se encuentran asentadas en su extremo este debido a la infiltración de aguas que saturan el suelo, originando asentamientos diferenciales (Foto 26).



Foto 24. Templo de las Tres Ventanas con separación de juntas en las paredes norte y sur debido a asentamientos.



Foto 25. Templo de las Tres Ventanas con separación de juntas en el extremo sureste, donde hay mucha humedad.



Foto 26. Asentamiento ligero y erosión en la escalinata de ingreso a la Plaza Sagrada.

Casa del Sacerdote: Recinto 1

Se localiza al sur de la Plaza Sagrada, es un recinto de doble ingreso con muros de paramentos rústicos. En la pared sur, en los extremos este y principalmente oeste, se han identificado separación de juntas (Fig.16) debido a asentamientos diferenciales (Foto 27).



Foto 27. Separación de juntas en el ala este y oeste del muro exterior sur de la Casa del Sacerdote.

Jardín

Este recinto es utilizado actualmente como jardín y se ubica al este del Conjunto 4; presenta separación de juntas debido a un asentamiento diferencial por la excesiva concentración de agua debido a la nueva función que se le ha asignado (Foto 28).



Foto 28. Separación de juntas por asentamiento en el recinto denominado Jardín.

Causas del deterioro y recomendaciones

Desde la llegada de Hiram Bingham el año 1911, los suelos de la Plaza Sagrada y los templos han sido removidos debido a varias excavaciones. Por otro lado, el agua de las precipitaciones pluviales se infiltra en estos suelos que no han vuelto a ser compactados adecuadamente; hoy se observa un suelo casi plano, con leve inclinación. A pesar de los pisos impermeables que se han colocado en el Conjunto 4, las esquinas internas noreste del Templo Principal y norte del Templo de las Tres Ventanas quedan todavía húmedas, especialmente en época de lluvias, demostrando la mala evacuación del agua (Fotos 21 y 25), que satura los suelos haciéndoles perder su capacidad de carga y dando así origen a los asentamientos.

Si bien es cierto que a la llegada de Bingham existía ya un fuerte asentamiento en el muro norte, ala este del Templo Principal (Fotos 15 y 21), este se ha incrementado en los últimos años. Los daños constatados en el muro consisten en un fuerte asentamiento de toda el ala este, casi de 0.30 a 0.40 m, comparando con una viga horizontal en la fachada. Este asentamiento es la causa directa de la dislocación de toda la pared norte, alas este y oeste. Durante los últimos 50 años esta dislocación ha progresado hasta provocar la separación de las juntas de varios bloques de roca labrada (Foto 29), tal como se ve en la Figura 17 (a, b, c), que son reconstrucciones fotográficas y de campo realizadas por Bouchard et al. (1992). También se observan separación de juntas en el ala oeste, que continúa hasta la pared sur de la Cámara de los Ornamentos (Figs. 16 y 18). El reacomodo o movimiento de las rocas labradas, debido al asentamiento de la pared este, se



Foto 29. Parte posterior de la pared norte del Templo Principal, con separación de juntas.

deben al peso de la estructura y a la pérdida de capacidad de carga del suelo por saturación. En consecuencia, una de las causas de los problemas de este conjunto es la presencia de las aguas pluviales que se infiltran y saturan los suelos, y la otra, es el gran peso de las estructuras de bloques de piedras labradas.

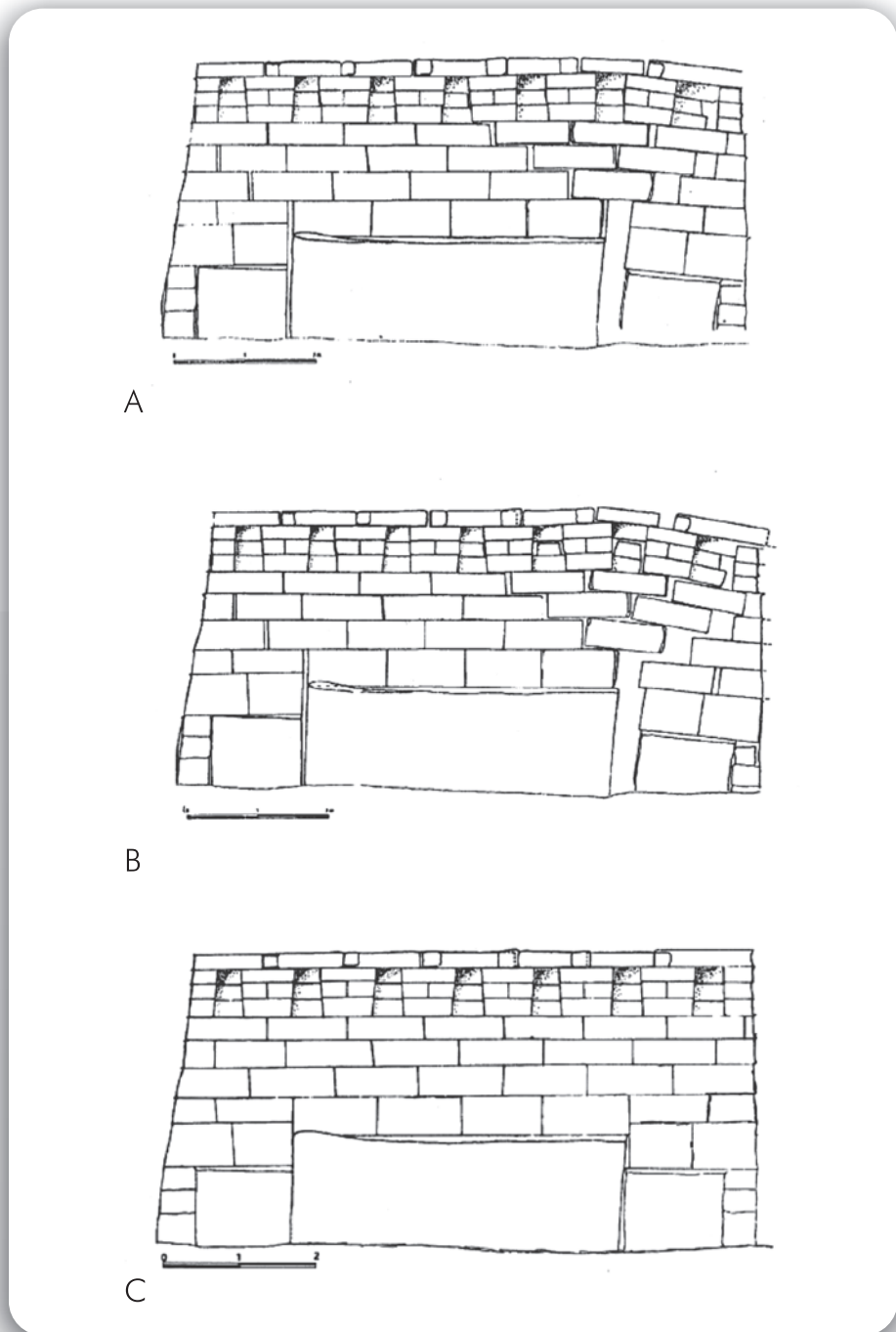


Fig. 17. Reconstrucción de la pared norte del Templo Principal. a) Dibujo realizado a partir de una fotografía de Martín Chambi tomada alrededor de 1940. B) Dibujo realizado a partir de un levantamiento de J.F. Bouchard (1987). c) Reconstitución gráfica del edificio. Tomado de Bouchard et al. (1992).

En el Templo de las Tres Ventanas se observa el asentamiento de toda la fachada este (Foto 23), y además un desajuste con las paredes norte y sur (Fotos 24 y 25). 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 y que se observan en las paredes laterales. En la pared este los bloques de piedras labradas inferiores son de gran tamaño, y por lo tanto, causan una fuerte carga en el subsuelo, lo que viene a ser otro factor adicional que incide en la conservación. Actualmente los pisos están impermeabilizados mediante *cappings* (pisos impermeables), sin embargo, aún se ven tonos verdes en el interior del recinto, debido a la concentración de aguas de lluvia (Foto 25).

La nueva función del recinto utilizado como jardín hace que este reciba agua, incluso en época de secas. Las infiltraciones han provocado la pérdida de capacidad de los suelos, con el consiguiente asentamiento diferencial que se traduce en la separación de las juntas de los muros.

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., 1989) 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, tal como había sido recomendado por Carlotto et al. (1994a), y es mostrado en la Figura 18 y descrito a continuación.

Los pisos impermeables del terraplén deben tener una leve inclinación al oeste, en el caso del Templo Principal, el drenaje debe llegar hasta una canaleta C, presente en una estructura semicircular c. La Cámara de los Ornamentos (Recinto 4), ubicada al norte del Templo Principal, debe evacuar sus aguas hacia el sumidero A, que se encuentra al oeste (Pasadizo b), mientras que las aguas que van de la escalinata de ingreso al Intiwatana (norte del Recinto 4) deben ir también a ese sumidero. En el pasadizo b, en medio de la pared oeste del Templo Principal, existe una división de las aguas; al sur, el *capping* debe llevar las aguas hacia el dren C, en tanto que al norte, el piso impermeable debe llevar las aguas hacia el sumidero A. La estructura semicircular c, con su sumidero C, recolectan gran parte de las aguas de todo el sector descrito anteriormente, para llevarlo hacia los andenes de la ladera occidental.

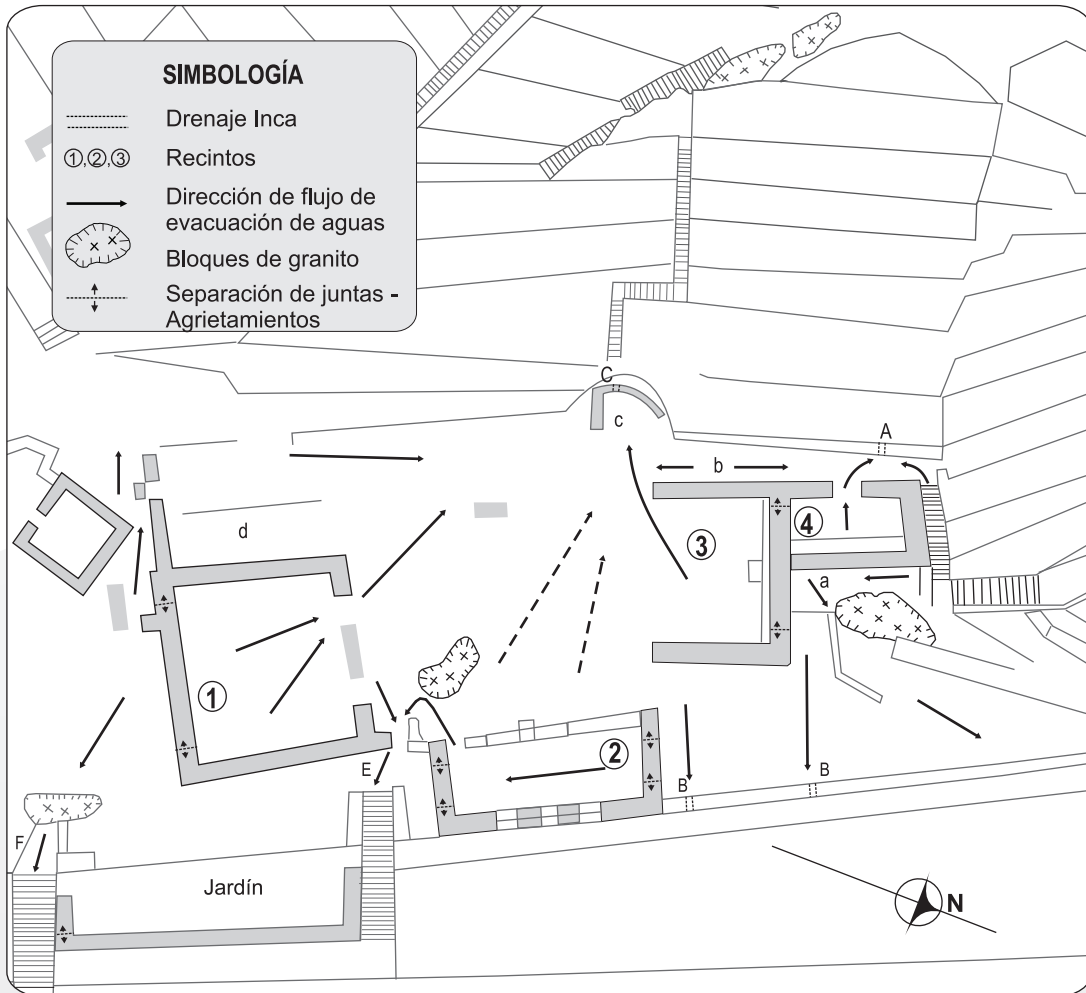


Fig. 18. Propuesta de drenaje para la Plaza Sagrada y Templos (Conjunto 4). Tomado y modificado de Carlotto et al. (1994a).

Las gradas ubicadas al norte del Recinto 4 deben ser restauradas tomando en cuenta su impermeabilización. En la parte norte, detrás del Templo Principal, las aguas pueden ser llevadas hacia el este, al sumidero B, o directamente a la Plaza Mayor (Fig. 18).

El sistema de drenaje propuesto para el Templo de las Tres Ventanas consiste en construir pisos impermeables con inclinación hacia el sur, de tal forma que las aguas descendan por la gradería E colindante con el muro sur (Fig. 18), que tiene que ser restaurada pues presenta separación de juntas. Otra posibilidad para evacuar las aguas del Recinto 2 es construir un piso impermeable e inclinado en toda la plaza, hasta la estructura semicircular c, aunque esta solución parece un poco complicada por el relieve del terreno.

Por otro lado, las aguas en el muro exterior sur del Recinto 1 deben ser evacuadas hacia las graderías F (Fig. 18), que también deben ser restauradas tomando en cuenta su impermeabilización e inclinación.

Intiwatana: Conjunto 5

Al oeste de la Plaza Mayor se encuentra ubicado el Intiwatana o Reloj Solar (Figs. 15 y 19), que forma parte de una colina natural con dirección general norte-sur y con laderas empinadas al oriente y occidente (Foto 30). Es un complejo arquitectónico con notoria presencia en el área, que fue construido aprovechando la elevación natural del afloramiento de granitos fracturados y algunos bloques de caos granítico que los incas limpiaron y estabilizaron. Para estabilizar el área se construyeron andenes tanto en la ladera oriental, donde existe un pequeño deslizamiento superficial, así como en la ladera occidental, donde todavía hay asentamientos diferenciales.

El Intiwatana se compone de tres recintos (Fig. 19) con plataformas artificiales y se llega a él desde la Plaza Sagrada, subiendo una escalera estrecha de piedras labradas. La excepcional escultura de forma geométrica compleja, considerada como un observatorio astronómico labrado directamente sobre el afloramiento rocoso (Foto 31), se encuentra en el Recinto 2 rodeada parcialmente de paredes de mampostería fina.

Al este del Recinto 1 (Fotos 32) se observa parte de un afloramiento de granito que está afectado por una fractura abierta que trata de separarlo del macizo rocoso debido a los efectos de la erosión superficial e infiltración. El piso de este lugar está impermeabilizado, pero se encuentra en mal estado de conservación, y por tanto es importante mantenerlo y evitar que las aguas de lluvias se infiltren por la fractura.

En los años noventa existían varios problemas de estabilidad en la ladera oriental, tales como el agrietamiento del muro este del Recinto 2 (Fig. 19 y Foto 33), por asentamiento del conjunto de andenes de la parte baja, que a su vez se hallan sobre afloramientos fracturados de granitos que han sido restaurados. Estos presentan algunos bloques que están en proceso de separación y constituyen un peligro para las personas que transitan por la parte inferior porque, además del fracturamiento de los granitos, en la parte superior del Intiwatana se producen filtraciones de agua que aceleran los procesos de geodinámica externa (Foto 34). En esa misma década, entre los Recintos 2 y 3 se hallaba un pequeño muro de aspecto poco estético, que no correspondía a una construcción inca y que ha sido restaurado. En el Recinto 3, la pared norte presentaba agrietamientos debido a asentamientos diferenciales y falta de conservación, sin embargo, también ha sido restaurada.

En general, el conjunto del Intiwatana se encuentra muy expuesto, particularmente en su vertiente oriental, donde la erosión superficial y las infiltraciones de aguas pluviales causan inestabilidad en las construcciones incas (Foto 35), por ejemplo, agrietamientos en la base de los muros de contención. La vertiente occidental también muestra agrietamientos en los andenes, particularmente donde se ha identificado un deslizamiento superficial estabilizado por los incas; actualmente se ven signos de reactivación (Fig. 16).



Foto 30. Vista panorámica del Intiwatana.



Foto 31.
Observatorio astronómico o Intiwatana,
labrado directamente sobre el afloramiento
de granito.



Foto 32.
Fractura que corta el granito y permite la
infiltración de aguas. En primer plano,
rastros de erosión superficial del piso
impermeable.



Foto 33. Ladera oriental del Intiwatana que muestra el agrietamiento que afecta el muro este del Recinto 2 y los andenes inferiores. Foto tomada el año 1994. Actualmente los agrietamientos persisten en los muros inferiores.

Causas del deterioro y recomendaciones

Si bien el Intiwatana se localiza sobre afloramiento de granitos que forman un relieve con laderas muy empinadas, este ha sido estabilizado por la construcción de andenes incas, pues el afloramiento está muy fracturado y muchos bloques se encuentran en proceso de separación. Las causas del deterioro son los efectos de la infiltración de agua en rocas fracturadas y bloques en vías de separación, favorecidos por la gravedad. En la ladera oeste se está reactivando un pequeño deslizamiento que fue estabilizado por los incas, al igual que en la ladera este, donde los muros muestran signos de asentamientos. Otros problemas son la escorrentía superficial e infiltraciones de las aguas de lluvia que penetran por las fracturas abiertas en los granitos.

Carlotto et al. (1994a) propusieron un diagrama de drenaje y la impermeabilización de los pisos, varios de ellos ya fueron realizados por el INC-Cusco. Sin embargo, la impermeabilización de los pisos requiere que tengan mantenimiento continuo y pendiente adecuada. 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. Además, las escaleras norte y sur se deben mantener en perfecto estado mediante la impermeabilización puesto que gran cantidad de agua ingresa a través de ellas, lo que provoca erosión en las juntas. Asimismo, se deben efectuar trabajos de consolidación para evitar las infiltraciones por las grietas superficiales y se deben estabilizar los bloques de granito que pueden caer a la Plaza Mayor. Igualmente, se deben restaurar los muros de la vertiente este, que presentan asentamientos diferenciales. Finalmente, se plantea seguir el sistema de drenaje propuesto por Carlotto et al. (1994a), mostrado en el mapa de drenaje del Conjunto 5 (Fig.19) y que se explica a continuación.

El sistema propuesto requiere de pisos impermeables inclinados para evitar la infiltración de las aguas y erosión superficial. Del Recinto 1 se puede llevar las aguas a las graderías A y de allí seguir hasta B, desde donde se evacuarán a los andenes. Estas graderías A deben ser restauradas e impermeabilizadas para evitar la infiltración; con este mismo fin se debe hacer un *capping* inclinado hacia el suroeste en el Intiwatana. En el Recinto 3 las aguas pueden ser evacuadas al oeste de acuerdo a la Figura 19. En la plataforma sur, al costado del Recinto 1, se debe mantener el *capping* dándole una inclinación hacia el talud este, en tanto que en los andenes de la ladera oriental se deben hacer *cappings* inclinados hacia el sur para evacuar las aguas y evitar que sigan las infiltraciones.

Finalmente, se ha identificado un punto muy peligroso en la plataforma y muro sur del Intiwatana (Foto 34), 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. Hace algunos años se colocaban cordones de seguridad en esta plataforma, para que los turistas no se acerquen al borde del muro, ahora ya no existen y es posible acceder a este lugar. En este caso se recomienda la impermeabilización del piso con *cappings* inclinados al sur y al oeste, para evitar la infiltración, así como la restauración del muro y volver a colocar los cordones de seguridad.



Foto 34. Zona de alto peligro en la plataforma sur del Intiwatana, en ella se ve la deformación del muro por infiltración de las aguas.

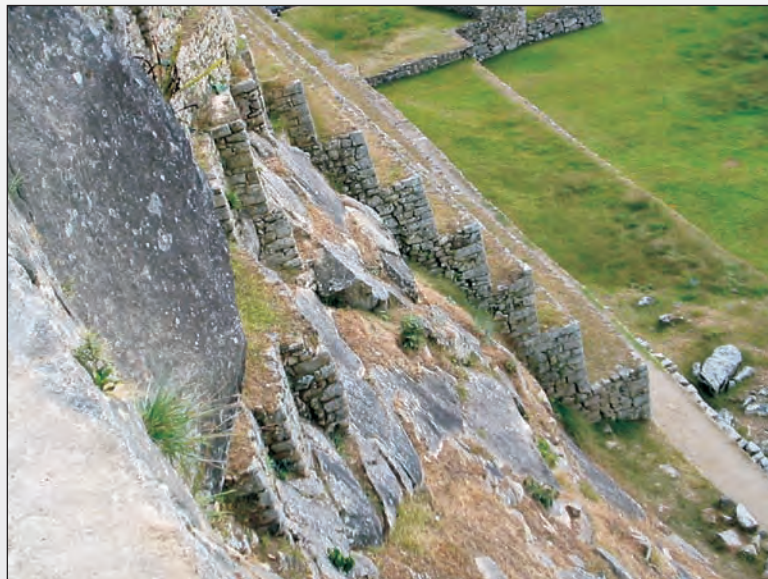


Foto 35. Ladera oriental del Intiwatana con agrietamiento en la base de los andenes en contacto con los afloramientos de granitos.

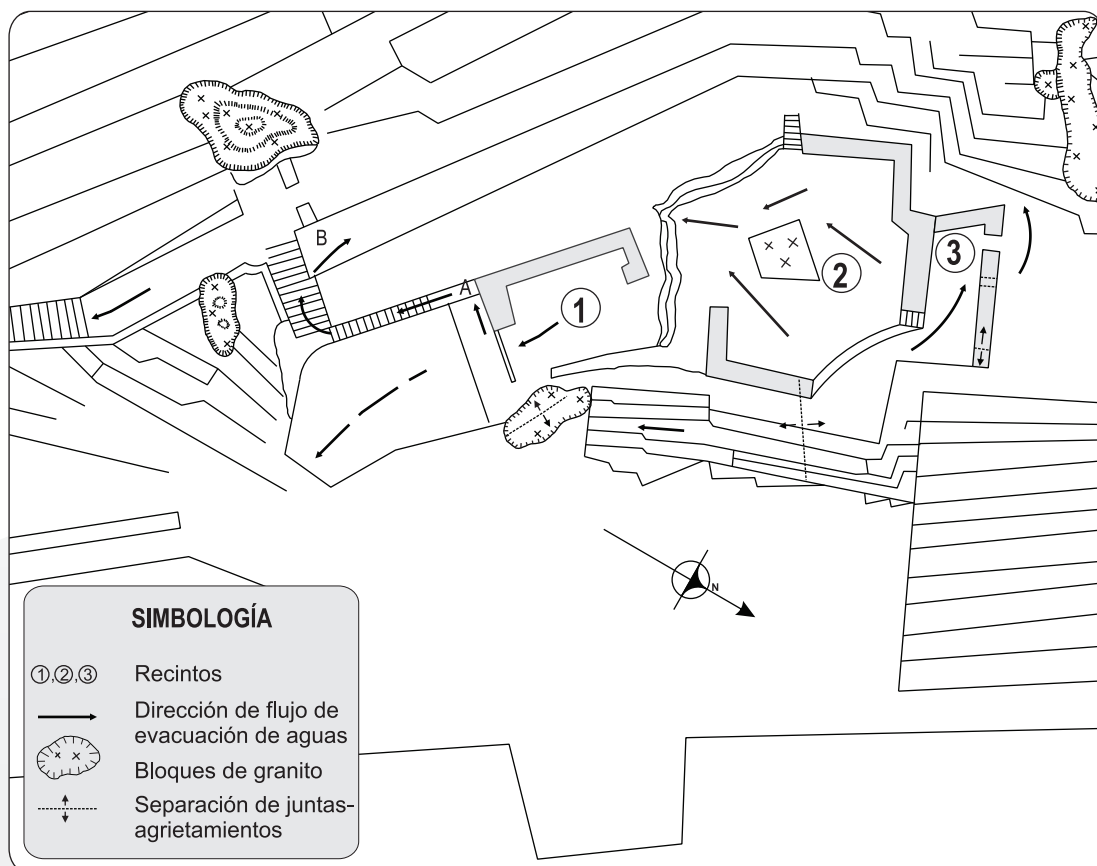


Fig. 19. Propuesta de drenaje para el Intiwatana, tomado y modificado de Carlotto et al. (1994a).

Conjunto 2

Ocupa la parte sur del Sector Urbano (Figs. 15 y 20, Foto 36). El sitio principal del conjunto se compone de dos pisos (Foto 36): la primera planta se conoce como Tumba Real (Foto 37), mientras que la segunda planta se denomina Torreón o Templo del Sol (Recinto 2) que, dentro del recinto semicircular, es un bloque pétreo de caos granítico. La construcción es la más fina, de tipo hilerado, con piezas paralelepípedas ensambladas con perfección, las hileras tienen la misma altura y dos ventanas con ménsulas que la embellecen. 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 o Centro Ceremonial (Fig. 20). Las evidencias estructurales y los elementos arquitectónicos indican que la función del Conjunto 2 debió ser ceremonial, así como residencial y lugar de almacenamiento.

El Torreón o Templo del Sol : Parte superior del Recinto 2

El Torreón tiene una puerta en la pared norte, viéndola desde el exterior es una ventana, pues se encuentra a cierta altura del piso; a la altura del umbral tiene agujeros vinculados a canales con ofidios, por lo que se llama también Puerta de las Sierpes (Foto 38). En el recinto semicircular las paredes interiores muestran efectos de meteorización físico-química, provocada por las peculiares condiciones meteorológicas de la zona (Foto 39). En la parte superior del muro semicircular, que lo separa del recinto rectangular, los minerales de la roca se han disgregado y la roca se ha separado en capas (Foto 39). Estos efectos de disgregación parecen relacionados con antiguos incendios puestos en evidencia por los arqueólogos y descritos también en las crónicas, donde se menciona este desastre durante la desocupación de la ciudad.

En el Torreón se observa también separación y desplazamiento entre las juntas de los bloques de roca labrada, tanto en el muro norte, junto a la Puerta de las Sierpes (Foto 38), así como entre dos pequeñas hornacinas ubicadas en el extremo oeste del muro (Foto 40). En el interior del Recinto 2, al final del muro semicircular, se ven agrietamientos que se alinean con otros del Recinto 4 (Figs. 16 y 20) y que colindan con el Recinto 5. La separación de las juntas alcanza hasta 3 cm y es muy notoria porque contrasta con la magistral técnica del ensamblado de los muros de este sitio. En los muros norte y sur del Aposento de la Ñusta (Recinto 5) hay separación de juntas hasta de 3.5 cm (Foto 41).

La separación de juntas y los desplazamientos identificados en los Recintos 1, 2, 3, 4, y 5 corresponderían a un probable plano de asentamiento diferencial alineado, con eje norte-sur (Figs. 16 y 20). La causa de estos desplazamientos se relaciona



Foto 36. Vista panorámica del Torreón, Tumba Real, Centro Ceremonial y escalinata de acceso construidos sobre bloque del caos granítico.



Foto 37. En el ingreso a la Tumba Real se ve una jamba en el bloque de granito (izquierda) y una roca labrada con escalones (derecha).



Foto 38. Puerta de las Serpes con separación de juntas.



Foto 39. Interior de la Puerta de las Serpes con separación de juntas y efectos de meteorización.



Foto 40. Separación de juntas en el ala oeste y sumidero en la parte baja del muro interior norte del Recinto 4.



Foto 41. Separación de juntas en el muro norte del Recinto 5. Al fondo de la puerta se nota la separación de juntas en el Aposento de la Ñusta.

con la infiltración de las aguas pluviales y, muy particularmente, de las aguas de las fuentes litúrgicas, que han producido asentamientos diferenciales. Sin embargo, estas fuentes han sido refaccionadas e impermeabilizadas en los últimos años, por lo que la infiltración probablemente se haya reducido.

La Tumba Real: Parte inferior del Recinto 2

La Tumba Real presenta tres paredes que sirven como muros para estabilizar el bloque de caos granítico, que tiene una inclinación de 48° y que es parcialmente un techo natural. En la parte superior este bloque enorme soporta al Torreón, y se aprovechó la inclinación de la roca para construir un recinto en la parte inferior (Foto 37).

La Tumba Real es un ambiente pequeño de forma irregular, cuyo vano de ingreso está dirigido al este. Al ingresar se observa que la jamba izquierda es la propia roca inclinada, mientras que la jamba del lado derecho es una roca labrada con seis escalones; no existe dintel y la misma roca sirve de techo (Foto 37). La pared norte es un muro construido ex profeso (Foto 42), con dos nichos altos trapezoidales, y a la altura de los dinteles aparecen falsas vigas pétreas de forma cilíndrica (Foto 43). En la pared oeste hay otros dos nichos (Foto 42) y en el centro del recinto emerge del piso una formación pétreo, labrada con molduras escalonadas.

El bloque de roca que forma parte del recinto y cuyo origen está relacionado con el caos granítico, originalmente inestable, fue estabilizado por los incas con muros de contención al sur y norte. Hasta los años noventa ocurrían permanentes filtraciones de agua a través del contacto entre el bloque de roca granítica, la laja del techo, dentro de las hornacinas y los dos muros, determinando el crecimiento de musgos, así como el desarrollo de líquenes que tapizan parcialmente las juntas y recubren algunas porciones aisladas del muro (Foto 42). La falta de un verdadero techo en el Torreón permite que se produzcan filtraciones hacia la Tumba Real, además de la filtración de agua proveniente del sistema de canaletas entre la segunda y cuarta fuentes litúrgicas.

En el muro norte se observan antiguos agrietamientos que han afectado a algunos elementos líticos; estos agrietamientos aparecen en forma entrecortada desde la base de una pequeña hornacina y siguen una trayectoria aproximada de 70° de inclinación hacia el piso (Foto 43).

El peso del gran bloque de roca granítica que se apoya sobre el muro, incluyendo el sobrepeso del Torreón edificado sobre el bloque de roca, ha ejercido presión sobre la estructura del mismo, el cual fue desestabilizado por problemas de sufusión y por la constante saturación del suelo, que pierde su capacidad de carga, incidiendo en el asentamiento de sus bases al nivel de su cimentación.



Foto 42. Muros norte y oeste de la Tumba Real con separación de juntas y presencia de musgos por la humedad.



Foto 43. Muro norte y contacto con el bloque granítico que sirve de techo en la Tumba Real. Nótese una piedra labrada fracturada.

La pared oeste muestra también un sistema de separación de juntas y pequeñas fracturas, ubicadas en el contacto con el gran bloque de roca inclinada que sirve de techo. Las grietas parecen paralelas y afectan solo a un elemento lítico del muro.

En un pequeño recinto ubicado al costado derecho de la Tumba Real, existe un pequeño muro construido sobre roca granítica; este muro sufre separación de juntas y desplazamiento de los elementos líticos debido a un asentamiento diferencial de sus bases (Foto 44).

En el punto A de la Figura 20, en el lado izquierdo del acceso a la Tumba Real, existe una pequeña escalinata adosada al gran bloque de granito; el contacto entre las gradas y la roca se halla separado y sirve de conducto de circulación e infiltración a las aguas pluviales, que provocan sufiisión y pérdida de capacidad de carga del suelo, en la base de las escalinatas, con el consiguiente asentamiento (Foto 45). En el punto B, al costado de la escalinata anteriormente descrita (Fig. 20), se observa separación de juntas en el muro debido a los asentamientos. En el punto C los muros muestran separación de juntas (Fig. 20 y Foto 46), debido a la desestabilización de los bloques graníticos, que se han acentuado entre 1994 y el 2003 (Cárdenas, 2003).

Las Fuentes Litúrgicas

Existen 16 fuentes dispuestas sucesivamente en planos diferentes y escalonados (Figs. 20 y 22), de manera que la primera está en la parte más alta, arriba del Recinto 1, y la décima sexta se encuentra abajo, en el Conjunto 19, siguiendo aproximadamente la dirección al este (Foto 47). Estas fuentes se encuentran unidas por un canal de piedras ensambladas, que distribuye el líquido en ellas. Estas estructuras no se encuentran alineadas, están separadas por distintas distancias y se caracterizan por diferentes tipos arquitectónicos. Cada una de ellas es una pequeña construcción, con canales de ingreso y salida del agua, algunas tienen una pequeña alacena, vano de puerta y altura conservada de 1.5 m. En la base de la segunda fuente existía una grieta por donde se infiltraban las aguas y parece haber sido la causa del agrietamiento de la pared sur del Centro Ceremonial y de los problemas del Torreón (Fig. 20). En la tercera fuente se detectaron grietas y juntas separadas en las paredes oeste, norte y sur, y esta última transportaba aguas al Torreón y la Tumba Real (Fig. 20). La cuarta y sexta fuente son de mejor calidad, tanto en pulido, magnitud y disposición de los poliedros, aunque también tienen infiltración de aguas. Bouchard (1989) observó que se producía una importante pérdida de agua en estas estructuras; para ello hizo circular agua desde la primera hasta la tercera fuente, ubicadas al norte del Recinto 2. Un conducto subterráneo permite el paso el agua debajo de la escalera, pero se encuentra muy deteriorado, probablemente por los asentamientos del piso. A esto se debía que solamente llegase una quinta parte del agua a esta fuente inferior; el resto penetraba a través de las grietas hasta la pared norte de la Tumba Real, inundando su piso. Esta infiltración originó gran parte de los deterioros observadas en la Tumba Real y contribuyó a activar el asentamiento de las rocas.



Foto 44. Muro construido y apoyado sobre bloques de caos granítico, con evidencias de separación de jambas.



Foto 45. Asentamientos de las gradas en el contacto con el bloque de granito del Torreón.



Foto 46. Separación de juntas en el muro y el contacto muro-bloque de granito en la zona de ingreso al Patio A (Fig. 20).



Foto 47.
Fuentes Litúrgicas en funcionamiento.

En las paredes norte y sur del Centro Ceremonial (Recinto 1) se ve la separación de juntas (Foto 48), que siguen un sistema de agrietamiento que viene desde el Torreón (Figs. 16 y 20). Las causas son las mismas que en el Torreón y la Tumba Real, es decir, el desequilibrio de los bloques por el asentamiento relacionado con la infiltración de aguas de lluvias y fugas en las fuentes litúrgicas.



Foto 48. Separación de juntas en la pared sur del Centro Ceremonial.

Causas del deterioro y recomendaciones

Las causas del deterioro en el Torreón, Tumba Real, Centro Ceremonial y Casa de la Ñusta están relacionadas 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 evacúan 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 con deformaciones, 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 (Fotos 38, 39, 40 y 41).

Además, el desarrollo de musgos y las manchas de humedad dentro de la Tumba Real (Fotos 42 y 43) 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 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 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 cabeceras 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. 20). Finalmente, se debe dar tratamiento a las rocas de las cabeceras de los muros que muestran intemperismo y disgregación de minerales, particularmente en la parte posterior de la Puerta de las Serpes.

El sistema de drenaje propuesto por Carlotto et al. (1994b) se presenta en la Figura 20 y se describe a continuación.

Dentro de los edificios rectangular (Recinto 4) y semicircular (Recinto 2) del Torreón, se debe dar un mantenimiento adecuado al piso impermeable que debe llevar las aguas hacia el pequeño sumidero que tiene conexión con las fuentes litúrgicas (Foto 40). Al oeste y en la parte posterior de los Recintos 4 y 5 existe un Pasadizo 7 que puede coleccionar las aguas y llevarlas al callejón transversal 7a ubicado al sur del Aposento de la Ñusta y de allí hasta 6. Las aguas del punto 13, que llegan a la parte posterior del Centro Ceremonial (Recinto 1), deben circular hacia el norte, por lo que se recomienda hacer un drenaje para evacuarlas hacia las escalinatas de las fuentes litúrgicas.

En la parte sur, las aguas de los Recintos 6 y 7 pueden ser evacuadas de acuerdo al diagrama de flujo que se muestra en la Figura 20. En el pasadizo posterior al Recinto 7, las aguas del punto 1 se dirigen a 2 y 3, y en este último se deben limpiar

las piedras amontonadas para evacuar el agua a 4 y luego a 5, el cual debe tener un *capping* inclinado hacia el norte, para llegar a 6. Del punto 2, las aguas deben pasar por 2a hasta 5 y 6. Al oeste del Recinto 6, las aguas de 2b deben ir a 2a. Igualmente, en 6 se plantea construir un drenaje para captar las aguas que vienen de 8 y 9. En el sector de los patios de los Recintos 8 y 9, las aguas de 10 se unen con 6 y con 11, para seguir hacia 6a hasta alcanzar el canal 6b.

En los Patios a, b, c adyacentes al Torreón y a los Recintos 8 y 9, las aguas discurren de acuerdo al diagrama de flujo, y cada recinto tiene un drenaje donde evacúa sus aguas. En el Patio a se recolectan las aguas del Recinto 8 y del Patio 12. Finalmente, se propone hacer un sistema de *capping* inclinado, como se muestra en la Figura 20, en la parte inferior del Torreón, cerca de la entrada de la Tumba Real y en el patio c.

A pesar de que las fuentes litúrgicas han sido restauradas, en el mes de mayo del 2007 han aparecido nuevas filtraciones en la Tumba Real, posiblemente debido al incremento de caudal en el canal inca que trae el agua desde la zona agrícola. Además de las reparaciones y restauraciones realizadas, se deben hacer monitoreos para evitar las fugas de aguas que causan los asentamientos en este sector. Adicionalmente, se recomienda revisar todo el canal que trae el agua desde la zona agrícola hasta las fuentes, para evitar infiltraciones en el andén situado al oeste del Torreón. De igual manera, se debe revisar todo el sistema de las fuentes y sus canales para eliminar las pérdidas de agua.

3. SECTOR URBANO-SUBSECTOR BAJO

Los estudios geológicos y de conservación que hemos desarrollado desde los años noventa han identificado problemas de conservación en varios conjuntos de la parte oriental de la ciudad inca de Machupicchu. Desde esa época hasta el momento, varios han sido solucionados, sin embargo, describiremos cómo se hallaba el lugar hace algunas décadas y cómo se encuentra actualmente.

Conjunto 10

Este conjunto se halla al este de la Plaza Mayor y está formado por dos grupos de edificios separados por un gran patio (Fig. 15). El primer sector consiste en cuatro recintos (1, 2, 3, y 4) que han sido restaurados y tienen pisos impermeables; el otro grupo se encuentra al sureste y está compuesto por un gran Recinto 5 y cuatro menores 6, 7, 8, y 9 (Fig. 21). El Recinto 5, ubicado cerca de una escalinata, tiene doce vanos de acceso, ocho en su muro delantero y dos en cada muro lateral.

El año 1994, el Recinto 5 se hallaba en mal estado de conservación, ya que el mortero visible en las juntas de las piedras mostraba únicamente tierra, sin otro material ligante, y varias secciones de los muros sur y este estaban caídos. La causa

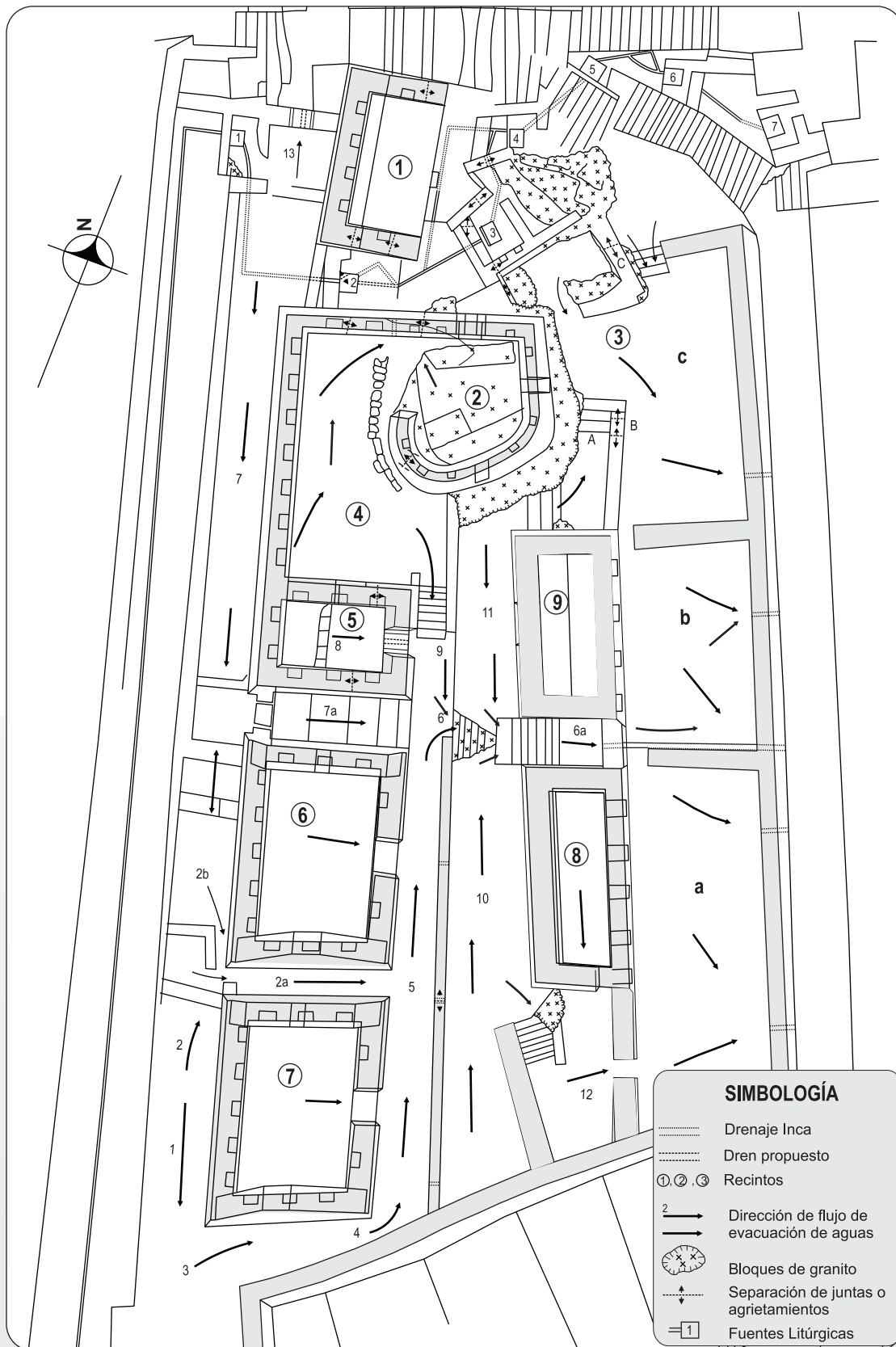


Fig. 20. Propuesta de drenajes para el Conjunto 2, tomado y modificado de Carlotto et al. (1994b).

principal del deterioro fue la erosión de las cabeceras por el agua de lluvia, que afectó la argamasa y produjo la caída de los bloques labrados superiores. Los cuatro recintos menores se hallaban también en mal estado de conservación, principalmente el 6 y el 7 (Foto 49), con los muros colapsados debido a la concentración de las aguas pluviales que produjeron sufusión, asentamientos diferenciales y el colapso de los muros.

Las recomendaciones para el Recinto 5 (Carlotto et al., 1994c) incluían la limpieza adecuada, pisos impermeables inclinados y drenes para evacuar las aguas, de acuerdo al diagrama de flujo que se muestra en la Figura 21. Así, las aguas del Recinto 5 deben seguir el flujo 1 y luego debían ser concentradas en el pasadizo 2, y de allí llevarlas al sumidero A; desde ahí debían ser derivadas hacia el punto 3. Las recomendaciones para los recintos menores eran: realizar una limpieza de la vegetación, restaurar la mampostería caída por el colapso de los muros, y construir un sistema de pisos impermeables y los drenes propuestos (Fig. 21). Estos debían adaptarse a la topografía del terreno, llevando las aguas hacia el sumidero B, de aquí debían ir hacia el punto 8 y unirse con 3. En el momento del estudio, las aguas del sumidero B iban directamente al punto P20 y fue una de las causas de la activación del deslizamiento en el Conjunto de Andenes 13.

Actualmente estos sitios están restaurados, tal como se observa en la Foto 50. Las recomendaciones del año 1994 han sido tomadas en cuenta parcialmente, pues todavía subsiste el problema de drenaje, ya que las aguas desfogan en el Conjunto de Andenes 13. Por lo tanto, se recomienda que las aguas sean llevadas a los puntos 8 y 3 que desfogan en una quebrada (Fig. 21).

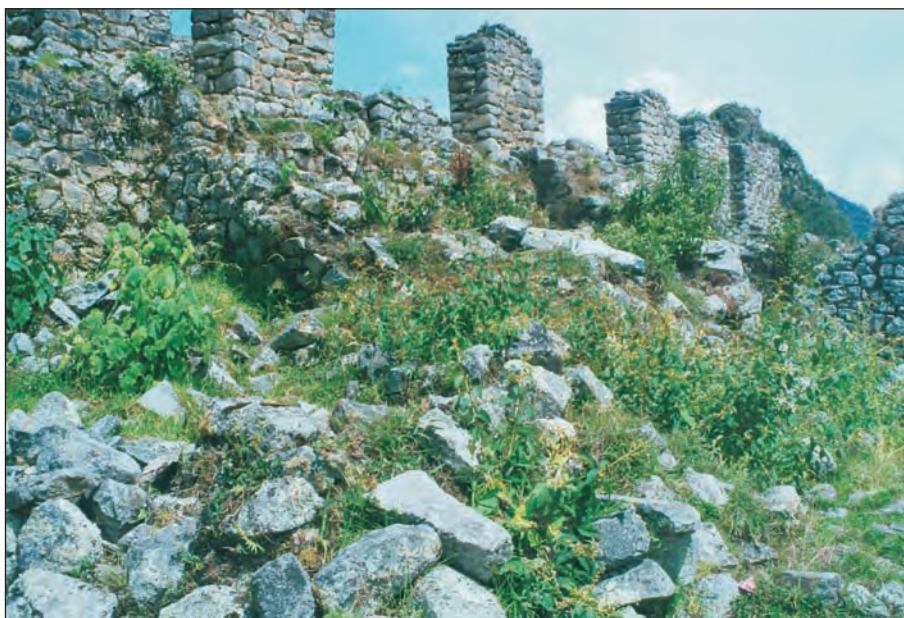


Foto 49. Recintos 6, 7, 8 y 9 del Conjunto 10 en mal estado de conservación. Foto tomada el año 1994.



Foto 50. Recintos 6, 7 y 8 del Conjunto 10, luego de la restauración. Foto tomada el año 2007.

Conjunto 11

Este conjunto recibe el nombre de Qolqas y consta de seis recintos de planta rectangular, numerados del 1 al 6 (Figs. 15 y 21), localizadas en tres distintos andenes. Su ubicación y el número de vanos favorecieron el acarreo de los productos agrícolas y por ello se cree que sirvieron como depósitos o qolqas. En 1994, el estado de conservación de este conjunto era de regular a bueno, sin embargo, no existía un sistema de drenaje adecuado. Posteriormente, el sitio fue restaurado, pero los problemas presentes antes de su restauración pueden volver a presentarse, es decir, el debilitamiento de las cimentaciones por efecto de las filtraciones de agua, que deterioran el mortero de la cimentación.

Actualmente este sector se halla aparentemente bien conservado (Foto 51), pero no cuenta con sistemas de drenaje, por lo que se propone el diagrama de flujos para la evacuación de las aguas pluviales que se muestra en la Figura 21 (Carlotto et al., 1994c).

Los pasadizos al oeste de los Recintos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 deben tener pisos impermeables inclinados, con las esquinas entre el suelo y la pared rellenas para evitar las infiltraciones de las aguas pluviales. En el pasadizo que se ubica al oeste de los Recintos 1 y 2 hay dos direcciones de flujo, de 1a a 2 y de 1b a 1c, originadas por un desnivel. Las aguas acumuladas de los Recintos 1 y 2 (flujo 3), y de los



Foto 51. Conjunto 11 en buen estado de conservación.

pequeños espacios al costado de estos, deben ser llevadas al pasadizo 4, que debe tener una inclinación hacia el sur. Igualmente, las aguas acumuladas en los Recintos 3 y 4 (flujo 5) deben ser llevadas al pasadizo 6. De la misma forma, las aguas de los Recintos 5 y 6 (flujo 7) deben ser captadas en el pasadizo 8, que debe tener una inclinación al sur hasta llegar a 9.

Los pasadizos 1, 4 y 6 deben conducir sus aguas a 2, que es un canal de drenaje que llevaría todas las aguas a 7, 9 y luego a 11, donde se juntan con las que vienen del Conjunto 12 y de los Recintos 4 y 5 del Conjunto 13 por medio de un drenaje en el punto P10. Desde el punto 11, las aguas deben ir hasta el punto 12, donde se debe reconstruir un canalito localizado al costado de un bloque granítico, que a su vez debe ser revestido para evitar la infiltración.

A partir del punto 12 existe un problema de drenaje, pues las aguas no pueden ser llevadas a la parte sur (Conjunto 13) debido a que allí existen problemas de conservación. Por lo tanto, proponemos que ellas sean dirigidas al punto 13 y de allí descendan por las escalinatas que se hallan al costado del Conjunto 13. Estas escalinatas deben ser restauradas e impermeabilizadas y, si es posible, se debe adecuar un canal longitudinal.

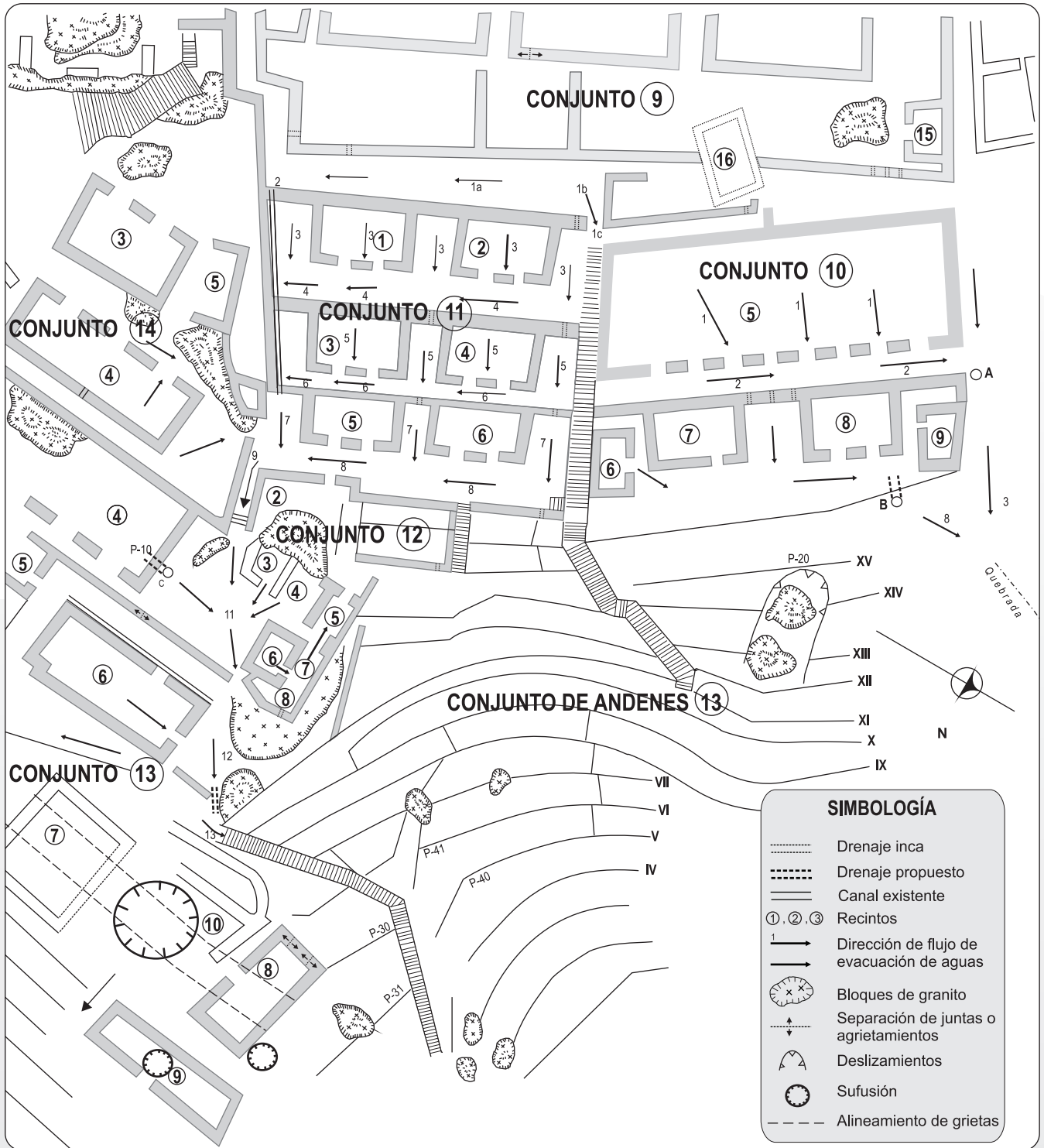


Fig. 21. Propuesta de drenajes para los Conjuntos 10, 11, 12, 13, 14 y el Conjunto de Andenes 13. Tomado y modificado de Carlotto et al. (1994c).

Conjunto 12

Se ubica en el extremo este del Subsector Urbano Bajo de la ciudad inca de Machupicchu, por debajo del Conjunto 11 (Figs. 15 y 21). Reúne varios ambientes, entre ellos ocho pequeños recintos, algunos son subterráneos; de acuerdo a su morfología y estructura, así como sus asociaciones, se cree que tuvieron función ceremonial y posiblemente albergaron a contextos funerarios.

Los recintos tienen de regular a buen estado de conservación, ya que han sido recientemente restaurados, sin embargo, al ser un lugar con grandes bloques de granitos estabilizados (Foto 52), las aguas pluviales penetran entre ellos y llegan a un recinto subterráneo (Foto 53), donde la humedad es evidente por la presencia de musgos en las paredes de fino acabado. En este conjunto se recomienda tomar en cuenta las inclinaciones de los pisos para seguir el diagrama de flujo de evacuación de aguas pluviales, tal como se muestra en la Figura 21. Por otro lado, en este lugar existen drenajes naturales, que son huecos revestidos a veces con granitos labrados.



Foto 52. Construcciones incas en el Conjunto 12 sobre grandes bloques de granito estabilizado.



Foto 53. Construcción inca subterránea con presencia de musgos debido a la humedad originada por las filtraciones de aguas pluviales.

Conjunto 13

Es una agrupación de varios recintos localizados al borde oriental de la ciudad inca de Machupicchu, que se ubican por debajo de los Conjuntos 12, 14, y 16 (Fig. 15). La parte más septentrional de este conjunto es una de las zonas con mayores problemas de conservación pues varios muros han colapsado (Foto 54), otros tienen agrietamientos que muestran cierto alineamiento norte-sur (Fig. 21), inclinados hacia el este (Foto 54). 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 (Fig. 21) 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 (Foto 55); 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 (Foto 56) 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 en P30 y sufusión que desestabiliza los bloques de granito en P31 (Fig. 21).

Las recomendaciones para este conjunto son: limpieza y retiro de la maleza que cubre las paredes, y la restauración de los muros colapsados en los Recintos 7, 8, 9 y 10. Luego de la limpieza, se deben buscar los antiguos drenes incas, y si no se ubican, se debe hacer pisos impermeables inclinados, tratando de llevar las aguas hacia el este, de acuerdo a lo propuesto en la Figura 21. Finalmente, se deben estabilizar los andenes que presentan separación de juntas y construir muros de contención para estabilizar los bloques de granito.

En conclusión, el estado de conservación de este conjunto es malo, con excepción de dos recintos. Se deben diseñar varios proyectos de conservación y restauración, y tomar inmediatamente medidas preventivas como apuntalamientos, drenajes, protección de suelos y cabezas de muros, entre otros.

Conjunto 16 (Mortero) y Conjunto 15 (Waca)

Estos conjuntos se sitúan al este de la Plaza Mayor, en el Subsector Urbano Bajo (Fig. 15). El Conjunto 16 se conoce también con el nombre de Mortero; en la pared sur, en ambos lados de la puerta de ingreso de doble jamba, se observa la separación de juntas que se alinean con otros en dirección norte-sur (Fig. 16 y Foto 57) y que los muros se inclinan hacia el oeste y este del alineamiento. Las causas se relacionan con el reacomodo de los bloques de granitos muy fracturados, debido a los efectos del agua y la gravedad, y que afectan de este modo a la pared sur de este conjunto.

Los monitoreos realizados por la misión checa y eslovaca en este lugar indican movimientos superficiales de estos bloques (Vilímek et al., 2005).

En los muros de los Recintos 3 y 7 del Conjunto 16 se observan agrietamientos que parecen continuar hacia el Recinto 5 y los andenes al sur del Conjunto 15 (Waca). Este alineamiento coincide con la línea divisoria de aguas que surge por el cambio abrupto de la pendiente hacia la ladera oriental de la ciudad (Fig. 16).

Al oeste del Conjunto 15 existen graderías de pendiente empinada cuyo borde este se encuentra junto a un gran bloque de roca fracturada algo movida, por donde se infiltran aguas pluviales que aparentemente afectan la estabilidad de la zona (Foto 58).

Conjunto 17 (Cóndor)

Este conjunto se ubica al sureste de la Plaza Mayor, en el Subsector Urbano Bajo (Fig. 15 y Foto 59). Se le conoce también con el nombre de Cóndor. Es una especie de templo abierto de planta semicircular, con tres nichos ceremoniales y agujeros pasadores en sus aristas (Recinto 5); está asociado a tres pequeñas estructuras subterráneas: un cubículo (Recinto 6) que tiene un pequeño vano de ingreso que

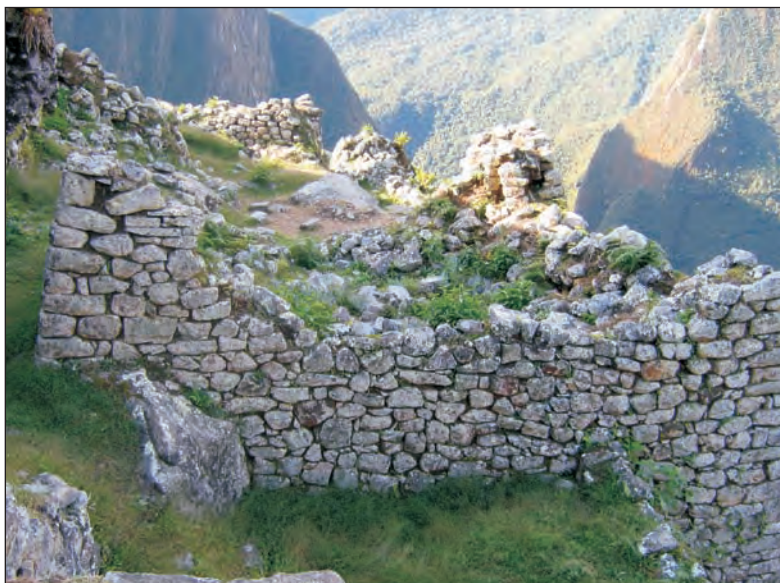


Foto 54. Muros colapsados y agrietamientos por efecto de la sufusión en el Conjunto 13.



Foto 55. Muros caídos y piedras labradas amontonadas en el Conjunto 13.

Lleva a un espacio pentagonal abierto (Recinto 7), desde el cual se puede ingresar a una cueva subterránea (Recinto 8). Las evidencias encontradas indican que al parecer tuvo varias funciones, siendo la más importante la ceremonial, relacionada con el cóndor; es posible que los cubículos subterráneos hayan servido para alojar algunos animales y también hay evidencias de función habitacional. Un rasgo que destaca de manera especial es una caverna que le confiere un estatus social especial. El conjunto está constituido por grandes bloques de granito muy fracturado y separados ligeramente del afloramiento; estos bloques fueron estabilizados antes de las construcciones incas, utilizando un drenaje natural, sin embargo, algunos muros de los recintos y alrededores están agrietados siguiendo el alineamiento norte-sur, observado también en el Conjunto 16 (Fig. 16 y Foto 60). En este conjunto las aguas de las lluvias se infiltran entre los bloques y pueden afectar su estabilidad.

Los problemas geodinámicos están relacionados con los bloques de granitos fracturados y movidos que se alinean con su similar del Conjunto 16 (al sur de la puerta de ingreso). Este alineamiento coincide también con la línea divisoria de aguas que se origina por el cambio abrupto de la pendiente hacia la ladera oriental de la ciudad (Fig. 16).

Conjuntos 18 y 19

Estos conjuntos se ubican en el Subsector Urbano Bajo (Fig. 15 y Foto 59) y son tradicionalmente llamados “grupo inferior”, “popular” o “grupo de los agricultores”. Estos conjuntos presentan un trazo ortogonal con pequeñas canchas y pasajes, dentro de ellas se encuentran los recintos de planta rectangular, quedando en el medio una especie de patio con una sola entrada.

El Conjunto 18 se compone de nueve recintos, mientras que el Conjunto 19 está conformado por diez recintos (Fig. 22), ambos conjuntos 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 (Fotos 61 y 62). 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 este conjunto consisten en realizar trabajos de drenaje de las aguas, de acuerdo a un diagrama de flujo propuesto por Carlotto et al. (1994c) (Fig. 22) y que se explica a continuación.



Foto 57. Separación de juntas en la pared sur del Conjunto 16.



Foto 58. Graderías apoyadas en granitos fracturados en la pared oeste del Conjunto 15.



Foto 59. Vista panorámica del Conjunto 17, así como de los Conjuntos 19 y 16 (al fondo).



Foto 60. Separación de juntas en los muros del Conjunto 17.



Foto 61. Conjuntos 18 y 19 en mal estado de conservación. Nótese la gran cantidad de recintos colapsados.

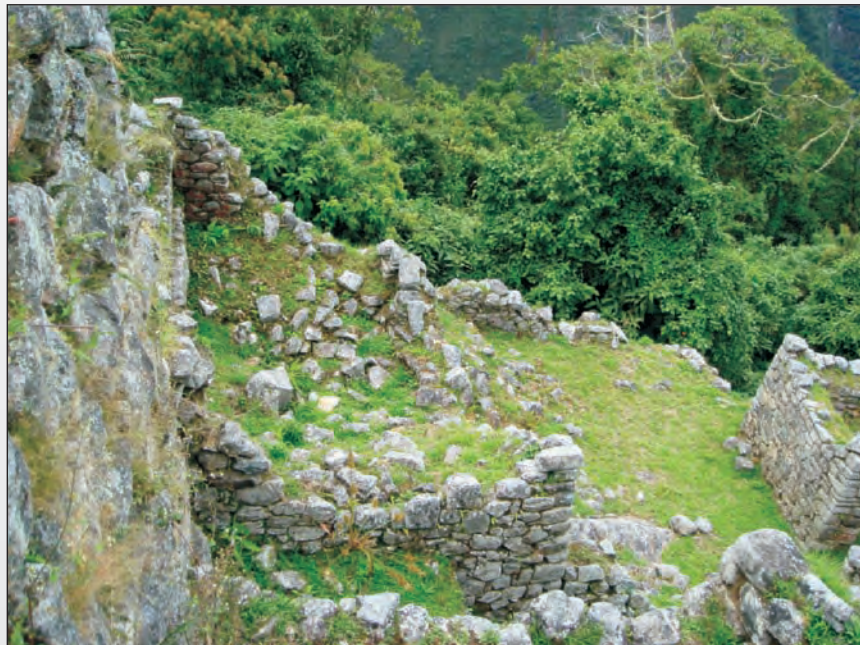


Foto 62. Recinto colapsado en el Conjunto 19.

En el conjunto 18, las aguas que se concentran en los andenes ubicados en la parte superior pueden ser llevadas hacia el foso seco mediante terrenos inclinados y los drenes 1 y 2, que deben ser construidos en el muro adyacente (Fig. 22). El flujo 3 debe bajar a un costado del Recinto 3, hasta unirse con el flujo 5. Las aguas que se concentran en 4 deben ser llevadas a 5, y de allí hasta una canaleta en 7, mientras que las aguas que se concentran en un recinto al costado de las gradas norte 6 deben ser llevadas a las escalinatas contiguas 6A, que pueden ser restauradas considerando drenes, y de allí deben unirse al canal 7. Los últimos tramos del canal 7 se encuentran deteriorados y su refacción es necesaria. Actualmente las aguas llegan al Recinto 1 del Conjunto 19.

Este último conjunto debe ser drenado de acuerdo al diagrama de flujo propuesto (Fig. 22), así, debe construirse un pequeño canal o agujero en los muros del Recinto 1 para llevar las aguas al foso seco en 9. En el pasadizo 10, las aguas pueden discurrir, al igual que en el pasadizo 11, ubicado en el límite entre los Conjuntos 19 y 17.

Finalmente, en ambos conjuntos son necesarios los trabajos de conservación, como la protección de las cabeceras de muros y también apuntalamientos, particularmente en el Recinto 5 del Conjunto 18.

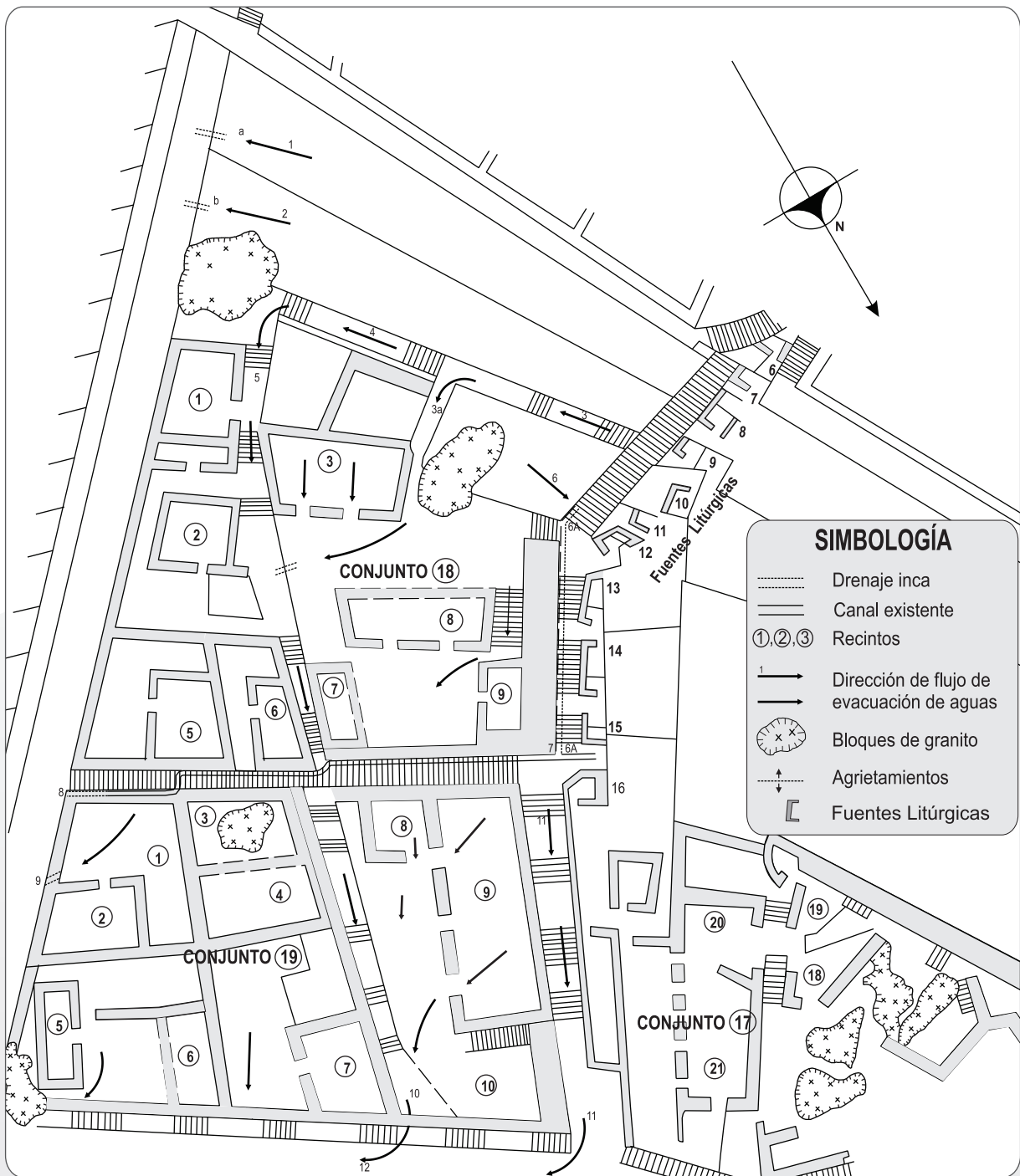


Fig. 22. Mapa con propuesta de drenajes para los Conjuntos 18 y 19. Tomado y modificado de Carlotto et al. (1994c).

4. SECTOR AGRÍCOLA Y CONJUNTO DE ANDENES

El sector agrícola se divide en subsector alto y bajo y se encuentra separado del sector urbano por el foso seco (Fig. 15); comprende andenes o terrazas utilizados para la agricultura, pero su función inicial fue la estabilización del caos granítico y de los deslizamientos superficiales. Muchos sitios puntuales de los conjuntos de andenes presentan problemas de conservación.

Conjunto de Andenes 5

El Conjunto 5 se ubica al oeste del Conjunto de Andenes 10, tiene planta de forma triangular (Fig. 15) y reúne aproximadamente 30 pequeñas terrazas. En el lado noroeste se observa la continuación de la muralla que rodea la ciudad. Tiene una fuerte gradiente y su función principal es la protección de las laderas; la forma semicircular de los andenes indica que han servido para estabilizar una escarpa de deslizamiento en la roca. El estado de conservación varía de regular a bueno, sin embargo, se deben colocar sistemas de drenajes, para evitar la infiltración y la erosión de los suelos.

En el extremo septentrional del Conjunto de Andenes 5, hacia el oeste y cerca de la Puerta de la Ciudad, se observa un muro con separación de juntas, que además está inclinado al oeste (Foto 63). Este agrietamiento se alinea con la divisoria de aguas (Fig. 16), que en la vertiente occidental se hace más empinada.



Foto 63. Muro con separación de juntas (izquierda) y Puerta de la Ciudad (derecha).

Conjunto de Andenes 6

Este grupo de andenes está ubicado en la ladera occidental de la ciudad, al oeste y debajo de la cantera (Fig. 15). Se accede a él mediante tres escalinatas con fuerte pendiente y tiene una planta en forma poligonal. En los paramentos de algunos andenes se ven hornacinas orientadas hacia el oeste, y por ello podría tratarse de terrazas ceremoniales (Foto 7). Los andenes fueron construidos para estabilizar antiguos deslizamientos y zonas inestables en una ladera empinada, donde las rocas graníticas se hallan muy fracturadas, y muestran inclusive evidencias de volcamiento.* En otros casos, los andenes se construyeron sobre roca estable, dando seguridad a todo el sistema (Foto 64).

Gran parte del Conjunto de Andenes 6 ha sido restaurado, sin embargo, todavía existen algunos con agrietamientos cerca de la ladera. Las causas se deben a la infiltración de aguas pluviales en la roca muy fracturada, sobre la que se encuentran las construcciones (Foto 65), y a la pendiente empinada. En este caso se recomienda la impermeabilización de las terrazas y la restauración de los andenes afectados.

Conjunto de Andenes 7

Es un conjunto con planta en forma triangular, que está ubicado en la ladera occidental de la ciudad (Foto 66), al oeste de la cantera; consta de 17 terrazas que van disminuyendo de tamaño a medida que descienden y su objetivo fue estabilizar



Foto 64. Andenes construidos sobre roca estable.

*Rotación de bloques de granito fracturados por efecto de la gravedad al tratar de desprenderse del macizo rocoso

la ladera. En la parte superior se observan tres pequeños recintos, dos de planta rectangular y el tercero triangular, cuya función debió ser complementaria a la del conjunto. Este conjunto se encuentra separado del 8 por una escalinata. El estado de conservación de estos andenes varía de regular a bueno, sin embargo, se debe considerar la construcción de sistemas de drenaje para evacuar las aguas de lluvia.

Conjunto de Andenes 8

Es un conjunto de andenes que rodean ambas vertientes de la Plaza Sagrada y el Intiwatana (Foto 66). Al oeste del Intiwatana, el objetivo de los andenes fue estabilizar la ladera empinada, en una zona donde las rocas graníticas se hallan muy fracturadas, inclusive con evidencias de volcamiento. En los muros de contención que sirvieron para estabilizar un deslizamiento antiguo se observan agrietamientos o separación de juntas que se alinean en dirección N-S (Foto 67). En este lugar la misión japonesa instaló extensómetros que confirmaron movimientos superficiales. En este caso se recomienda impermeabilizar los andenes y recuperar los drenajes incas.

Conjunto de Andenes 10

Este conjunto se encuentra ubicado al sur del foso seco (Fig. 15). Los andenes que se encuentran al oeste muestran agrietamientos en su base a pesar de estar construidos sobre aparentes afloramientos de granitos, ya que estos se hallan muy fracturados y a favor de la pendiente; en realidad, es el inicio de un deslizamiento traslacional (Foto 68). La inestabilidad de estas construcciones aumenta por la infiltración de las aguas pluviales y la pendiente muy empinada. En este sitio se recomienda construir o restaurar drenajes, para evitar la erosión e infiltración de las aguas en los andenes y áreas adyacentes.

Conjunto de Andenes 11

Está 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. 16 y Foto 17). 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 manto coluvial. La infiltración del agua y el drenaje insuficiente son los causantes de este fenómeno.

Otro sitio con problemas geodinámicos se observa en el extremo sureste del conjunto, donde el muro exterior sureste presenta separación de juntas entre los



Foto 65. Andenes en proceso de restauración, Conjunto de Andenes 6. Foto tomada en junio de 2005.



Foto 66. En primer plano partes del Conjunto de Andenes 7, al fondo el Conjunto de Andenes 8 que rodea al Intiwatana.



Foto 67. Muros de contención con efectos de asentamiento y separación de juntas en el Conjunto de Andenes 8, ubicados al oeste del Intiwatana.



Foto 68. Terrazas del Conjunto de Andenes 10, construidos sobre granitos muy fracturados que comienzan a deslizarse.



Foto 69. Separación de juntas en el muro sur de los Recintos 5 y 6 del Conjunto de Andenes 11.



Foto 70. Deslizamiento estabilizado por los incas mediante las terrazas del Conjunto de Andenes 13.



Foto 71. Deslizamiento que afectó al Conjunto de Andenes 13. Vista tomada el año 1994.

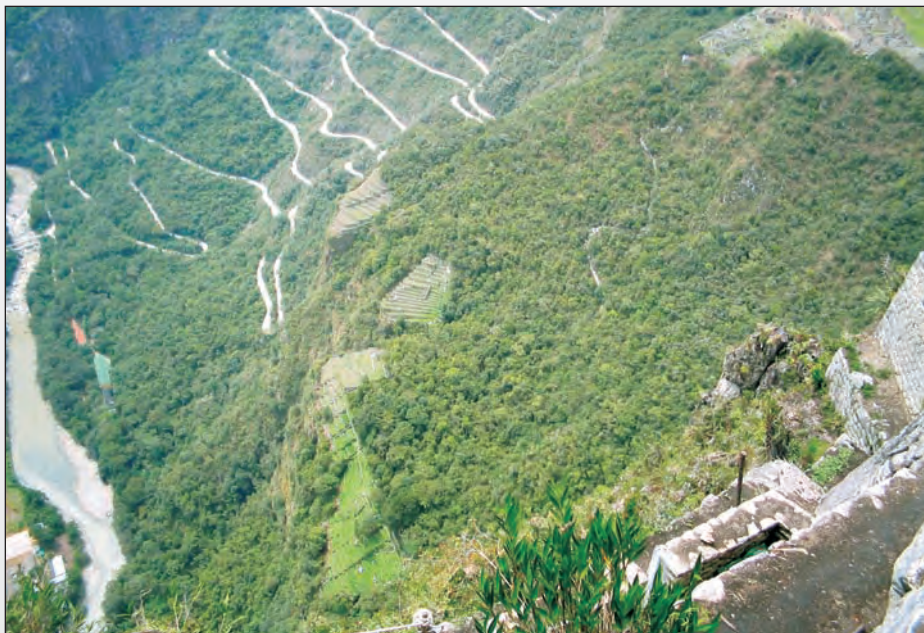


Foto 72. Conjunto de las Cataratas 1, 2 y 3 al borde del precipicio y rodeados de una vegetación tupida.

Recintos 5 y 6 (Fig. 16 y Foto 69), así como entre los Recintos 2 y 4. Estos agrietamientos pueden deberse a la infiltración de las aguas pluviales, que se acentúan por el peso de las construcciones que se encuentran sobre afloramientos de rocas fracturadas en una zona de pendiente empinada. Se recomienda reconstruir o restaurar los drenajes, así como impermeabilizar las áreas descubiertas y las plataformas de los andenes. También se deben reforestar las áreas descubiertas con especies nativas.

Conjunto de Andenes 13

Este conjunto conformado por 15 andenes (Fig. 21) se ubica en el sector oriental de la ciudad inca (Fig. 15 y Foto 70), debajo de los Conjuntos 10, 11, 12. En 1994, en los andenes XI, XII, XIII, XIV y XV, que forman cinco plataformas unidas mediante escalinatas (Carlotto et al., 1994), se observaba un pequeño derrumbe-deslizamiento (P20) con un ancho promedio de 5 m, que afectó los andenes XII, XIII, XIV y XV (Foto 71). Las causas de la activación de este deslizamiento fueron la concentración de las aguas provenientes del conjunto 10 y particularmente del sumidero B, y la caída de bloques de granito que se desestabilizaron debido a la sufusión y al debilitamiento de los muros. Estos bloques no se observan actualmente porque han rodado pendiente abajo. Los andenes de I al X (Fig. 21) fueron diseñados y construidos por los incas para estabilizar un antiguo deslizamiento y cumplen esta función de manera eficiente; su estado de conservación varía de regular a bueno, sin embargo, se observan algunos daños en los andenes V (P-40) y VI (P-41), pues los muros superiores desprendidos requieren ser restaurados.

Conjunto de Andenes: Cataratas

Al este y noreste de la ciudad inca, en la parte baja de la ladera oriental hay tres conjuntos de andenes denominados Catarata 1, 2 y 3 (Fig. 15 y Foto 72), que se encuentran construidos sobre granitos muy fracturados y algo sueltos, pero estabilizados en el borde de un barranco que llega hasta el río Urubamba. Estos andenes están en proceso de recuperación y restauración.

5. CERRO WAYNAPICCHU

El cerro Waynapicchu se encuentra a 2677 msnm, 200 m más alto que la ciudad inca y está situado al norte. Los trabajos de andenería terminan de enmarcar y contener las caras de la cumbre de la montaña. En la cima, que tiene forma alargada y dirección noreste-suroeste, existen grandes bloques apilados de granito, que en realidad son caos granítico. Los andenes terminan formando un torreón natural con amplio dominio del cielo y la tierra, y por eso se piensa que los incas lo utilizaron como observatorio y templo a la vez. Esta montaña está separada de la zona de la ciudad por la falla NE-SO denominada falla Waynapicchu (Fig. 11). Existe un camino de acceso a la cima (Foto 73), que pasa sobre diferentes tipos de suelos y

roca. Al inicio se halla sobre suelos eluvio-coluviales y sobre una zona de grandes bloques de granito que forman parte de un caos (Foto 74), hasta aproximadamente cerca del pequeño cerro Uñapicchu, luego, el camino sigue mayormente sobre afloramientos de granito muy fracturado y suelos coluviales (Foto 75). En las laderas aparecen suelos orgánicos de pequeño espesor, así como suelos coluviales donde se desarrolla una rala vegetación arbustiva. Son frecuentes los problemas de erosión superficial e inestabilidad de los bloques de granito debido a la falta de drenajes en caso de suelos y granitos fracturados; esto se acentúa en las pendientes muy pronunciadas por las intensas precipitaciones pluviales.

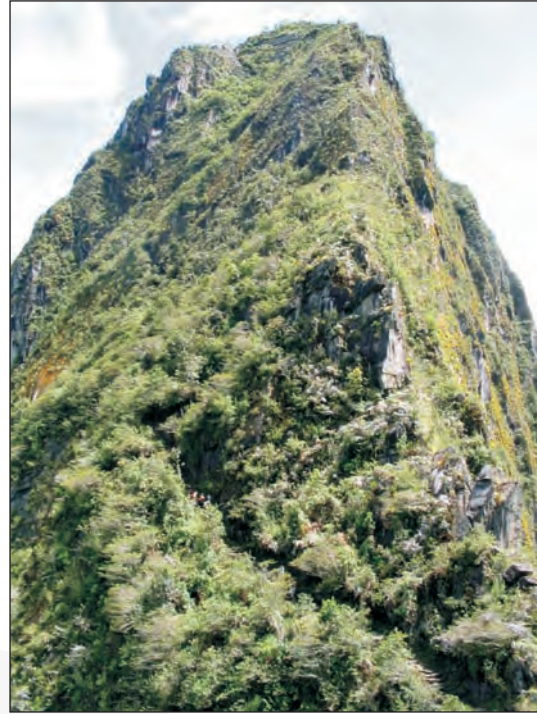


Foto 73. Camino de acceso al cerro Waynapicchu.



Foto 74. Camino inca a Waynapicchu sobre suelos coluviales que muestran signos de erosión superficial.



Foto 75. Camino inca a Waynapicchu sobre granitos al borde del precipicio.



Foto 76. Andenes incas que estabilizan una ladera con evidencias de deslizamiento, en la cima del cerro Waynapicchu.



Foto 77. Bloque de granito fracturado en vías de separación del afloramiento en el cerro Waynapicchu. La fractura atraviesa el camino inca para llegar a la cima.



Foto 78. Cima del cerro Waynapicchu formada por grandes bloques de caos granítico



Foto 79. Muros incas que estabilizan la ladera del cerro Uñapicchu.

Las primeras construcciones incas se encuentran aproximadamente a 2550 msnm; están compuestas de andenes y recintos, algunas se localizan sobre deslizamientos antiguos estabilizados (Foto 76), y otras fueron construidas sobre granitos superando abismos verticales. Varios recintos han sido restaurados y se encuentran en buen estado de conservación. Para ingresar a la cima del cerro se atraviesa una fractura en el granito que está separándose del afloramiento (Foto 77), y al llegar se observan grandes bloques de granitos fracturados y un poco movidos y, sobre estos, el caos granítico (Foto 78). En Waynapicchu también es evidente el paso progresivo de los granitos fracturados a los bloques de granitos separados formando caos granítico, particularmente en la cima del cerro (Fotos 77 y 78).

Las recomendaciones para la buena conservación del camino son: evitar la erosión superficial a causa de las aguas pluviales y construir drenes longitudinales y transversales. Las zonas con bloques de caos granítico deben ser estabilizadas con muros de contención, ya que en algunos casos ciertas ampliaciones del camino las han desestabilizado.

Existe un camino de acceso hacia el cerro Uñapicchu (2480 msnm) que sigue suelos coluviales y granitos fracturados, sobre ellos hay construcciones que han sido restauradas (Foto 79). Antes de llegar a la cima se ven rocas muy fracturadas y granitos separados que forman parte del caos granítico. Aquí hay problemas de caída de rocas y asentamientos, y por ello se recomienda la estabilización e impermeabilización, para evitar la infiltración de las aguas pluviales y la erosión superficial de los suelos coluviales y orgánicos.

Referencias bibliográficas

Bouchard, J., Carlotto, V., Usselman, P. (1989). Informes sobre la Misión de Cooperación en Machupicchu: Geología, Geomorfología, Arquitectura. Embajada de Francia, Lima, 53 p.

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. (2003). Geología, geodinámica, monitoreo, hipótesis de deslizamientos profundos de la ciudadela inca de Machu Picchu. Informe final de la auditoría ambiental de Machu Picchu-Contraloría General de la República, 85 p.

Cárdenas, J., Carlotto, V., Romero, D., Jaimes, F. y Valdivia, W. (1997). Geología de los cuadrángulos de Chuanquiri y Pacaypata. Carta Geológica Nacional INGEMMET, Boletín 89, Serie A, Lima, 208 p.

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, p 171-191.

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, Francia. 158p.

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, Lima, 18 p.

Carlotto, V., Cárdenas, J., Chávez, R., Pumayali, R. y Roman, F. (1994a). *Estudio geológico y de conservación de la Plaza Sagrada, Templos e Intiwatana*. PNUD - UNESCO, Lima. 18p..

Carlotto, V., Cárdenas, J., Chávez, R., Pumayali, R. y Roman, F. (1994b). *Estudio geológico de los problemas de asentamientos en el Torreón-Tumba Real y zonas aledañas*. PNUD - UNESCO, Lima. 19p.

Carlotto, V., Cárdenas, J., Chávez, R., Pumayali, R. y Roman, F. (1994c). *Estudio geológico y de Conservación de la parte oriental de la Ciudadela de Machu Picchu*. PNUD - UNESCO, Lima. 18p.

Carlotto, V., Gil, W., Cárdenas, J y Chávez, R. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca*. Carta Geológica Nacional INGEMMET, Boletín 65, Serie A, Lima. 245 p.

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, Lima. 320 p.

Clark, A.H., Farrar, E., Kontak, D.J., Langridge, R.J., Arenas, M.J., France, L.J., McBride, S.L., Woodman, P.L., Wasteneys, H.A., Sandeman, H.A. y Douglas, D.A. (1990). *Geologic and Geochronologic Constraints on the Metallogenic Evolution of the Andes of Southeastern Peru*. *Economic Geology* 85: 1520-1583.

Egeler, C. y De Booy, T. (1957). *De geologisch-alpinistische exploratie in de Cordillera Vilcabamba en Cordillera Veronica, zuid-oost Perú*. *Tijdschrift van het Kon. Nederland Aardrijkskd. Genoot.* 74 (2): 120-136.

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.

Fricker, P. (1960). *Zur Geologie der Cordillera Vilcabamba*. *Alpen*, 36: 58-66.

Fricker, P. y Weibel, M. (1960). *Zur Kenntnis der Eruptive gesteine in der Cordillera Vilcabamba (Peru)*. *Schweizerische Mineralogische Petrologische Mitteilungen* 40: 359-382. Zürich.

Heim, A. (1948). *Geología de los ríos Apurímac y Urubamba*. *Boletín del Instituto Geológico del Perú*, Lima. 10: 1-25.

Huaco, P., Minaya, M. y Deza, E. (1986), Intensidades causadas por el sismo del 05-04-86 en la ciudad del Cusco. Instituto Geofísico del Perú.

Kalafatovich, C. (1963). Geología de la ciudadela de Machu Picchu y sus alrededores. Revista Universitaria 121:217-228. Cusco, UNSAAC.

Kontak, D., Clark, A.H. y Farrar, E. (1984). The Magmatic Evolution of the Cordillera Oriental, Southeastern Peru, en *Andean Magmatism: Chemical and Isotopic Constraints*, Harmon y Barreiro editores, p. 203-219. Londres.

Marocco, R. (1978).- Estudio geológico de la Cordillera de Vilcabamba. Boletín 4. Serie D.Lima, INGEOMIN.157p.

Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). 131p. Lima, Instituto de Geología y Minería.

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, Berlín, Heidelberg, p. 49-54.

A black and white photograph of the Machu Picchu ruins in Peru. The image shows a large stone wall in the foreground, with a mountain in the background. The text is overlaid on the image.

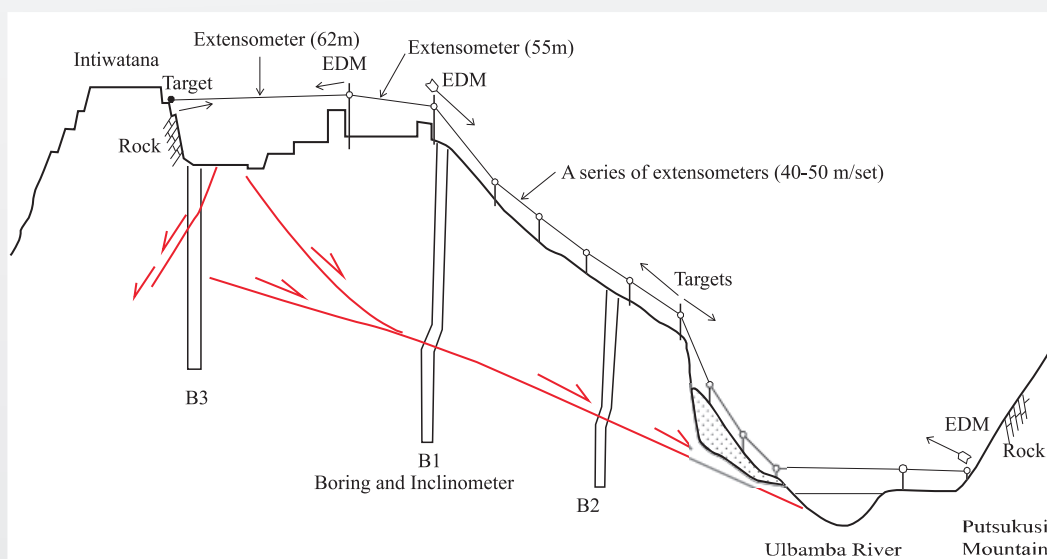
**IV. ¿MACHUPICCHU EN VÍAS DE DESAPARICIÓN?
INVESTIGACIONES DE LAS MISIONES EXTRANJERAS Y PERUANAS**

1. 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 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 et al., 2000-2005) 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 siguiente. Para probar esta hipótesis, Sassa et al. (2000) propusieron el monitoreo con extensómetros y la realización de perforaciones para medir la profundidad a la que se encontraría el plano de deslizamiento.



Sección hipotética de Machupicchu que muestra los planos de deslizamiento que destruirían la ciudad inca (Sassa, 2001).

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 Víctor Carlotto, quienes sustentaron sus observaciones en los foros nacionales e internacionales, y también en publicaciones de divulgación (véase *Geotimes* 46 (8), agosto 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 en los capítulos anteriores.

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 nacionalidades (misión checa-eslovaca, italiana y peruano-canadiense) para determinar si existía o no este gran deslizamiento que destruiría Machupicchu. Durante un taller realizado en esa localidad 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 precursores, 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.

Un antecedente importante es que en 1990 otro equipo japonés había alertado sobre los peligros existentes en Machupicchu, incluyendo el sísmico que podría afectar las construcciones, y por lo tanto, aconsejó que las zonas críticas de la ciudad (como el Templo Principal, el Torreón, etc.) debían ser reconstruidas adoptando técnicas antisísmicas utilizadas en Japón (JICA, 1990).* Sin embargo, la misión franco-peruana integrada por J. F. Bouchard, V. Carlotto y P. Usselman (1992) pronto desestimó esta suposición, además de señalar a Machupicchu como un sitio estable a los sismos, donde los problemas eran superficiales y estaban más bien relacionados con el agua y la gravedad.

Para poder entender el desarrollo y estos hechos presentaremos un resumen de las investigaciones realizadas por las diferentes misiones, que fueron publicadas en diferentes revistas internacionales, y las conclusiones del taller que se organizó el año 2005 en Machupicchu.

Carlotto, V. y Cárdenas, J. (2001): Machu Picchu A giant built on a fragile foundation, *Geotimes* 46 (8), agosto 2001

* JICA (1990). Informe general sobre el estudio de conservación de las ruinas de Machupicchu, República del Perú, Lima.

2. MISIÓN JAPONESA: INVESTIGACIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN MACHUPICCHU (Sassa et al., 2000-2005)

Introducción

La existencia de posibles deslizamientos de gran tamaño en Machupicchu fue introducida por Carreño y Bonnard (1997), y a raíz de esta información el equipo japonés se interesó en las investigaciones. En marzo del 2000 comenzaron los estudios de reconocimiento y en noviembre se instalaron los extensómetros (Sassa et al., 2000). Los primeros resultados de los extensómetros que indican movimientos fueron reportados en el Simposio de Riesgo de Mitigación y Protección de Patrimonios Naturales y Culturales en Tokio (Sassa et al., 2001), en *Yomiuri Newspaper* en Japón y *New Scientist* en Inglaterra (Hadfield, 2001). La nota periodística de *New Scientist* fue sensacionalista y, según el propio K. Sassa, con equivocaciones o mala interpretación, sin embargo, llamó la atención mundial y consiguió fondos para las investigaciones; así se organizaron una serie de eventos, la firma de convenios y se establecieron consorcios para diferentes proyectos de investigación relacionados con los deslizamientos y Machupicchu, incluyendo misiones de otros países.

El monitoreo inicial de la ladera usando extensómetros por el equipo japonés del Instituto de Investigaciones en Prevención de Desastres de la Universidad de Kioto (DPRI/KU) comenzó en cooperación con el INC y el INRENA en noviembre del 2000. Después del establecimiento del Consorcio Internacional de Deslizamientos (ICL) y el Programa Internacional de Deslizamientos (IPL) en 2002, el inicio de los acuerdos de cooperación sobre Machupicchu entre el gobierno del Perú y DPRI/KU fue desarrollado en el marco del ICL. El Programa Internacional de Deslizamientos (IPL) c101-1 "Investigaciones de deslizamientos en Machupicchu" reunió a seis grupos de investigación, incluyendo japoneses, italianos, checo-eslovacos y peruano-canadienses.

Posteriormente, el año 2004, el equipo japonés instaló cuatro nuevos conjuntos de extensómetros, tres juegos de receptores de GPS y una estación total con tres prismas, para poder monitorear el posible gran deslizamiento en Machupicchu.

Hipótesis planteada

La hipótesis planteada por el profesor K. Sassa y sus colaboradores ha ido variando en el tiempo, pero esencialmente es la misma: existirían deslizamientos profundos que destruirían la ciudad inca de Machupicchu. Su teoría indica la presencia de dos planos de deslizamiento profundos a partir de la Plaza Mayor hasta el río Urubamba, a lo largo de más de 500 m, y que al activarse ocasionarían la caída del cerro, incluyendo la ciudad inca. La Plaza Mayor o Plaza Principal es una cumbre de montaña, en donde la ciudad fue construida en una zona plana o algo cóncava



Fig. 1. Localización y vista de la ciudad inca de Machupicchu. Tomado y modificado de Sassa et al. (2002).

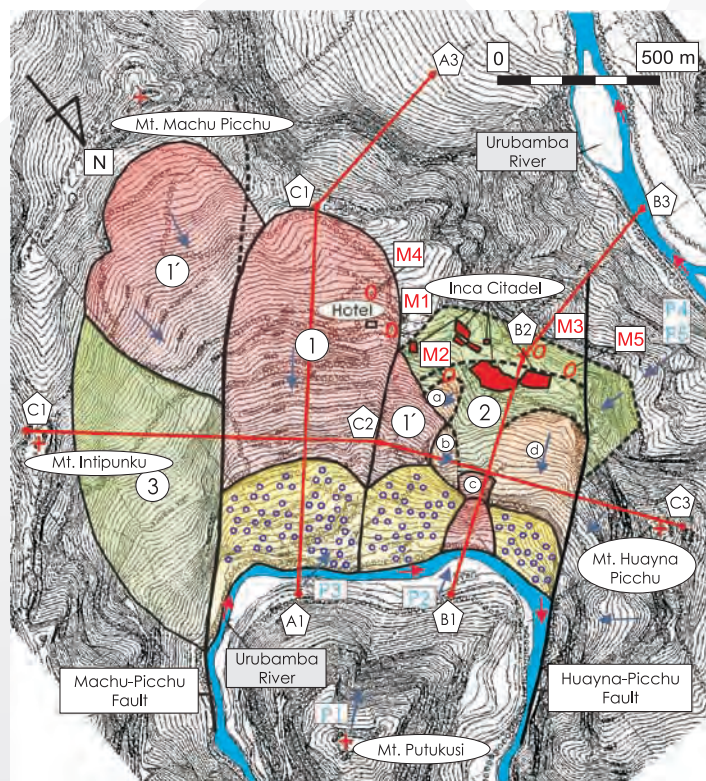


Fig. 2. Mapa de los Bloques de deslizamientos 1, 2 y 3 en el frente de talud (Sassa et al., 2002). A1-A3, B1-B3, C1-C3: líneas de las secciones para el Bloque 1 y Bloque 2 ; ①, ②, ③: bloques de deslizamientos y potenciales deslizamientos; I : expansión de bloques del 1 al 2 y 3; a, b, c, d: subbloques del Bloque 2 las que parecen moverse arriba hacia el área de la ciudad desde el borde a: deslizamiento retrogresivo, b: posible volcamiento de roca; c: deslizamiento reciente; d: deslizamiento superficial que no tiene aún mucho desplazamiento; □□□□ detritos de deslizamiento al pie del talud; M1-M5; ubicación de los extensómetros. Tomado de Sassa et al. (2002).

separada por dos relieves: Intiwatana al oeste y el Sector Urbano al este. Según el profesor K. Sassa, la Plaza Mayor parece estar contorneada por un relleno de detritos en la zona de fractura entre las dos cumbres, a lo largo de la línea punteada (Fig. 1). Como ha sido mostrado por Sassa et al. (2001), la línea punteada dibujada a través de la zona de la estructura fracturada (Fig. 1) puede ser una potencial escarpa de deslizamiento, sin embargo, en las publicaciones previas, se afirmaba que era la prueba del deslizamiento. Recientemente dice: “esta hipótesis no está aún probada por el monitoreo, ni perforaciones, ni exploración geofísica ni excavaciones directas, u otros métodos confiables, sin embargo, cualquier fenómeno para negar esta hipótesis no está todavía establecido” (Sassa et al., 2005).

Para explicar la existencia de los deslizamientos profundos, Sassa et al. (2000-2001) indican que la ciudad inca de Machupicchu fue construida en la cima de una montaña, cuya ladera este es relativamente joven y la denominan *Front Slope* o frente del talud, y que estaría controlada por las diaclasas que están a favor de la pendiente. En este frente de talud, Sassa (2001) y Sassa et al. (2001) definieron una “zona de ruptura de la estructura de la roca” (líneas rojas discontinuas en la Figura 1) que sería una zona de cizalla que señala la etapa precursora potencial de los deslizamientos. La otra parte (sector oeste) de la ladera es llamada *Back Slope* o espalda del talud, tiene pendiente empinada pero alta resistencia al cizallamiento. La mayoría de los deslizamientos en el *Back Slope* son bloques caídos o volcamientos (*topples*), sin embargo, en algunos estudios el profesor K. Sassa considera también en esta parte la existencia de un gran deslizamiento. Sassa et al. (2002) presentaron un mapa de distribución de deslizamientos (Fig. 2) basados principalmente en la fotointerpretación.

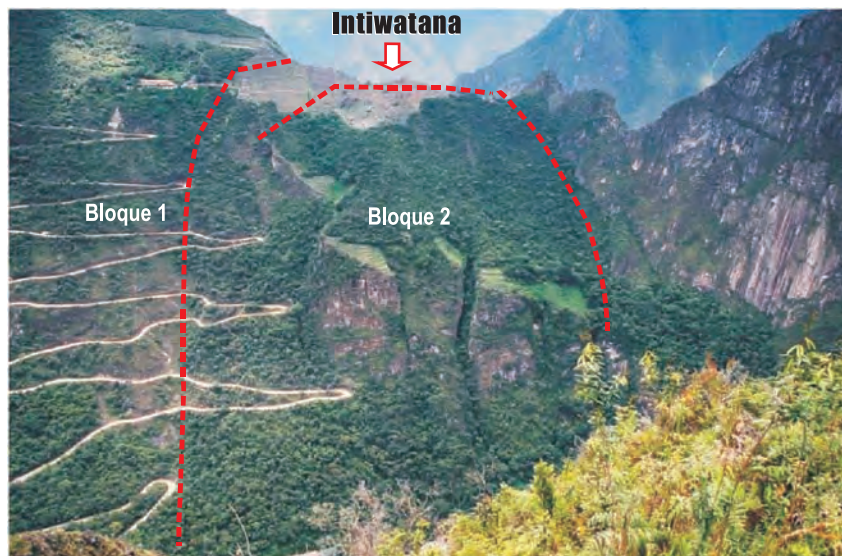
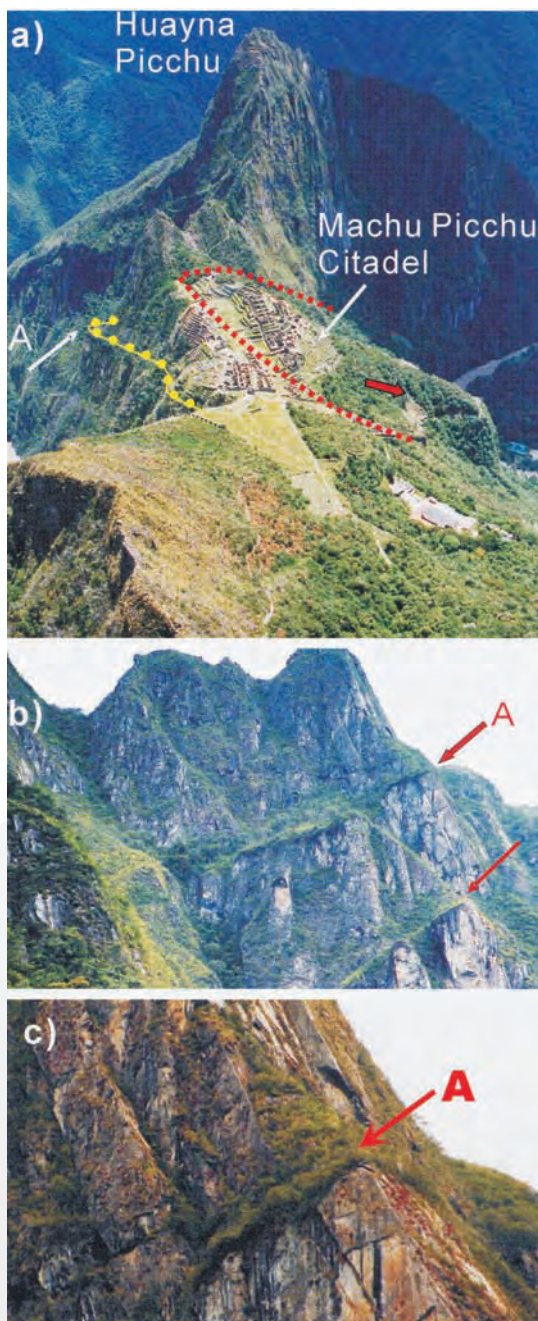


Fig. 3. Talud oriental de Machupicchu tomado desde el cerro Putukusi. La superficie lisa del Bloque 2 puede ser una superficie de deslizamiento de un deslizamiento antiguo. El Bloque 1 está cubierto por detritos de deslizamiento que actualmente se mueven débilmente. Tomado de Sassa et al. (2002).



Para interpretar el proceso de deslizamiento hay que partir de ver la Figura 3, es decir, una vista frontal del frente de talud, la localización de dos secciones y la interpretación de deslizamientos (Sassa et al., 2001, 2002, 2005).

1. Es obvio que el Bloque 1 es actualmente un deslizamiento activo.
2. El Bloque 2, en general, parece ser una ladera de roca dura intacta. Sin embargo, la pendiente ha sido invadida por deslizamientos retrogresivos o rocas volcadas (*topple*) en el sitio del río Urubamba y en el Bloque 1, como muestran las marcas rojas en la Figura 3.
3. La superficie del suelo del Bloque 2 es muy lisa y muy recta. Estas superficies rectas están formadas generalmente a lo largo de bandas de cizallamiento, que son superficies deformadas por esfuerzos tectónicos.
4. La foto aérea tomada por K. Sassa en el 2000 sugiere la existencia de una posible banda de cizallamiento (líneas amarillas en la Figura 4a) en paralelo a la actual superficie suave del terreno del Bloque 2.
5. La banda de cizallamiento indicada por "A" (Figs 4b y 4c) es probablemente la extensión de una superficie de deslizamiento del Bloque 1, en este caso, la parte baja final de la banda de cizallamiento. Es aún una hipótesis que no está confirmada por perforaciones (Sassa et al., 2005).

Fig. 4. a) Ciudad de Machupicchu desde un helicóptero (Sassa et al., 2002); b) foto del punto A desde la parte posterior y c) foto ampliada del punto A. La línea roja punteada indica una posible cabecera de escarpe de un deslizamiento en etapa precursora; la línea amarilla punteada indica una potencial superficie de deslizamiento en etapa precursora. Las flechas A indican el mismo lugar desde diferentes ángulos.

Posibles procesos de deslizamiento en Machupicchu

La Figura 5 (Sassa et al., 2001, 2002, 2005) muestra que el río Urubamba rodea al área de Machupicchu a lo largo de un sistema de fallas. El frente de talud (Bloques 1, 2 y 3 en la Figura 2) parece haber sido excavado por movimientos en masa previos, en tanto que la cumbre de la montaña, en la ciudad, parece haber sido sometida a deslizamientos y parcialmente removida en ambos lados del río Urubamba. Es una masa de roca estable, sin embargo, se observan superficies de deslizamientos de rocas. Por lo tanto, hay que suponer que al haber excavado el frente del talud, no hubo probablemente un único deslizamiento gigante, sino una serie de deslizamientos retrogresivos, tal como se ve actualmente en el Bloque 1 y en el borde del Bloque 2.

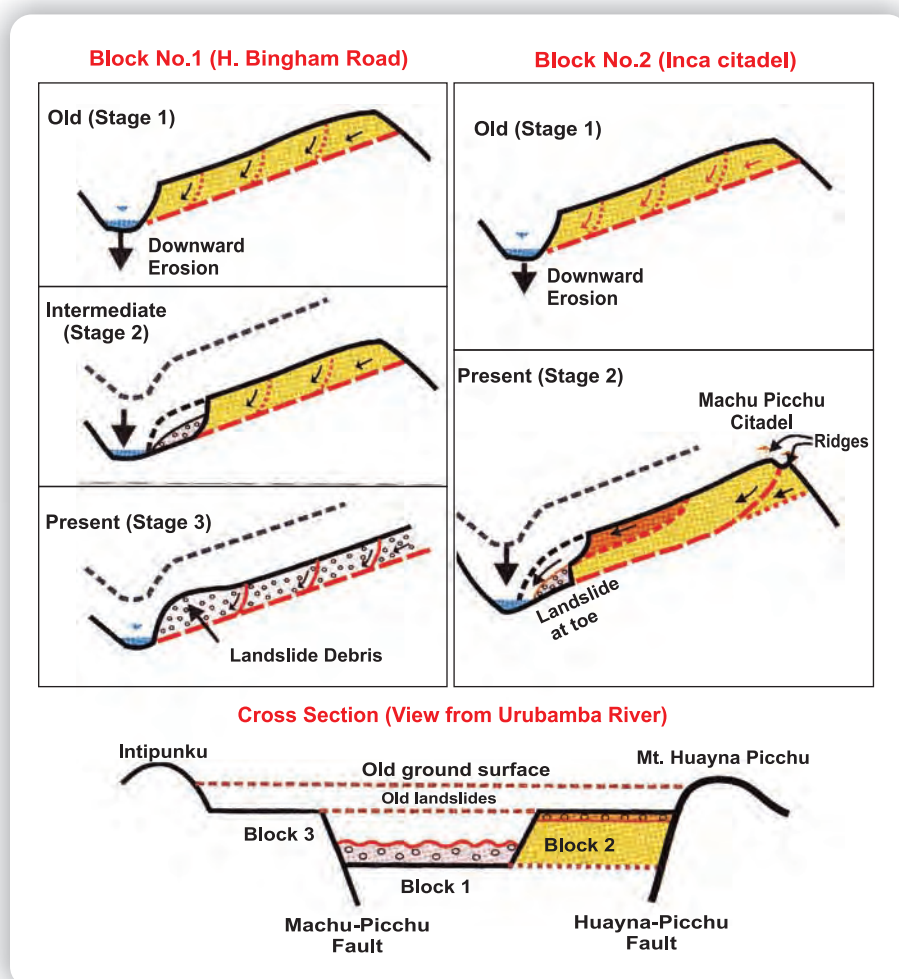


Fig. 5 Hipótesis del proceso de deslizamiento en Machupicchu. Tomado de Sassa et al. (2002, 2005).

Las etapas de evolución de los deslizamientos (Sassa et al., 2002, 2005) están ilustradas en una forma esquemática para el Bloque 1 y el Bloque 2 (Fig. 5). Es probable que en tiempos antiguos hayan ocurrido deslizamientos retrogresivos en el frente de talud y el material deslizado se haya movido hacia el río Urubamba, cuyo nivel fue cambiando alrededor de 100 m más abajo, hasta el nivel actual. Tres

planos de deslizamiento de los Bloques 1, 2 y 3 muestran la diferencia en la evolución de la velocidad de los deslizamientos. El talud del Bloque 1 ha sido sometido fuertemente a la erosión del río Urubamba. Primero, la pendiente comenzó a deslizarse como se ilustra en el periodo intermedio (Etapa 2) del Bloque 1. El deslizamiento retrogresivo inicial se expandió hacia la parte superior y hacia los lados de la ladera, después se formó la configuración actual de la Etapa 3, donde detritos del deslizamiento activo cubren la ladera. En la Figura 2 se ve que el río Urubamba fue empujado hacia delante por los detritos del deslizamiento producidos por el Bloque 1. Así estos depósitos de deslizamiento han trabajado probablemente en favor de la protección frente a la erosión, al pie del Bloque 2, y a causa de esta protección, la evolución del Bloque 2 fue frenada y está aún en la Etapa 2. El mayor freno para la evolución de la pendiente es el Bloque 3. Después del transporte de los detritos de deslizamiento previo, no han ocurrido grandes deslizamientos debido a que casi no hay erosión allí, como se indica en la Figura 2. Solo el Bloque 1 fue sometido a mayores deslizamientos hasta el nivel presente del río Urubamba y localizado en la elevación inferior del cauce del río. El Bloque 2 sigue ahora el proceso del Bloque 1 y se conoce la profundidad de los deslizamientos, pero toda la ladera desde la cumbre de la montaña hacia el río está afectada por deslizamientos activos y cubierta por detritos de deslizamiento. La Figura 6b presenta una sección longitudinal a lo largo de B1-B2 en el Bloque 2; esta sección muestra un deslizamiento activo hacia el pie (c en la Figura 2) y otros están aún en la etapa precursora. La superficie de deslizamiento potencial es una banda de cizalla encontrada en la Figura 4. Si consideramos que la superficie potencial está localizada en el nivel, como se muestra en la Figura 6b, entonces la profundidad del deslizamiento es de 150 a 200 m (Sassa et al., 2001, 2005).

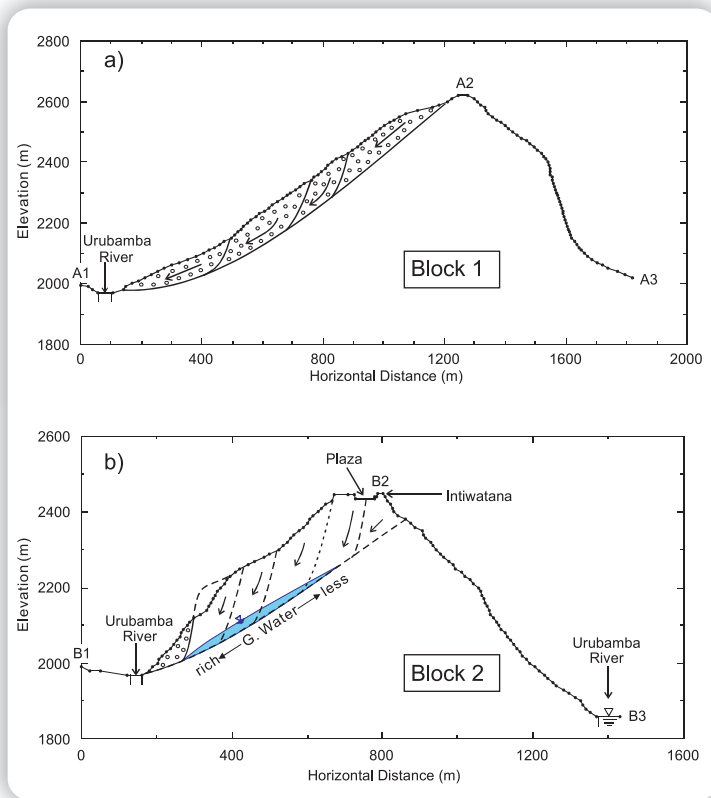


Fig. 6. Secciones longitudinales del Bloque 1 (A1-A2) y Bloque 2 (B1-B2). Tomado de Sassa et al. (2001, 2002).

Monitoreo

La misión japonesa utilizó tres métodos de estudio y monitoreo: extensómetros, GPS y estación total (Sassa et al., 2001-2005).

Extensómetros

En la primera etapa de investigación cuantitativa, dos tipos de extensómetros simples fueron instalados en la ladera de Machupicchu el año 2000 (Sassa, 2000). El primero consiste en extensómetros manuales y el segundo en extensómetros con registrador automático. Estos aparatos miden los desplazamientos de suelos, y por tanto los movimientos superficiales. El resultado de esos monitoreos (Sassa et al., 2000, 2001) sugiere la existencia de desplazamiento permanente del orden de milímetros por mes o más grandes. Veinte extensómetros fueron instalados en cinco sitios (M1-M5), como se muestra en la Figura 2. El extensómetro S1 en M, cerca del Hotel Santuario Lodge, muestra una gradual extensión a lo largo del tiempo, correspondiente a una estación de lluvias, y detecta movimientos relativamente grandes y deslizamientos profundos. La Figura 7 presenta el monitoreo del extensómetro manual N2 instalado en el sitio M2, en el borde del subbloque (a) del Bloque 2; el movimiento es más grande y del orden de 10 mm y la respuesta en el evento de lluvia parece más grande que el registrado por el extensómetro S1. Es probable que detecte un deslizamiento relativamente poco profundo. No es posible estimar el tamaño del deslizamiento a partir del monitoreo de un simple extensómetro, sin embargo, es seguro que el movimiento del deslizamiento (probablemente deslizamientos a gran escala) ocurre como respuesta a lluvias en la ladera de Machupicchu (Sassa et al., 2001, 2002, 2005). Esto indica que una lluvia puede disparar deslizamientos en una ladera o, al contrario, la reducción de infiltración por lluvias en la superficie de cizallamiento, por superficies de drenaje o drenajes subterráneos, puede prevenir los movimientos de deslizamientos (Sassa et al., 2005).

GPS y estación total

El equipo japonés obtuvo en el 2004 el permiso oficial para instalar extensómetros, GPS y estación total en Machupicchu, incluyendo el área de la Plaza Mayor. En septiembre y noviembre del 2004 y marzo del 2005 se instalaron cuatro juegos de extensómetros de gran intervalo, tres juegos de receptores de GPS estáticos y una estación total con tres prismas anclados (Sassa et al., 2001, 2002, 2005). La Figura 8 es el mapa de localización de cada instrumento (Sassa et al., 2005).

La Figura 9 ilustra la localización de los extensómetros y GPS en el bloque de deslizamiento interpretado. El extensómetro 04E2 es un hilo de super-invar que cruza la Plaza Mayor desde una roca grande ubicada bajo el Intiwatana hasta una pared de una construcción inca, y registra la extensión y compresión. El extensómetro 04E3 está localizado bajo la ciudad, en el Bloque 2, y el extensómetro 04E1 cerca del extensómetro S1 en el Bloque 1, pero sus intervalos son más grandes

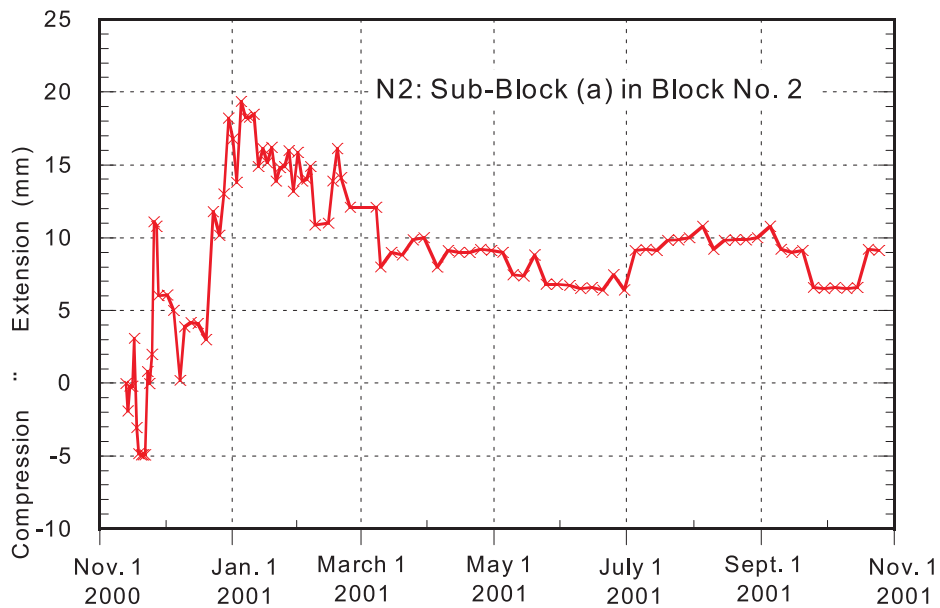
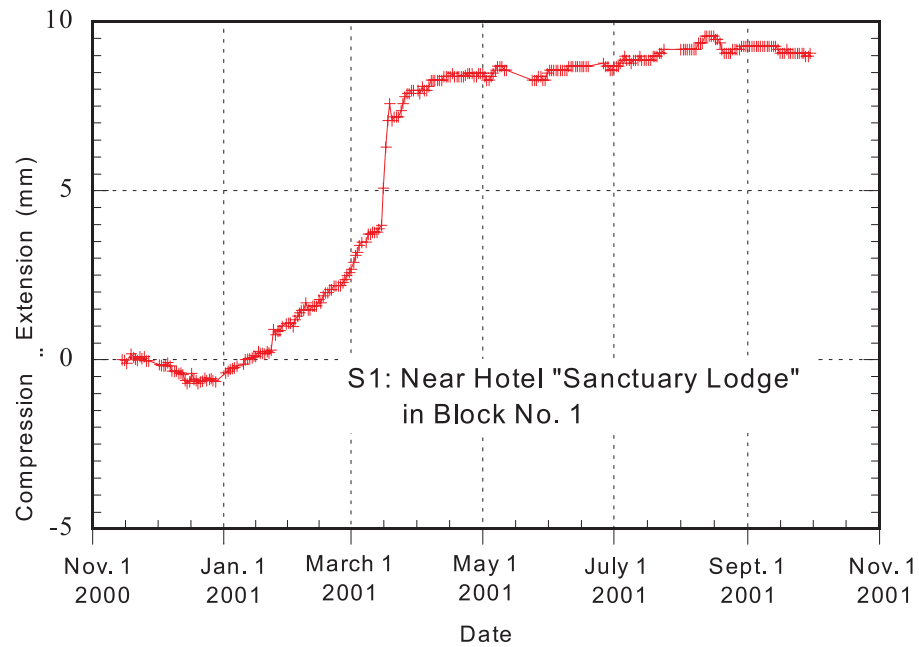


Fig. 7. Registros del extensómetro S1 en el sitio de monitoreo M1 cerca del Hotel Sanctuary Lodge en el Bloque 1 y extensómetro N2 en el sitio de monitoreo M2 en el Bloque 2. Tomado de Sassa et al. (2002).

que S1. Ambos intentan detectar una extensión potencial en la cabecera del escarpe del deslizamiento, en la parte media del talud en el Bloque 1 y Bloque 2. El extensómetro 04E4 está localizado al pie del Bloque 1, cruzando el río Urubamba, para monitorear el movimiento compresivo de este bloque. La Figura 9 presenta la sección del Bloque 2, mientras que 04E1 y 04E4 están instalados en el Bloque 1, así las posiciones de esos dos extensómetros no son reales, pero están proyectadas al Bloque 2 (Sassa et al., 2002, 2005).

Encima de cada extensómetro se han instalado los receptores GPS 04G1, 04G2 y 04G3. La red estática de GPS tiene ahora tres estaciones. El punto de referencia está sobre 04G3 en la estación de tren de Machupicchu. Los movimientos relativos de 04G1 en el Bloque 1 y 04G2 en el Bloque 2 pueden ser monitoreados (Sassa et al., 2002, 2005).

La estación total está localizada en el punto 04TS1 de la Figura 8, en la margen derecha del río Urubamba. Tres prismas apuntalados en 04TM1, 04TM2 y 04TM3 están localizados en las cabeceras del pie del acantilado, en el Bloque 2. En un periodo de casi cuatro meses, desde el 27 de noviembre del 2004 al 23 de marzo del 2005, solo el punto 04TM2 muestra un pequeño desplazamiento de 1 mm hacia abajo de la pendiente; los otros dos puntos no muestran desplazamientos mayores a 1 mm, aunque este periodo de observación incluye la estación de lluvias (Sassa et al., 2002, 2005).

De acuerdo a Sassa et al. (2001, 2002, 2005), es necesario realizar perforaciones y colocar inclinómetros de barrenos o utilizar un método alternativo para detectar las superficies de deslizamiento y para conocer la profundidad de los deslizamientos. El monitoreo de las aguas subterráneas es muy importante para evaluar sus efectos frente a los deslizamientos. La ilustración de las perforaciones en la Figura 9 es un borrador de propuesta. El movimiento debería detectarse a pesar de ser mínimo debido a que la ladera se halla en una etapa precursora de deslizamiento (Sassa et al., 2005). La identificación de la superficie de deslizamiento y los efectos de las aguas subterráneas (presión de poros de agua) activando deslizamientos (bandas de cizalla) permiten el plan de drenaje efectivo de las aguas subterráneas. La prevención del pie de deslizamiento así como la reducción de la erosión del río son también medidas efectivas para prevenir los deslizamientos retrogresivos (Sassa et al., 2002, 2005).

Conclusiones

Los mayores logros del grupo de investigación japonés son (Sassa et al., 2001, 2002, 2005):

1. Es probable que en el pasado hayan ocurrido deslizamientos retrogresivos y que estos aún continúen en la ladera de Machupicchu. La evolución de deslizamientos es diferente en los Bloques 1, 2 y 3; las etapas actuales de cada uno de los bloques son informativas para la evaluación de los procesos futuros de los deslizamientos.

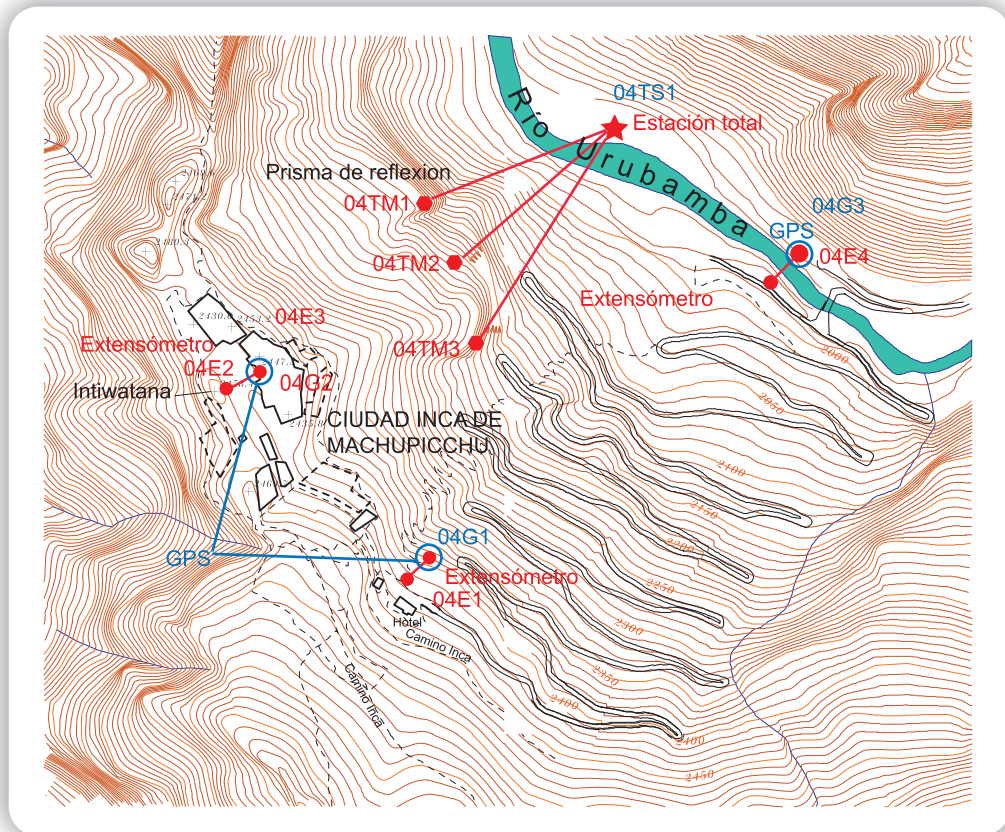


Fig. 8. Instrumentos de monitoreo instalados en Machupicchu por el equipo japonés en el 2004. Extensómetros de gran espacio (04E1, 04E2, 04E3, 04E4), receptores GPS estáticos (04G1, 04G2, 04G3), estación total (04TS1) y prismas de espejos (04TM1, 04TM2, 04TM3) fueron instalados alrededor del monumento de Machupicchu. Tomado y modificado de Sassa et al., (2005). Base topográfica: Programa Machupicchu.

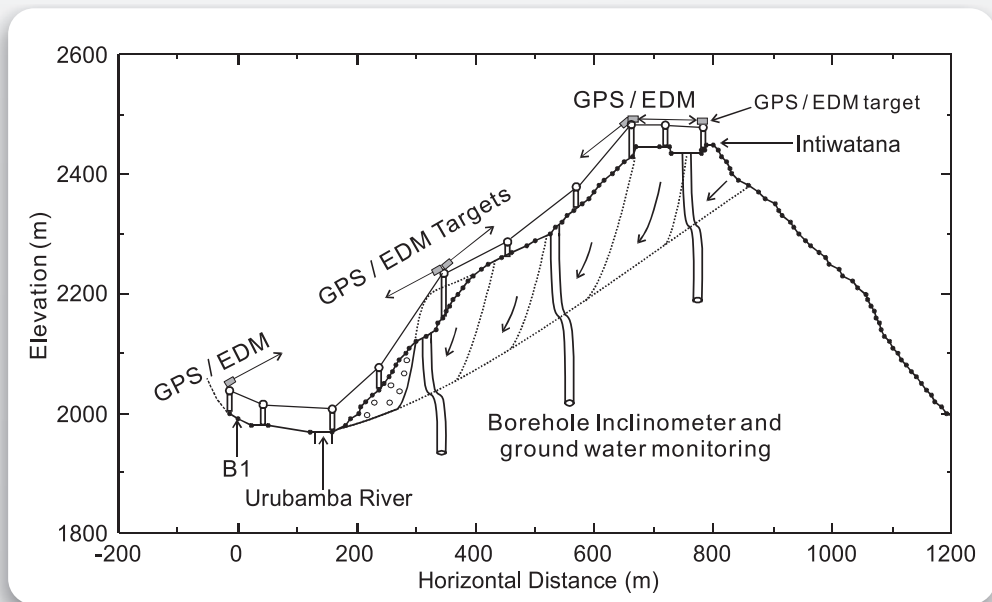


Fig. 9. Ilustración del sistema de monitoreo para precisar el entendimiento de los deslizamientos potenciales (Sassa et al., 2002).

2. Una banda de cizallamiento fue encontrada y posiblemente sea una potencial superficie de deslizamiento del Bloque 2; está buzando con pendiente hacia el frente del talud. Las aguas subterráneas probablemente fluyen hacia abajo, a lo largo de las bandas de cizalla; ellas podrían ser escasas en el techo del Bloque 2 y abundantes en la parte baja del talud. Esta podría ser la causa de la cabecera de la escarpa de deslizamiento que divide la Plaza Mayor.
3. Las aguas subterráneas a lo largo de las bandas de cizalla en el Bloque 2 y también los deslizamientos retrogresivos alrededor del Bloque 2 (es decir en el borde del Bloque 1, al pie del acantilado cerca del río Urubamba) pueden ser algunos de los principales factores causales del Bloque 2; la reducción de esos factores causales debería ser una medida correctiva efectiva para los deslizamientos.
4. Un entendimiento cabal de la situación actual y los procesos de deslizamientos no pueden lograrse sin el monitoreo confiable de la deformación de la superficie del suelo, sin perforaciones geológicas ni exploración geofísica preferente, sin el monitoreo del desplazamiento de la cizalla y los niveles de aguas subterráneas y/o presión de poros en las perforaciones. Afortunadamente, los otros grupos de investigación han realizado monitoreo de las deformaciones y exploración geofísica.
6. Son necesarias mayores investigaciones para evaluar el riesgo de deslizamientos en Machupicchu. Es posible protegerlo si se reducen las causas del deslizamiento, partiendo de los resultados de investigaciones confiables, aunque esta no es una tarea fácil.

Referencia bibliográficas

Carreño, R. y Bonnard, C. (1997). Rocks Slide at Machupicchu, Peru. *Landslide News* 10: 15-17.

Hadfield, P. (2001). Slip Sliding Away. *New Scientists*, Reed Business Information 169 (2281), 20 p.

Sassa, K. (2001). The Second Investigation Report on the Slope Instability in Inca's World Heritage in Machupicchu, Cusco, Peru. *Rapport DPRI April*, Kyoto, 24p.

Sassa, K., Fukuoka, H. y Shuzui, H. (2000). Field Investigations of the Slope Instability at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru. *Landslide News* 13: 37-41.

Sassa, K., Fukuoka, H., Kamai, T. y Shuzui, H. (2001). Landslide Risk at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru, en: *Proceedings of the UNESCO/IGCP Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage*, Tokio, p. 1-14.

Sassa, K., Fukuoka, H., Shuzui, H. y Hoshino, M. (2002). Landslide risk evaluation in the Machu Picchu World Heritage, Cusco, Peru, en: Proceedings of the UNESCO/Kyoto University International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Kyoto, p. 469-488.

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, Berlín, Heidelberg, p. 25-38.

3. MISIÓN DE LOS PAÍSES DE LA REPUBLICA CHECA Y ESLOVACA: INVESTIGACIONES GEOMORFOLÓGICAS EN MACHUPICCHU (Vilímek y Zvelebil, 2002; Vilímek et al., 2005)

Introducción

La misión de investigación checa y eslovaca se sumó a las investigaciones de Sassa et al. (2000) y la UNESCO para estudiar los grandes deslizamientos de Machupicchu (Vilímek y Zvelebil, 2002; Vilímek et al., 2005) en el marco del programa de la UNESCO/IGS, IGSP 425 y del ICL/IPL.

Las investigaciones comenzaron el 2001 con un levantamiento de campo preliminar que estableció una estrategia nueva y básica para la red de monitoreo de sitios con medidas de dilatómetros portátiles. Consideraron también que una tarea importante para el estudio del riesgo de deslizamientos consiste en estimar los ratios de desplazamientos en áreas susceptibles. De esta manera se busca comprobar la hipótesis de K. Sassa acerca de la existencia de movimientos de ladera, grandes y profundos, que originan el desplazamiento de la cumbre de la montaña. Se realizó el análisis de peligro de deslizamientos a partir de las investigaciones geomorfológicas en el área de Machupicchu. Pronto fue evidente la necesidad de investigaciones más amplias a causa de la evolución compleja del paisaje del meandro del río Urubamba, donde el sitio arqueológico está localizado, así como los movimientos en las laderas, la erosión profunda y las masas selectivas destruidas por intemperismo o sufusión (Vilímek y Zvelebil, 2002; Vilímek et al., 2005).

Vilímek et al. (2005) afirman que las comparaciones morfológicas y geológicas del meandro de Machupicchu con otras circundantes revelan que su formación es tectónica y disectada, con una "forma de montura plana" hacia la parte superior. Este meandro fue el área de construcción más apropiada para los incas y la zona en forma de silla de montar sobre la cual se ha emplazado el área urbana de Machupicchu está limitada por dos montañas: Waynapicchu (2640 msnm) y Machupicchu (3072 msnm). Los elementos estructurales predominantes están estrechamente relacionados con la intrusión magmática y el origen de las estructuras batolíticas como diaclasas profundas y fracturas de diferente orientación. El modelo tectónico de primer orden está representado por tres fallas regionales: Waynapicchu y Machupicchu con dirección NE-SO y la falla Urubamba con dirección NO-SE; en tanto las direcciones predominantes de las diaclasas locales y las fracturas son E-O y N-S, y pueden observarse sobre el sitio. El buzamiento de esas estructuras generalmente es alto, entre 50 y 60°. A lo largo de estas fallas inversas de alto ángulo se desarrolló un graben (bloque estructural subsidente) sobre el cual se construyó la ciudad inca (Wright et al., 1997).

Métodos

El levantamiento geomorfológico y la cartografía fueron llevados a cabo para obtener información de la forma, génesis y dinámica de las condiciones de modelamiento, mientras que el análisis morfoestructural fue desarrollado para comprender minuciosamente la relación entre paisaje y estructura geológica. Las mayores geoformas en el área se relacionan con la tectónica; y las formas estructurales pasivas y tectónicas activas son modificadas en diferentes grados por procesos de denudación o acumulación. La actividad neotectónica activaría los procesos exógenos, como erosión o sedimentación enorme, sin embargo, Vilímek et al. (2005) sostienen que estos fenómenos deben ser cuidadosamente probados en el contexto de un área más grande porque también podrían ser explicados sin la influencia de la actividad tectónica. Estos investigadores elaboraron un mapa estructural de fracturas con 250 medidas de rumbo y buzamiento, con especial atención a las medidas de espejos de fallas y la orientación de las estrías.

La técnica de monitoreo fue muy cuidadosa en cuanto al medio ambiente y las estructuras arqueológicas (Fig. 1) y tomó en cuenta las restricciones para instalaciones permanentes, visibles sobre las rocas de superficie. Al mismo tiempo, fue necesario un método muy preciso debido a la necesidad de comprobar la hipótesis sobre pequeñas magnitudes de deformaciones del suelo dentro del área arqueológica. Como método básico se escogió dilatómetros portátiles para los desplazamientos relativos de fisuras abiertas en los afloramientos de rocas de basamento sobre las cuales se hallan las importantes estructuras incas. En condiciones de medidas favorables, este método puede detectar movimientos irreversibles del orden de 0.1 mm por año, dentro de un mínimo de 3 años de monitoreo permanente (Zvelebil y Stemberk, 2000), y sus requerimientos de instalaciones permanentes se limitan a pares de pernos pequeños fijados opuestamente a través de la fractura medida.

Para la extensometría se eligió un tipo de extensómetro portátil que se instaló a lo largo de algunos metros de ancho (25 a 30 m) de una zona de tensión en una hipotética fractura profunda, y para ello solo fue necesario instalar permanentemente pernos extensométricos sobre el afloramiento de roca. Bajo condiciones de medidas favorables, la precisión de este método es de 0.5 mm por año, en series de tres años. La exactitud mencionada fue considerada suficiente para obtener datos confiables acerca de la deformación actual en los sitios seleccionados. Ambas medidas, del dilatómetro y extensómetro, fueron realizadas por el Instituto Nacional de Cultura (INC-Cusco).

Resultados

En la zona de estudio, las formas de erosión dominan el relieve (Fig. 2) pero con fuerte predisposición estructural en la evolución del paisaje. La erosión intensa y profunda del río Urubamba ha creado un cañón en el que no existen terrazas



Fig. 1. Sitio arqueológico de Machupicchu con la localización de las mediciones de dilatómetros: C: Cueva (midiendo el sitio C1); T: Templo Principal (T1, T2, T3); I: Intiwatana (I1, I2, I3); P: Plaza (P1); W: Waynapicchu (W1, W2, W3); A: Acllawasi (A1); M: Wairana o Mirador (M1, M2, M3, M4); R: Rodadero (R1, R2, R3); Q: Qhata (Q1). Evaluación cualitativa de la tendencia de los movimientos. Color rojo: movimientos irreversibles; color verde: sin ningún movimiento irreversible; azul claro: no puede ser interpretado aún. Tomado y modificado de Vilímek et al. (2005).

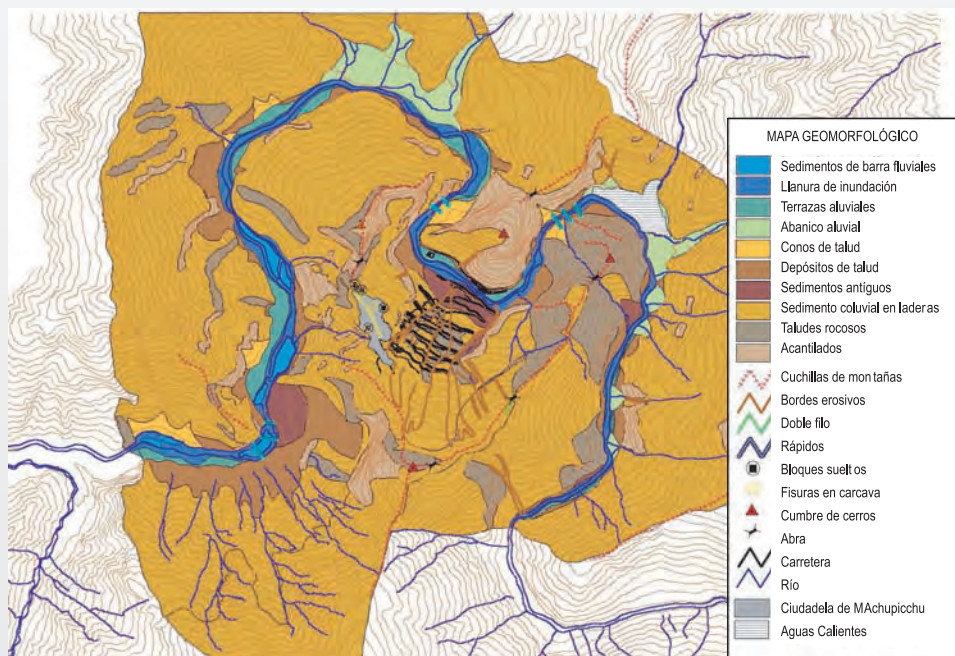


Fig. 2 Mapa geomorfológico de los alrededores del sitio arqueológico de Machupicchu (meandro del río Urubamba). El mapa está orientado hacia el norte. Tomado y modificado de Vilímek et al. (2005).

fluviales que permitan establecer etapas antiguas y cronológicas en el desarrollo del proceso de erosión del río, que sigue zonas o lineamientos tectónicos mayores como las fallas Machupicchu, Waynapicchu y Urubamba (Vilímek et al., 2005), bien registradas por las medidas estructurales (Fig. 3). 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 neotectónico en la amplia región del batolito de Machupicchu. Entre las formas de relieve dominantes están las acumulaciones de los conos de deyección o terrazas probablemente cuaternarias. Sus edades se han fijado de acuerdo con su posición relativa, no existiendo dataciones disponibles hasta el momento. Un aporte masivo de sedimentos, causados por la intensa erosión en las partes media y alta de la divisoria de aguas, forma importantes abanicos aluviales, y su destacada evolución está controlada por ocasionales flujos (e.g. Alcamayo, Mandor; Vilímek et al., 2005).

Las pendientes laterales en las divisorias de aguas locales son muy pronunciadas (60 a 70°) y continúan en desequilibrio; ellas pueden ser documentadas por los movimientos recientes de las laderas deformadas (en el sentido amplio, incluye deslizamientos, flujos de suelos, varios tipos de caída de rocas y deslizamientos de rocas); además, se han cartografiado deslizamientos de pequeña y gran escala.

Las formas de deslizamiento en ambas laderas de la cumbre de Machupicchu pueden ser clasificadas en una jerarquía de sistemas ordenados. Las formas de primer orden son remanentes de un posible movimiento a gran escala que activó toda la cumbre de Machupicchu. El deslizamiento contribuyó significativamente al desarrollo de la "forma de silla de montar" (una área plana en la parte más alta de la cumbre entre los cerros Machupicchu y Waynapicchu) y como este fue el sitio donde construyeron los incas, el deslizamiento es preínca (Vilímek et al., 2005). Dentro del límite de deslizamientos de primer orden existen formas de orden de menor jerarquía constituidas por la activación de las partes superficiales de la masa deslizante; parecen ser más jóvenes, alguna de ellas pueden ser contemporáneas con la ocupación inca y otras son más jóvenes, quizás recientes (e.g. Carreño y Bonnard, 1997).

En la pendiente este de la cumbre de Machupicchu estas formas parecen originadas por una secuencia de varios deslizamientos enormes. El origen de estos deslizamientos es soportado por una disconformidad estructural entre las áreas a lo largo de la carretera Bingham y las pendientes laterales de los cerros Machupicchu y Waynapicchu (Fig. 3); en la pendiente oeste adoptan la forma de grandes caídas de rocas (Vilímek et al., 2005).

Debido a que no completaron tres años de tomas de medidas (noviembre del 2005), los resultados del monitoreo se presentaron solo de forma cualitativa en tres categorías (Vilímek et al., 2005): sitios con movimientos no reversibles, sitios sin ningún movimiento y sitios que no pueden ser interpretados (Fig. 1). Siendo un resultado preliminar, solo puede indicar que el movimiento registrado en los sitios

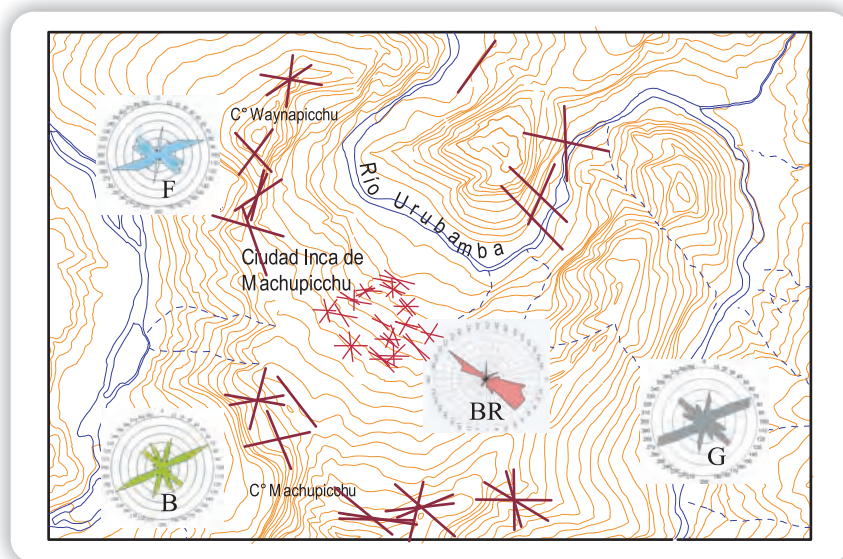


Fig. 3. Medidas estructurales en diferentes áreas de Machupicchu. Cumbre F: NE del talud, fuera de la carretera Bingham (frente de talud); BR: talud en la carretera Bingham; B: SO del talud (talud posterior); G: tectograma general resumido. Tomado y modificado de Vilímek et al. (2005).

con dilatómetros tiene magnitudes mayores a un milímetro por año. Un ejemplo del movimiento no reversible es registrado al norte del Templo Principal deformado (Fig. 4) con una medida aproximada de 2 mm. El gráfico de las medidas de los extensómetros en uno de los dos perfiles claves a lo largo de la Plaza Mayor es presentado en la Figura 5. Si se toma en cuenta el alto valor relativo del error de medida resulta muy anticipado realizar alguna interpretación rigurosa. Sin embargo, si se considera solo el control de medidas, una tendencia de cierre de 6mm en dos años es aparente (Vilímek et al., 2005).

Discusión

Aunque otros autores no han descrito movimientos tectónicos recientes en este área y hasta ahora no se han publicado datos de sismicidad presente, Vilímek et al. (2005) encontraron evidencias de movimientos tectónicos en la geomorfología local, aunque la existencia de movimientos prehistóricos a gran escala que afectaron las áreas donde está localizado el sitio arqueológico y la carretera Bingham, y que están condicionados por las fallas Machupicchu y Waynapicchu, podrían estar relacionados con actividad neotectónica. Tales fallas no tienen otro equivalente en los meandros adyacentes en el cañón de Torontoy y la erosión del río probablemente no es un factor suficientemente disparador para tal efecto. Al menos es evidente la influencia pasiva de la tectónica sobre esta evolución (Vilímek et al., 2005).

Los últimos 500 años constituyen solo una parte de la historia del desarrollo de laderas complejas de largo término en la cumbre de Machupicchu. Además de los

movimientos de ladera existen otros procesos geodinámicos que podrían dañar al sitio arqueológico y estar relacionados con la actividad de los deslizamientos (e.g. intemperismo, subsidencia, cambios en la infiltración). Por lo tanto, sin un estudio completo es imposible evaluar el riesgo geodinámico actual del sitio considerado patrimonio mundial (Vilímek et al., 2005). La primera etapa de estos estudios incluye un largo programa de monitoreo para detectar los desplazamientos en las masas de roca, además, es necesario un catálogo completo de los análisis de deformación histórica, arqueológica, geológica y de ingeniería civil, así como es recomendable un levantamiento geofísico para la identificación de posibles aberturas subterráneas, al igual que otros casos de estudio (intemperismo, resistencia de las rocas, etc.).

Conclusiones

Los principales procesos responsables de la evolución del paisaje en el área de estudio son 1. Levantamiento geotectónico que incrementa los procesos exogenéticos, 2. Intensa erosión del río en una zona disturbada altamente tectónica en sitios de cruce de grandes fallas, 3. Varios tipos de movimientos de ladera, 4. Intensa meteorización a lo largo de zonas de rotura (Vilímek y Zvelebil, 2002; Vilímek et al., 2005).

Los movimientos de ladera tienen una fuerte predisposición estructural. Las fallas principales de Machupicchu y Waynapicchu condicionan la ocurrencia de deslizamientos de edad preínca de primer orden. El buzamiento hacia el sureste de los planos de fractura en los granitos causó la diferenciación cinemática de los movimientos de pendiente, deslizándose sobre la pendiente este, en contraste con los volcamientos o *toppling* de caída de rocas en la ladera oeste. Las generaciones más jóvenes de los movimientos de ladera están representadas por superficies de movimientos, predominantemente de pequeña escala, de la más baja orden de jerarquía (Vilímek y Zvelebil, 2002; Vilímek et al., 2005).

Las interpretaciones de los resultados del monitoreo tienen carácter preliminar debido al intervalo de tiempo incompleto que se necesita. Los desplazamientos de las fracturas en los afloramientos de roca situados dentro del área arqueológica alcanzan como máximo un milímetro por año. En el nivel actual de conocimientos no se puede excluir la influencia de otros procesos involucrados, además de posibles movimientos de ladera, como deformaciones del suelo debido a la erosión del subsuelo y la subsidencia irregular sobre la masa de roca muy fracturada. Los resultados de las medidas de los extensómetros no pueden ser interpretados todavía; sin embargo, en las condiciones presentes y dentro de un corto intervalo de meses o pocos años -especialmente sin ningún sismo fuerte- es muy improbable la ocurrencia de un colapso catastrófico de la ladera (Vilímek et al., 2005).

Referencias bibliográficas

Carreño, R. y Bonnard, C. (1997). Rocks slide at Machupicchu, Peru. *Landslide News* 10: 15-17.

Sassa, K., Fukuoka, H. y Shuzui, H. (2000). Field Investigations of the Slope Instability at Inca´s World Heritage in Machu Picchu, Peru. *Landslide News* 13: 37-41.

Zvelebil, J. Y Stemberk, J. (2000). Slope Monitoring Applied to Rock Fall Management in NW Bohemia, en: *Landslides in Research, Theory and Practice*, en: *Proceeding of the 8th International Symposium on Landslides*, E. Bromhead et al. editores. Londres, p. 1659-1664.

Vilímek, V. y Zvelebil, J. (2002). Slope Instability at Machu Picchu: Ideas and Questions. *Acta Montana* 19: 75-89.

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, Berlín, Heidelberg, p. 49-54.

Wright, K.R. y Witt, G.D. y Valencia Zegarra, A. (1997). Hydrogeology and paleohydrology of Ancient Machu Picchu, *Ground Water* 35 (4): 660-666.

4. MISIÓN ITALIANA: MONITOREO, GEOMORFOLOGÍA Y ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU (Canuti et al., 2005; Casagli et al., 2005)

Introducción

En el área de Machupicchu la misión italiana ha aplicado varias metodologías de estudio de monitoreo de bajo impacto medioambiental, que buscan minimizar el uso de equipos, utilizar un tiempo óptimo y obtener datos confiables en las superficies de deformación. La red de monitoreo está basada en GPS, levantamiento de Escáner Láser Multitemporal, Interferometría Radar Terrestre (GB-SAR) e Interferometría Radar Satelital de Apertura Sintética (InSAR). Los resultados preliminares confirman parcialmente las evidencias de campo sobre la deformación de las laderas pero, en el mediano plazo, requieren un largo periodo de observaciones a partir de los procesos de deslizamiento relativamente lentos (Canuti et al., 2005).

Adicionalmente, Casagli et al. (2005) han realizado el levantamiento de campo y el análisis de algunas imágenes satelitales de muy alta resolución (VHR) al igual que un análisis multitemporal de imágenes *Quickbird* (de *Digitalglobe*) con datos pancromáticos y multiespectral. El principal propósito del análisis fue el reconocimiento de flujos de detritos usando técnicas de sensores remotos.

Marco geológico y estructural

El granito de Machupicchu está fracturado superficialmente en bloques de tamaño variable, controlado por el marco estructural local; las dimensiones de los bloques simples varían de 10^{-1} hasta cerca de 3×10^3 m³. La cobertura del suelo está compuesta principalmente por bloques individuales y materiales gruesos subordinados y originados por intemperismo químico y físico de los minerales; en tanto que porciones de las laderas exhiben acumulaciones de detritos como resultado de la actividad de los deslizamientos. La distribución del tamaño de grano de las acumulaciones de los deslizamientos está muy relacionada con los tipos de movimientos y su evolución. Los taludes y conos taludes están compuestos por sedimentos finos y gruesos, según la energía local del relieve. Los depósitos de aluviones se presentan a lo largo del río Urubamba y sus tributarios; están compuestos por sedimentos heterométricos y polimícticos que pueden estar en contacto lateral con los depósitos de talud. Los rellenos antropogénicos y las terrazas en la cima de la ciudad reflejan el trabajo de la civilización inca en el área (Fig. 1).

La deformación del granito está localizada en conjuntos orientados y regularmente espaciados (pocos decímetros a metros) en zonas de cizalla. Estas indican cinemáticas de fallas inversas y movimientos de rumbo. Los datos del desplazamiento de las fallas muestran que la deformación más tardía ocurrió como

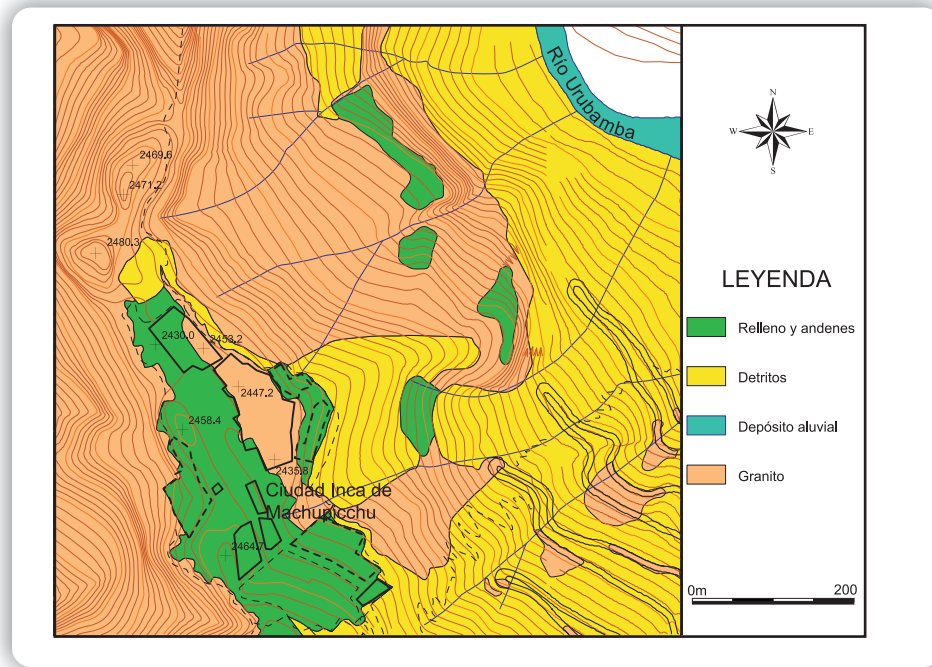


Fig. 1. Mapa geológico de la ciudad inca de Machupicchu. Tomado y modificado de Canuti et al. (2005).

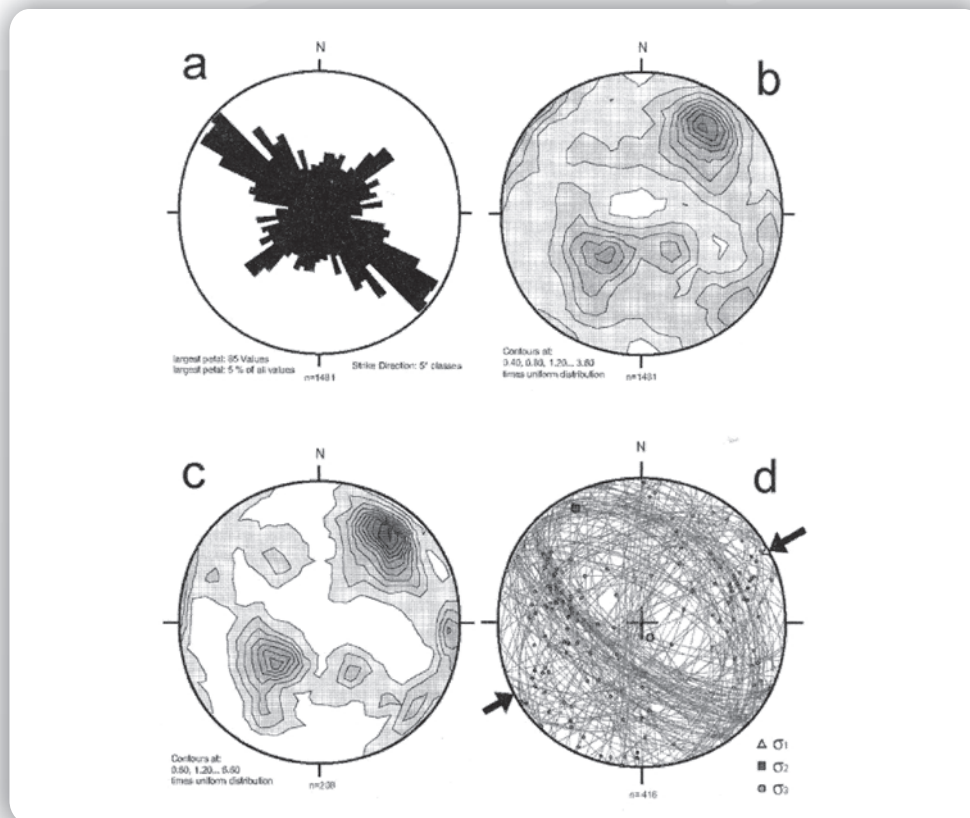


Fig. 2. Datos de orientación. a: Diagrama de rosas mostrando el rumbo de las discontinuidades planas del batolito. b: Diagrama de contorno de polos para discontinuidades planas (hemisferio inferior, proyección equiareal). c: Diagrama de contorno de polos de de planos de cizallamiento (hemisferio inferior, proyección equiareal). d: Datos de desplazamiento de fallas mostrando los ejes del esfuerzo principal calculado (Mazzoli et al., 2005; Canuti et al., 2005).

resultado de un acortamiento principal de orientación N60°E, compatible con los datos regionales cerca de la región de Cusco (Carlotto, 1998). El análisis estructural sugiere que las zonas de cizallas analizadas forman parte de una gran población de superficies espaciadas regularmente, que muy probablemente se originaron como diaclasas tempranas por enfriamiento en las rocas ígneas. La reactivación de los conjuntos diferentemente orientados de diaclasas precursoras permitió deformar el granito en desplazamientos pequeños relativos, lo que ocurrió en un número muy grande de zonas de cizalla. El esfuerzo está, por lo tanto, localizado a la escala métrica, pero distribuido a la escala del kilómetro (Mazzoli et al., 2005).

El marco estructural de los terrenos está relacionado finalmente con el principal grupo de orientaciones del sentido de buzamiento de las fracturas: a) 30°/30° en el cerro Machupicchu, b) 30°/60°, c) 225°/65°, d) 130°/90°. Los sistemas secundarios (e.g. 130°/45, 315°/30° y 310°/45°) han sido examinados en el área, con una menor relevancia como se muestra en la Figura 2 (Mazzoli et al., 2005; Canuti et al., 2005).

Marco geomecánico

Las características geomecánicas de las masas de rocas, principalmente granitos y granodioritas, han sido obtenidas mediante una investigación geomecánica de campo específico (i.e. *scanlines*-tomografía lineal para la clasificación como RMR, GSI, Q-system, medidas directas de esfuerzos compresivos uniaxiales a través del martillo de Schmidt, el ángulo de fricción (*tilttest* de inclinación) y el análisis de reportes técnicos. Finalmente, la descripción de los materiales y las condiciones generales de las masas de rocas han sido resumidas a través de la observación directa. Canuti et al. (2005) presentan diferentes tablas con las propiedades mecánicas de las rocas, pero no dan valores sobre la estabilidad de los taludes.

Geomorfología e inestabilidad de taludes

Durante los trabajos realizados por tres misiones en el 2003 y 2004, el grupo italiano realizó un levantamiento geomecánico y geomorfológico en toda el área. Las observaciones de campo fueron integradas con la interpretación de fotos aéreas y dos imágenes satelitales de muy alta resolución (*Quickbird*) del 18 de junio del 2002 y 18 de mayo del 2004. Las características morfoestructurales generales del área están principalmente determinadas por el levantamiento tectónico regional y el marco estructural, en consecuencia, las condiciones cinemáticas del tipo de deslizamientos y evolución están fuertemente condicionadas por los factores mencionados arriba (Canuti et al., 2005). Muchos fenómenos de inestabilidad de taludes han sido identificados y clasificados de acuerdo a su mecanismo, material involucrado y estado de actividad (Fig. 3). Ellos son: caída de rocas, flujos de detritos, deslizamiento de rocas y deslizamientos de detritos. El área de la ciudad inca ha sido interpretada como afectada por un movimiento de masa profundo

(Sassa et al., 2001- 2002), si esto es confirmado por los sistemas de monitoreo actuales, podría estar relacionado con una deformación de ladera gravitacional profunda (DSGSD) (Canuti et al., 2005), probablemente del tipo de pandeo compuesto: *biplanar compound bi-planar sagging* (CB), descrita por Hutchinson (1998). Un foso principal NO-SE, relacionado con una estructura tipo graben, está localizado dentro del área arqueológica y apoya esta hipótesis; otras fosas están elongadas en la dirección de buzamiento de la ladera (Canuti et al., 2005).

Al suroeste, la morfología local depende de la intersección entre los sistemas $225^{\circ}/65^{\circ}$ y $130^{\circ}/90^{\circ}$, que limita la evolución lateral. Estas condiciones cinemáticas causan el alto ángulo del deslizamiento de rocas, que muy frecuentemente puede evolucionar a caída de rocas, las que también están condicionadas por los sistemas $30^{\circ}/30^{\circ}$ y $30^{\circ}/60^{\circ}$ que originan bloques prominentes (Canuti et al., 2005). Asimismo, la ladera suroeste exhibe algunas terrazas morfológicas, regularmente espaciadas, cuyo origen está aún en investigación (i.e., erosión fluvial, *sagging*, fracturas, etc.).

La evolución morfológica, en el flanco noreste debajo de la ciudad inca, está contrastada predominantemente por sistemas $30^{\circ}/30^{\circ}$ y $30^{\circ}/60^{\circ}$ y marginalmente por el sistema $225^{\circ}/65^{\circ}$; la intersección de estas dos primeras con la cara de la ladera es compatible cinemáticamente con la ocurrencia de deslizamientos planares de rocas, mientras que la intersección de la cara de la ladera con el sistema $225^{\circ}/65^{\circ}$ es cinemáticamente compatible con caída de rocas (Canuti et al., 2005). Deslizamientos de rocas y caída de rocas puede producir bloques con dimensiones variables de 10^{-1} a 10^2 m^3 .

Los detritos producidos por los deslizamientos de rocas y caída de rocas, así como los procesos de intemperismo, se movilizan periódicamente como deslizamiento de detritos y flujo de detritos. El deslizamiento más reciente ocurrió en 1995 y afectó parte de la carretera Bingham (Carlotto y Cárdenas, 1996). Los deslizamientos de detritos y flujos de detritos están caracterizados por una estructura generalmente indiferenciada de bloques caóticos englobados en una matriz de arena gruesa. La distribución del tamaño del grano depende principalmente de la distancia de las áreas fuentes y el ángulo de la pendiente (Canuti et al., 2005).

Finalmente, en el lado noreste, un elemento geomorfológico importante consiste en una gran acumulación de detritos, localizada justo debajo de la ciudad inca y actualmente muy erosionada por los deslizamientos dormidos circundantes. La acumulación es probablemente el resultado de un deslizamiento antiguo, ahora estabilizado, aunque su característica original no es clara. De cualquier manera, el movimiento de la masa ocurrió ciertamente antes de la construcción inca (Canuti et al., 2005).

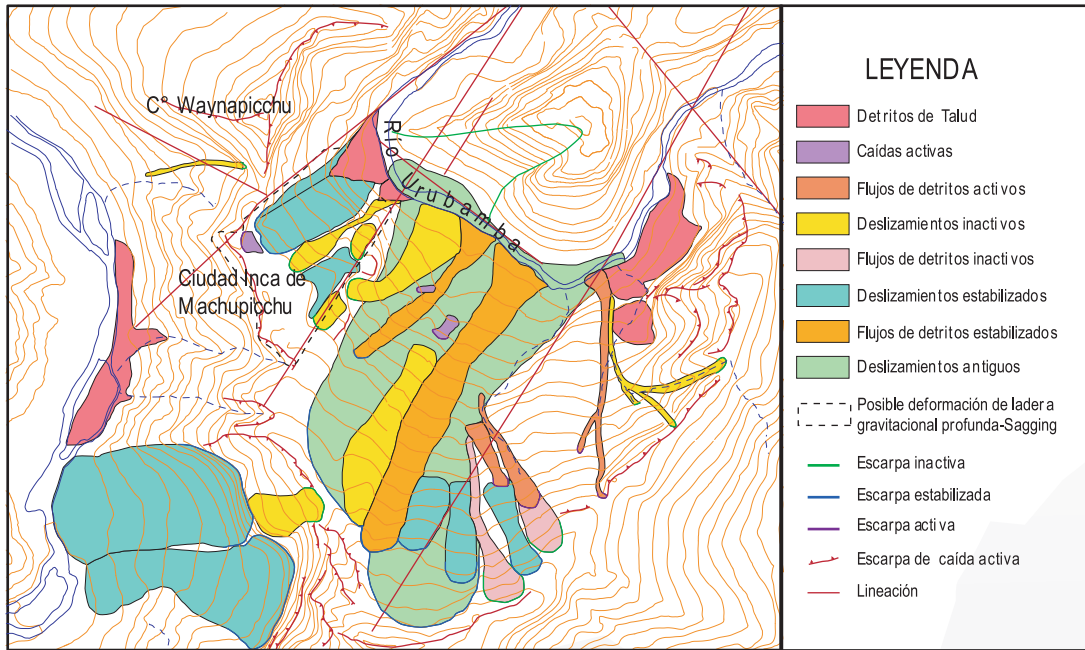


Fig. 3. Mapa geomorfológico de Machupicchu. Tomado y modificado de Canuti et al. (2005).

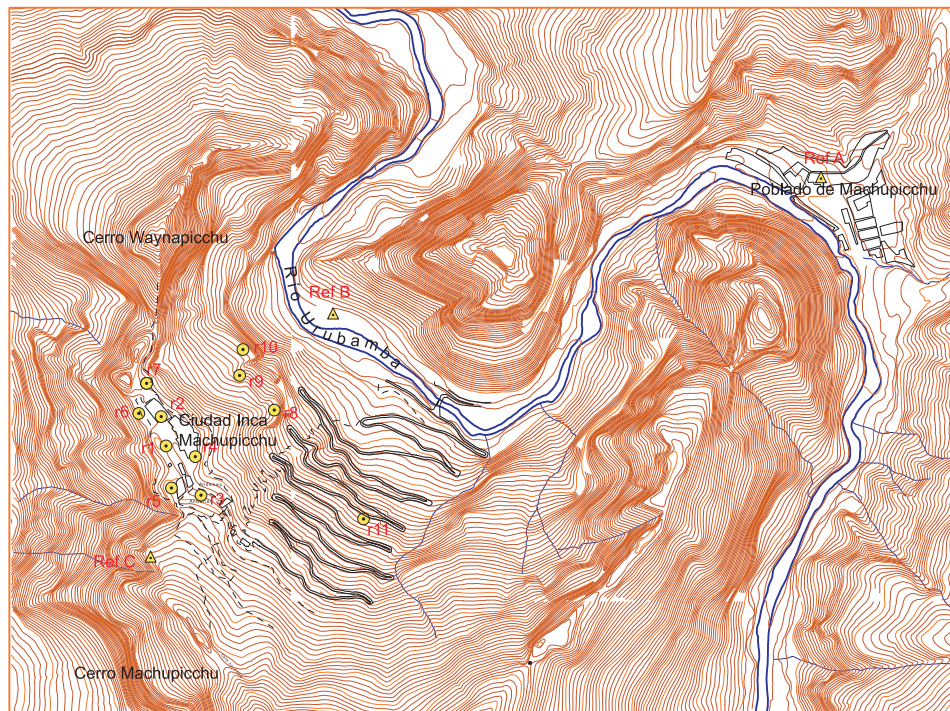


Fig. 4. Red de GPS en el área de Machupicchu. Tomado y modificado de Canuti et al. (2005), base topográfica: Programa Machupicchu.

Red de monitoreo de GPS

Una red de GPS fue instalada en septiembre del 2003 en el valle de Urubamba y en la ciudad inca (Fig. 4); esta red está constituida por tres puntos de control (a priori fijos) y once puntos itinerantes instalados en el área de la ciudad. El primer examen fue realizado en septiembre del 2004 después de un año de monitoreo. El desplazamiento en los puntos itinerantes de la ciudad inca fue calculado usando líneas de base generadas del ajuste de coordenadas geodésicas de los puntos de referencia. El resultado muestra que en los puntos 9 y 10 hubo un desplazamiento considerable e indican valores entre 0.010 y 0.012 m a lo largo del eje norte (Canuti et al., 2005).

Realización de modelo digital de terreno 3D de la ciudad inca

El levantamiento de la ciudad inca se realizó usando técnicas terrestres LIDAR para obtener modelos tridimensionales digitales del área. Esta clase de escáner láser terrestre, también equipado con una cámara métrica digital, permite generar ortofotos terrestres y relacionar el tono-color RGB del impulso láser simple. Por lo tanto, los sectores de la ciudad señalados como de particular relevancia científica y cultural, como la Tumba Real y el Templo Principal, fueron también levantados. El modelo numérico tiene gran importancia para continuar las investigaciones acerca de la posible evolución del área y evaluar las interferencias geológicas. Este conjunto de datos constituye una base numérica para generar una cartografía detallada y dedicada a realizar modelos numéricos (Canuti et al., 2005).

Monitoreo con JRC GB-SAR

En octubre del 2004 el sistema de radar LISA fue instalado en una pequeña área abierta de la vieja estación del tren en Puente Ruinas, en la margen derecha del río Urubamba, al inicio de la carretera que sube a la ciudad inca. Desde ahí es posible ver algunas construcciones de la parte baja en la entrada a la ciudad, y además toda la zona baja con vegetación, donde se cree que se podría observar un posible movimiento de deslizamiento. Según el conjunto de datos adquiridos hasta ahora, el sistema de radar no ha detectado desplazamientos significativos (Canuti et al., 2005). Considerando el porcentaje de desplazamiento muy bajo medido por otros sistemas de monitoreo, al menos un año completo de medidas es necesario para obtener datos confiables y así evaluar pequeños desplazamientos que podrían afectar a la ciudad inca.

Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR)

Los recientes avances de las capacidades en imágenes ópticas y de radar, e.g. alta resolución espacial, adquisición estereoscópica y adquisición de alta frecuencia temporal, así como el desarrollo de nuevas técnicas robustas basadas en el análisis de interferometría de imágenes radar, como la Técnica Permanente de Dispersión,

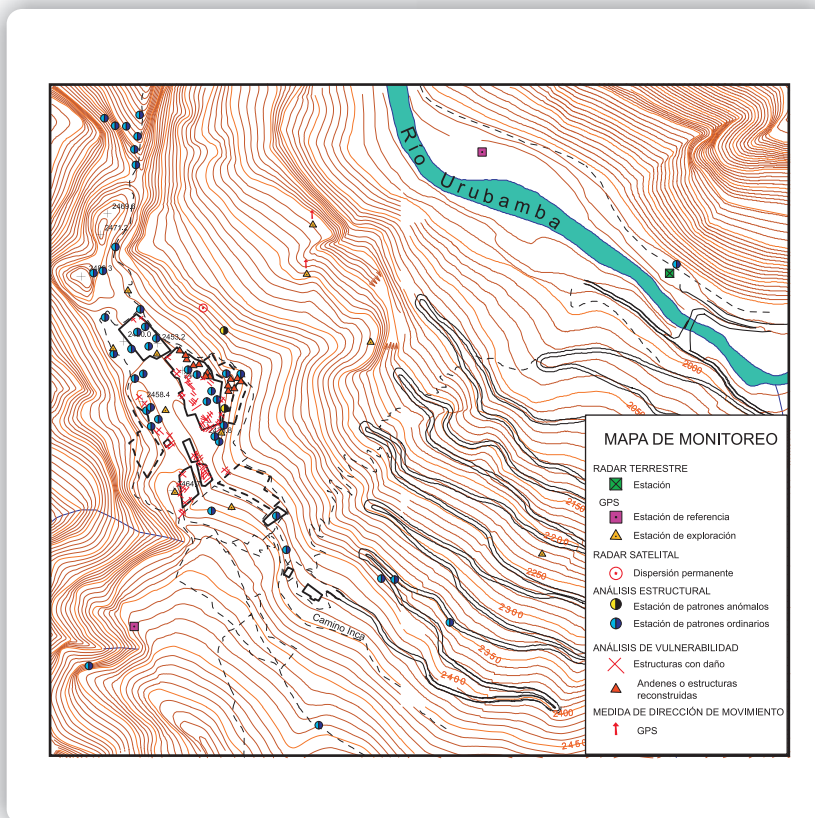


Fig. 5. Mapa integrado de evidencias de deformación y datos de monitoreo actual. Tomado y modificado de Canuti et al. (2005).

y la posibilidad de integrar esos datos con el Sistema de Información Geográfica (GIS), han incrementado bastante el potencial de los sensores remotos para las investigaciones de los deslizamientos; así, ahora se trabaja con una resolución de milímetros. La topografía muy accidentada de Machupicchu, las pendientes de las laderas y las condiciones locales del clima, convierten al examen del sitio en un desafío para la aplicación de los datos del radar satelital. Además, la falta de adquisición de datos históricos de un conjunto de ESA-ERS impidió, al menos en la primera parte del proyecto, la aplicación de la técnica POLIMI PS. De hecho, la identificación de puntos medidos y la estimación (y remoción) de los componentes atmosféricos pueden ser usualmente ejecutadas al menos en 15 a 20 escenas que serían válidas. Desafortunadamente, solo pocas escenas ERS fueron adquiridas desde 1991 para el procesado por interferometría. Sin embargo, en el sistema del proyecto INTERFRASI, todos los datos de satélites radar en el área de interés, adquiridos por ESA sensores ERS-1, ERS-2 y Envisat, han sido procesados intentando identificar zonas coherentes, donde la información de desplazamiento podría ser recubierta, aplicando un acercamiento (DInSAR). Sin embargo, el nivel de coherencia de los pares de interferometría resultó ser bajo y la información no podría recubrir el AOI (Canuti et al., 2005).

Debido a la falta de escenas ESA-ERS, se han planeado y procesado más de 30 escenas recolectadas del sensor radar canadiense RADARSAT en diferentes modos de adquisición. El uso de RADARSAT con datos "Fine-Beam", caracterizado por alta resolución espacial con respecto a datos ESA, resultó muy importante para identificar buenos objetivos para el radar. Además, el corto ciclo de repetición de RADARSAT (24 días en vez de 35) permitió la creación de una serie de tiempos de 16 datos de radar en dos diferentes modos de adquisiciones en un periodo alrededor de un año. El incremento de resolución permite la selección de una docena de "Candidatos PS" en el AOI, caracterizado por un suficiente nivel de señal to clutter ratio (SCR).

En un análisis profundo de una serie de tiempos de datos RADARSAT, los fenómenos de correlación severos se han acentuado debido probablemente a condiciones de microclima al tiempo de adquisición y la fase fuerte de artefactos debido a las heterogeneidades troposféricas. Los resultados preliminares han mostrado evidencias de movimientos diferenciales entre los objetivos radar que miden alrededor de 5 cm, pero la estimación usando el conjunto de datos disponibles ha sido considerada no confiable. Por lo tanto, se requiere una confirmación independiente con más PS (Canuti et al., 2005).

Conclusión

Las investigaciones geológicas y geomorfológicas en Machupicchu, aun siendo preliminares y debiendo ser confirmadas por una red de monitoreo continuo, corroboran la visión general de inestabilidad del talud descrita por Sassa et al. (2001, 2002), con algunos nuevos elementos y observaciones (Canuti et al., 2005). Varios fenómenos de inestabilidad de taludes han sido identificados y clasificados de acuerdo al mecanismo, los materiales implicados y el estado de la actividad. Ellos están mayormente relacionados a caída de rocas, flujos de detritos, deslizamiento de rocas, y deslizamiento de detritos. El origen de estos fenómenos está cinemáticamente controlado por la relación entre la configuración estructural, la cara del talud (caídas de roca, deslizamientos de roca y deslizamientos de detritos) y la pérdida de terrenos generada por antiguos o recientes deslizamientos que son la fuente de los flujos de detritos (Canuti et al., 2005).

En el área de la carretera, un mapeo detallado de los depósitos de detritos se ha ejecutado y conduce a una zonificación de los procesos, en los límites del antiguo deslizamiento detectado por Sassa et al. (2001). La relación de la pendiente con la ciudadela es más compleja debido al fuerte control estructural de las fracturas principales en la evolución del talud. En este caso, los deslizamientos planares de las rocas afectan principalmente el flanco noreste, mientras que las caídas de rocas son predominantes en el flanco suroeste (Canuti et al., 2005).

El análisis de los datos de monitoreo son aún preliminares y deben ser confirmados. Sin embargo, es posible integrar toda la información disponible en un mapa sintético mostrando (Canuti et al., 2005; Fig. 5):

1. La coincidencia de la deformación GPS, PS, así como una gran concentración de trabajos de restauración en el flanco noreste de la ciudad. En esta área, un gran depósito de escombros se ha acumulado sobre el acantilado y los análisis geológicos de campo han detectado algunas irregularidades en los patrones de la configuración estructural local; por otro lado, movimientos GPS hacia el norte no han sido detectados por el radar terrestre, probablemente debido al corto tiempo de observaciones con respecto al monitoreo GPS; adicionalmente, el movimiento GPS es casi paralelo a la orientación de las medidas, haciendo inefectivo el control de distancia del radar.
2. La estabilidad de la parte superior de la ciudad inca, donde muchos sensores GPS no muestran ningún desplazamiento; además, las estructuras arqueológicas parecen estar en buen estado.
3. Las continuas caídas de rocas en el lado suroeste del acantilado y en el borde de la ciudadela, donde las estructuras arqueológicas han sido dañadas por una progresiva degradación lateral; este es probablemente el área con mayores problemas de conservación. Finalmente, los datos recolectados están siendo utilizados para ofrecer los primeros modelos de la evolución del talud del sitio. Sin embargo, el análisis de los datos recolectados de monitoreo en los sistemas instalados por los equipos italianos, japoneses, checo-eslovacos, junto con los datos provenientes de canadienses y peruanos, permitirá una mejor evaluación de los mecanismos de los procesos de las laderas y los deslizamientos, llevando a una completa armonía entre la observación de los diferentes grupos de investigación involucrados.

Referencias bibliográficas

Carlotto, V. (1998). Evolution Andine et Raccourcissement au Niveau de Cusco (13-16°S) Pérou. Enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique. Tesis doctoral, Universidad de Grenoble, Francia, 158 p.

Carlotto, V. y Cárdenas, J. (1996). Evaluación geológica del derrumbe del 26-12-95 en la carretera Puente Ruinas-Machupicchu y zonas aledañas, UNSAAC, Cusco, 11 p.

Hutchinson, J.N. (1988). General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, p. 3-36.

Canuti, P., Margottini, C., Mucho, R., Casagli, N., Delmonaco, G., Ferreti, A., Lollino, G., Puglisi, C. y Tarchi, D. (2005). Preliminary Remarks on Monitoring, Geomorphological Evolution and Slope Stability of Inca Citadel of Machu Picchu (C101-1), en: Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides, Springer, Berlín, Heidelberg, p. 39-47.

Casagli, N., Fanti, R., Nocentini, M. y Righini, G. (2005). Assessing the Capabilities of VHS Satellite Data for Debris Flow Mapping in the Machu Picchu Area (C101-1), en: *Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides*. Springer, Berlín, Heidelberg, p. 61-70.

Mazzoli, S, Delmonaco, G. y Margottini, C. (2005). Role of Precursor Joints in the Contractional Deformation of the Granite Pluton, Machu Picchu Batholith, Eastern Cordillera, Peru. *Rend Soc. Geol. It*, I: 120-122.

Sassa, K., Fukuoka, H., Kamai, T. y Shuzui, H. (2001). Landslide Risk at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru, en: *Proceedings of the UNESCO/IGCP Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage*, Tokio, p. 1-14.

Sassa, K., Fukuoka, H., Shuzui, H. y Hoshino, M. (2002). Landslide Risk Evaluation in the Machu Picchu World Heritage, Cusco, Peru, en: *Proceedings of the UNESCO/Kyoto University International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage Kyoto*, p. 469-488.

5. MISIÓN PERUANA-CANADIENSE: GEOFÍSICA DE RESISTIVIDAD 2D, GEORADAR (GPR) Y ELECTROMAGNETISMO EN LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU

Walter Pari¹, Víctor Carlotto^{1,2}, Marten Douma³, Peter Bobrowsky³, Martín Oviedo², José Cárdenas² y Mel Best³

¹ INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima-Perú.

² UNSAAC, Av. de la Cultura 733, Cusco-Perú.

³ Servicio Geológico de Canadá.

Introducción

Las técnicas geofísicas proporcionan una opción rápida, eficiente, informativa y no invasora para determinar laderas inestables en casos en los que no pueden aplicarse los métodos tradicionales de evaluación del subsuelo, tales como trincheras y perforaciones. En vista de la hipótesis sobre la existencia de deslizamientos profundos, y una amenaza de colapso catastrófico en la ciudad inca de Machupicchu, era necesario realizar investigaciones geofísicas sistemáticas en el sitio con el objeto de obtener información geológica y geotécnica del subsuelo, las características de los sedimentos superficiales, la topografía del substrato rocoso, así como la presencia de fallas y planos de deslizamiento. Estas investigaciones se realizaron en el marco del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (MAP:GAC), con la asistencia del Servicio Geológico de Canadá, el INGEMMET y la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, y sus resultados contribuyen a la evaluación de los peligros y son un aporte a la conservación de la ciudad inca.

La primera fase de los trabajos geofísicos de campo consistieron en la aplicación de los métodos de Resistividad Eléctrica y Electromagnetismo EM-31/EM-34 (mayo del 2004), y en la segunda fase se aplicaron los métodos de Georadar-GPR y Resistividad 2D (junio-julio del 2005).

Método de Resistividad-Wenner 2D

Este método se caracteriza por el estudio de las variaciones de los parámetros físicos de las rocas o de los suelos y depende de factores que afectan la resistividad de los materiales, como la porosidad, agua en los poros, conductividad en los granos minerales, grado de compactación, etc. La resistividad y conductividad de los materiales terrestres se basa en la aplicación de la Ley de Ohm ($V = IR$), donde V = voltaje (Voltios), I = corriente (Amperios) y R = resistencia (Ohmios). Para este estudio se aplicó la configuración Wenner, con 48 electrodos con espaciamentos de 5 m, que ofrece mejor resolución en profundidad (50 m). Se realizaron ocho líneas en la carretera de acceso Hiram Bingham (Fig. 1) y una línea en la Plaza Mayor de la ciudad. El equipo geofísico empleado fue el Sistema Syscal Iris con 48 electrodos de potencial. El procesamiento y los resultados obtenidos se desarrollaron en base al programa de modelamiento de Resistividad en 2D (Inversión de resistividad, RES2DINV V.4).

Las interpretaciones a partir del *background*, que da valores de resistividad mayores a 3000 ohm-m, revelan que estos son típicos de rocas graníticas y corresponden a los que afloran en parte de la ciudad inca (Fig. 2). Los datos de resistividad de los ocho tramos superiores de la carretera (línea 0 a línea 7) nos indican, en color amarillo (Fig. 1), valores bajos, en comparación al *background*, entre 700 y 1200 ohm-m. Estas zonas de baja resistividad se interpretan como rocas intensamente fracturadas, con presencia de flujos de agua y coinciden con una zona de falla que atraviesa el área (Falla Machupicchu).

En la ciudad inca se realizó una sección transversal a la Plaza Mayor o Plaza Principal (Fig. 2), donde zonas de baja resistividad, en color azul, se asocian a las terrazas superiores al oeste y este, probablemente debido a suelos de mayor espesor para la agricultura. Asimismo, se observa baja resistividad en el área infrayacente a las construcciones, como una capa delgada, quizás de suelos o rellenos que agregaron los incas para hacer una buena base de construcción para los edificios. La zona de baja resistividad, al lado este de la Plaza Mayor, puede estar relacionada a las fracturas saturadas con agua. La alta resistividad mostrada en la base de la plaza es interpretada como la parte superior del substrato rocoso. En los extremos este y oeste de la sección se pueden interpretar planos de deslizamientos superficiales, que son corroborados por la cartografía geológica. Bajo la Plaza Mayor no se ven planos de falla ni de deslizamientos, como lo plantean Sassa et al. (2000, 2001, 2002, 2005).

Método Georadar de Penetración-GPR (*Ground Penetrating Radar*)

El levantamiento con georadar (Fig. 3) utilizó el Sistema Pulse EKKO 100 fabricado en Canadá y que incluye una unidad de control, un procesador y dos antenas (un transmisor y un receptor) de alta frecuencia (50, 100 y 200 Mhz) (Mucho et al., 2005; Pari et al., 2006). El procedimiento está relacionado principalmente con el método de reflexión sísmica, el cual está constituido por un transmisor (Tx) que emite una señal hacia el subsuelo, mientras que el regreso de la onda electromagnética es detectado y registrado por el receptor (Rx). El GPR funciona generalmente con una separación fija del transmisor-receptor, la adquisición continua de los datos se logra moviendo constantemente las antenas del GPR a lo largo de la sección. La información recolectada se presenta en tiempo real y de manera continua en la pantalla del computador, donde se ve como una imagen el material subyacente a lo largo de la línea de investigación. Las reflexiones ocurren donde hay un cambio en la constante dieléctrica y la conductividad del medio (Fig. 4a) y las secciones de los datos ploteados son semejantes a las secciones sísmicas con tiempo en nanosegundos en el eje vertical y la posición en el eje horizontal (Fig. 4b). La profundidad de investigación varía desde menos de un metro hasta aproximadamente 30 m.

Las líneas del Georadar-GPR muestran reflectores electromagnéticos que corresponden a patrones de frecuencia bien definidos, que indican claramente cambios litológicos causados por el coeficiente de permitividad relativa y conductividad eléctrica del medio.

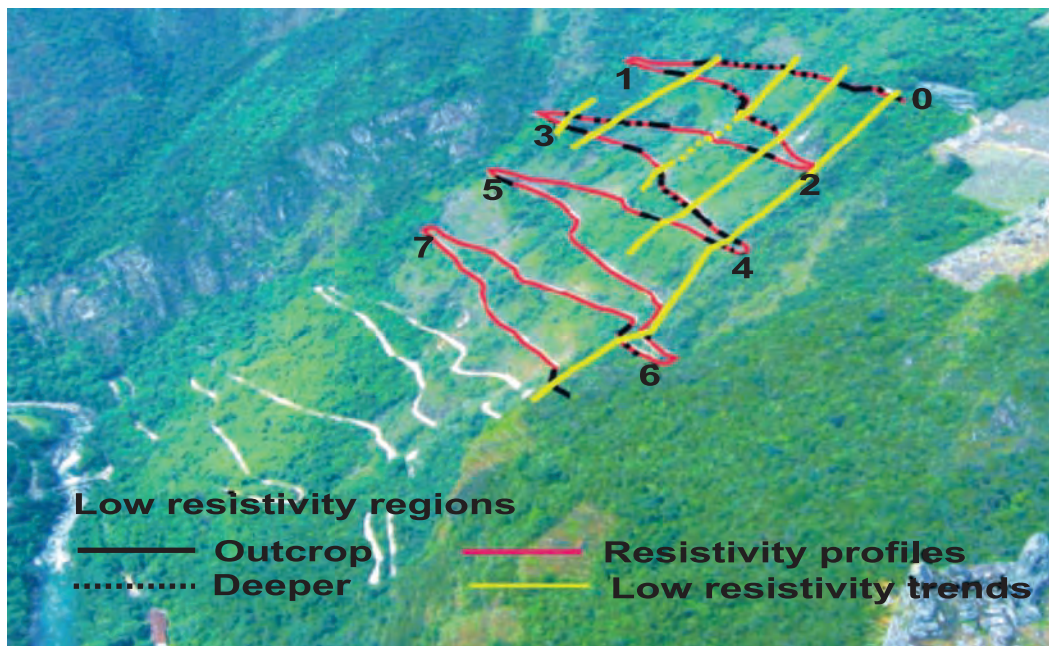


Fig. 1. Perfiles de resistividad y tendencias en la carretera Hiram Bingham (INGEMMET, inédito).

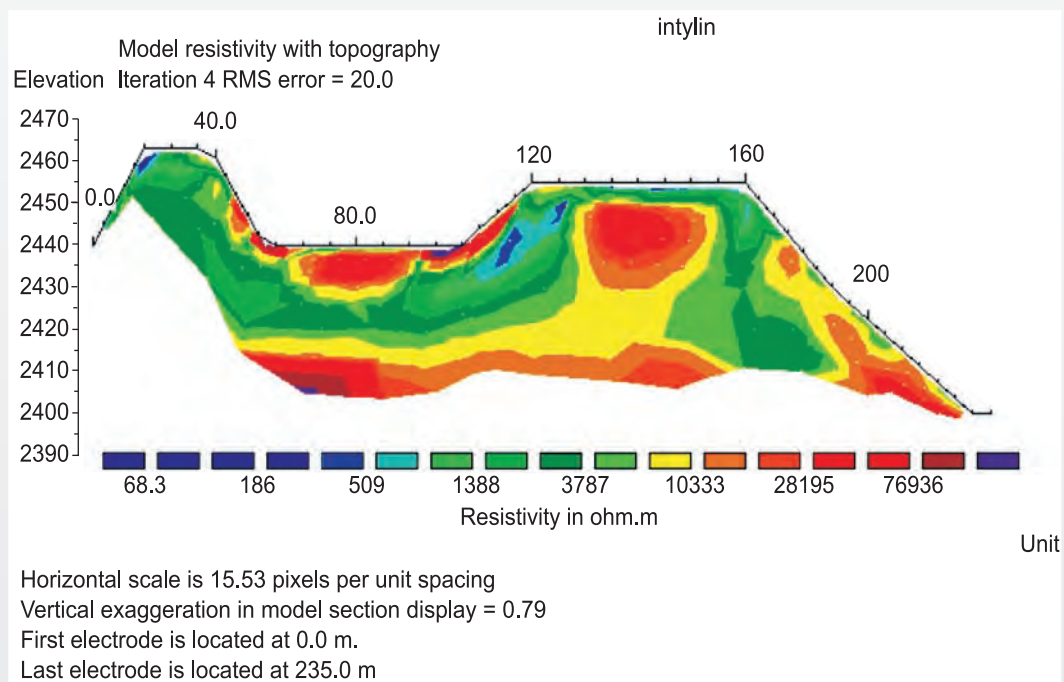


Fig. 2. Sección de resistividad que cruza la Plaza Mayor entre el Intiwatana (izquierda) y el Sector Urbano (derecha) (INGEMMET, inédito).

Uno de los blancos del GPR fue el área de la Plaza Mayor que separa el Intiwatana y el Sector Urbano de la ciudad (Fig. 5). El objetivo principal fue obtener la configuración del subsuelo y del substrato rocoso bajo la plaza, y consecuentemente calcular el espesor del relleno y la topografía del substrato. Otro de los objetivos fue determinar la presencia o la ausencia de planos de falla o deslizamiento con dirección norte-sur que, según K. Sassa debería encontrarse bajo la Plaza Mayor.

Tres facies o unidades principales fueron identificadas en las secciones de georadar en el área. La primera facies se sitúa en el techo de las secciones, entre 0.5 y 1 m (Fig. 6) y muestra una fuerte reflexión, a veces acompañada de una o dos reflexiones débiles paralelas, pero directamente encima. Las excavaciones y el resultado de las pruebas de laboratorio indican que muchos de estos suelos superiores, agrícolas o de relleno, tienen en las terrazas y plazas un espesor típico de 0.5 m (Wright et al., 1999). Estas facies son mostradas en rojo en la Figura 6 y fueron observadas en todas las secciones de georadar levantadas en terrazas y plazas.

Debajo de las facies de suelos existe una unidad de reflexiones generalmente menos organizadas e interrumpidas en lugares por pocas reflexiones subhorizontales. Esta segunda unidad, de color celeste en la Figura 6, parece extenderse hasta unos 4 m de profundidad en algunos lugares y representa el subsuelo compuesto por bloques, rocas, fragmentos y tal vez otros productos de masonería inca; es decir, puede ser el caos granítico o material de relleno inca. La falta de coherencia en muchas de las reflexiones se refleja en la dispersión de las ondas de radar y se debe a los escombros. En términos generales, las secciones muestran que la Plaza Mayor es una depresión que habría sido rellenada durante la construcción de la ciudad.

Infrayaciendo a las facies de suelos e indicando los límites de capacidad de penetración del georadar, existe una tercera unidad de color verde en la Figura 6, pobremente organizada y ocasionalmente con reflexiones hiperbólicas entrecruzadas. Este tipo de apariencia es consistente con el substrato rocoso fracturado o con una litología, en la cual la mayoría de componentes son grandes bloques. Desde el punto de vista geológico, pensamos que corresponde a una parte del caos granítico y su transición al substrato rocoso fracturado (Carlotto et al., 2006; Pari et al., 2006).

En las secciones de georadar no se observó ninguna falla principal o plano de deslizamiento a lo largo de cualquiera de las líneas de estudio, aunque hay indicadores de rocas fracturadas de menor importancia, con saturación de agua, tanto en la carretera Hiram Bingham como en la ciudad inca.

La Figura 5 muestra tres secciones georadar en la parte sur de la Plaza Mayor, donde se distingue un árbol grande al centro de una plaza menor. Esta última fue examinada atendiendo el pedido de los arqueólogos que trabajan en el sitio,



Fig. 3. Foto del sistema de sensores y software PulseEKKO 100 GPR en el Templo de las Tres Ventanas (INGEMMET, inédito).

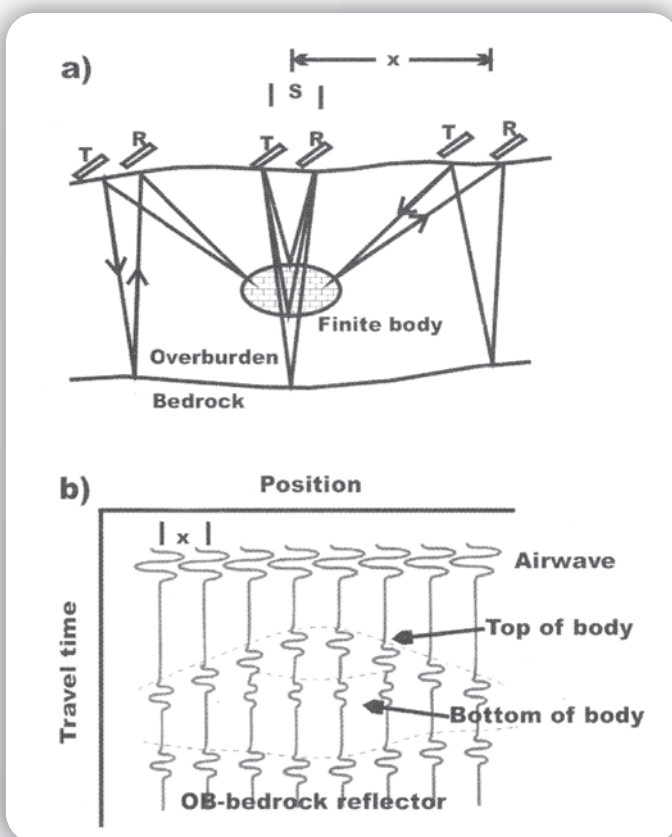


Fig. 4. Perfil de Reflexión del GPR

a) Diagrama esquemático ilustrando las reflexiones GPR. Las antenas dipolos están situadas paralelamente a la dirección de la línea levantada. S es la constante de separación entre los dos dipolos y x es la distancia incrementada del sistema GPR y movida a lo largo de la línea levantada. b) Sección del GPR para la localización geológica dada en a. El eje del tiempo es medido en nanosegundos. Nótese las reflexiones desde el techo hasta la base del cuerpo finito (INGEMMET, inédito).

quienes en 1996 exhumaron una piedra labrada de un muro enterrado a un metro de profundidad, sea que la pared fue construida como un muro de contención temporal o abandonada luego de un cambio en los planes de construcción. Las facies de georadar en esta plaza son consistentes con las facies identificadas y descritas anteriormente, sin embargo, las facies de subsuelo muestran reflexiones subhorizontales más o menos desarrolladas (Fig. 7). La reflexión de la pared parece como una hiperbólica pobremente desarrollada sobre un alto de la parte más baja de la facies bloque/roca madre descrita antes.

Electromagnetismo EM-31/EM-34

Los sistemas de electromagnetismo EM-31 y EM-34 fueron empleados en Machupicchu, ambos dominios de frecuencia miden la conductividad media del subsuelo. La profundidad de la exploración para el EM-31 es aproximadamente 4m y para el EM-34 hasta 25 m. Los datos del EM-31 fueron recogidos con un espaciamiento de la estación de 3 a 4 m y los datos EM-34 con un espaciamiento de la estación de 10 o 20 m, correspondiendo a la separación del transmisor-receptor. El punto de la medida para ambos sistemas está situado equidistante del transmisor y el receptor; se requiere escaso procesamiento de los datos y los diagramas de la sección, y los mapas de la conductividad generados de los datos proporcionan la información básica para la interpretación. Sin embargo, en Machupicchu el EM-31 no proporcionó la profundidad de la penetración requerida para identificar fracturas y los planos potenciales de falla o deslizamientos, en tanto que el EM-34 alcanzó profundidades suficientes para reconocer estos tipos de características, pero la roca granítica resistente del fondo limitó su resolución.



Fig. 5. Localización de las secciones de georadar en dos sectores de la Plaza Mayor (INGEMMET, inédito).

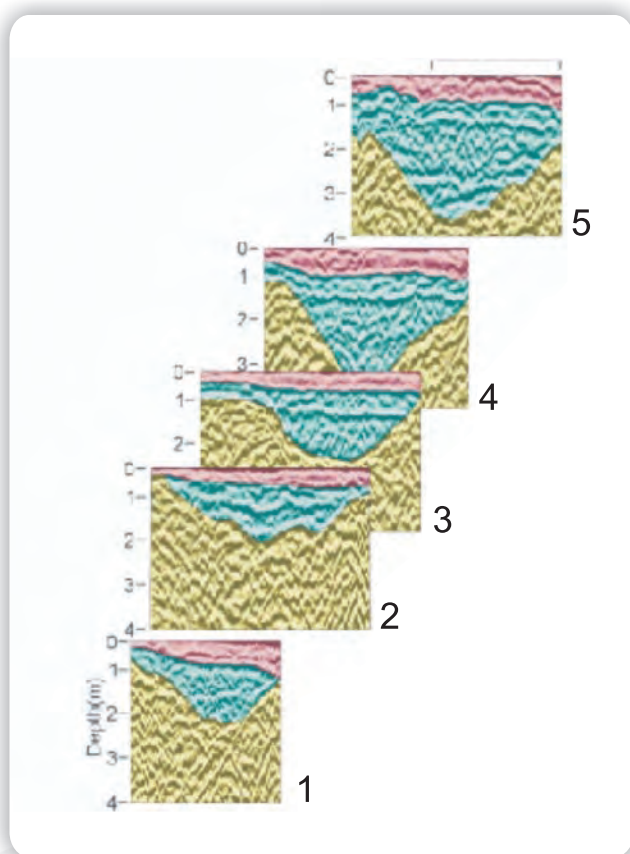


Fig. 6. Interpretación de las secciones de georadar en paralelo, cruzando la Plaza Mayor. Ubicación de las secciones en la Figura 5 (INGEMMET, inédito).

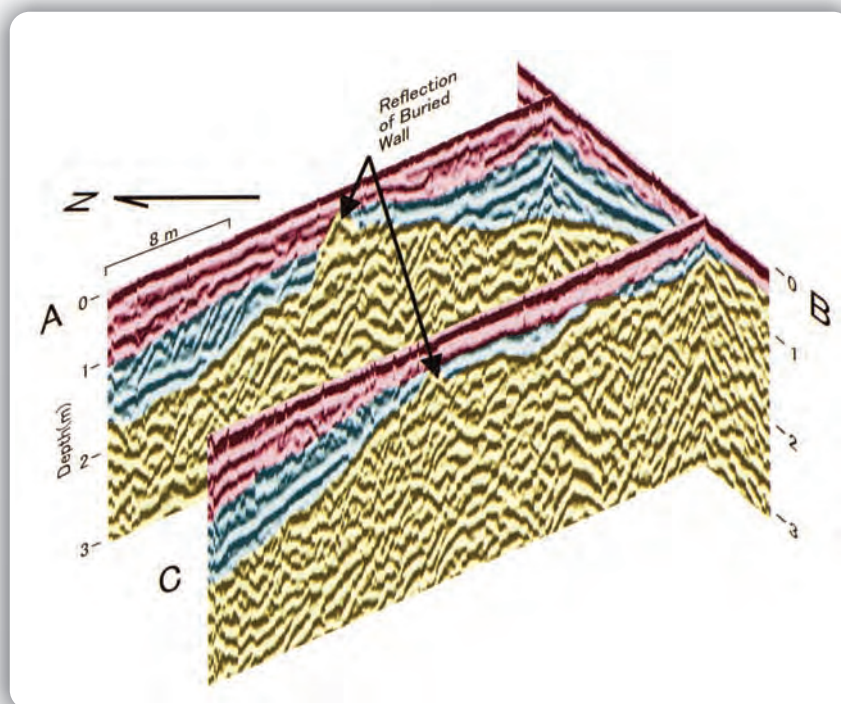


Fig. 7. Interpretación de las secciones georadar cruzando la plaza menor al sur de la Plaza Mayor. Ubicación de las secciones en la Figura 5 (INGEMMET, inédito).

Conclusiones

De los tres métodos geofísicos empleados, el electromagnético no resultó efectivo para las interpretaciones debido a que no proporcionó la profundidad de la penetración requerida o por la presencia de rocas graníticas que limitó su resolución.

El método de resistividad fue efectivo para interpretar las rocas graníticas, pues es capaz de mapear variaciones dentro de rocas muy resistivas. El georadar de penetración GPR fue también efectivo para determinar el espesor del relleno, la litología y la topografía del substrato. En las secciones de ambos métodos no se ha observado ninguna falla principal o planos de deslizamiento a lo largo de cualquiera de las líneas o secciones de estudio, aunque hay indicadores de fracturas de menor importancia saturadas con agua en la carretera Hiram Bingham y cerca de la Plaza Mayor. El relieve del substrato bajo la plaza es significativo y la parte superior parece haber sido rellena por fragmentos y escombros. Además el georadar permite interpretar bloques grandes de granito encima del substrato que corresponderían al caos granítico.

Las especulaciones por parte de la misión japonesa (Sassa et al., 2000-2005) acerca de que un plano de deslizamiento profundo de dirección norte-sur podría presentarse bajo la Plaza Mayor no están sustentadas por el radar de penetración ni por la resistividad.

Referencias bibliográficas

Carlotto, V., Cárdenas, J. y Fídel, L. (2006). Resultados del Taller Internacional de Deslizamientos en Machu Picchu, (Cusco-Perú). XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, Resúmenes Extendidos, p. 19-22.

Mucho, R., Carlotto, V., Pari, W., Oviedo, M., Douma, M., Best, M. y Bobrowsky, P (2005). The Application of Ground Penetrating Radar (GPR) at Machu Picchu, Peru (C101-1). Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management, en: Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides. Springer, Berlín, Heidelberg, p. 55-59.

Pari, W., Carlotto, V., Cárdenas, J., Oviedo, M., y Douma, M. (2006). Aplicación de la geofísica (Resistividad 2D y georadar-GPR) en la ciudadela inca de Machu Picchu: Cusco-Perú. XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, Resúmenes Extendidos, p. 50-53.

Sassa, K., Fukuoka, H. y Shuzui, H. (2000). Field Investigations of the Slope Instability at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru. *Landslide News* 13: 37-41.

Sassa, K., Fukuoka, H., Kamai, T. y Shuzui, H. (2001). Landslide Risk at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru, en: Proceedings of the UNESCO/IGCP Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Tokio, p 1-14.

Sassa, K., Fukuoka, H., Shuzui, H. y Hoshino, M. (2002). Landslide Risk Evaluation in the Machu Picchu World Heritage, Cusco, Peru, en: Proceedings of the UNESCO/Kyoto University International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Kyoto, p. 469-488.

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). Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management, en: Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides. Springer, Berlín, Heidelberg, p. 25-38.

Wright, K.R., Valencia, A. y Lorah, W. (1999). Ancient Machu Picchu Drainage Engineering. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 125(6): 360-369.

6. MISIÓN PERUANA: INVESTIGACIONES GEOMECÁNICAS Y EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD EN LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU

Lionel Fídel¹, Patricio Valderrama¹, José Cárdenas², Victor Carlotto^{1,2} y Walter Pari¹

¹ INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima-Perú.

² UNSAAC, Av de la Cultura 733, Cusco-Perú.

Introducción

Habiéndose realizado diferentes tipos de estudios geológicos y geofísicos para determinar la existencia de un deslizamiento profundo que podría desencadenar un colapso a gran escala de la ciudad inca de Machupicchu, el INGEMMET efectuó un estudio geomecánico y una evaluación de las condiciones de estabilidad de la ciudad. Para este fin, en base al mapeo geotécnico de la roca aflorante (granitos), las superficies expuestas y el talud de corte en la carretera, se evaluó una caracterización detallada del macizo rocoso desde el punto de vista de su estructura y calidad. Sobre la base de estos resultados, el área se sectorizó en zonas geomecánicas. Por otro lado, a partir de ensayos in situ, trabajos anteriores y métodos indirectos, se determinaron las propiedades físicas y los parámetros de resistencia de la roca intacta, las discontinuidades y la masa rocosa que conforman el área. Considerando toda esta información básica y una identificación previa de los modos de falla, se analizó la estabilidad de los taludes en la zona donde Sassa et al. (2001, 2002, 2005) plantean la existencia de un gran deslizamiento que destruiría esta ciudad inca.

Caracterización de la masa rocosa

A partir del mapeo geotécnico de campo, se registraron datos para la caracterización de la masa rocosa, utilizando el método directo por líneas de detalle. Se realizaron 23 estaciones y se registraron en total 3,173 datos (Fig. 1). Los parámetros de observación y medición se efectuaron de acuerdo con las normas sugeridas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), presentadas por Romana y Serón (2003), y los datos se procesaron con el programa de computo DIPS v.5.1 (1999).

Las estaciones de mediciones estructurales se agruparon teniendo en cuenta su posición y cercanía a los bloques estructurales del área y los resultados se presentan en la Figura 1, en forma de diagramas de rosetas de rumbos. En la Figura 2 se presentan los datos de orientación de las discontinuidades o fracturas en la ciudad inca, la carretera de acceso Hiram Bingham y un compósito general. Las fallas Waynapicchu y Machupicchu dividen el sector en cuatro bloques estructurales que denominaremos: Waynapicchu, ciudad, Cerro Machupicchu e Intipunku (Fig. 1); la ciudad inca se ubica sobre el bloque estructural que en forma de montura separa los cerros Machupicchu y Waynapicchu.

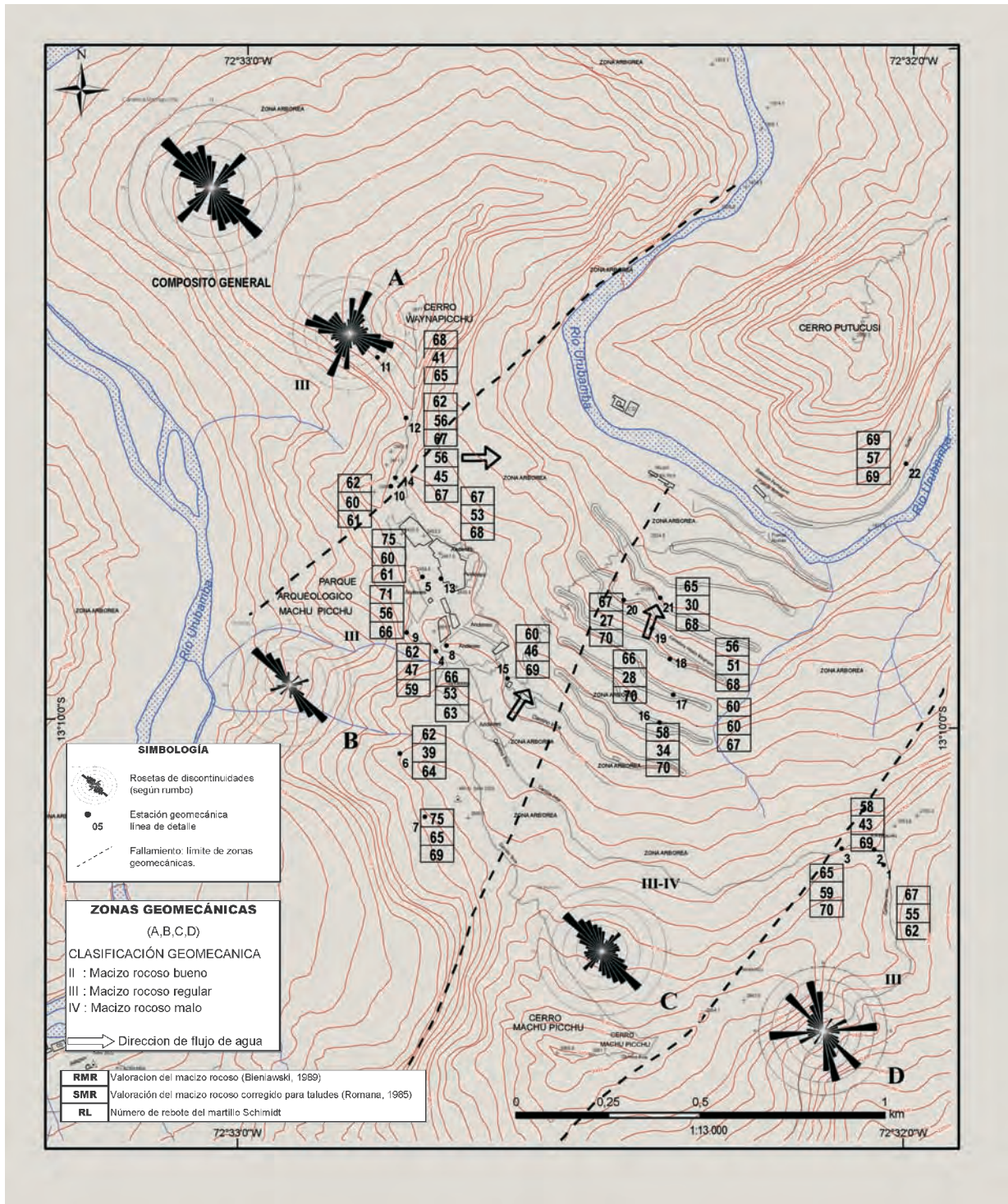


Fig 1. Mapa geomecánico de la ciudad inca de Machupicchu y alrededores.

En el área de estudio se presentan discontinuidades en cuatro familias estructurales principales: $N327^{\circ}/42^{\circ}NE$, $N134^{\circ}/61^{\circ}SO$, $N219^{\circ}/86^{\circ}NO$ y $N343^{\circ}/74^{\circ}SO$; estas coinciden con los sistemas de fallas regionales con orientaciones NO-SE. En el nivel de observación del afloramiento, las fallas son persistentes, onduladas, medianamente rugosas a rugosas rellenas con roca triturada y óxidos. En cuanto a las condiciones de las discontinuidades o fracturas, para cada caso del 100%, el 74% son persistentes, 45% onduladas, 40% planas, 51% algo rugosas y 27% rugosas. El espaciado de las fracturas varía de separadas a medianamente separadas, son abiertas superficialmente y con relleno de óxidos y sulfatos.

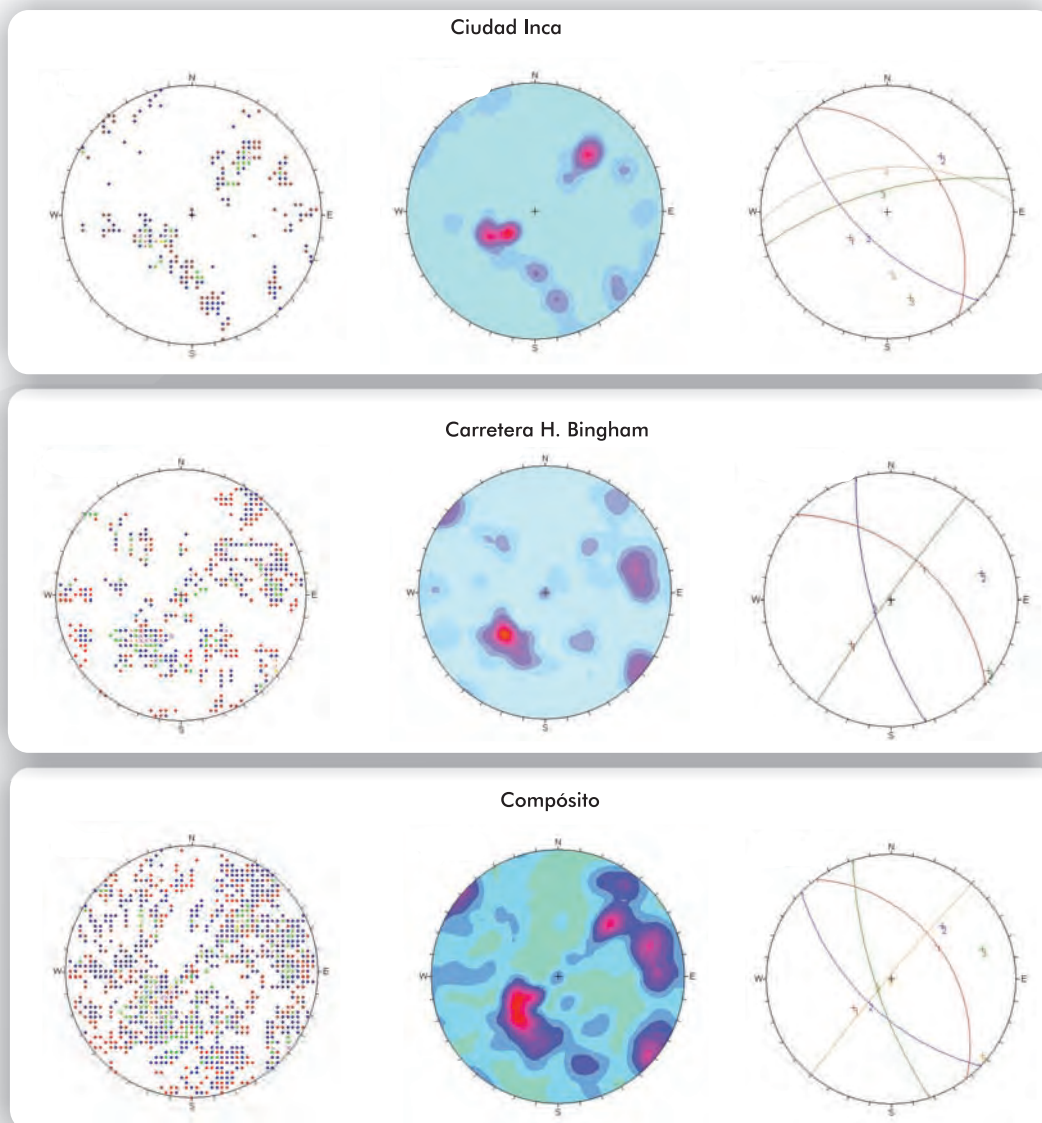


Fig 2. Resultados del análisis estructural en el área de estudio.

Hidrogeología

En la ciudad inca se han encontrado evidencias de flujos de agua subterránea que pueden ser causa de los asentamientos y hundimientos locales, así como de los deslizamientos que afectan a la carretera de acceso Hiram Bingham; estas evidencias consisten en filtraciones en los taludes rocosos de la carretera y manantiales en las cercanías del Hotel Machupicchu. La presencia de agua en las fracturas es estacional, salvo en algunos puntos de la carretera y en el sector Intipunku donde es permanente.

Clasificación geomecánica de la masa rocosa

La masa rocosa fue clasificada utilizando los criterios RMR de Bieniawski (1989) y el SMR (RMR ajustado a taludes) de Romana (1985) y Romana et al. (2001). Los valores de resistencia compresiva de la roca intacta fueron determinados con el método indirecto usando el martillo de geólogo (ISRM, 1981) y el martillo Schmidt de dureza; y el índice de calidad (RQD) fue determinado para cada estación mediante el registro lineal (Ramírez et al., 1984), teniendo como parámetro de entrada principal la frecuencia de fracturamiento por metro lineal. El RMR en el área de estudio varía entre 56 y 75, teniendo como promedio 65 (roca buena). La distribución porcentual del SMR o calidad de la masa rocosa en los sectores Ciudad, Waynapicchu e Intipunku es regular en un 100%; en el sector Camino Puente Inca el 50% es buena y 50% mala; en el sector carretera de acceso el 33% es regular y 67% mala; finalmente, en el compósito general del área de estudio, el 4% es buena, 70% es regular y 26% es mala (Fig. 3).

DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE CALIDADES DE LA MASA ROCOSA (SMR)

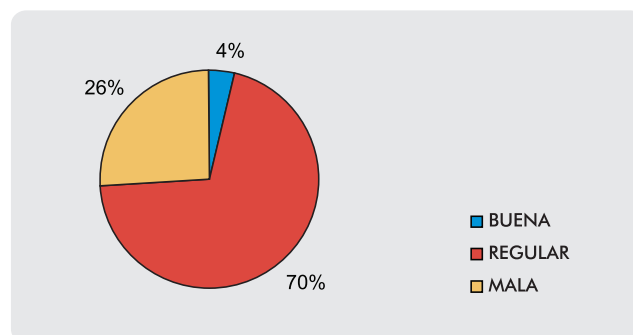


Fig. 3. Distribución porcentual de calidades de la masa rocosa SMR.

A pesar de la alta resistencia de los granitos, en algunos sectores la calidad y resistencia del macizo rocoso disminuyen debido a la presencia de agua, el intenso fracturamiento y la disposición de estos con los taludes. El Índice de Resistencia Geológica-GSI (Marinos y Hoek, 2000) varía entre 51 y 70, con un promedio de 65. En el área de estudio la roca de mala calidad (SMR) se localiza en los afloramientos y taludes de corte de la carretera de acceso a la ciudad inca, debido principalmente a la distribución de las fracturas con respecto al talud y la presencia de agua en estas. En este sector hay evidencias de ocurrencia de deslizamientos en el pasado reciente, como el ocurrido en diciembre de 1995.

Zonificación geomecánica

La presencia de las fallas Machupicchu y Waynapicchu, con orientación NE-SO y que dividen estructuralmente el área de estudio en cuatro sectores, coinciden con la zonificación geomecánica: Zona A: Waynapicchu, Zona B: Ciudad, Zona C: cerro Machupicchu y Zona D: Intipunku (Fig. 1).

Resistencia de la roca

Los valores de la resistencia compresiva uniaxial (σ_c) fueron estimados mediante ensayos in situ con el martillo de Schmidt, según las normas sugeridas por la ISRM (1981). Los valores de rebote de las rocas estimadas a partir de estos ensayos se presentan en la Figura 1. Con este método, la resistencia compresiva uniaxial (σ_c) del granito varía entre 199 a 347 MPa, con un promedio de 235 Mpa. La resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta obtenida con el martillo de geólogo varía entre 100 y 250 MPa. Desde el punto de vista de la estabilidad estructuralmente controlada, es importante conocer las características de resistencia al corte de las discontinuidades, puesto que estas constituyen superficies de debilidad de la masa rocosa y por tanto son planos potenciales de falla. Para establecer la resistencia al corte básica del granito se efectuaron cuatro ensayos con el tablero inclinable *tilt table test* siguiendo las normas sugeridas por la ISRM (1981). Los resultados para el granito obtenidos con estos ensayos nos proporcionan un ángulo de fricción (Φ°) entre 33° y 38°. Según Canuti et al. (2005), el mismo (Φ°) varía entre 36.9 y 51°, con un promedio de 35°.

En el Cuadro 1 se presenta un resumen de los parámetros de resistencia al corte según las diferentes fuentes de información, así como los valores asumidos para ejecutar los análisis de estabilidad.

Cuadro 1. Resumen de parámetros de resistencia al corte en discontinuidades (Ramírez et al., 1984)

Tipo de roca	RMR (1989)		Tilt test	Tabla (*)	Canuti et al. (2005)		Valor asumido	
	C (KPa)	Φ	Φ	Φ_b	C (KPa)	Φ	C (KPa)	Φ
Granito	300-400	35°-45°	35°	31°-35°	212-398	26°-54°	360	36°

Resistencia de la masa rocosa

Las propiedades de resistencia de la masa rocosa referidas a los parámetros de resistencia al corte fueron estimadas combinando los criterios de Bieniawski (1989), Hoek y Brown (1980, 1988), Hoek et al. (1992), Marinos y Hoek (2000) y Hoek et al. (2002), quienes utilizan los parámetros de calidad de la masa rocosa y resistencia de la roca intacta desarrollados anteriormente. En los cálculos, la constante m de la roca tiene un valor de 29 para el granito. Los estimados de los parámetros de resistencia al corte de la masa rocosa se procesaron con el programa *Rock Lab* (Rocscience Inc., 2002) dando los siguientes resultados: tipo de roca = granito; resistencia compresiva (σ_{cmr}) = 235 MPa; GSI = 60; cohesión (c) = 3.390 MPa y un ángulo de fricción (Φ°) de 46°.

Evaluación de las condiciones de estabilidad

Para la identificación de los modos de falla se evaluaron los problemas de inestabilidad potencial de los taludes mediante análisis cinemáticos con técnicas estereográficas y utilizando la información sobre las orientaciones de las discontinuidades, la geometría de los taludes y un ángulo de fricción conservador de 32°. Asimismo, se realizó el análisis cinemático con fricción de una de las estaciones de mapeo geomecánico, las zonas geomecánicas y el compósito general del área de estudio. Los resultados por zonas y compósito general se presentan en el Cuadro 2 y en la Figura 4 se muestra, a manera de ejemplo, el análisis cinemático de las zonas ciudad y cerro Machupicchu (que incluye la carretera de acceso) y del compósito general.

A continuación analizaremos los resultados de las zonas más importantes:

1. Zona B-Ciudad: en el talud general (38°NE) no hay posibilidad de falla planar con el Set 1, ya que su dirección de máxima pendiente no rompe en la cara del talud; lo mismo ocurre con las cuñas 1/3 y 1/4. El Set 2 es un plano potencial de falla al volteo (Fig. 4a).

En el talud inferior (52° NE), el Set 1 es potencialmente inestable por falla planar; las cuñas 1/3 y 1/4 son aflorantes y por lo tanto inestables localmente, y el Set 2 es un plano potencial de falla por volteo (Fig. 4a).

2. Zona C-Cerro Machupicchu: en esta zona, el talud natural está formado por restos de antiguos deslizamientos traslacionales y avalanchas de rocas. Para el análisis cinemático se ha considerado el talud natural (38° NE), generalmente estable, y el talud de corte (80° NE).

El talud de corte es potencialmente inestable debido a la influencia del fracturamiento principal (el azimuth es paralelo al talud), a las

filtraciones existentes, y la altura y el ángulo de inclinación del mismo. Esta zona es actualmente la más inestable por la presencia de fallas planares (Set 1) y por cuñas aflorantes (Sets 1/2 y 1/3). Es importante mencionar que en 1995, después de intensas precipitaciones, se produjo localmente un derrumbe en el talud de corte que afectó la carretera, interrumpiendo el acceso vehicular (Fig. 4b).

3. Compósito general: para este compósito se trabajó con la sección A-A' propuesta por Sassa et al. (2001, 2002). Los buzamientos de los taludes varían de 38°NE para el talud natural general a 52°NE para el talud general inferior. Para el talud natural general encontramos que el Set 2 es un plano potencial de falla por volteo.

Para el talud general inferior, el Set 2 es un plano potencial de falla por volteo y el Set 1 es potencialmente inestable por falla planar. Esta zona inestable puede revertirse si en el análisis se toma en cuenta un ángulo de fricción más real (ondulación/rugosidad de las planas de falla) y la cohesión del macizo rocoso (Fig. 4c).

Es importante mencionar que en los análisis no se ha considerado la cohesión del macizo rocoso, así como la ondulación/rugosidad y continuidad de las discontinuidades, por lo tanto, las inestabilidades potenciales localizadas se reducirían si se consideran estos parámetros.

Cuadro 2. Resultado del análisis cinemático en el área de la ciudad inca de Machupicchu (con fricción, zonas geomecánicas y compósito)

ZONAS GEOMECAÑICAS	ÁNGULO DE TALUD (°)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	FALLA PLANAR CON	POSIBILIDADES DE VUELCO O FORMACIÓN DE GRIETAS DE TRACCIÓN	FORMACIÓN DE CUÑAS	OBSERVACIONES
ZONA A: WAYNAPICCHU	64	32				Estable
ZONA B: CIUDAD	(38/52)	32	1	2 (TS y TI)	1/3, 1/4	En TI
ZONA C: CERRO MACHUPICCHU	(38, 80)	32	1		1/2, 1/3	En TC
ZONA D: INTIPUNKU	48	32	1	3	1/2	
COMPOSITO GENERAL	(38/52)	32	1 (TI)	2 (TS y TI)		

1, 2, 3: discontinuidades en orden de importancia; 1/2: cuña con los set (familias) 1 y 2; (TN, TC): TN = talud natural, TC = talud de corte; (TS/TI): TS = talud superior, TI = talud inferior.

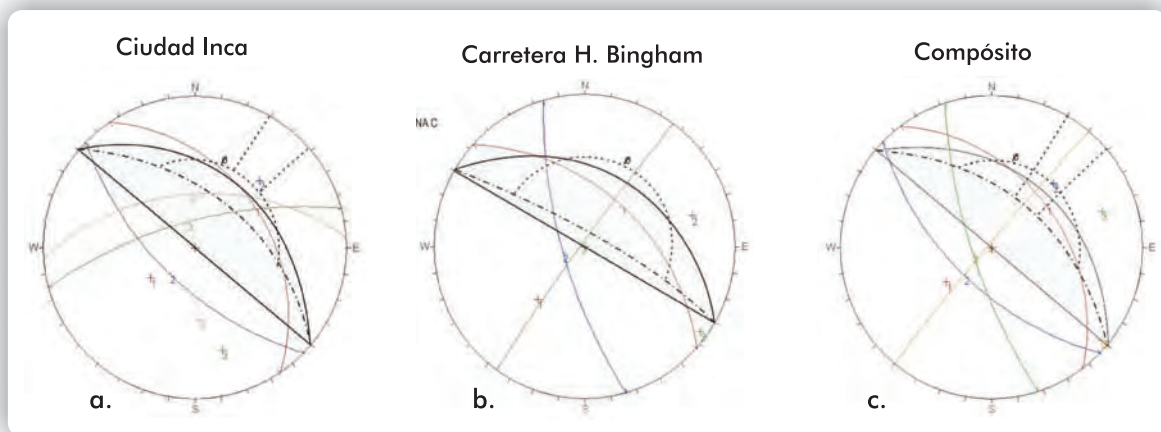


Fig. 4. Análisis cinemático con fricción (32°), (a) Zona B, (b) Zona C y (c) Compósito general.

Selección y utilización de los métodos de cálculo

Si consideramos la influencia de la calidad de la masa rocosa, la falla de los taludes estará regida por rocas de menor calidad. En el mapeo geomecánico realizado, la calidad de la masa rocosa (RMR) es mayor de 55 (roca regular a buena). En estas condiciones, el modo de falla principal se debe al debilitamiento estructuralmente controlado (arreglo estructural), como los que se observan en la carretera de acceso a la ciudad inca y en Intipunku. Las observaciones de campo muestran estos modos de falla en los taludes de corte e inestabilidades locales.

Para el análisis de estabilidad del talud noreste de la ciudad inca de Machupicchu se ha tomado la sección A-A' propuesta por Sassa et al. (2001, 2002). En esta sección la altura del talud (450 m) y las características geomecánicas de las discontinuidades (persistencia, ondulación, rugosidad, etc.) son determinantes para elegir el método de cálculo y los valores de los datos de entrada. A partir de los resultados obtenidos, podemos asegurar la existencia de un debilitamiento estructuralmente controlado que también compromete a un porcentaje de la masa rocosa. Por lo tanto, de producirse una falla, esta comprometería a un 20% de la masa rocosa y un 80% sería a través de las discontinuidades.

Dadas las condiciones descritas, se ha adoptado el uso del programa de cómputo SLIDE v 5.0, y el análisis se basa en la suposición de un deslizamiento profundo no circular cuyo bloque está definido por la intersección de dos discontinuidades (sets resultantes del compósito general) y la cara del talud, que se encuentran sujetas a carga gravitacional, presencia de agua subterránea (en el plano de falla) y cargas sísmicas pseudoestáticas.

Por otra parte, el área de Machupicchu se localiza en la Zona de Sismicidad Intermedia, en donde se producirá una aceleración máxima de 0.32 g con una

probabilidad de 0.006%, siendo el periodo medio de retorno de sismos de 500 años. Para este caso consideramos una aceleración efectiva de 0,21 g, teniendo en cuenta el periodo predominante del suelo.

Análisis de estabilidad

Los análisis fueron orientados a verificar la estabilidad del talud noreste del área de estudio (N310°/38° y 52°NE), que estaría comprometido a deslizarse en un futuro muy próximo (Sassa et al., 2001, 2002).

Para evaluar el problema de inestabilidad fue necesario realizar varios análisis tomando como base los resultados del análisis cinemático en la ciudad y el compósito general, que comprendieron los siguientes casos: 1) estabilidad del talud en condiciones secas y estáticas; 2) estabilidad del talud en condiciones secas y seudoestáticas; 3) situación actual de la estabilidad del talud en condiciones drenadas y estáticas, y 4) situación de la estabilidad del talud en condiciones drenadas y seudoestáticas.

Evaluación de resultados

Los cálculos de estabilidad del talud noreste de la ciudad inca de Machupicchu se analizaron con parámetros de cálculo que incluyen la cohesión, el ángulo de fricción, la sismicidad y la presencia de agua en la falla, en condiciones extremas, condiciones estructurales adversas con un 80% de ruptura por las discontinuidades, con agua en la superficie de falla y aceleraciones sísmicas máximas en 500 años.

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se muestra que el talud noreste de la ciudad inca se considera estable en los cuatro casos presentados, ya que los factores de seguridad en todos ellos están por encima de 1 (Cuadro 3). Los valores menores de 1 indicarían condiciones de inestabilidad.

Cuadro 3. Factores de seguridad del talud noreste de la ciudad inca de Machupicchu

Condiciones	Sector	Factor de seguridad	
		Estático	Seudo estático
Secas	Talud NE	1.438	1.03
Drenadas	Talud NE	1.437	1.029

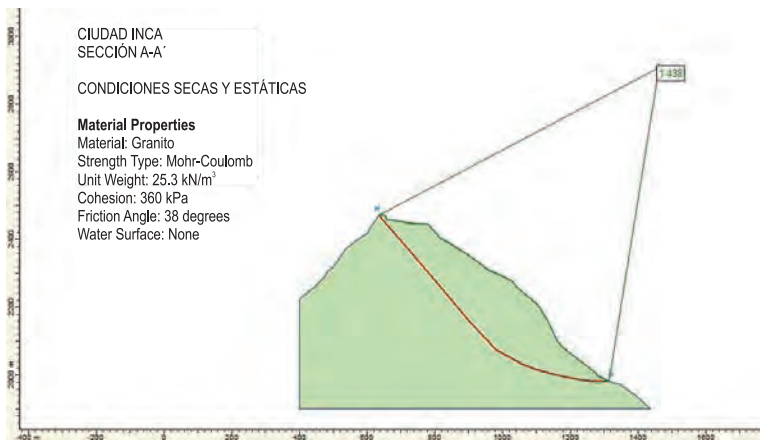


Fig. 5. Análisis de estabilidad en condiciones secas-estáticas.

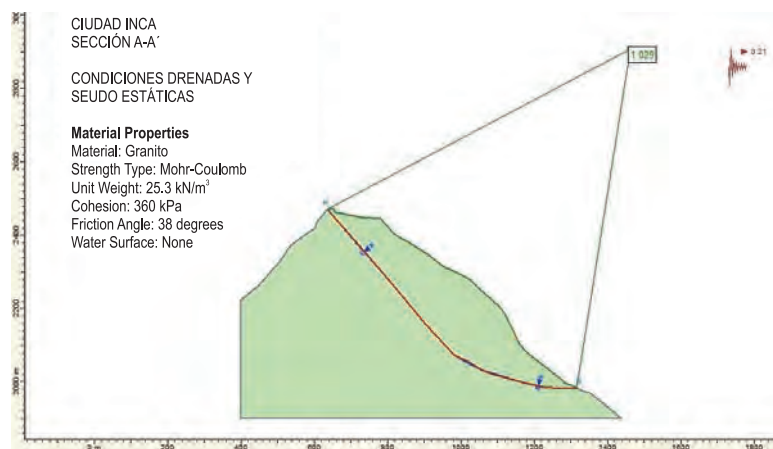


Fig. 6. Análisis de estabilidad en condiciones secas-seudoestáticas.

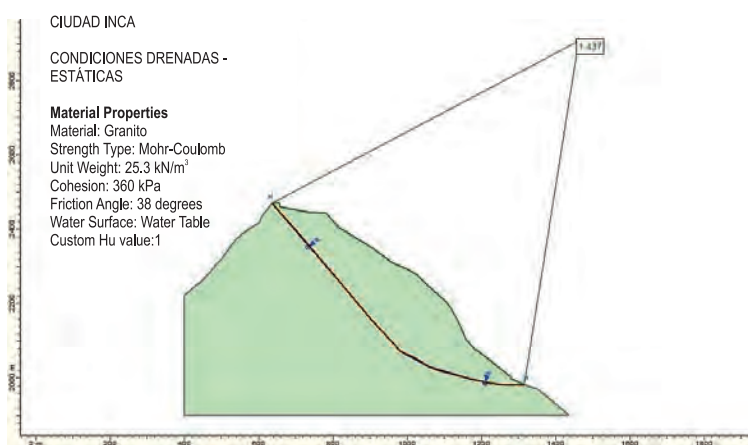


Fig. 7. Análisis de estabilidad en condiciones drenadas-estáticas.

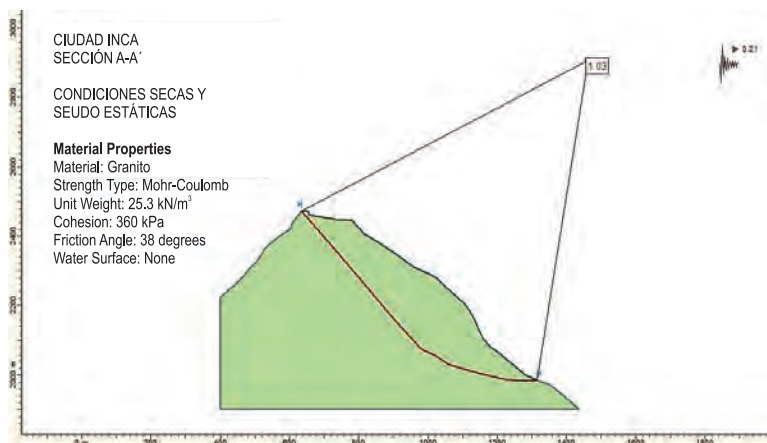


Fig 8. Análisis de estabilidad en condiciones drenadas pseudoestáticas

Conclusiones

Los resultados de los análisis de estabilidad, a partir de parámetros de cálculo como cohesión, ángulo de fricción, sismicidad y presencia de agua en la falla, han demostrado que la ciudad inca de Machupicchu es estable en condiciones extremas, tales como estructurales adversas, presencia de agua en la superficie de falla y aceleraciones sísmicas máximas en 500 años. En consecuencia, la posible falla propuesta por Sassa et al. (2001, 2002, 2005) no se desarrolla bajo las condiciones extremas calculadas, lo que corrobora los resultados geológicos y geofísicos propuestos por los diferentes grupos de investigación y, particularmente, la misión peruano-canadiense.

Referencias bibliográficas

- Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, Nueva York, 251 p.
- Canuti, P., Margottini, C., Mucho, R., Casagli, N., Delmonaco, G., Ferreti, A., Lollino, G., Puglisi, C. y Tarchi, D. (2005). Preliminary Remarks on Monitoring, Geomorphological Evolution and Slope Stability of Inca Citadel of Machu Picchu (C101-1), en: Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides, Springer, Berlín, Heidelberg, p. 39-47.
- Hoek, E. y Brown, E.T. (1980). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. Journal of Geotechnical Engineering Division 106 (9): 1013-1035.
- Hoek, E. y Brown, E.T. (1988). The Hoek-Brown Failure Criterion, a 1988 Update, en: Rock Engineering for Underground Excavations, Pro. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (Curran J.C. editor), Toronto, Dept. Civil Engineering, Universidad de Toronto, p. 31-38.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. y Corkum B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion 2002 edition, Bawden HRW, Curran J.C., Telsenicki M., Editores en: Proceedings of the North American Rockmechanics Society (NARMS-T AC 2002). Mining Innovation and Technology, Toronto p. 267-273.

Hoeck, E., Word, D. y Shah, S. (1992). A modified Hoek-Brown Criterion for Jointed Rock Masses. Proc Rock Characterization, Sump. Int. Soc. Rock Mech. Eurock '92, Hudson J.A., Londres, Brit. Geotech. Soc., 209-214.

ISRM (1978). Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Geomech Abstr. 15, p. 319-368.

Marinos, P. y Hoek, E. (2000). GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation, en: Proceedings of the GeoEng2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Technomic Publishers, Lancaster, p. 1422-1446.

Ramírez Oyanguren, P., De la Cuadra, E. e Irizar, L. (1984). Mecánica de rocas aplicada a la minería. Madrid IGME, 362 p.

Romana, M. (1985). New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. Proc. Int. Symp. Rock Mech. Excav. Min. Civ. Works, ISRM, Mexico D.F., p. 59-68.

Romana, M. y Seron, J. (2003). Formatos normalizados para la toma de datos de campo a usar en las clasificaciones geomecánicas RMR, Q y SMR. Universidad Politécnica de Valencia. Jornadas Hispanoamericanas sobre obras subterráneas. Madrid, 15-16 setiembre 2003, 10 p.

Romana, M., Serón, J.B. y Montalar, E. (2001). La clasificación geomecánica SMR. Aplicación experiencias y validación. V Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables. Madrid, p. 393-404.

Sassa, K., Fukuoka, H., Kamai, T. y Shuzui, H. (2001). Landslide Risk at Inca's World Heritage in Machu Picchu, Peru, en: Proceedings of the UNESCO/IGCP Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Tokio, p. 1-14.

Sassa, K., Fukuoka, H., Shuzui, H. y Hoshino, M. (2002). Landslide Risk Evaluation in the Machu Picchu World Heritage, Cusco, Peru, en: Proceedings of the UNESCO/Kyoto University International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Kyoto, p. 469-488.

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). Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management, en: Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides. Springer, Berlín, Heidelberg, p. 25-38.

7. RESULTADOS DEL TALLER INTERNACIONAL DE DESLIZAMIENTOS EN MACHUPICCHU (CUSCO-PERU)

Introducción

Los días 12 y 13 de septiembre del 2005 se realizó en el poblado de Machupicchu (Aguas Calientes) el Taller Internacional sobre Deslizamientos en Machu Picchu-Perú, organizado por el Consorcio Internacional de Deslizamientos (ICL), el Instituto Nacional de Cultura (INC), el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). En este taller se presentaron los resultados de las diferentes misiones de investigación (japonesa, peruano-canadiense, italiana, checa y eslovaca).

La organización del evento estuvo a cargo del Instituto de Investigaciones en Prevención de Desastres de la Universidad de Kioto, Japón (DPRI/KU) y fue presidido por Kyoji Sassa (DPRI/KU), Víctor Benavides (en representación del Viceministro de Minas) y Edwin Benavente del INC. La secretaría general fue compartida por Hiroshi Fukuoka (DPRI/KU) y Lionel Fidel (INGEMMET). Los miembros integrantes del comité organizador fueron Paolo Canuti, Peter Bobrowsky, Claudio Margottini, Nicola Casagli, Giuseppe Delmonaco, Vit Vilimek, Jan Vicko, Gonghui Wang, Victor Carlotto, José Cárdenas y Fernando Astete.

Durante el taller se confrontó la posición de la misión japonesa, liderada por el profesor K. Sassa, con los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas por las misiones italiana, checa-eslovaca y la peruana-canadiense, esta última liderada por el INGEMMET, con la participación de la UNSAAC y el Programa Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA:GCA), a través del Servicio Geológico de Canadá.

Las presentaciones de los resultados de investigación estuvieron a cargo de Víctor Carlotto y Walter Pari por Perú, Kyoji Sassa por Japón, Claudio Margottini por Italia y Vit Vilimek por la República Checa y Eslovaquia; participaron también Carlos Ramírez y Alfredo Mormontoy por el INC-Cusco.



Organizadores y expositores en el Taller Internacional de Deslizamientos en Machupicchu, septiembre del 2005.

Resultados

En las páginas siguientes se presentan los resultados de las diferentes misiones científicas, tal como fueron ofrecidas en el taller, en español y en inglés.

PROPUESTA DEL INGEMMET-PMA:GCA-UNSAAC

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET) en base a los resultados de la investigaciones realizadas dentro del Proyecto Multinacional Andino: PMA-GCA con soporte del Servicio Geológico de Canadá, y además, con la participación de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), concluyen que no hay evidencias geológicas ni geofísicas de un deslizamiento profundo y de grandes dimensiones que pueda dañar o destruir la ciudadela Inca de Machu Picchu. Los fenómenos existentes son superficiales y afectan las construcciones incas, por lo que proponemos que las investigaciones futuras sean priorizadas y orientadas en la protección y conservación de la ciudadela y otros sitios culturales del Santuario Histórico de Machupicchu.

CONCLUSION DE LOS GRUPOS CHECOS Y ESLOVACOS

Movimientos prehistóricos de pendientes a gran escala de un tipo desconocido y cinemático (no hay datación disponible) son probables.

Mediciones extensométricas que cruzan la plaza no confirmaron la actividad reciente de movimientos en pendientes a gran escala.

Deformaciones en los afloramientos rocosos son principalmente de significado local. El índice monitoreado de desplazamiento da la capacidad de cuantificar recientes procesos (asentamientos diferenciales, deslizamientos superficiales, erosiones, etc.), los cuales son responsables de la deformación de algunas estructuras arqueológicas.

Colapso a gran escala del sitio arqueológico es altamente improbable en condiciones medio ambientales actuales.

Es altamente apreciable un monitoreo continuo para clarificar los resultados finales contribuyendo a un plan maestro de protección del sitio.

El enfoque que presentamos es solamente una parte de los resultados metodológicamente multicomplejos (geomorfología, hidrogeología, ingeniería geológica) la cual debería proceder continuamente en estrecha cooperación con entidades y personal peruanos.

MISIÓN CIENTÍFICA ITALIANA

La Misión Científica Italiana en el área de Machu Picchu apuntó principalmente a proveer tecnologías nuevas y emergentes para el monitoreo de la inestabilidad de la pendiente (interferometría de radar satelital, interferometría round based, Sistema de Posicionamiento Global GPS, escáner láser, imágenes ópticas satelitales).

La información colectada hasta la fecha y la medición en el campo muestran la presencia de movimientos de masa, caracterizados por diferentes tipologías, actividades y frecuencias, en toda el área investigada. Estos deslizamientos son substantivamente superficiales no conformando al momento, la hipótesis de un grande y profundo movimiento de masas que involucre a toda la ciudadela.

El monitoreo y la recolección de datos todavía están en progreso y su implementación en un periodo próximo clarificará mejor la evolución de las pendientes.

EQUIPO JAPONÉS DE INVESTIGACIÓN EN DESLIZAMIENTOS

1. El Bloque n° 1 está activo actualmente, basado en el monitoreo de deslizamientos.
2. Son necesarios trabajos posteriores, investigación de campo y monitoreos amplios para evaluar riesgos de deslizamientos en el Bloque n° 2. Identificación de etapas precursoras de deslizamientos ubicados en lo profundo, son actualmente uno de las mas importantes tópicos en el campo de la ciencia de deslizamientos.

PROPUESTAS POR PARTE DEL INRENA

Habiendo conocido algunos resultados de las investigaciones realizadas por el ICL, es importante que estos mismos tengan continuación ya que requieren un mayor tiempo de investigación de cada una de ellas con la finalidad de llegar a una conclusión bastante acertada, con respecto a los deslizamientos, esto en prevención de acciones futuras y asegurar la estabilidad de la ciudad Inca de Machupicchu y sus alrededores, así mismo ampliar las investigaciones al sector de Aguas Calientes, Aobamba, Cedrobamba, Mandor, siendo estas microcuencas que han mostrado actividad geodinámica estos últimos años.

Garantizar el financiamiento de estos futuros estudios por parte de los conformantes del ICL, encabezados por el Dr. Kyoji Sassa.

Asegurar la transferencia de tecnología a la contraparte peruana.

Aguas Calientes, 13 de septiembre del 2005

PROPOSAL OF INGEMMET-PMA: GCA-UNSAAC

On the basis of the results of the investigations made by the Multinational Andean Project: PMA-GCA with the support of the Geological Service of Canada, as well as with the participation the National University of San Antonio Abad of Cusco (UNSAAC), the Geological Institute of Mining and Metallurgy of Peru (INGEMMET) concludes that there is neither geological nor geophysical evidence for a profound landslide of large dimensions that could damage or destroy the Incan citadel of Machu Picchu. The existing phenomena are superficial and affect the Incan constructions, so we propose that future investigations are prioritized and oriented towards the protection and conservation of the citadel and other cultural sites in the Historic Sanctuary of Machu Picchu.

All of the foreign missions should count on the participation of Peruvian professionals from the representative institutions, like UNSAAC, INGEMMET, INC, INRENA, etc, through formal agreements. These professionals will receive the transferred knowledge and new technology. The Peruvian institutions and their professionals for their part will offer the local available information and knowledge.

CONCLUSION OF CZECH AND SLOVAK GROUPS TO THE LANDSLIDES HAZARD RISK ASSESSMENT OF MACHU PICCHU HERITAGE SITE

Large scale prehistoric slope movements of unknown type kinematics (not available dating) is highly probable.

Extensometric measurement across plaza did not confirmed the recent activity of the large scale slope movement.

Deformation on rock outcrops are mainly of local significance. The monitored rate of displacement gives the capability to quantify recent processes (differential settlement, shallow landslides, weathering, etc), which are responsible for deformation of some archaeological structures.

Large scale collapse of archeological site is highly improbable within the present day environmental conditions.

The continuation of monitoring is highly appreciable to clarify the final results to contribute to the Master plane of the heritage site.

The results we presented is only one part of multicomplex methodological approach (geomorphology, hydrogeology, engineering geology) which should continually proceed in high cooperation with Peruvian Bodies and personals.

THE ITALIAN SCIENTIFIC MISSION

The Italian Scientific Mission in the area of Machu Picchu was mainly aimed at providing new and emerging technologies for the monitoring of slope instability (satellite radar interferometry, round based interferometry, Global Positioning System-GPS, laser scanner, satellite optical images).

The data up to now collected and the field survey show the presence of mass movements, characterized by different typologies, activities and frequencies, in the whole investigated area. These landslides are substantially shallow, not confirming at the moment, the hypothesis of a large and deep mass movement involving the whole citadel.

The monitoring and the data collection are still in progress and their implementation in the next period will better clarify the evolution of the slopes.

JAPANESE LANDSLIDE INVESTIGATION TEAM

1. Block No.1 is currently active based on the landslide monitoring.
2. Further research, field investigation and extensive monitoring are necessary to evaluate landslide risk on Block No.2. Identification of precursor stage of deep seated landslides is currently one of most important topics in the field of landslides science.

PROPOSALS BY INRENA

Having understood some of the results of the investigations made by the ICL, it is important that they are continued as they each require a longer timeframe of investigation in order to arrive at a correct conclusion with respect to the landslides. This will prevent future actions and assure the stability of the Incan city of Machu Picchu and its surroundings, which will also increase the investigations of the sector of Aguas Calientes, Aobamba, Cedrobamba, Mandor, as these river zones have shown geodynamic activity in the recent years.

We propose that the financing of these future investigations by the members of the ICL, directed by Dr. Kyoji Sassa, be guaranteed.

It is important that the transference of technology to their Peruvian counterparts be assured.

Aguas Calientes, September 13, 2005

INTERNATIONAL WORKSHOP ON LANDSLIDES IN MACHUPICCHU, PERU

On September 12th and 13th, the International Workshop on Landslides in Machupicchu, Peru took place in the Cultural Center of the National Institute of Culture (INC), organized by the International Consortium on Landslides (ICL), the National Institute of Culture (INC), the National Institute of Natural Resources (INRENA), the Institute of Geology, Mining and Metallurgy (INGEMMET), and the National University of San Antonio Abad of Cusco (UNSAAC).

In this workshop the Japanese, Peruvian-Canadian, Italian, Czech and Slovak missions presented the most up-to-date results of their research projects, which were supervised and coordinated by national organizations like the INC, INGEMMET, INRENA and UNSAAC.

The most up-to-date results indicate that in the Incan Citadel of Machupicchu geodynamic phenomena do exist, but there is no risk on the grand scale except for minor, superficial phenomena that should be adequately monitored and treated.

The participants and investigators agreed upon the necessity of continuing with the investigations and permanent monitoring and committed themselves to presenting their most current results and information to the National Institute of Culture – information that will increase the INC's respective documentation and will be incorporated into the database of the Investigation Center of the Historic Sanctuary of Machupicchu.

The missions committed themselves to prioritizing and strengthening technological transfer and training in the different projects that they will present in the spirit of international technical cooperation, a situation that will guarantee the participation of Peruvian professionals.

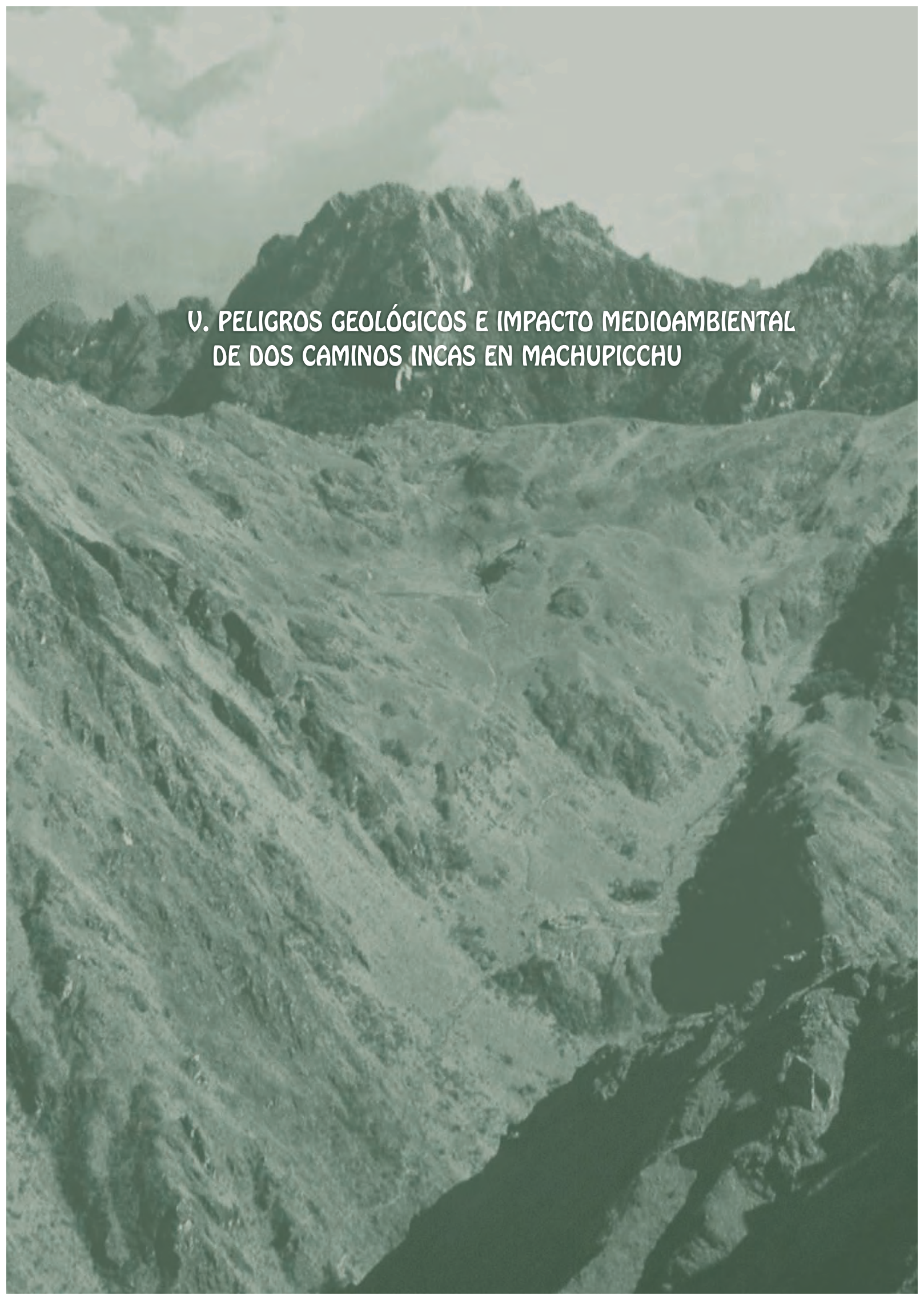
It is proposed that the investigations will enrich the different archaeological sites and human settlements located in the entire geographical zone that makes up the Historic Sanctuary of Machupicchu.

In the annex are attached the documents presented by the different missions.

[Handwritten signatures]

Machupicchu, September 13, 2005

[Handwritten signatures]

An aerial photograph of a mountainous region. The central focus is a large, dark, jagged mountain peak. Below it, a wide valley is visible, characterized by steep, rocky slopes and a network of small, winding paths or roads. The terrain appears rugged and sparsely vegetated. The sky is overcast with soft, grey clouds. The overall color palette is muted, with various shades of grey, brown, and green.

**V. PELIGROS GEOLÓGICOS E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL
DE DOS CAMINOS INCAS EN MACHUPICCHU**

1. PELIGROS GEOLÓGICOS E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL EN EL CAMINO INCA TRADICIONAL Y LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU

José Cárdenas¹, Víctor Carlotto², Tomasa Flores¹, Vilma Cano¹ y Fernando Astete³

¹ Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, cardenasroque@gmail.com

² INGEMMET Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, vcarlotto@ingemmet.gob.pe

³ Instituto Nacional de Cultura, INC-CUSCO

RESUMEN

Las evaluaciones de los fenómenos geológicos y de la geodinámica externa, realizadas a lo largo del Camino Inca Tradicional (27.15 km) en los años 1994, 2001 y 2006, están basadas en una cartografía e inventario sistematizado. Se han identificado 108 sitios con ocurrencias de fenómenos que corresponden principalmente a deslizamientos, caída de rocas, derrumbes, reptación de suelos, asentamientos, erosión superficial, erosión de ríos y sufusión. Los fenómenos geodinámicos están relacionados a los efectos del agua y de la intervención del hombre, que han causado la destrucción parcial o total de algunas partes del camino. Se han dedefinido 15 áreas con características similares, las cuales han sido valoradas, y se ha determinado su peligrosidad geológica; además, se han identificado los impactos ambientales de los fenómenos geodinámicos que afectan principalmente el suelo, la flora y fauna y la estabilidad de los taludes. Luego, con el uso de matrices causa-efecto se ha realizado la evaluación de impacto ambiental del camino dividido en tramos, y se ha establecido que los principales fenómenos que lo afectarán son los aluviones, la erosión superficial y los deslizamientos. Finalmente, se presentan medidas de mitigación y prevención para proteger este patrimonio inca. La metodología utilizada para el camino inca, es decir, la evaluación geodinámica y de impacto ambiental, se ha aplicado también a la ciudad inca de Machupicchu, y revela que los principales impactos ambientales se refieren a la seguridad y estabilidad de los sitios arqueológicos debido a los asentamientos y deslizamientos superficiales.

INTRODUCCIÓN

La ciudad inca de Machupicchu y su entorno (32,592 hectáreas) fueron reconocidos el año 1981 como Santuario Histórico con el objetivo de proteger la flora y fauna, las formaciones geológicas, la belleza paisajística y los sitios arqueológicos, incluyendo el camino inca (Foto 1). En 1983 Machupicchu fue designado por la UNESCO como Patrimonio Mundial Cultural y Natural de la Humanidad. En los años 1998 y 2005 se desarrollaron los planes maestros con el objetivo principal de proteger el entorno natural y paisajístico, así como los monumentos arqueológicos y otros bienes culturales existentes en el santuario (INRENA, 1998; INC-INRENA, 2005). Los objetivos no se han cumplido, en parte porque no se han tomado en cuenta los aspectos geológicos y de geodinámica externa, que nunca han sido considerados en los estudios de impacto ambiental. Con este trabajo se trata de mostrar la importancia de la geología, a través de la

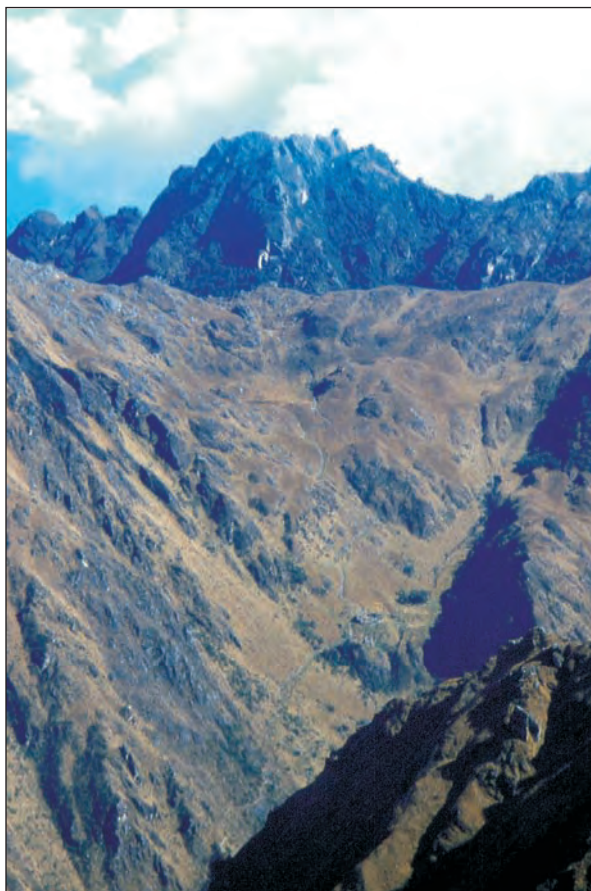


Foto 1. Camino inca que sube de Pacaymayo al abra de Runkurakay.

evaluación de los fenómenos de geodinámica externa que permiten determinar los peligros y su impacto ambiental en el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu. Los resultados permitirán una gestión integral de los elementos naturales y culturales, así como una intervención que debe ser inmediata y partir de las recomendaciones planteadas.

UBICACIÓN, FISIOGRAFÍA Y CONDICIONES CLIMÁTICAS

El Santuario Histórico de Machupicchu se localiza en plena Cordillera Oriental del sur del Perú, en el departamento de Cusco, provincia de Urubamba y distrito de Machupicchu (Fig. 1, Cap. 1). El río Urubamba atraviesa la cordillera en dirección NO-SE, formando el cañón del mismo nombre; las vertientes suroeste y noreste del valle son bastante empinadas, con cumbres importantes, entre las que destacan los nevados de Salcantay (6264 msnm), Huamantay (5459 msnm) y Paljay (5125 msnm) al suroeste, y la Verónica (5750 msnm) y Bonanta (5319 msnm) al noreste.

El camino que sale de Qoriwayrachina pasa por Wayllabamba, luego por Pacaymayo y finalmente llega a la ciudad de Machupicchu (27.15 km), se denomina Camino Inca Tradicional (Fig. 3, Cap. 1) y está localizado en la margen izquierda del río Urubamba, dentro del Santuario Histórico de Machupicchu.

La variabilidad climática que caracteriza al camino inca se debe a las diferencias altitudinales existentes en la región; las altitudes mínimas corresponden a Qoriwayrachina (2451 msnm) y las máximas al abra Warmiwañusqa (4201 msnm). En las áreas de menor altitud, como la ciudad inca, el clima se caracteriza por ser lluvioso (aproximadamente 1950 mm), semicálido y húmedo, típico de ceja de selva, mientras que las áreas de mediana altitud que corresponden a gran parte del camino presentan un clima más templado; en las partes más altas, el clima es lluvioso en verano, y seco y frío en otoño e invierno. En todas las áreas, el periodo lluvioso de noviembre a marzo presenta mayores precipitaciones en relación al resto del año.

GEOLOGÍA

En el Santuario Histórico de Machupicchu afloran rocas ígneas intrusivas del batolito de Machupicchu, se encuentran también rocas metamórficas del Paleozoico inferior y se han desarrollado superficialmente depósitos cuaternarios o recientes (Fig. 4, Cap. 1). La Formación Ollantaytambo aflora al noreste del santuario y está conformada por pizarras, cuarcitas y escasas rocas volcánicas, de posible edad Cámbrica u Ordovícica. Encima yacen los conglomerados de la Formación Verónica y las pizarras de la Formación San José (Ordovícico), esta última aparece en Wayllabamba. En la quebrada Aobamba se han reconocido cuarcitas de la Formación Sandia (Ordovícico superior) y diamictitas de la Formación San Gabán (Ordovícico-Silúrico). Al sureste del santuario afloran areniscas, lutitas y calizas de las formaciones Huambutío (Jurásico terminal), Huancané (Cretácico inferior), del Grupo Yuncaypata (Cretácico superior), las formaciones Quilque-Chilca (Paleoceno) y del Grupo San Jerónimo (Eoceno-Oligoceno). Entre las rocas intrusivas destacan los granitos y las granodioritas, que están cortadas por diques de aplita y cuarzo. Los granitos son de color blanco o gris, con textura granular, holocristalina, a veces porfirítica, compuestos de cuarzo, microclina, ortoclasa, plagioclasa y biotita. Si bien el batolito se ha formado en profundidades de la corteza (Fig. 8, Cap. 1), ahora se halla en la superficie por efecto del levantamiento y erosión de la Cadena de los Andes; la edad del batolito es de 246 ± 10 millones de años, datado por el método Rb/Sr (Priem: En Egeler y De Booy, 1961).

Los depósitos aluviales corresponden a antiguos aluviones que se emplazan en las quebradas Kusichaca, Llulluchayoc, Wayruro y sobre todo en Hualancay. En esta última quebrada, el aluvión fue tan grande que represó el río Urubamba y el Kusichaca, y su origen está relacionado a un evento histórico que seguramente se debió a la desglaciación del nevado Wayanay. Parte de los sitios arqueológicos de Patallaqta y Willkarakay se hallan construidas sobre estos depósitos, así como el camino que va de Qoriwayrachina a Aqomoqo, que está compuesto por bloques de granitos y cuarcitas, subredondeados, con diámetros de 3 a 5 m, en una matriz areno-arcillosa. Los depósitos fluviales están constituidos por gravas en una matriz de arena y limos, se han formado en el piso de los valles y se observan en el río Kusichaca, desde Aqoqasa hasta Wayllabamba, en las quebradas Wayruro,

Pacaymayo, Choquesuysuy y Wayraqtambo. Los depósitos glaciares y/o fluvioglaciares están compuestos por mezclas de grandes bloques de granitos angulosos envueltos por gravas en una matriz heterogénea de arena y limos; se ubican principalmente en el tramo Wayllabamba-Pacaymayo, donde se encuentran tres valles de origen glaciar: Llulluchayoc, Wayruro y Pacaymayo.

Gran parte del camino inca ha sido construido sobre depósitos coluviales compuestos por bloques de granitos dispersos, gravas angulosas en una matriz areno-arcillosa; y además sobre conos de escombros constituidos por gravas y bloques fuertemente angulosos con poco o nada de matriz. Los deslizamientos y derrumbes en las laderas empinadas son frecuentes y los depósitos denominados “caos graníticos” son un conjunto de bloques de granitos caídos por gravedad a partir de afloramientos muy fracturados (Figs. 13 y 14, Cap. 2).

En el santuario se han reconocido fallas regionales con dirección NO-SE y locales con eje NE-SO, además de diaclasas que son estructuras debidas al enfriamiento de los magmas que originaron los granitos (Carlotto et al., 1999); estas estructuras son las que han influido en el modelado del relieve y en el aspecto actual de la zona. Sin embargo, es importante mencionar que las fallas no son activas, ni son la causa de los problemas geodinámicos en la ciudad inca de Machupicchu y en el Camino Inca Tradicional.

EVALUACIÓN GEODINÁMICA EN EL CAMINO INCA TRADICIONAL Y LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU

Antecedentes

El primer estudio y evaluación geológica-geodinámica del Camino Inca Tradicional fue realizado por Carlotto et al. (1994); este trabajo contiene información relacionada al inventario y la cartografía de los fenómenos de geodinámica externa o movimientos en masa, y fue tomada en cuenta por el Instituto Nacional de Cultura para la conservación y mantenimiento del camino. Un segundo estudio fue realizado por Carlotto et al. (2001) y tuvo como objetivo realizar el monitoreo geodinámico del camino, tomando como línea base el trabajo del año 1994. En un tercer estudio, Cárdenas (2003) y Cárdenas et al. (2004) evalúa y monitorea la ciudad y el camino incas; este mismo autor evalúa el impacto de los peligros geológicos en el camino y la ciudad incas como parte de su tesis de maestría (Cárdenas, 2005). Finalmente, el 2006 se monitorea nuevamente el camino y se muestra la validez de la zonificación (Cárdenas et al., 2006c). El presente artículo presenta los resultados de los trabajos antes descritos, principalmente de Cárdenas (2005) y Cárdenas et al. (2006a).

El Camino Inca Tradicional

En el santuario histórico existe una red de caminos que comunicaban la región en la época de ocupación inca. Actualmente algunos son usados para el turismo de aventura en la modalidad de caminata o *trekking*; el más importante y atractivo, por la diversidad de pisos ecológicos que atraviesa y por las obras incas que forman parte del camino, es conocido con el nombre de Camino Inca Tradicional. Este camino comienza en Qoriwayrachina, en el kilómetro 88 de la línea férrea Cusco-Machupicchu, y sigue por Patallaqta, Wayllabamba, Pacaymayo, Runkurakay, Phuyupatamarca, Wiñaywayna, y llega a la ciudad inca; tiene una longitud de 27.15 km, recorre diferentes altitudes, entre 2450 y 4200 msnm, y un recorrido normal comprende de tres o cuatro días de caminata. Con fines de descripción, evaluación y presentación, el Camino Inca Tradicional fue dividido en cuatro tramos (Carlotto et al., 1999) (Cuadro 1 y Figs. 1 y 2).

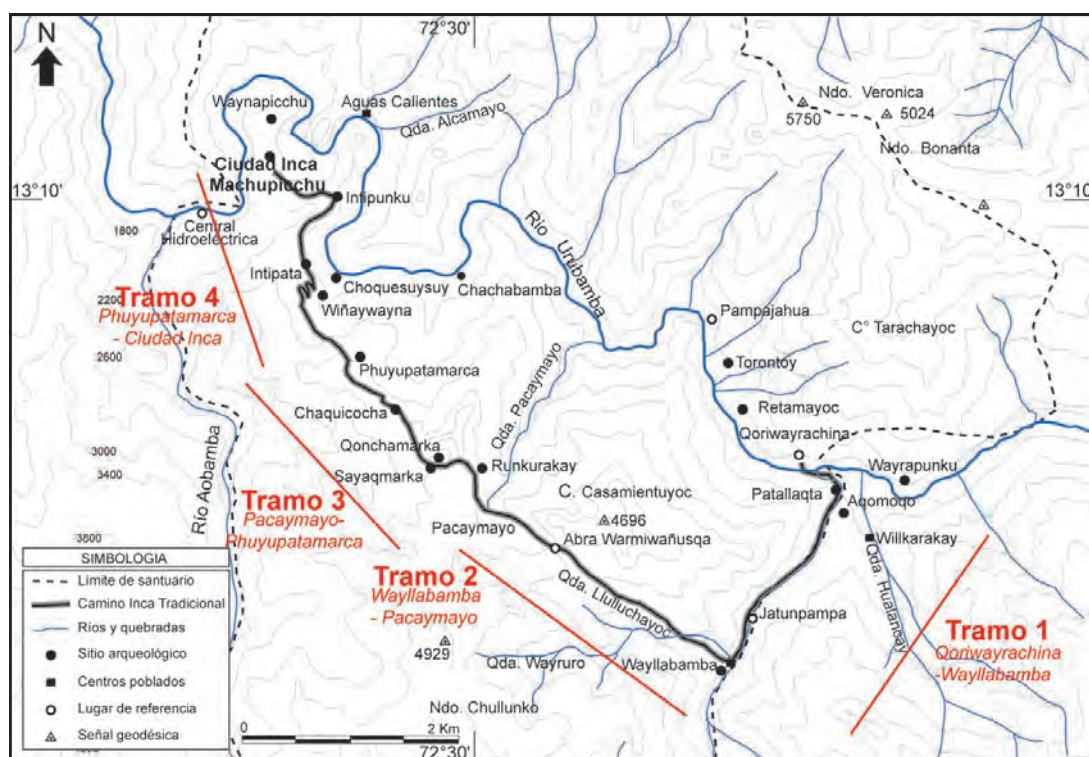


Fig 1. El Camino Inca Tradicional dividido en cuatro tramos.

Cuadro 1. Sitios y altitudes en el Camino Inca Tradicional

Tramo	Sitios naturales y arqueológicos
1. Qoriwayrachina (km 0+000) Wayllabamba (km6+430)	Puente Kusichaca (2585 msnm), centro urbano Patallaqta, Aqomoqo (2658 msnm), puente Jatumpampa (2825 msnm), puente Wayllabamba (2940 msnm).
2. Wayllabamba (km 6+430) Pacaymayo (km 13+420)	Puente Wayruro (3245 msnm), Yunca Chimpa, Llulluchapampa (4020 msnm), abra Warmiwañusqa (4201 msnm), Pacaymayo (3572 msnm).
3. Pacaymayo (km 13+420) Phuyupatamarca (km 20+020).	Sitio arqueológico Runkurakay (3751 msnm), abra Runkurakay (3944 msnm), laguna Yanacocha (3701 msnm), sitio arqueológico Suyaqa marka (3580 msnm), sitio arqueológico Qonchamarca (3550 msnm), Chaquicocha (3535 msnm), Túnel (3590 msnm), abra Phuyupatamarca (3645 msnm), sitio arqueológico Phuyupatamarca (3600 msnm).
4. Phuyupatamarca (km 20+020)-Ciudad Inca (km 27+150).	Wiñaywayna (2680 msnm), sitio arqueológico Wiñaywayna, Wayraqpunko (2580 msnm), Intipunku (2720 msnm), ciudad inca (2418 msnm).

1. Tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba

El camino comienza en Qoriwayrachina a 2450 msnm, sobre una terraza aluvial en la margen derecha del río Urubamba, luego cruza el puente Qoriwayrachina, construido sobre estribos utilizados por los incas, uno fundado sobre granitos y el otro sobre depósitos aluviales. El camino sigue sobre la terraza aluvial de la margen izquierda del río Urubamba (Foto 2) hasta llegar al centro urbano de Patallaqta, de aquí sube a Aqomoqo (2658 msnm) donde se observan impresionantes restos del aluvión de Hualancay. El camino continúa por la margen derecha del río Kusichaca (Foto 3), luego cruza por un puente en el sector de Jatumpampa (2825 msnm) y llega a Wayllabamba (2940 msnm), este último tramo se encuentra sobre depósitos de conos aluviales y terrazas fluviales.

2. Tramo Wayllabamba-Pacaymayo

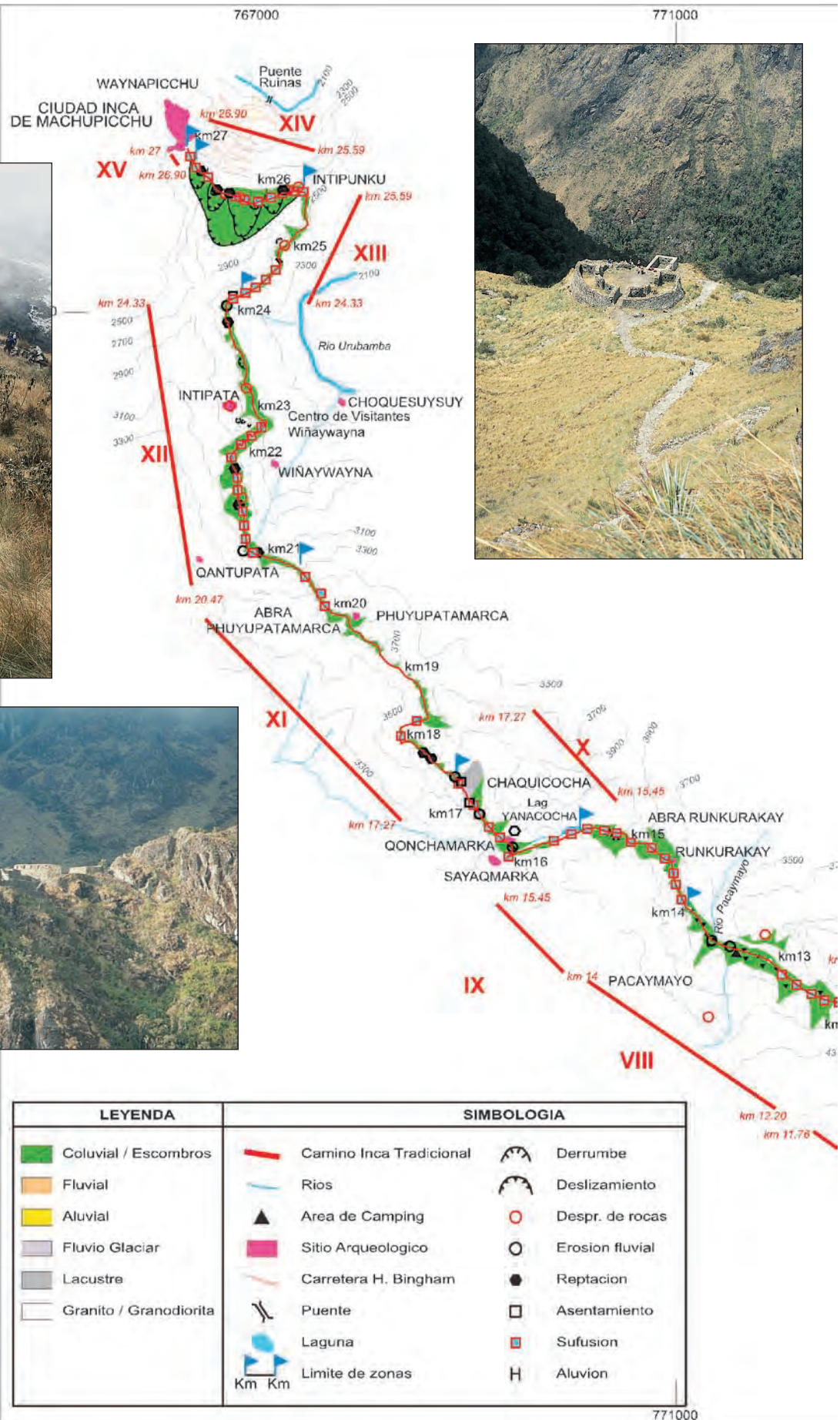
Este trayecto se caracteriza por ser muy accidentado y recorre tres valles de origen glaciar: Llulluchayoc, Wayruro y Pacaymayo. El camino sale de Wayllabamba (2940 msnm), cruza el río Llulluchayoc y comienza a ascender por el flanco sur del valle atravesando terrenos coluviales hasta el puente Wayruro a 3245 msnm; luego de cruzar el río del mismo nombre retoma nuevamente el flanco sur del valle Llulluchayoc y asciende hasta Llulluchapampa. Este sector es bastante empinado y se caracteriza por depósitos coluviales, fluvio-glaciares y también aluviales. La vegetación arbórea es importante ya que protege a los suelos de la erosión (Foto 4). En la zona de Llulluchapampa, lugar de camping entre 3575 y 3700 msnm, el relieve es menos empinado y el camino corre sobre suelos fluvio-glaciares; desde esta zona se asciende nuevamente por el flanco sur del valle hasta el abra de Warmiwañusqa (4201 msnm) sobre terrenos de conos de escombros y glaciares, y el camino tiene mayor pendiente.



Foto 2. Inicio del camino inca en Qoriwayrachina y puente sobre el río Urubamba. El camino atraviesa depósitos aluviales antiguos del aluvión de la quebrada Hualancay que represó el río Urubamba.



Foto 3. Camino sobre granitos intemperizados, con lajas y muros deteriorados por erosión superficial. Vista tomada el año 1994. Tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba.



775000

779000

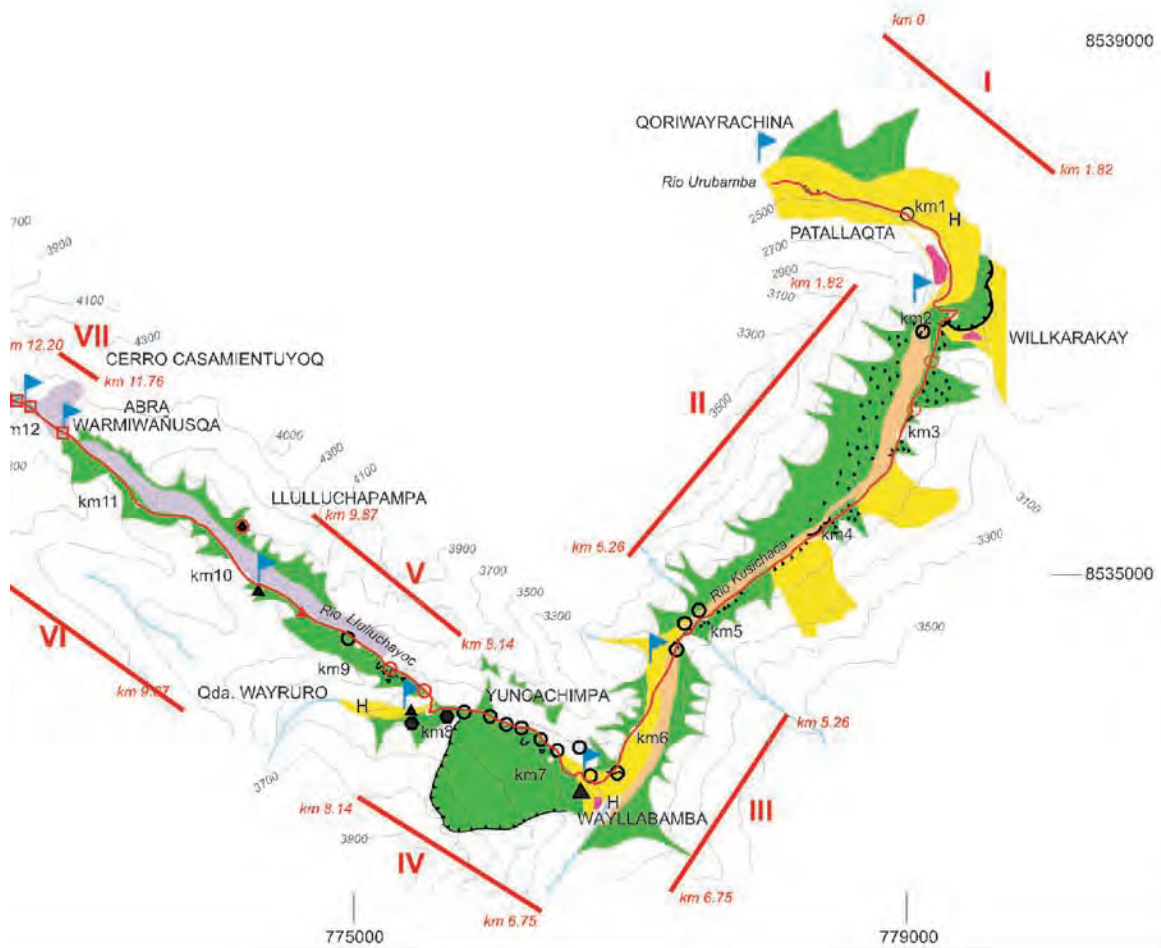


Figura 2. Mapa geológico y geodinámico del Camino Inca Tradicional.



Foto 4. Camino inca en ascenso por la quebrada Llulluchayoc, entre Wayllabamba y el abra de Warmiwañusqa.



Foto 5. Camino zigzagueante que desciende del abra de Warmiwañusqa hacia Pacaymayo.

En Warmiwañusqa comienza el descenso bastante abrupto por la parte central del valle hasta 4050 msnm, sobre un camino inca descubierto en 1994 y que recorre suelos glaciares y coluviales en proceso de erosión; luego el camino sigue por el flanco sur del valle, atraviesa depósitos coluviales y conos de escombros (Foto 5) y desciende de manera menos abrupta hasta llegar a Pacaymayo (3572 msnm). En la parte alta, al sur de Pacaymayo, existe un derrumbe activo que produce caída de bloques de granitos a más de 150 m de desnivel.

3. Tramo Pacaymayo-Phuyupatamarca

En Pacaymayo (3572 msnm) comienza un nuevo ascenso por la montaña (Foto 1) hasta Runkurakay (3751 msnm), en este tramo el camino atraviesa principalmente suelos coluviales, pero está empedrado con lajas en gran parte de su recorrido. El sitio arqueológico de Runkurakay está asentado sobre depósitos coluviales de poco espesor y sobre afloramientos de granito. Desde Runkurakay el ascenso continúa por un camino muy empinado sobre depósitos coluviales y algunas veces sobre afloramientos de roca (Foto 16), hasta llegar al abra de Runkurakay (3944 msnm) donde se observan grandes bloques graníticos a manera de caos, que han servido como material de construcción para el camino.

Del abra de Runkurakay el camino desciende a Sayaqmarka por un relieve moderado en el flanco noroeste de la montaña y sobre depósitos coluviales (Foto 6), hasta la altura de la laguna Yanacocha. Desde aquí, se sigue el borde sur del valle hasta Sayaqmarka; este tramo es muy impresionante no solo por su emplazamiento y los pisos de lajas, sino también por su entorno geográfico, geológico y paisajístico. El sitio arqueológico de Sayaqmarka (3580 msnm) está construido sobre rocas fracturadas del batolito y parcialmente sobre bloques de caos granítico, de donde provino la roca de construcción. Durante el recorrido de Sayaqmarka hasta Phuyupatamarca, el camino serpentea por las montañas, atraviesa el valle de Yanacocha y el sector de Qonchamarca, sobre suelos coluviales y de conos de escombros, con relieve ascendente pero tendido, hasta alcanzar la zona de Chaquicocha (3535 msnm) que es relativamente plana y corresponde a depósitos lacustres. Luego el camino asciende ligeramente y pasa a una zona relativamente plana sobre depósitos coluviales hasta llegar a la Samana (3675 msnm), donde el camino desciende un poco hasta atravesar la quebrada Qantupata para luego ascender nuevamente de manera suave, cruzando depósitos coluviales y pequeños afloramientos de granito, hasta llegar al abra de Phuyupatamarca (3645 msnm, Foto 7). Este es otro tramo muy impresionante por la existencia de diferentes obras de arte, particularmente en taludes verticales, donde los anclajes incas construidos en las rocas sirven de apoyo a la plataforma.

4. Tramo Phuyupatamarca-ciudad inca de Machupicchu

En este sector la morfología es bastante accidentada pues se halla en el flanco sur del cañón de Urubamba. El sitio arqueológico de Phuyupatamarca está construido



Foto 6. Bajada del abra de Runkurakay hacia Sayaqmarka, donde se ven los efectos de la erosión superficial en el año 1994. Actualmente se halla restaurada.



Foto 7. Abra de Phuyupatamarca con evidencias de los efectos del incendio del año 1994 y la erosión superficial en el camino.

sobre depósitos coluviales de poco espesor, en una ladera empinada a muy empinada; una cantera importante se ubica al sur de este sitio y conserva piedras en proceso de labrado. Desde Phuyupatamarca (3600 msnm) a Wiñaywayna (2680 msnm) se desciende sobre un acantilado bastante abrupto, que es uno de los lugares más hermosos ya que el camino está formado esencialmente por gradas que han sido construidas para salvar un talud rocoso muy empinado (Foto 8) e incluye también una escalinata en forma de caracol o espiral, diseñada para pasar una quebrada en la difícil topografía (Foto 9). Sin embargo, para llegar a Wiñaywayna se sigue utilizando un camino en zigzag en mal estado, a pesar de haberse puesto en valor el camino inca que va de Intipata al centro de visitantes de Wiñaywayna y luego al grupo arqueológico del mismo nombre.

El sitio arqueológico de Wiñaywayna (2650 msnm) (Foto 10) está construido sobre depósitos coluviales y roca estable, se ubica en una ladera bastante accidentada y constituye un bello sector por las construcciones impresionantes de andenerías y fuentes de agua conocidas como Fuentes Litúrgicas. Otro sitio arqueológico, Intipata (2800 msnm), está emplazado sobre una ladera bastante abrupta y compuesta por depósitos coluviales y caos granítico. El trecho del camino que va del centro de visitantes de Wiñaywayna a Intipunku (2720 msnm) muestra un relieve de ladera con pendiente empinada sobre depósitos coluviales, pero el camino sigue casi sobre la misma cota. En Intipunku afloran granitos muy fracturados en un relieve también empinado, y el camino desciende por la ladera septentrional del cerro Machupicchu hasta llegar a la ciudad inca (2418 msnm); en este tramo el camino ha sido construido sobre una escarpa de deslizamiento (Foto 11) que se halla en parte estabilizada por andenes incas. Al inicio del descenso, el camino corta afloramientos graníticos y depósitos coluviales que sufren constantes reactivaciones geodinámicas como la ocurrida el año 2006 y que interrumpió el acceso a la ciudad inca por varios meses (Cárdenas et al., 2006b).

Metodología

La evaluación geodinámica del Camino Inca Tradicional siguió una metodología de estudio que se inició con la identificación, inventario y cartografiado de los fenómenos geodinámicos o movimientos en masa; luego se realizó la clasificación y se determinó el grado de sensibilidad frente a los fenómenos geodinámicos, finalmente se estableció el grado de peligrosidad geológica.

1. Identificación y cartografiado

Los fenómenos geodinámicos presentes a lo largo del camino fueron identificados, inventariados y cartografiados (Cuadro 2); para el detalle se empleó cinta métrica y mapa topográfico a escala 1:10,000, pero en los últimos estudios se ha utilizado el GPS. El cartografiado se presenta en mapas digitales en los que se mencionan los lugares más importantes y sitios arqueológicos (Fig. 2). Los fenómenos reconocidos son: erosión superficial (Fotos 3 y 6), erosión fluvial, derrumbes (Foto 13),

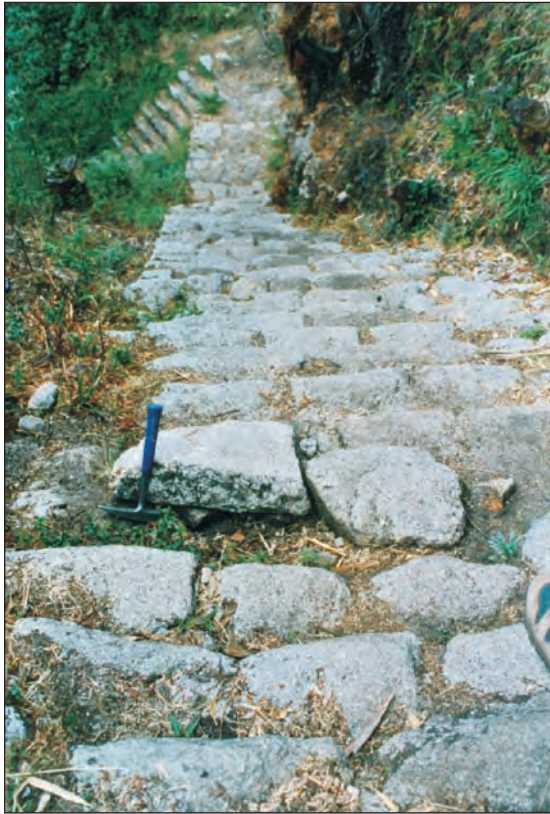


Foto 8. Gradas con desprendimiento de peldaños en la bajada de Phuyupatamarca a Wiñaywayna.



Foto 9. Escalinata en forma de espiral construida para cruzar una quebrada.

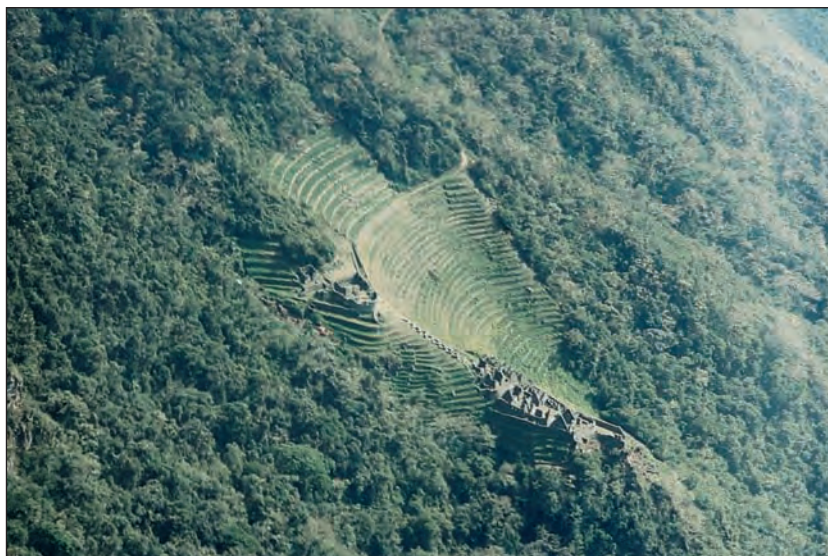


Foto 10. Vista panorámica del sitio arqueológico de Wiñaywayna.



Foto 11. Camino inca que cruza el cerro Machupicchu antes de llegar a la ciudad inca.

deslizamientos (Foto 11), desprendimiento y caída de rocas, reptaciones, asentamientos y sufusión (Foto 6). Este último término se define como hundimiento en suelos o caminos por efecto del agua, que hace perder material fino de la matriz o argamasa. En resumen, se han identificado 108 sitios con ocurrencias de fenómenos geológicos (Cuadro 2); el mayor número se halla en el tramo Phuyupatamarca-ciudad inca con 36 ocurrencias y el menor en el tramo Pacaymayo-Phuyupatamarca con 20 ocurrencias; el tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba tiene 21 ocurrencias y el tramo Wayllabamba- Pacaymayo tiene 31 ocurrencias.

Cuadro 2. Evaluación de fenómenos geodinámicos del Camino Inca Tradicional. Como ejemplo se describen cuatro puntos de un total de 108 sitios

Sitios	Kilometraje	Roca/suelo	Pe %	Fenómeno Geodinámico	E 2001	E 1994	Clasificación	S
01	km 0+180 km 0+360	al	D	der pab, ersu	R	R	Pd-ME-M	3
02	km 1+170 km 1+820	al	D	der an andenes	R	R	Pd-ME-M	3
03	km 1+820 km 2+080	al	D	des an pab par, ersu, erflu	R-B	R-M	Rg-D-A	2-3
04	km 2+080 km 2+100	al	D	der par, ersu	R-B	R-M	Pd-BA-B	4

Abreviatura

Roca/suelo: al: aluvial.

Pendiente (Pe): D: fuertemente inclinada (8-15 %).

Fenómeno geodinámico: ersu: erosión superficial, der: derrumbe, pab: pendiente abajo, par: pendiente arriba, Des: deslizamiento, an: antiguo, ac: activo, erflu: erosión fluvial.

Estado del camino (E): B: bueno, R: regular, M: malo.

Clasificación: Pd: pequeña dimensión, Rg: relativamente grandes, D: destructivo, ME: medio, BA: bajo, A: alto, M: medio, B: bajo.

Sensibilidad (S): alta (S=2), mediana (S=3), baja (S=4).

2. Clasificación, sensibilidad y pendiente

Para la clasificación, sensibilidad y pendiente se han tomado varios parámetros que están basados en el modelo propuesto por Bustamante (2000) y modificados por Cárdenas (2005) (Cuadro 2).

a. Clasificación

Para la clasificación se han considerado tres parámetros: el tamaño, la intensidad y la ocurrencia de los fenómenos geodinámicos.

- Tamaño

Los casos de pequeña dimensión (Pd), con pequeño movimiento y dimensiones métricas no crean muchos problemas de seguridad, en cambio los relativamente

grandes (Rg), con mayor capacidad de movimiento y dimensiones métricas a decamétricas pueden crear problemas de seguridad (Foto 12). En el camino se han determinado 105 fenómenos de pequeña dimensión y tres relativamente grandes; en el tramo Phuyupatamarca-ciudad inca se encuentra el mayor número de fenómenos de pequeña dimensión (35), pero en él también se encuentra el fenómeno de mayor tamaño: el deslizamiento del cerro Machupicchu (Foto 11). Los tramos Qoriwayrachina-Wayllabamba y Pacaymayo-Phuyupatamarca presentan el menor número de fenómenos de pequeña dimensión (20).

- Intensidad

Se califica como muy destructiva (MD) cuando hay destrucción total de centros poblados, obras de ingeniería y grandes extensiones de campos de cultivo, como destructiva (D) cuando la destrucción es parcial en centros poblados, obras de ingeniería y campos de cultivo; media (ME) cuando hay destrucción de algunas viviendas de un centro poblado, daños parciales en obras de ingeniería y campos de cultivo; y como baja (BA) cuando hay daños menores y poco significativos en centros poblados y obras de ingeniería y, además, se solucionan con facilidad. En el camino inca predominan los fenómenos de intensidad baja en 54 sitios, luego siguen los de intensidad media en 37 sitios y los destructivos en 17. En el tramo Wayllabamba-Pacaymayo se encuentra el mayor número de fenómenos destructivos (10); por ejemplo, en la parte alta de la quebrada Pacaymayo, el 4 de julio de 1993 se produjo un derrumbe con caída de bloques de granitos de más de un metro de diámetro, que llegaron hasta el área designada para camping, constituyendo un peligro para los turistas que acampan en esta área (Foto 13). En los tramos Pacaymayo-Phuyupatamarca y Phuyupatamarca-Ciudad Inca se presentan el mayor número de fenómenos cuya intensidad es baja, luego siguen los tramos Qoriwayrachina-Wayllabamba y Wayllabamba-Pacaymayo, con intensidad media.

- Ocurrencia

Es calificada como muy alta (MA) cuando la ocurrencia es inminente y periódica, con efectos catastróficos, y se relaciona con la intensidad muy destructiva y destructiva; clasificada como alta (A) si la ocurrencia es inmediata y tiene antecedentes de reactivaciones periódicas, y corresponde a la intensidad destructiva; media (M) cuando la evolución es lenta y con antecedentes esporádicos poco significativos, y se relaciona con la intensidad media; es baja (B) si la evolución es muy lenta, con ocurrencia a muy largo plazo y de intensidad baja. Sobre la base de la ocurrencia del fenómeno, el mayor número corresponde a baja con 54 casos, luego a media con 37, y en menor proporción alta con 17. El mayor número de ocurrencia de fenómenos se encuentra en los tramos Wayllabamba-Pacaymayo y Phuyupatamarca-ciudad inca, en este último está presente el fenómeno más destacado por su ocurrencia y dimensiones: el deslizamiento del cerro Machupicchu (Foto 11).



Foto 12. Deslizamiento que afecta el camino inca en la subida a Warmiwañusqa.



Foto 13. Derrumbe con caída de bloques de granitos al sur de la zona de camping de Pacaymayo. Vista tomada el año 1994.

b. Sensibilidad

La sensibilidad se cuantifica de acuerdo a las características comunes que puedan tener determinadas áreas del camino frente a los fenómenos geodinámicos, problemas geotécnicos y la pendiente del terreno (INGEMMET, 1997). Los casos de muy alta sensibilidad ($S=1$) se refieren a áreas con fuertes problemas geológicos y geotécnicos; por ejemplo, las pendientes de las laderas son superiores a su límite crítico, están afectadas por intensa meteorización y fracturamiento que generan fenómenos de movimiento en masa. Se califican como de alta sensibilidad ($S=2$) las áreas con fenómeno geodinámico alto e intensidad variable; por ejemplo, debido a la fuerte pendiente de las laderas, las obras civiles y los centros poblados sufren daños; son áreas afectadas por frecuentes precipitaciones pluviales que favorecen la meteorización y el fracturamiento, con pérdida de cohesión de la cubierta detrítica; hay fluctuación del nivel freático que genera movimientos en masa. Son de mediana sensibilidad ($S=3$) las áreas con ocurrencia de fenómenos geodinámicos que pueden ser atenuados con obras de drenaje y estabilización de suelos; por ejemplo, las pendientes suaves a moderadas, con nivel freático poco profundo que indica un alto grado de saturación de los suelos. Se denominan de baja sensibilidad ($S=4$) a las áreas aparentemente favorables por tener superficies moderadamente onduladas; en ellas se producen problemas de tipo litológico-estructural y geotécnico en presencia de fenómenos geológicos de poca magnitud. Finalmente, son de escasa información ($S=5$) las áreas con ausencia de fenómenos geodinámicos o con escasa información de su ocurrencia; es posible que se presenten problemas geotécnicos e hidrogeológicos.

En el camino inca existen 56 sitios con sensibilidad mediana, 48 con baja sensibilidad y solo 18 con alta sensibilidad.

c. Pendiente del terreno

La pendiente del terreno fue clasificada para ayudar a zonificar las áreas y así establecer el grado de peligro geológico: A: plana (0-2%), B: ligeramente inclinada (2-4%), C: moderadamente inclinada (4-8%), D: fuertemente inclinada (8-15%), E: moderadamente empinada (15-25%), F: empinada (25-50%) y G: muy empinada (50-75%).

3. Zonificación de peligros geológicos

Para la zonificación de los peligros geológicos se agruparon zonas con características similares basadas en la sensibilidad, geología, geodinámica, precipitación y pendiente; de esta manera se determinaron 15 zonas (Cuadro 3). Luego se elaboró una matriz para cuantificar cada una de las zonas y establecer valores para el grado de peligrosidad (Cuadro 4). Así se cuantificaron los parámetros como suelos-rocas y los fenómenos geodinámicos, dando valores más altos a aquellos que favorecen más la activación o reactivación de los fenómenos. Asimismo, se dieron valores a la pendiente y las precipitaciones, siendo mayores aquellos que más inciden en la ocurrencia del fenómeno. Finalmente, se cuantificaron los valores de sensibilidad para cada zona.

En la matriz (Cuadro 4), la vertical muestra las 15 zonas establecidas y la horizontal presenta los parámetros cuantificados, es decir, la precipitación, pendiente, roca-suelo, fenómenos geodinámicos y sensibilidad. Los valores utilizados son: 1 a 4 para la precipitación, 1 a 5 para la pendiente, 1 a 8 para roca/suelo, 1 a 9 para los fenómenos geodinámicos y 1 a 5 para la zonificación por sensibilidad. Luego se realizó la sumatoria o agregación para cada una de las zonas, y para el análisis se fijaron los valores de 20 a 25 para peligro alto, 15 a 20 para peligro medio y 10 a 15 para peligro bajo.

El peligro bajo caracteriza a zonas donde se registra menor presencia de fenómenos geodinámicos, y cuando aparecen son de menor tamaño, menor ocurrencia y menor sensibilidad; esto se debe a la menor pendiente, a características litológicas menos favorables para los movimientos en masa, y a menor cantidad de agua producto de las lluvias. Aquí están comprendidas las zonas I, VI y VII, situadas en Patallaqta, Llulluchapampa y Warmiwañusqa, donde la topografía es menos accidentada y los suelos coluviales y aluviales son bastante estables; las intervenciones para mejorar el camino son simples y de fácil realización.

El peligro medio indica zonas con ocurrencia media de fenómenos geodinámicos; estos son de mediana dimensión y sensibilidad media, debido a una mayor pendiente, mayor presencia de suelos y rocas fracturadas, favorecidas por más cantidad de aguas de lluvia. La mayor parte de las áreas cae dentro de esta clasificación y corresponden a las zonas II, III, IV, V, VIII, IX, X, XI, XII y XIII. Las intervenciones para las mejoras del camino no son tan simples y en algunos casos se requieren obras de ingeniería (Foto 14).

El peligro alto corresponde a zonas con fuertes problemas geodinámicos debido a la mayor ocurrencia y tamaño de los fenómenos, que afectan de manera crítica al camino inca. Estos se hallan favorecidos por las pendientes empinadas asociadas a rocas muy fracturadas o suelos poco consistentes para la estabilidad de taludes, donde las altas precipitaciones favorecen la activación o reactivación de los fenómenos geodinámicos. Solo se han identificado dos áreas con peligro alto: las zonas XIV y XV, ambas relacionadas con el deslizamiento del cerro Machupicchu. En estas zonas es frecuente la ocurrencia de fenómenos, como en marzo del 2006, cuando un derrumbe destruyó el camino e impidió, por dos meses, el paso de los visitantes en el trayecto Wiñaywayna-ciudad inca. Anteriormente, el año 1995, otro derrumbe-deslizamiento dañó la carretera de ingreso a la ciudad inca por más de dos meses (Carlotto y Cárdenas, 1996). En estas zonas de peligro alto, la intervención y el tratamiento son difíciles y costosos.

Cuadro 3. Zonas del Camino Inca Tradicional

Kilómetro	PPA (mm)	Pe (%)	Roca/suelo	Fenómeno geodinámico	S	Zonas
km 0+000 km 1+820	1100	C-E	co, al	ersu, erflu	4	I
km 1+820 km 5+260	1100	D-E	co, esc, al. flu	erflu, der, dero, dero?	4 a 3	II
km 5+260 km 6+750	1100- 1500	E-F	al, flu, co	erflu, der?, dero?, aluvión?	3 a 2	III
km 6+750 km 8+140	1500	E-F	co, p	des, ersu, erflu, der, dero?, aluvión?	3 a 2	IV
km 8+140 km 9+870	1500- 1000	E-F	co, esc, p, g	erflu, der, ersu, dero?, des?	2 a 3	V
km 9+870 km 11+760	1000	F	co, flugla, g	ersu, dero, suf, der?	3 a 4	VI
km 11+760 km 12+200	1000	F	flugla, g	ersu, suf, dero?, der?	3	VII
km 12+200 km 14+000	1500- 1900	F-G	co, esc, g	ersu, suf, dero, der?	3 a 2	VIII
km 14+000 km 15+450	1900- 1500	F-D-G	co, esc, g	ersu, suf, dero?, der?	4	IX
km 15+450 km 17+270	1900	F-G	co, gla, la, g	ersu, suf, as, rep, as?, rep?	4	X
km 17+270 km 20+470	1900	G-F	co, g	ersu, suf, rep, as, dero?, rep?, as?	4 a 3	XI
km 20+470 km 24+330	1900- 1950	F	co, g	suf, rep, ersu, as, as?, dero?	3 a 4	XII
km 24+330 km 25+590	1950	F	co, g	ersu, suf, der, dero, dero?, der?	3	XIII
km 25+590 km 26+900	1950	F	co	des, der, ersu, suf, dero, rep, as?	3 a 4	XIV
km 26+900 km 27+150	1950	F	co	suf	4	XV

Abreviaturas

Precipitación promedio anual (PPA)

Pendiente (Pe), C: moderadamente inclinada (4-8%), D: fuertemente inclinada (8-15%), E: Moderadamente empinada (15-25%), F: empinada (25-50%), G: muy empinada (50-75%).

Roca/Suelo, co: coluvial, al: aluvial, g: granito, gla: glaciar, p: pizarra, flu: fluvial, esc: escombros, la: lacustre, flugla: fluvioglaciar.

Fenómeno geodinámico, ersu: erosión superficial, der: derrumbe, Des: deslizamiento, erflu: erosión fluvial, dero: desprendimiento o caída de rocas, rep: reptación, suf: sufusión, as: asentamiento.

Sensibilidad (S), Alta (S=2), Mediana (S=3), Baja (S=4).

Cuadro 4. Matriz de calificación y determinación de peligro geológico en las 15 zonas del Camino Inca Tradicional

Zonas	Kilómetro	PPA (mm)	Pe (%)	Roca/suelo	Fenómeno Geodinámico	S	Agregación o sumatoria	Peligro geológico
I	km 0+000 km 1+820	1	2	5.5	1.5	2	12	Bajo
II	km 1+820 km 5+260	1	2.5	6.5	4	2.5	16.5	Medio
III	km 5+260 km 6+750	2	3.5	6.3	2	3.5	17.3	Medio
IV	km 6+750 km 8+140	2	3.5	4	4.5	3.5	17.5	Medio
V	km 8+140 km 9+870	1.5	3.5	4	3.3	3.5	15.8	Medio
VI	km 9+870 km 11+760	1	4	3.6	2.6	2.5	13.7	Bajo
VII	km 11+760 km 12+200	1	4	2.5	2.5	3	13	Bajo
VIII	km 12+200 km 14+000	3	4.5	4.6	2.6	3.5	18.2	Medio
IX	km 14+000 km 15+450	3	5.5	4.6	2.5	2	17.6	Medio
X	km 15+450 km 17+270	4	4.5	3.5	4	2	18	Medio
XI	km 17+270 km 20+470	4	4.5	3.5	4	2.5	18.5	Medio
XII	km 20+470 km 24+330	4	4	3.5	4	2.5	18	Medio
XIII	km 24+330 km 25+590	5	4	3.5	3.7	3	19.2	Medio
XIV	km 25+590 km 26+900	5	4	6	4.8	2.5	22.3	Alto
XV	km 26+900 km 27+150	5	4	6	4	2	21	Alto

Escala de valores

Precipitación (PPA): 1 (1000-1100 mm), 2 (1100-1500mm), 3 (1500-1900mm), 4 (1900-2000mm)

Pendiente (Pe): 1 (C), 2 (D), 3 (E), 4 (F), 5 (G)

Fenómeno geodinámico: 1 (ersu), 2 (erflu), 3 (dero), 4 (suf), 5 (as), 6 (rep), 7 (der), 8 (Des), 9 (al); dividido entre numero de ocurrencias.

Roca/Suelo: 1 (g), 2 (p), 3 (gla), 4 (la-flugla), 5 (al), 6 (co), 7 (esc), 8 (flu); dividido entre el numero de tipo de roca o suelo.

Sensibilidad (S): 2 (baja), 3 (media), 4 (alta).

Peligro geológico: alto (25-20), medio (20-15), bajo (15-10).



Foto 14. Deslizamiento que afecta el camino en el tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba. Vista tomada el año 1994.



Foto 15. Camino afectado por erosión superficial y sufusión en Chaquicocha (1994). Actualmente se halla restaurado.

IMPACTO EN EL SISTEMA MEDIOAMBIENTAL DEL CAMINO INCA TRADICIONAL Y LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU

Los especialistas en definir los procesos que provocan impactos ambientales significativos en el camino y la ciudad inca indican algunas acciones en los sistemas biológico, socioeconómico y cultural, así como en el sistema físico donde solamente se menciona la problemática del desagüe de los humedales, y el desequilibrio de los regímenes hidrológicos (Ochoa y Trujillo, 2000; Galiano, 2000; Cuadro 5); no consideran los factores geológicos y de geodinámica externa. Sin embargo, la evaluación geológica del Camino Inca Tradicional indica que los procesos que provocan impactos negativos importantes en la conservación del camino están relacionados a los fenómenos geodinámicos o movimientos en masa y a la erosión superficial que afectan las laderas de las montañas donde se emplaza el camino inca (Foto 15). En la ciudad inca los procesos que provocan impactos negativos están relacionados con fenómenos geodinámicos superficiales, como asentamientos y erosión de laderas que afectan a las construcciones incas. Por otro lado, cualquier alteración que se produzca en forma independiente en los sistemas físico, biológico, socioeconómico y cultural repercutirá necesariamente sobre el otro y viceversa. Es extremadamente difícil poder predecir de forma genérica las alteraciones que se puedan producir, sin embargo, en el medio físico particularmente relacionado a la geología se pueden prevenir o minimizar los posibles impactos que puedan afectar la conservación natural y cultural de un área natural protegida como el Santuario Histórico de Machupicchu y otra como el Camino Inca Tradicional.

Cuadro 5. Acciones que provocan impactos ambientales significativos (Ochoa y Trujillo, 2000; Galiano, 2000)

Sistema	Actividades
Físico	<ul style="list-style-type: none"> - Desagüe inducido de humedales (Yanacocha, Chaquicocha, Wiñaywayna, etc.). - Desequilibrio de los regímenes hidrológicos-Uso inadecuado de aguas superficiales.
Biológico	<ul style="list-style-type: none"> - Deforestación de bosques y vegetación nativa de la región. - Alteración del hábitat de la fauna silvestre.
Socio económico y cultural	<ul style="list-style-type: none"> - Uso y seguridad inadecuada de áreas de camping. - Instalación de elementos ajenos a la naturaleza (torres, antenas, etc.). - Uso y manejo inadecuado de nuevas vías de acceso y grupos arqueológicos (trochas, carreteras, caminos, etc.). - Tugurización de áreas pobladas (Qoriwayrachina, Wayllabamba, Wiñaywayna). - Construcción de infraestructuras (hotel, servicios higiénicos, casetas de control, etc.). - Manejo inadecuado de los residuos sólidos. - Sobreestimación de la capacidad de carga. - Los incendios forestales que causan daños irreversibles a la flora y fauna silvestres. - El uso y manejo inadecuado de la agricultura (p.e. uso de fertilizantes y químicos) que afectan al suelo y el agua. - La presencia de ganado exótico (vacuno, caprino, equino y porcino) que afecta al suelo y flora y fauna silvestres.

Las evaluaciones geodinámicas realizadas a lo largo del camino inca en los años 1994, 2001 y 2006 confirman que existen procesos geológicos que provocan impactos ambientales en la conservación del camino. La ocurrencia de movimientos en masa puede afectar principalmente la seguridad de los visitantes, las áreas de camping, la infraestructura reciente, la estabilidad de suelos y rocas, la conservación de sitios arqueológicos y finalmente provocar impactos en la belleza escénica del paisaje natural y cultural (Cárdenas, et al., 2006a; 2006b).

Identificación y evaluación de impactos ambientales en el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu

Para la identificación y evaluación de los impactos ambientales en el camino y la ciudad inca se ha utilizado la matriz de Leopold (1971) y matrices causa-efecto.

Matriz de Leopold

En la horizontal de la matriz se presenta un listado de los procesos naturales y las acciones antrópicas negativas que están relacionadas con la problemática de la zona de estudio; en la vertical se muestra un listado de los factores ambientales impactados (Cuadro 6). Luego de evaluar la relación entre estos, se sumó el número de aspas de las celdillas a lo largo de las filas y columnas analizadas. Para los procesos naturales y acciones antrópicas se tomó en cuenta la sumatoria de resultados ≥ 14 , mientras que para los factores ambientales impactados se tomó en cuenta la sumatoria de resultados ≥ 12 .

Los procesos naturales y las acciones antrópicas que causan mayor impacto están referidas a la excesiva capacidad de carga con un valor de 17 (Foto 16); luego están la activación y reactivación de los fenómenos geodinámicos, la acumulación de residuos, la ganadería y el pastoreo, las instalaciones de áreas de camping, los incendios y las construcciones, todas con un valor de 16; le siguen la introducción de flora y fauna exótica y la deforestación con un valor de 14. Los factores ambientales impactados en primer lugar son las especies de la flora y fauna en peligro con un valor de 14, luego están los suelos y sitios históricos o arqueológicos con un valor de 13 y finalmente la estabilidad de taludes, pérdida de terrenos, pérdida de cobertura vegetal, vistas escénicas y panorámicas, y rasgos físicos singulares, todos con un valor de 12. Del análisis de la matriz se deduce que los aspectos relacionados a la geodinámica y actividades antrópicas deben ser tomados en cuenta para la identificación de impactos ambientales en el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu.

Matriz causa-efecto para el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu

Después de haber identificado los impactos ambientales negativos más significativos en el camino y la ciudad inca mediante la matriz de Leopold, se ha

Cuadro 6. Identificación de impactos ambientales en el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu en la matriz de Leopold (1971)

PROCESOS NATURALES Y ACCIONES ANTRÓPICAS		FACTORES AMBIENTALES IMPACTADOS															
		Intr. de fauna y flora exótica	Modificación de habitat	Incendios	Construcciones	Instalaciones de áreas de camping	Agricultura	Ganadería y pastoreo	Generación de energía	Paisajismo	Deforestación	Senderos	Acumulación de residuos	Fosas sépticas	Activac. o reactiv. de fenómenos geodinámicos	Excesiva capacidad de carga	Agregación de resultados
Suelo	Suelos	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	13
agua	superficial	x			x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	11
	subterránea	x			x	x	x	x	x		x		x	x		x	10
	Calidad	x				x	x	x			x		x	x		x	11
	Calidad		x	x	x	x					x		x				5
Procesos	Compactación y asentamiento	x		x	x	x		x			x	x	x	x	x	x	11
	Estabilidad de taludes	x		x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x	12
Flora	Pérdida de cobertura vegetal	x		x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x	12
	Especies en peligro	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	14
Fauna	Especies en peligro	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	14
Usos de suelo	Pérdida de terrenos	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	12
Recreo	Camping y excursionismo	x		x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	11
	Instalaciones de recreo	x		x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	11
Estética	Vistas escénicas y panorámicas			x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	12
	Rasgos físicos singulares			x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	12
	Sitios históricos o arqueológicos	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	13
Inst. y actividad.	Construcciones	x		x	x					x					x	x	5
	Redes de transporte	x		x				x		x		x	x	x	x	x	8
	Agregación de resultados	14	4	16	16	16	16	16	10	7	14	13	16	9	16	17	197

Cuadro 7. Evaluación de impacto ambiental en el tramo Qorwayrachina-Wayllabamba

PROCESOS NATURALES Y ACCIONES ANTRÓPICAS		Fenómenos Geodinámicos										Actividades antrópicas																							
		Deslizamiento	Derrumbe	Aluvión	Erosión fluvial	Desprendimiento de rocas	Erosión superficial	Reptación	Asentamiento-sufusión	Introducción de flora y fauna exótica	Instalación y actividades en áreas de camping	Incendios	Generación de residuos sólidos	Construcciones e instalac. de postes	Deforestación	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	Excesiva capacidad de carga	SUMA																	
MEDIO GEOBIÓFISICO	Factores ambientales impactados																																		
	Sistema ambiental																																		
	Suelo	Deterioro de los suelos	4	4	5	5	2	2	5	4	3	Reptación	5	4	3	Introducción de flora y fauna exótica	5	4	5	5	4	5	Deforestación	5	4	5	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	3	Excesiva capacidad de carga	5	4	5	69
	Agua	Superficial subterránea	3	3	4	3	2	2	4	3	3	Erosión superficial	4	3	3	Introducción de flora y fauna exótica	4	4	2	5	4	3	Construcciones e instalac. de postes	4	3	3	Deforestación	3	3	3	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	54
		caudal	4	3	5	4	1	2	1	2	1	Erosión superficial	1	1	1	Introducción de flora y fauna exótica	1	3	1	2	3	1	Construcciones e instalac. de postes	3	1	1	Deforestación	1	1	1	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	3	3	3	36
		Calidad	1	1	2	2	1	4	1	1	1	Erosión superficial	4	1	1	Introducción de flora y fauna exótica	4	5	1	5	5	2	Construcciones e instalac. de postes	5	2	1	Deforestación	2	1	4	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	40
	Flora	Pérdida de cobertura vegetal	4	4	4	4	4	4	2	1	1	Erosión superficial	4	2	1	Introducción de flora y fauna exótica	5	5	5	4	4	5	Construcciones e instalac. de postes	4	4	5	Deforestación	3	3	4	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	62
		Pérdida de diversidad	3	3	4	3	2	3	1	1	1	Erosión superficial	3	1	1	Introducción de flora y fauna exótica	4	4	4	4	3	4	Construcciones e instalac. de postes	3	4	2	Deforestación	4	2	3	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	3	3	4	48
	Fauna	Alteración del hábitat	4	3	4	4	3	4	3	1	1	Erosión superficial	4	3	1	Introducción de flora y fauna exótica	4	4	5	4	4	5	Construcciones e instalac. de postes	4	4	5	Deforestación	3	3	4	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	59
		Disminución de población	3	2	3	3	2	4	2	1	1	Erosión superficial	4	2	1	Introducción de flora y fauna exótica	4	3	4	4	4	4	Construcciones e instalac. de postes	4	4	4	Deforestación	2	2	3	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	3	3	4	48
Geología	Estabilidad de taludes	5	5	5	4	5	4	3	4	4	Erosión superficial	4	3	4	Introducción de flora y fauna exótica	4	3	5	3	4	5	Construcciones e instalac. de postes	4	4	5	Deforestación	3	3	4	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	66	
Paisaje	Disminución de vistas escénicas y panorámicas	4	4	5	4	3	3	3	3	3	Erosión superficial	3	3	3	Introducción de flora y fauna exótica	4	4	5	4	5	4	Construcciones e instalac. de postes	5	4	4	Deforestación	4	3	4	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	62	
	Alteración de rasgos físicos singulares	4	4	5	4	4	4	4	3	3	Erosión superficial	4	3	3	Introducción de flora y fauna exótica	4	4	4	4	5	4	Construcciones e instalac. de postes	5	4	4	Deforestación	4	3	4	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	63	
MEDIO SOCIO ECON Y CULTURAL	Usos suelo	4	3	5	5	3	4	3	3	3	Erosión superficial	4	3	3	Introducción de flora y fauna exótica	4	4	4	5	4	4	Construcciones e instalac. de postes	4	4	4	Deforestación	4	3	3	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	3	3	3	61	
	Recreo	5	5	5	3	5	3	3	3	3	Erosión superficial	3	3	3	Introducción de flora y fauna exótica	3	3	4	1	1	4	Construcciones e instalac. de postes	1	4	4	Deforestación	4	4	4	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	4	4	4	56	
	Cultural	4	4	5	4	5	3	3	3	3	Erosión superficial	3	3	3	Introducción de flora y fauna exótica	4	4	4	4	4	4	Construcciones e instalac. de postes	4	4	4	Deforestación	4	3	3	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	5	5	5	63	
SUMA		52	48	61	52	42	42	51	35	31	Erosión superficial	51	35	31	Introducción de flora y fauna exótica	54	54	53	53	55	54	Construcciones e instalac. de postes	55	54	54	Deforestación	38	38	38	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	54	54	54	54	

Escala de valores

1: Bajo impacto negativo, 2: Ligero impacto negativo, 3: Moderado impacto negativo, 4: Severo impacto negativo, 5: Alto impacto negativo



Foto 16. Camino entre el sitio arqueológico y el abra de Runkurakay recorrido por varios turistas.

aplicado para cada tramo y la ciudad inca una matriz causa-efecto (Cuadros 7 al 11) que valoriza las interrelaciones de cada variable con cada factor ambiental. Estas valorizaciones están sustentadas en medidas cuantitativas que consideran un único valor, utilizando para ello una escala de valoración relativamente abstracta de fácil interpretación. Así, en la vertical, en procesos naturales y acciones antrópicas, se han priorizado los procesos naturales que ocurren en el camino con mayor frecuencia, así como las actividades antrópicas de mayor relevancia negativa, versus los factores ambientales impactados. Luego se utilizó una escala de valores de 1 a 5, que va desde bajo a alto impacto negativo. Esto nos ha servido para valorizar cuantitativamente la relación entre procesos naturales-acciones antrópicas y los factores ambientales impactados. Finalmente se sumaron los valores en la vertical y horizontal, habiéndose considerado para el análisis del camino inca la sumatoria de ≥ 60 para los factores ambientales impactados, ≥ 40 para los fenómenos geodinámicos y ≥ 53 para las actividades antrópicas. En el análisis de agregación de resultados para la ciudad inca se ha considerado el intervalo de ≥ 46 para los factores ambientales impactados, ≥ 38 para los fenómenos geodinámicos y ≥ 43 para las actividades antrópicas.

Tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba (Cuadro 7)

En orden de importancia los factores ambientales más impactados son: deterioro de los suelos (69), estabilidad de taludes (66), seguridad de sitios arqueológicos (63), alteración de rasgos físicos singulares (63), disminución de vistas escénicas y

panorámicas (62) y pérdida de cobertura vegetal (62). Los fenómenos geodinámicos que causan más impactos en los elementos ambientales son: aluviones (61), deslizamientos (52), erosión fluvial (52), erosión superficial (51), derrumbes (48) y desprendimiento de rocas (42). Las actividades antrópicas que causan más impactos en los elementos ambientales son: construcciones e instalación de postes (55), deforestación (54), introducción de flora y fauna exóticas (54), instalación y actividades en áreas de camping (54), excesiva capacidad de carga (54), incendios (53) y generación de residuos (53). La deforestación, la generación de residuos sólidos y la excesiva capacidad de carga se presentan a lo largo de todo el camino inca.

El turismo y la presencia de varios sitios arqueológicos ejercen un fuerte impacto negativo sobre los suelos, ya que en este tramo se unen otros dos caminos incas: uno que viene de Chilca y otro de Mollepata. En este tramo también ejerce un fuerte impacto ambiental en el paisaje la presencia de bosques exóticos de eucaliptos y torres de conducción eléctrica, así como las acémilas que erosionan los suelos de las laderas y especialmente del camino inca (Fotos 17 y 18). La deforestación y la ocurrencia de incendios se deben a las actividades antrópicas del turismo y de las poblaciones de Qoriwayrachina y Wayllabamba.

Otra variable que recibe impacto es la estabilidad de los taludes debido a que el valle del río Kusichaca es relativamente estrecho y sus aguas ejercen constante erosión (Foto 14). Esta acción del río produce la activación o reactivación de otros fenómenos geológicos como los deslizamientos, debido al tipo de suelo poco resistente, la presencia de roca muy alterada y fracturada, las pendientes empinadas y además las abundantes precipitaciones.

Tramo Wayllabamba-Pacaymayo (Cuadro 8)

Los factores ambientales más impactados, en orden de importancia, son: deterioro de los suelos (69), estabilidad de taludes (67), alteración de rasgos físicos singulares (65), seguridad de sitios arqueológicos (64), disminución de vistas escénicas y panorámicas (63), pérdida de terrenos (63) y pérdida de cobertura vegetal (62). Los fenómenos geodinámicos que causan más impactos en los elementos ambientales son: aluviones (59), erosión fluvial (55), deslizamientos (52), erosión superficial (51), derrumbes (44) y desprendimiento de rocas (42). Las actividades antrópicas que más impactos causan en los elementos ambientales son: instalación y actividades en áreas de camping (57), deforestación (55), introducción de flora y fauna exóticas (55), construcciones e instalación de postes (55), excesiva capacidad de carga (54) e incendios (53).

Las actividades antrópicas influyen en el deterioro de los suelos del camino inca o sus laderas, ya sea debido a las actividades turísticas o de los pobladores de las comunidades de Wayllabamba. Otro aspecto muy negativo es la existencia de dos áreas de camping situadas en un valle muy estrecho, que se hace inestable debido a

Cuadro 8. Evaluación de impacto ambiental en el tramo Wayllabamba-Pacaymayo.

PROCESOS NATURALES Y ACCIONES ANTRÓPICAS FACTORES AMBIENTALES IMPACTADOS		Fenómenos Geodinámicos										Actividades Antrópicas									
		Deslizamiento	Derrumbe	Aluvión	Erosión fluvial	Desprendimiento de rocas	Erosión superficial	Reptación	Asentamiento-sufusión	Introducción de flora y fauna exótica	Instalación de camping	Incendios	Generación de residuos sólidos	Construcciones e instalaciones de postes	Deforestación	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	Excesiva capacidad de carga				
MEDIO GEOFISSICO	Sistema ambiental	Elementos o atributos																			
	Suelo	4	4	5	5	2	5	4	3	5	4	4	5	5	4	5	4	5			
	agua	3	3	4	4	2	4	3	3	4	5	2	5	4	3	3	4				
		4	3	5	4	1	2	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3				
		1	1	1	2	1	4	1	1	4	5	1	5	5	2	1	5				
	Flora	4	3	4	4	4	4	2	2	5	5	5	4	4	5	3	4				
		3	2	4	3	2	3	1	1	5	4	4	4	3	5	2	3				
	Fauna	4	2	4	4	2	4	3	1	4	4	5	4	4	5	3	4				
		3	2	3	3	2	3	2	1	4	3	4	4	4	4	1	3				
	Geología	5	4	5	5	4	4	4	4	4	4	5	2	4	5	4	4				
MEDIO SOCIO ECON Y CULTURAL	Paisaje	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	5	4	5	4	3	4				
		4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	3	4				
	Usos suelo	4	3	5	5	4	4	4	3	4	4	4	5	4	4	3	3				
Recreo	5	5	5	4	5	3	3	4	3	4	5	1	1	4	4	4					
Cultural	4	4	5	4	5	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4					
SUMA		52	44	59	55	42	51	39	34	55	57	53	52	55	55	39	54				

Escala de valores

1: Bajo impacto negativo, 2: Ligero impacto negativo, 3: Moderado impacto negativo, 4: Severo impacto negativo, 5: Alto impacto negativo

la deforestación de vegetación nativa, utilizada como leña para fogatas. Además, los cortes de talud para la construcción de terrazas, ampliación de áreas de camping y construcción de servicios higiénicos alteran el paisaje (Foto 19). En una parte de este tramo todavía se utilizan acémilas como medio de transporte de carga, y ellas también intervienen en la destrucción del camino inca.

Otra problema es la erosión que ejerce el río Lulluchayoc sobre las laderas de la quebrada, siendo uno de los principales agentes de inestabilidad de taludes y que muchas veces provoca derrumbes. En parte de este tramo afloran rocas y suelos poco resistentes y poco compactos, que los hacen muy inestables y propensos a la aparición de otros fenómenos geodinámicos. A esto se suma la pendiente moderada al pie de las montañas y muy empinada en la cima, las fuertes precipitaciones y las acciones relacionadas a las actividades antrópicas. Finalmente, la zona de camping en la parte alta del valle Lulluchayoc es también peligrosa pues está al pie de conos de escombros antiguos que pueden reactivarse y producir caída de bloques de granitos, tal como se ve actualmente (Foto 20). Por otro lado, en la vertiente suroeste de Pacaymayo, sobre un relieve bastante abrupto, existe un derrumbe que produce caída de rocas, con bloques cuyo diámetro supera el metro. El año 1994 este derrumbe se reactivó (Foto 13) y grandes bloques de roca cayeron sobre la zona de camping. El fenómeno está relacionado con el fracturamiento de las rocas en una ladera ya desestabilizada, y por lo tanto la caída de rocas continuará.

Tramo Pacaymayo-Phuyupatamarca (Cuadro 9)

En orden de importancia, los factores ambientales más impactados son: estabilidad de taludes (67), seguridad de sitios arqueológicos (67), deterioro de los suelos (65), disminución de vistas escénicas y panorámicas (64), alteración de rasgos físicos singulares (64) y pérdida de cobertura vegetal (60). Los fenómenos geodinámicos que causan más impactos en los elementos ambientales son: erosión superficial (55), derrumbes (48), reptación (48), asentamiento/sufusión (46), deslizamientos (45), desprendimiento de rocas (40) y erosión fluvial (40). Las actividades antrópicas que causan más impactos en los elementos ambientales son: incendios (55), deforestación (55), instalación y actividades en áreas de camping (55), generación de residuos sólidos (53), excesiva capacidad de carga (53) e introducción de flora y fauna exóticas (53).

Los factores ambientales mas impactados corresponden al deterioro del suelo e inestabilidad de taludes a lo largo del camino inca, esto debido a los cortes de talud con el fin de ampliar la plataforma del camino. Otro factor ambiental impactado es la seguridad de los sitios arqueológicos, ya que en este tramo se encuentran Runkurakay, Sayaqmarka y Qonchamarca, así como el camino con lajas originales y terraplenes artificiales incas, que están expuestos a la erosión y destrucción, ya sea natural o antrópica. El fenómeno geodinámico que afecta más este tramo es la erosión superficial, favorecida por la escasa cobertura vegetal propia de la zona

Cuadro 9. Evaluación de impacto ambiental en el tramo Pacaymayo-Phuyupatamarca.

PROCESOS NATURALES Y ACCIONES ANTRÓPICAS		Fenómenos Geodinámicos										Actividades Antrópicas									
Sistema	Componente ambiental	Elementos o atributos	Deslizamiento	Derrumbe	Aluvión	Erosión fluvial	Desprendimiento de rocas	Erosión superficial	Replación	Asentamiento-sufusión	Introduce, de flora y fauna exótica	Instalac. y actividades, en áreas de camping	Incendios	Generación de residuos sólidos	Construcciones e Instalac. de postes	Deforestación	Accesos y sitios arqueológicos nuevos	Excesiva capacidad de carga	SUMA		
MEDIO GEOBIOSICO	Suelo	Deterioro de los suelos	3	4	3	3	2	5	4	4	5	4	5	5	4	5	4	5	5	65	
	agua	Superficial-subterránea	3	3	3	3	2	4	3	3	4	4	2	4	4	3	3	3	4	52	
		caudal	3	3	3	2	1	2	1	1	1	3	1	2	2	1	1	1	3	30	
		Calidad	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	4	1	5	4	2	1	4	36	
	Flora	Pérdida de cobertura vegetal	3	4	3	3	3	4	3	2	2	5	5	5	4	4	5	3	4	60	
	Pérdida de diversidad	3	3	3	3	2	3	2	2	2	4	4	4	4	3	5	2	3	50		
	Fauna	Alteración del hábitat	3	3	3	3	3	4	3	2	4	4	5	4	4	5	3	4	57		
	Disminución de población	3	2	2	3	2	4	2	2	2	3	3	4	4	3	4	2	3	46		
	Geología	Estabilidad de taludes	4	5	3	3	4	5	4	5	4	4	5	3	5	5	4	4	67		
	Paisaje	Disminución de vistas escénicas y panorámicas	4	4	3	3	3	4	5	5	4	4	5	4	5	4	3	4	64		
MEDIO SOCIO ECON. Y CULTURAL		Alteración de rasgos físicos singulares	4	4	3	4	4	4	5	5	4	4	4	4	5	4	3	3	64		
	Usos suelo	Pérdida de terrenos	3	3	2	3	3	4	5	4	4	4	4	5	4	4	3	3	58		
	Recreo	Seguridad física áreas camping	4	5	2	3	5	4	5	5	3	4	5	1	1	4	4	4	59		
	Cultural	Seguridad de sitios arqueológico (caminos, andenes, recintos, etc)	4	4	3	3	5	4	5	5	4	4	5	4	4	4	4	5	67		
SUMA			45	48	37	40	40	55	48	46	53	55	55	53	52	55	40	53	53		

Escala de valores

1: Bajo impacto negativo, 2: Moderado impacto negativo, 3: Moderado impacto negativo, 4: Severo impacto negativo, 5: Alto impacto negativo



Foto 17. Bosque de eucaliptos y torres de alta tensión en el tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba.



Foto 18. Uso de acémilas en el tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba.



Foto 19. Zona de camping en Wayruro, tramo Wayllbamba-Pacaymayo.



Foto 20. Cono aluvial y caída de rocas cerca del abra de Warmiwañusqa.

(Foto 21). En el intervalo Sayaqmarka-Phuyupatamarca, la cobertura vegetal es mucho mayor, pero con suelos de pequeño espesor que descansan sobre granitos fracturados e intemperizados, razón por la cual es afectado por fenómenos geodinámicos de movimiento lento y de pequeña dimensión como reptaciones y derrumbes, que pueden provocar la pérdida de suelos o su deterioro. En este último trecho también se ha observado que las rocas graníticas, además de estar muy fracturadas, se encuentran muy intemperizadas y en proceso de arenación (Foto 21) debido a factores geológicos y climatológicos. Otro fenómeno que afecta el camino inca es la sufusión (Foto 15), que se acentúa por las fuertes precipitaciones, la excesiva capacidad de carga que soporta el camino y también porque los visitantes utilizan para sus caminatas zapatos con plantas no recomendables y en otros casos bastones en punta que ocasionan daños en el empedrado del camino. Estos problemas se agravan por la falta de drenaje y mantenimiento constante del camino. Una medida muy importante en estos últimos años es el cierre del camino inca en el mes de marzo, que podría ampliarse a toda la temporada de lluvias intensas. Las actividades antrópicas toman un protagonismo negativo en el caso de los incendios, como el último registrado en 1997 y que afectó una parte del camino y de la ciudad inca. Los incendios tienen mayor impacto negativo en el medio ambiente, ya que se pierde la cobertura vegetal nativa (Foto 7) y también la fauna silvestre, o se altera su hábitat al reducirse sus espacios de residencia. Otras causas no menos importantes son las actividades realizadas por la excesiva cantidad de visitantes y consecuentemente el aumento de la generación de residuos sólidos y de la deforestación, que incide en el deterioro del suelo, la pérdida de terrenos y la cobertura vegetal, que son condiciones que aceleran la formación de los fenómenos geodinámicos. En la laguna Chaquicocha se construyeron baños que rompen el esquema natural de la zona y disminuyen las vistas escénicas y panorámicas (Foto 22). Si bien es cierto que estos servicios son importantes, debieron ser construidos de manera camuflada en zonas adyacentes y rodeados de la vegetación nativa.

Tramo Phuyupatamarca-Ciudad Inca de Machupicchu (Cuadro 10)

Los factores ambientales más impactados, en orden de importancia, son: deterioro de los suelos (70), estabilidad de taludes (70), disminución de vistas escénicas y panorámicas (69), alteración de rasgos físicos singulares (69), seguridad de sitios arqueológicos (69), pérdida de cobertura vegetal (62) y pérdida de terrenos (60). Los fenómenos geológicos que causan más impactos en los elementos ambientales son: deslizamientos (57), erosión superficial (51), derrumbes (51), desprendimiento de rocas (48), asentamiento-sufusión (45), reptación (44), erosión fluvial (41) y aluviones (40). Las actividades antrópicas que causan más impactos en los elementos ambientales son: incendios (58), construcciones e instalación de postes (56), introducción de flora y fauna exóticas (56), instalación y actividades en áreas de camping (56), deforestación (55), exceso de capacidad de carga (55) y generación de residuos (53).

Este tramo es uno de los más bellos por sus características naturales y arqueológicas; cualquier acción negativa que se realice en él incidirá principalmente en el deterioro de los suelos por su espesor pequeño y en la inestabilidad de los taludes (derrumbes y desprendimiento de rocas). Además, para ampliar el camino actual se suele hacer cortes de talud o extraer bolones de roca, lo que resulta en laderas muy inestables, pero gracias a la cobertura vegetal el impacto es mucho menor. Buena parte de este tramo está constituido por gradas, y los visitantes están obligados a transitar en grupos guiados y el transporte de sus pertenencias está a cargo de los llamados “wayruros”, que suelen llevar peso por encima de los 20 kg permitidos; esto provoca la destrucción progresiva de los peldaños (Foto 8) y en consecuencia favorece la inestabilidad del lugar. Por otra parte, las laderas están expuestas a fenómenos geodinámicos debido a las pendientes empinadas, la ocurrencia de incendios, las construcciones de plataformas para viviendas o las ampliaciones de áreas de camping, las altas precipitaciones, los suelos de pequeño espesor y los granitos fracturados e intemperizados.

Wiñaywayna es un sitio arqueológico de importancia dentro del Camino Inca Tradicional, sin embargo, es una de las zonas con mayor intervención antrópica en espacios reducidos y con ladera empinada. Cerca del grupo arqueológico Wiñaywayna se encuentran un museo, un hotel, locales y campamentos del INC e INRENA, viviendas informales, así como torres eléctricas y antenas, sin olvidar las zonas de camping y los baños. Estas construcciones han sido realizadas sin planificación previa y en consecuencia sin criterios paisajísticos acordes con el santuario histórico natural y patrimonio de la humanidad.

Intipunku y el cerro Machupicchu son la antesala a la ciudad inca. Sin embargo, la ladera norte, por donde pasa el camino inca, está afectada por un deslizamiento de grandes dimensiones, que fue estabilizado por los incas con andenes en algunas partes. 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 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. Como ejemplo presentaremos dos eventos geodinámicos que se produjeron en la zona.

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 (Foto 23) y originó la caída de bloques de hasta más de 70 toneladas, que rodaron pendiente abajo afectando la carretera en varios tramos (Fig 11, Cap. 1). En los alrededores del hotel de turistas se ven varias escarpas de deslizamientos menores, dentro del deslizamiento mayor del cerro Machupicchu, de



Foto 21. Erosión superficial y proceso de arenación entre Chaquicocha y el Túnel.



Foto 22. Sector Laguna Chaquicocha con construcciones (izquierda) que rompen el paisaje natural.

ellos uno se localiza encima del hotel y llega casi hasta el camino inca, tiene una longitud de 100 m y talud de 50° (Foto 24). El hotel fue construido sobre la masa deslizada, en la parte posterior tiene un muro de contención y más arriba se ven andenes incas. Un antiguo canal capta las aguas subterráneas situadas en la parte posterior del hotel y las llevan a la ciudad inca. En diciembre de 1995 estos canales funcionaban parcialmente y parte del agua se infiltraba a la masa deslizada. En consecuencia, 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 favorecidas 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.

El 30 de marzo del 2006 se produjo un derrumbe que causó la caída de rocas en el cerro Machupicchu a la altura de Intipunku, afectando parte del camino (Fig. 11 Cap. 1 o 2) que, en este tramo, es el único paso directo para llegar a la ciudad desde Wiñaywayna. Un estudio geológico, llevado a cabo inmediatamente después del fenómeno, recomendó la prohibición del paso de los turistas hasta que se realicen los arreglos necesarios; esta interrupción duró más de dos meses (Cárdenas et al., 2006b). Como medida de seguridad e integridad física, los visitantes fueron desviados hacia el kilómetro 107, es decir bajando por la quebrada Choquesuysuy hasta llegar al río Urubamba y luego hacia la localidad de Aguas Calientes, para finalmente subir en bus a la ciudad inca de Machupicchu. Este hecho creó malestar entre los visitantes y las agencias de turismo.

El derrumbe ocurrió aproximadamente a las 11:30 p.m. e involucró bloques de granitos y material coluvial, lo que provocó el colapso de 23 m del camino inca cerca de Intipunku, a 2675 msnm (Foto 25). Desde el camino hacia la corona del derrumbe (pendiente arriba) existe una longitud de 160 metros, siendo el ancho del fenómeno de 50 m. En la escarpa o corona, lugar donde empezó el derrumbe, existían grietas milimétricas a centimétricas en el material coluvial que incluye los bloques de granito; luego del derrumbe, bloques de roca y gravas llegaron inclusive hasta el quinto zigzag del camino Hiram Bingham (2270 msnm) (Foto 26), y afectó también 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: 15 días antes del derrumbe se produjeron precipitaciones en la región de 10 a 48 mm por día.

Ciudad Inca de Machupicchu (Cuadro 11)

Los factores ambientales más impactados en la ciudad inca, en orden de importancia, son: seguridad de sitios arqueológicos (59), estabilidad de taludes



- ■ ■ Deslizamiento antiguo
- Derrumbe-caída de rocas 1995

Foto 23. Hotel construido en la masa de un deslizamiento. En la parte frontal se reactivó un derrumbe el año 1995.



Foto 24. Derrumbe ocurrido el 26 de diciembre de 1995 y que interrumpió la carretera de acceso a la ciudad inca.

(59), deterioro de los suelos (55), disminución de vistas escénicas y panorámicas (53), pérdida de cobertura vegetal (51) y pérdida de terrenos (46). Los fenómenos geodinámicos que causan más impactos en los elementos ambientales son: asentamiento-sufusión (40), reptación (40), erosión de laderas (39), derrumbes (38) y deslizamientos (38). Las actividades antrópicas que causan más impactos en los elementos ambientales son: la construcción y ampliación del hotel e instalación de postes (47), introducción de flora y fauna exótica (46), generación de residuos (46), incendios (44) y excesiva capacidad de carga (43).

Se cree que en las próximas décadas el turismo hacia Cusco aumentará aproximadamente de medio millón hasta un millón y medio o dos millones de personas. La ciudad inca tiene aproximadamente una capacidad de carga máxima de 912,500 visitantes al año (2,500 día), de los cuales 175,000/año (500/día) corresponden a los que arriban por los caminos incas. La demanda turística puede incrementarse hasta 4 mil o 5 mil visitantes por día, lo que obliga a que se adopten medidas inmediatas con previsiones insoslayables (Plan Maestro Machupicchu, 2005). En consecuencia, la ciudad inca de Machupicchu es uno de los monumentos históricos más visitados por turistas nacionales y extranjeros. Por ser considerada como patrimonio de la humanidad debe ser conservada para las futuras generaciones, razón por la cual es muy importante la seguridad física de este sitio frente a las agresiones diarias del clima y el agua, que influyen en la inestabilidad de las laderas y, por consiguiente, de los sitios arqueológicos.

Esta ciudad fue intervenida, desde la época incaica, con las construcciones de recintos y andenes con piedras labradas sobre la cima de una montaña de granitos muy fracturados e intemperizados, donde domina el caos granítico. Como se vio en el capítulo 2, los incas estabilizaron el caos mediante andenes y construyeron un sistema de drenaje para evacuar adecuadamente las aguas y evitar los asentamientos y los deslizamientos superficiales. Además, en las laderas más bajas y adyacentes a la ciudad inca, existen coberturas de suelo de pequeño espesor o suelos coluviales pertenecientes a antiguos deslizamientos o derrumbes, que se vuelven inestables debido a muchos factores y se activan con movimientos muy lentos (reptaciones) o violentos (derrumbes y caída de rocas), especialmente en la época de lluvias. Los incas controlaron también estos suelos mediante andenes o la construcción de plataformas por corte y relleno de materiales de suelo y roca, pero la falta de medidas preventivas y correctivas han favorecido el deterioro de algunos andenes y recintos incas en desmedro del paisaje arqueológico.

A la presencia de peligros geodinámicos que afectan los restos arqueológicos de la ciudad inca, se añade la coexistencia de flora exótica (gramíneas) y gusanos que se alimentan del mortero existente entre las piedras labradas de las construcciones, creándose así inestabilidad en los muros y sus cabeceras. Otro problema paisajístico es la presencia de construcciones de concreto en el control de acceso que pertenece al INC y en el hotel de turistas que rompen el esquema natural y arqueológico de la ciudad inca. Todos estos problemas se acentúan por la

presencia de aguas superficiales pues los drenajes incas no funcionan por falta de trabajos de recuperación y restauración, y también debido a que las construcciones carecen ahora de techos, lo que incide en la activación o reactivación de peligros geodinámicos, principalmente los asentamientos y deslizamientos.

Resumen y conclusiones de los factores ambientales en el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu

En los cuadros 12, 13 y 14 se presentan los resúmenes de los factores ambientales impactados, las actividades antrópicas y los fenómenos geodinámicos. Estas matrices de color para el Camino Inca Tradicional muestran que los medios más impactados están relacionados al deterioro de los suelos, la estabilidad de taludes y la seguridad de los sitios arqueológicos, y enfatizan la importancia de conservar el medio natural y cultural (Cuadro 12). Por otra parte, se ha identificado que las actividades antrópicas que ejercen mayor impacto son las construcciones de infraestructura e instalación de torres eléctricas, deforestación e incendios forestales, que influyen en el impacto negativo del paisaje de belleza escénica, de seguridad y salud (Cuadro 13). Existen fenómenos geodinámicos característicos de cada tramo, pero otros son comunes, como la erosión superficial, los aluviones, los deslizamientos, los asentamientos, los derrumbes, las reptaciones y la erosión fluvial (Cuadro 14). Por otro lado, en el caso de la ciudad inca, las matrices de color indican que los factores ambientales más impactados están principalmente relacionados con la seguridad de los sitios arqueológicos y la estabilidad de los taludes. Las actividades antrópicas que tienen mayor impacto son la construcción de infraestructura e instalación de postes, la introducción de flora exótica y la generación de residuos sólidos. Los fenómenos geodinámicos que tienen más impacto en la ciudad son los asentamientos relacionados con la sufusión, reptación, erosión superficial, los derrumbes y los deslizamientos superficiales.

Estos fenómenos deben ser tomados en cuenta en las medidas de mitigación y prevención programadas, primero para la seguridad de los visitantes, y luego para la conservación de los sitios arqueológicos y naturales.

Cuadro 11. Evaluación de impacto ambiental de la Ciudad Inca de Machupicchu.

PROCESOS NATURALES Y ACCIONES ANTRÓPICAS		Fenómenos Geodinámicos										Actividades Antrópicas																
Sistema	Componente ambiental	Elementos o atributos	Deslizamiento			Derrumbe			Desprendimiento de rocas			Erosión de laderas			Reptación			Asentamiento-sufusión			Introducc. de flora exótica	Incendios	Generación de residuos sólidos	Construcción de hotel e instalación de postes	Accesos y restos arqueológicos nuevos	Excesiva capacidad de carga	SUMA	
			Deslizamiento	Derrumbe	Desprendimiento de rocas	Erosión de laderas	Reptación	Asentamiento-sufusión	Introducc. de flora exótica	Incendios	Generación de residuos sólidos	Construcción de hotel e instalación de postes	Accesos y restos arqueológicos nuevos	Excesiva capacidad de carga														
MEDIO GEO-BIÓFISICO	Suelo	Deterioro de los suelos	4	4	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	55	
	agua	Superficial-subterránea	3	3	1	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	42
	Flora	Calidad	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	28
		Pérdida de cobertura vegetal	4	4	3	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	51
		Pérdida de diversidad	4	4	2	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	44
MEDIO SOCIO ECON. Y CULTURAL	Fauna	Alteración del hábitat	3	3	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	45
	Geología	Estabilidad de taludes	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	59
	Paisaje	Disminución de vistas escénicas y panorámicas	5	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	53
	Usos suelo	Pérdida de terrenos	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	46
	Cultural	Seguridad de sitios arqueológico (caminos, andenes, recintos, etc)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	59
SUMA			38	38	27	39	40	40	40	40	40	46	44	46	44	46	46	47	47	47	47	47	47	47	47	47	43	

Escala de valores

1: Bajo impacto negativo, 2: Ligero impacto negativo, 3: Moderado impacto negativo, 4: Severo impacto negativo, 5: Alto impacto negativo.



Foto 25. Derrumbe que afectó el camino inca cerca de Intipunku en marzo de 2006.

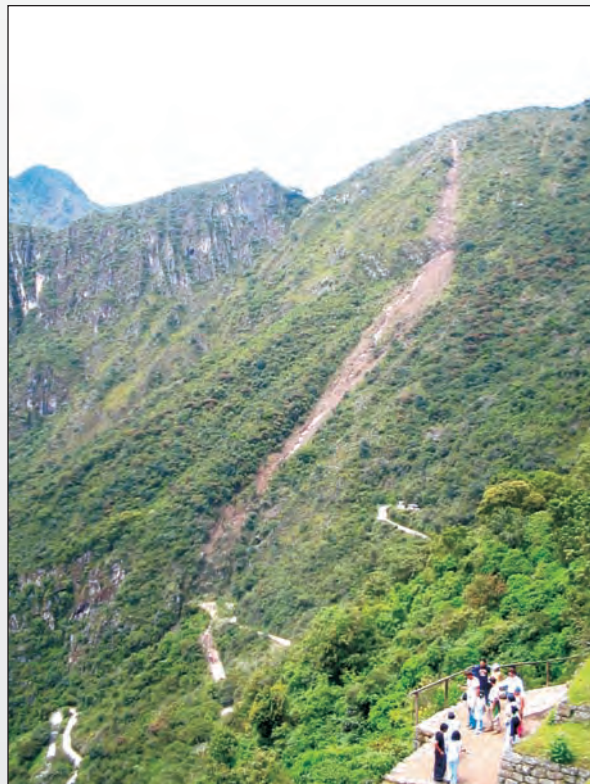


Foto 26. Vista panorámica del derrumbe de marzo de 2006 que llegó hasta la carretera de acceso.

Cuadro 12. Resumen de factores ambientales impactados en el Camino Inca Tradicional y la ciudad inca de Machupicchu

Tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba	Tramo Wayllabamba-Pacaymayo	Tramo Pacaymayo-Phuyupatamarca	Tramo Phuyupatamarca-ciudad inca	Ciudad inca
Deterioro de los suelos	Deterioro de los suelos	Estabilidad de taludes	Deterioro de los suelos	Seguridad de sitios arqueológicos
Estabilidad de taludes	Estabilidad de taludes	Seguridad de sitios arqueológicos	Estabilidad de taludes	Estabilidad de taludes
Seguridad de sitios arqueológicos	Alteración de rasgos físicos singulares	Deterioro de los suelos	Seguridad de sitios arqueológicos	Deterioro de los suelos
Alteración de rasgos físicos singulares	Seguridad de sitios arqueológicos	Alteración de rasgos físicos singulares	Alteración de rasgos físicos singulares	Disminución de vistas escénicas y panorámicas
Disminución de vistas escénicas y panorámicas	Pérdida de terrenos	Disminución de vistas escénicas y panorámicas	Disminución de vistas escénicas y panorámicas	Pérdida de cobertura vegetal
Pérdida de cobertura vegetal	Disminución de vistas escénicas y panorámicas	Pérdida de cobertura vegetal	Pérdida de cobertura vegetal	Pérdida de terrenos

Cuadro 13. Resumen de actividades antrópicas en el Camino Inca Tradicional y ciudad inca de Machupicchu

Tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba	Tramo Wayllabamba-Pacaymayo	Tramo Pacaymayo-Phuyupatamarca	Tramo Phuyupatamarca-ciudad inca	Ciudad inca
Construcción de infraestructura e instalación de postes	Instalaciones y actividades en áreas de camping	Incendios	Incendios	Construcción de infraestructura e instalación de postes
Deforestación	Deforestación	Deforestación	Construcción de infraestructura e instalación de postes	Introducción de flora y fauna exóticas
Introducción de flora y fauna exóticas	Introducción de flora y fauna exóticas	Instalación y actividades en áreas de camping	Instalación y actividades en áreas de camping	Generación de residuos sólidos
Instalación y actividades en áreas de camping	Construcción de infraestructura e instalación de postes	Introducción de flora y fauna exóticas	Introducción y actividades en áreas de camping	Generación de residuos sólidos
Excesiva capacidad de carga	Excesiva capacidad de carga	Excesiva capacidad de carga	Deforestación	Excesiva capacidad de carga
Incendios	Incendios	Generación de residuos sólidos	Excesiva capacidad de carga	

Cuadro 14. Resumen de fenómenos geodinámicos en el Camino Inca Tradicional y en la ciudad inca de Machupicchu

Tramo Qoriwayrachina-Wayllabamba	Tramo Wayllabamba-Pacaymayo	Tramo Pacaymayo-Phuyupatamarca	Tramo Phuyupatamarca-ciudad inca	Ciudad inca
Aluvión	Aluvión	Erosión superficial	Deslizamiento	Asentamiento-sufusión
Deslizamiento	Erosión fluvial	Derrumbe	Erosión superficial	Reptación
Erosión fluvial	Deslizamiento	Reptación	Derrumbe	Erosión superficial
Erosión superficial	Erosión superficial	Asentamiento- sufusión	Desprendimiento de rocas	Derrumbe
Derrumbe	Derrumbe	Deslizamiento	Asentamiento-sufusión	Deslizamiento
Desprendimiento de rocas	Desprendimiento de rocas	Desprendimiento de rocas	Reptación	

MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y PREVENCIÓN

Las medidas de mitigación y/o prevención que deben tomarse en cuenta se relacionan con las variables impactadas a lo largo del Camino Inca Tradicional y se presentan a continuación. En el caso específico de la ciudad inca de Machupicchu, ellas han sido ampliamente abordadas en el capítulo 3.

Para el deterioro de los suelos

La primera medida propuesta es limitar la capacidad de carga, es decir, el número de turistas que pueden ingresar diariamente al camino inca. Actualmente se ha restringido el paso a 500 turistas por día, aunque las agencias de turismo presionan para elevar el número; si se aceptan estos pedidos el camino sufriría mayor deterioro. Asimismo, se debe prohibir el arrojado de residuos sólidos, porque afectan a los suelos y también a la fauna y flora; los residuos generados deben ser transportados por los turistas hasta finalizar el trayecto. Si bien existen dispositivos, estos no se cumplen porque no existe una cultura de conservación en la mayoría de los involucrados. Otra medida consiste en prohibir la cría de ganado vacuno y el uso de acémilas en las áreas correspondientes al camino inca, aunque esto es muy difícil en el primer tramo, ya que el camino es también un medio de acceso para las poblaciones de la zona. Deben evitarse también las fugas de aguas de los canales, ya que forman cárcavas y afectan al camino. Otra medida importante es la construcción y/o restauración de drenes longitudinales y transversales al camino

para evitar la erosión por efectos del agua. Finalmente, se deben definir mejor las áreas para camping, de acuerdo a la capacidad de carga y los peligros geológicos.

Para la estabilidad de taludes

En este caso se plantea reforestar las laderas y los taludes del camino con especies nativas y también evitar el corte de taludes durante la refacción del camino, así como en las laderas donde se ubican las áreas para camping. Igualmente, se debe evitar la tala de árboles y cortes exagerados de la flora, especialmente durante los trabajos de mantenimiento del camino. Además, se deben hacer planes para evitar los incendios que son los que más inciden en la aparición de movimientos en masa. Asimismo, las obras de drenaje en laderas y caminos son importantes para evitar la circulación libre del agua. Por otro lado, en zonas de caos granítico o granitos muy fracturados se debe desquinchar y/o estabilizar los bloques de rocas inestables en las zonas de peligro. También se debe controlar la erosión de los ríos y la reptación de suelos con la construcción de muros de contención o la rehabilitación de los que existen desde tiempos incas. En algunos casos, como en Pacaymayo o Lulluchapampa cerca del abra de Warmiwañusqa, existen sitios con caída o desprendimiento de rocas y deben ser zonificados para definir exactamente las áreas de camping. Finalmente, se debe contar con planes de emergencia y contingencia en caso de ocurrencia de desastres relacionados con los peligros geológicos.

Para mejorar las vistas escénicas y panorámicas

Es necesario realizar una evaluación de impacto ambiental para la construcción de viviendas, casetas, servicios higiénicos, etc. Por ejemplo, en áreas con bello paisaje de los sectores de Yuncachimpa, Lulluchapampa, Warmiwañusqa, Chaquicocha y Wiñaywayna, se han construido servicios higiénicos que han disminuido las vistas escénicas y panorámicas naturales. También, se debe reforestar las áreas incendiadas y afectadas por los deslizamientos. Finalmente, se deben recoger los residuos sólidos.

Para mitigar la alteración de rasgos físicos singulares

Se debe evitar la instalación de objetos ajenos a la condición natural y arqueológica de la región, como por ejemplo, torres de alta tensión, construcción de hoteles y servicios higiénicos; las construcciones deben estar camufladas en el paisaje y aprovechar la vegetación. Asimismo se debe tratar adecuadamente las áreas con problemas geodinámicos para evitar la erosión de las bordes de ríos y quebradas.

Para la seguridad de los sitios arqueológicos

Se debe prohibir que los visitantes pisen las cabeceras de muro en los centros arqueológicos porque dañan las estructuras. Se debe seguir dando mantenimiento

constante al camino, refaccionando o construyendo sistemas de drenaje e impermeabilizando pisos. Finalmente, se debe poner señalizaciones de acuerdo al entorno natural.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los fenómenos geodinámicos que afectan al Camino Inca Tradicional son: erosión superficial, derrumbes, deslizamientos, desprendimiento de rocas, reptaciones, aluviones, erosión de ríos, asentamientos y sufusión. Estos fenómenos, casi todos relacionados a los efectos del agua, han sido y continúan siendo la causa de la destrucción parcial o total de algunos sectores del camino. En general, los fenómenos geodinámicos son de pequeña dimensión, intensidad baja y ocurrencia baja, siendo predominante la sensibilidad mediana. A partir de las características geológicas, geodinámicas y otras similares, se ha agrupado el camino en 15 zonas, para así determinar su grado de peligrosidad y poderlas tratar y conservar. El mayor número de zonas tiene peligro medio, siendo de peligro alto el tramo que atraviesa el cerro Machupicchu, donde existe un deslizamiento de tamaño grande, destructivo y de ocurrencia alta.

De las matrices de evaluación de impacto ambiental se concluye que los factores ambientales más impactados en el camino inca están relacionados con el deterioro de los suelos, la estabilidad de los taludes y la seguridad de los sitios arqueológicos. Las actividades antrópicas que tienen mayor impacto son los incendios, y en segundo lugar las construcciones e instalación de postes, deforestación e instalación y actividades en áreas de camping. Los fenómenos geológicos están caracterizados para cada tramo y los más importantes son los aluviones, los deslizamientos, la erosión superficial, los asentamientos, los derrumbes y la erosión fluvial. Las acciones comunes que impactan el medio ambiente son la generación de residuos sólidos, la deforestación y la excesiva capacidad de carga.

Las principales medidas correctivas recomendables son la restauración, refacción, construcción, reconstrucción y mantenimiento del camino inca, incluyendo los muros de contención, drenes, gradas y plataformas. Se debe considerar la estabilidad de los taludes evitando la tala y promoviendo la reforestación. Asimismo se debe controlar la erosión de los ríos y la reptación de suelos mediante muros de contención o la rehabilitación de los que existen desde tiempos incas. En lo posible, las obras tomarán en cuenta las técnicas incas que resultan menos costosas y casi siempre más eficaces. En base a la problemática descrita, las evaluaciones y recomendaciones realizadas, se debe regular la capacidad de carga del Camino Inca Tradicional, que de ninguna manera deberá exceder los 500 visitantes por día que ya se han establecido. Finalmente, se recomienda continuar con el monitoreo y la evaluación detallada de los fenómenos geodinámicos en el camino y alrededores, particularmente en las zonas de mayor peligro y que pueden incidir en la seguridad de los visitantes.

Referencias bibliográficas

Bustamante, F. (2000). Características de los peligros de geodinámica externa y su impacto en el sistema medio ambiental de la ciudad del Cusco-2000. Tesis de Maestría, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, 185 p.

Cárdenas, J. (2003). Geología, geodinámica, monitoreo, hipótesis de deslizamientos profundos de la ciudadela inca de Machu Picchu. Informe final de la auditoría ambiental de Machu Picchu-Contraloría General de la República, 85 p.

Cárdenas, J. (2005). Evaluación del impacto de los peligros de geodinámica externa en el Camino Inca Tradicional y ciudadela de Machu Picchu, Cusco-Perú, 2003-2004. Tesis de Maestría, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, 175 p.

Cárdenas, J., Carlotto, V. y Cano, V. (2004). Geología, geodinámica y monitoreos del Camino Inca de Machu Picchu. XII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú. Resúmenes Extendidos, p. 3-6.

Cárdenas, J., Carlotto, V., Flores, T., Cano, V. y Astete, F. (2006a). Peligros geológicos e impacto en el sistema mediambiental del Camino Inca Tradicional: Machupicchu. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú 101: 43-71.

Cárdenas, J., Carlotto, V. y Oviedo, M. (2006b). Caída de rocas-derrumbe sucedido el 30 de marzo del 2006 en el cerro Machu Picchu. Informe técnico presentado al INC-Cusco, 12 p.

Cárdenas, J., Carlotto, V., Flores, T. y Cano, V. (2006c). Impacto en el sistema medioambiental del Camino Inca Tradicional y Ciudadela Inca de Machu Picchu. XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú. Resúmenes Extendidos, p. 11-14.

Carlotto, V. y Cárdenas, J. (1996). Evaluación geológica del derrumbe del 26-12-95 en la carretera Puente Ruinas-Machupicchu y zonas aledañas. UNSAAC, Cusco, 11 p.

Carlotto, V., Cárdenas, J., Chávez, R., Pumayali, R. y Román, F. (1994). Estudio geológico y de conservación del Camino Inca de Machu Picchu. PNUD-UNESCO, Lima. 57 p.

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, Lima. 320 p.

Carlotto, V., Cárdenas, J., Tintaya, D., Acosta, H., Cano, V. e Ibarra, I. (2001). Evaluación geológica-geodinámica, de riesgo y conservación del Camino Inca a Machu Picchu. UNSAAC-Cusco, 26 p.

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.

Galiano, W. (2000). Situación ecológico-ambiental del Santuario Histórico de Machu Picchu: Una aproximación. Programa Machu Picchu. CBC Cusco, 105 p.

INGEMMET (1997). Álbum de mapas de zonificación de riesgos fisiográficos y climatológicos del Perú - Memoria descriptiva. Boletín 17, Serie C - Dirección de Geotecnia, Lima, 83 p.

INRENA (1998). Plan Maestro del Santuario Histórico de Machu Picchu. Lima, 350 p.

INC-INRENA (2005). Plan Maestro del Santuario Histórico de Machupicchu, 234 p.

Leopold, L. (1971). A procedure for evaluating environmental impacts. US Geological Survey Circular 645/1971. Washington, D.C.

Ochoa, J. y Trujillo, I. (2000). Caracterización biológica, ecológica y ambiental en la red de caminos inca del Santuario Histórico de Machu Picchu. Programa Machu Picchu. Cusco, 180 p.

2. GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA DEL CAMINO SAGRADO EN MACHUPICCHU

Martín Oviedo¹, Ronald Concha¹, Igor Astete¹, José Cárdenas¹,
Tomas Flores¹ y Víctor Carlotto^{1,2}

¹Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, martinoviedo@hotmail.com

²INGEMMET Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, vcarlotto@ingemmet.gob.pe

Introducción

La comunicación durante la época incaica se realizaba mediante una red de caminos incas que convergían en el Cusco, que era el centro de administración y gobierno del Tawantinsuyo. Los caminos llegaban a los centros ceremoniales, y uno muy importante fue la ciudad inca de Machupicchu que se ubica en la provincia de Urubamba, departamento de Cusco. El Camino Sagrado que conecta el sitio arqueológico de Chachabamba con la ciudad inca de Machupicchu forma parte de esta red de caminos. El Camino Sagrado empieza aproximadamente en el kilómetro 104 de la línea férrea Cusco-Machupicchu, en la margen izquierda del río Urubamba (2151 msnm); luego sigue por el sitio arqueológico Chachabamba (2171 msnm), posteriormente sube sobre la ladera norte del cerro Wiñaywayna hasta llegar al sitio arqueológico de Wiñaywayna (2680 msnm) (Fig. 1). Este camino se conecta con el Camino Inca Tradicional en el tramo Phuyupatamarca-ciudad inca de Machupicchu.

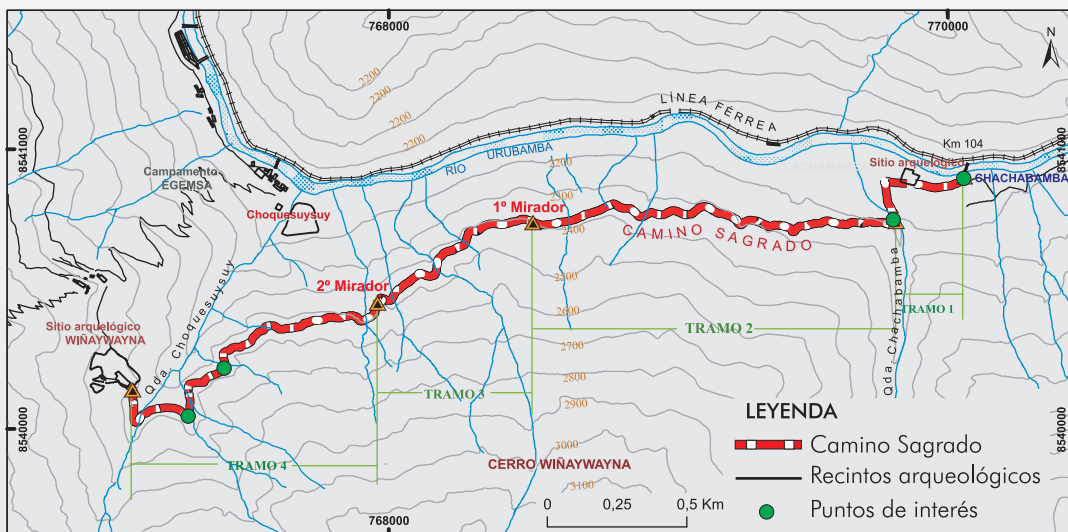


Fig. 1. Mapa de ubicación del Camino Sagrado.

El Camino Sagrado (Foto 1) es ofrecido al turismo de aventura para la realización de caminatas para los turistas que no disponen de tiempo para recorrer el Camino Inca Tradicional, o que no tienen las condiciones físicas para una caminata tan larga y de resistencia. Este camino se puede recorrer en un día o dos si consideramos el tramo Wiñaywayna-ciudad inca.

Considerando que el Camino Inca Tradicional es estudiado y monitoreado geológicamente desde hace muchos años (Carlotto et al., 1994; Cárdenas et al., 2006), creemos que el Camino Sagrado debe tener también información que sirva no solo como línea base para futuros monitoreos, sino para plantear soluciones para los problemas de conservación (Oviedo et al., 2006).

Marco geológico

La zona de estudio se localiza en el batolito de Machupicchu. El Camino Sagrado ha sido construido principalmente sobre depósitos coluviales y a veces sobre granitos o suelos aluviales. Los afloramientos de granitos se encuentran bastante



Foto 1. Tramo del Camino Sagrado en la ladera norte del cerro Winaywayna.

fracturados y alterados, motivo por el cual en las laderas se observan algunos bloques aislados de granito que se hallan inestables, en peligro de caer y ocasionar daños. Los depósitos coluviales se encuentran en las laderas del cerro Wiñaywayna, forman un manto superficial conformado por la mezcla de fragmentos de roca de granulometría gravosa hasta bloques; estos depósitos pueden alcanzar varios metros de espesor. También existen depósitos eluviales donde se incluyen los suelos orgánicos, que en conjunto varían de 0.10 a 0.30 m de espesor, aunque en sectores llegan hasta 3 m. Los depósitos aluviales se reconocen en la desembocadura de los ríos Chachabamba y Choquesuysuy, teniendo mayor desarrollo en Chachabamba. Los depósitos aluviales están conformados por grandes bloques de granito en una matriz areno-limosa y arcillosa. En general, la mayor parte de los depósitos son muy inestables, especialmente en presencia de agua, ya que el material es saturado por las fuertes precipitaciones pluviales.

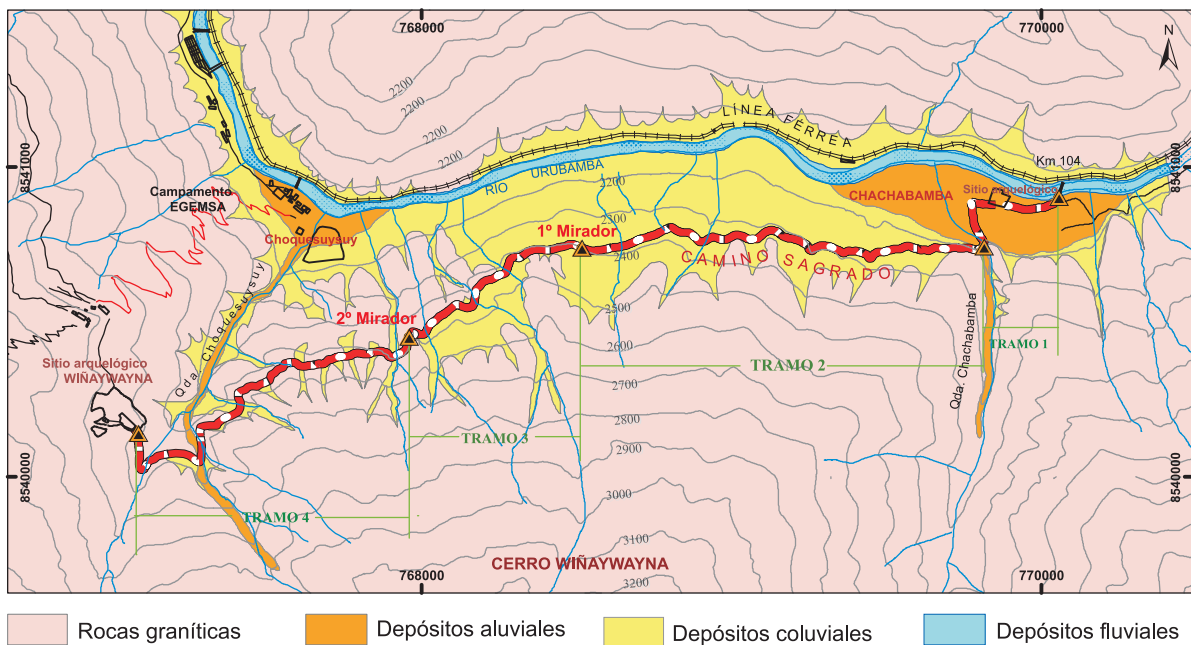


Fig. 2. Mapa geológico del Camino Sagrado.

El Camino Sagrado

El Camino Sagrado tiene una longitud total de 3719 km, empieza en el kilómetro 104 de la línea férrea y llega al sitio arqueológico de Wiñaywayna. El camino ha sido dividido en cuatro tramos para una mejor descripción:

TRAMO 1: Puente línea férrea km 104-Quebrada Chachabamba (km 0+000-Km 0+441)

Está caracterizado por tener un relieve casi plano, conformado por depósitos aluviales del cono de Chachabamba, donde la vegetación es tupida. En algunos sectores se ven lajas con drenes transversales cada 20 m. En general, el camino se encuentra en estado de conservación regular a bueno debido a los trabajos que realiza el INC-Cusco, aunque en algunos sectores se ven problemas originados por la erosión superficial.

En el km 0+151 se encuentra el sitio arqueológico de Chachabamba (Foto 2), emplazado sobre depósitos aluviales y en buen estado de conservación, mientras que los caminos adyacentes a los recintos se hallan en mal estado pues están afectados por la erosión superficial.

Desde el sitio inca de Chachabamba el camino continúa hasta llegar a la quebrada del mismo nombre, donde se presentan fenómenos de erosión fluvial con posible caída de rocas en el camino. El río se cruza mediante un puente de madera de 10.5m de longitud, con bases que datan de tiempos incas.



Foto 2. Sitio arqueológico de Chachabamba.

TRAMO 2: Quebrada Chachabamba-Primer mirador (km 0+441-km 1+834.5)

Desde la quebrada Chachabamba, el camino continúa sobre la ladera empinada del cerro Wiñaywayna, donde se presenta suelos coluviales. El camino tiene poca pendiente y se encuentra en regular estado de conservación debido a la presencia de drenes transversales; la escasa vegetación está constituida por ichu y arbustos nativos. Los fenómenos que afectan el camino son reptación, derrumbes (Foto 3) y caída de rocas. Aunque se han realizado obras de contención para estabilizar pequeños derrumbes y deslizamientos, ellas también han sufrido daños por la presión lateral de los suelos saturados.



Foto 3. Derrumbe que afectan el Camino Sagrado en el tramo 2.

TRAMO 3: Primer mirador-Segundo mirador (km 1+834.5-km 2+151)

Este tramo es similar al anterior, aunque la ladera presenta una mayor pendiente. El camino se halla sobre depósitos coluviales y en algunos sectores se ven afloramientos de granitos muy fracturados (Foto 4); la vegetación arbustiva nativa es mucho mayor que en el trayecto anterior. El camino tiene lajas en ciertos sectores; también se ven muros de contención en zonas con problemas de derrumbes y deslizamientos. En general, el tramo se halla en regular estado de conservación, sin embargo se ven problemas de erosión superficial e inestabilidad de algunos bloques de granito. Igualmente, algunos muros están afectados por la presión lateral de los suelos.



Foto 4. Granitos fracturados con bloques que pueden caer sobre el camino inca.

TRAMO 4: Segundo mirador-sitio arqueológico Wiñaywayna (km 2+151 km 3+719)

Este tramo se diferencia de los anteriores por presentar mayores afloramientos de granitos que están fuertemente fracturados, aunque persisten localmente los depósitos coluviales (Foto 5). La plataforma puede o no tener lajas (Foto 6). En general, este tramo se encuentra en regular estado de conservación, aunque se han identificado zonas de caída de bloques de granito y otras de erosión superficial. Por otro lado, en las quebradas del km 2+914 y del km 3+214 se observan evidencias del paso de dos aluviones o huaycos. En efecto, el 1 de abril del 2006 ocurrieron dos aluviones que destruyeron el camino inca, con longitudes de 10 y 45 m. Estos aluviones continuaron por la quebrada Choquesuysuy (Foto 6) hasta llegar al río Urubamba, donde destruyeron los servicios higiénicos y las oficinas de administración del local del INC.



Foto 5. Ladera muy empinada del tramo 4 del camino inca que está sobre granitos y suelos coluviales.



Foto 6. Efectos del aluvión del 1 de abril del 2006 que destruyó el camino inca.

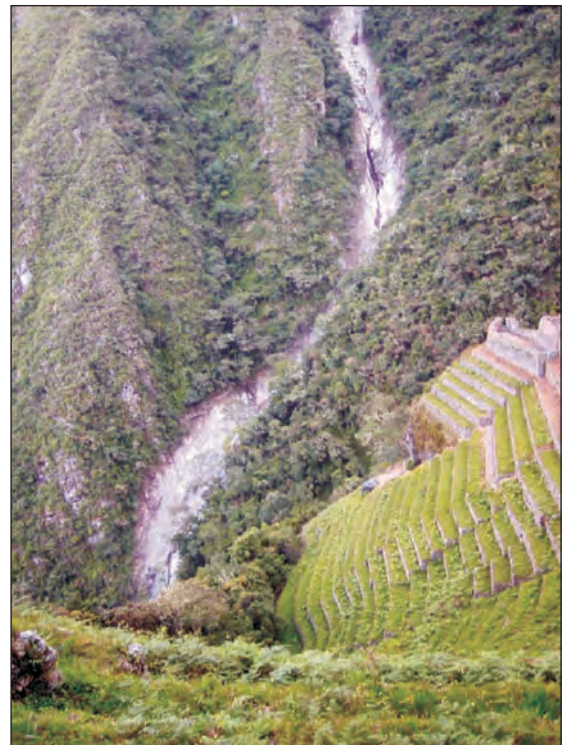


Foto 7. Andenes del sitio arqueológico de Wiñaywayna. Nótese la erosión producida por un flujo de aluvión.

WIÑAYWAYNA

El sitio arqueológico de Wiñaywayna se encuentra ubicado en una ladera bastante empinada (Foto 7) y se emplaza sobre suelos coluviales y un afloramiento de granito. Este complejo se encuentra en buen estado de conservación a excepción de la andenería ubicada al suroeste, que está deteriorada por falta de conservación de los drenajes. La espectacular andenería de Wiñaywayna estabilizó el antiguo deslizamiento sobre el que está construido.

Conclusiones

El Camino Sagrado es una alternativa al Camino Inca Tradicional para el turismo de aventura. Los problemas geológicos encontrados en este camino inca son: erosión superficial, derrumbes, caída de rocas, aluviones, reptación y deslizamientos. El estado de conservación del Camino Sagrado varía de regular a bueno, sin embargo, se recomienda priorizar el tratamiento de las laderas y el mantenimiento del camino, especialmente en el Tramo 4, donde han ocurrido aluviones.

Referencias bibliográficas

Cárdenas, J., Carlotto, V., Flores, T. Cano, V. y Astete, F. (2006). Peligros geológicos e impacto en el sistema mediambiental del Camino Inca Tradicional: Machupicchu. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú 101: 43-71.

Carlotto, V., Cárdenas, J., Chávez, R., Pumayali, R. y Román, F. (1994). Estudio geológico y de conservación del Camino Inca de Machu Picchu. PNUD-UNESCO, 57p.

Oviedo, M., Concha, R., Astete, I., Cárdenas, J., Flores, T. Y Carlotto, V., (2006). Evaluación geológica y geodinámica del Camino Sagrado en Machu Picchu. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos, p. 46-49.

**VI. PELIGROS GEOLÓGICOS EN OTROS LUGARES
DEL SANTUARIO HISTÓRICO DE MACHUPICCHU**



1. INTRODUCCIÓN

El Santuario Histórico de Machupicchu presenta relieve y geología muy variados, con montañas, nevados, glaciares, valles profundos y quebradas, donde las condiciones climáticas con abundancia de lluvias propician la ocurrencia de fenómenos de geodinámica externa. Estos fenómenos ocurren en todo el santuario y en la zona de amortiguamiento, pero destacan por su importancia los que se presentan en la ciudad y los caminos incas, descritos ampliamente en los capítulos anteriores. Son importantes también los fenómenos geodinámicos presentes en las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo, así como en Aobamba y Runtumayo, que serán presentados a continuación. Sin embargo, estos no son los únicos, ya que se han identificado derrumbes y caída de rocas en la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, incluyendo los derrumbes de la parte septentrional del cerro Waynapicchu, así como los aluviones en las quebradas Chachabamba, Choquesuysuy, Mandor, Lucumayo, Cedrobamba y Pacaymayo.

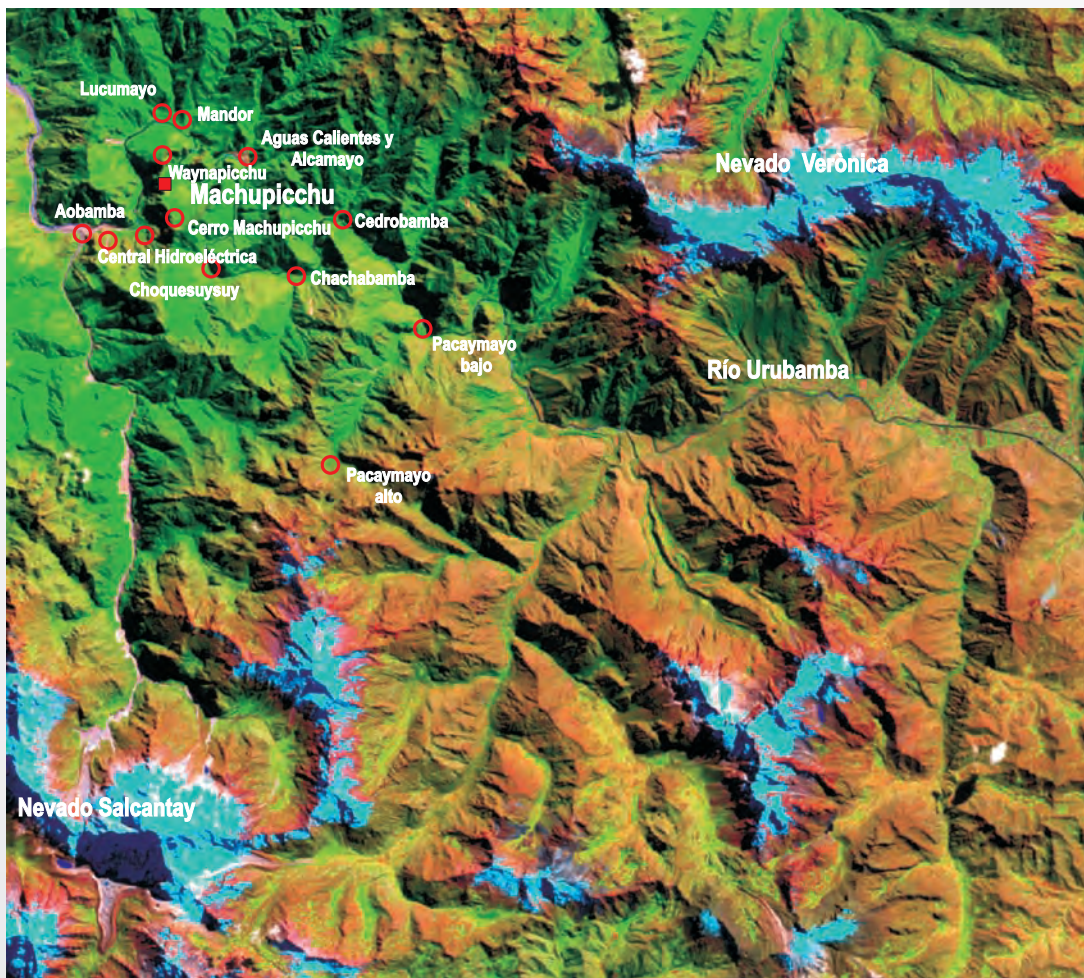


Imagen satélite Landsat que muestra los rasgos morfológicos de la zona de estudio y la ubicación de sitios con problemas de geodinámica externa.

2. EL DISTRITO DE MACHUPICCHU (AGUAS CALIENTES)

Víctor Carlotto^{1,2}, José Cárdenas² y Patricio Valderrama¹

1 INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima-Perú

2 UNSAAC, Av de la Cultura 733, Cusco-Perú

Introducción

El poblado de Machupicchu, más conocido como Aguas Calientes, es capital del distrito del mismo nombre en la provincia de Urubamba, departamento del Cusco, y es el centro urbano más importante y próximo a la ciudad inca, principal destino turístico del Perú. La población supera los 2000 habitantes y está dedicada a ofrecer diferentes servicios y bienes relacionados a la actividad turística. El Santuario Histórico recibe anualmente a más de 500,000 turistas, el 10 a 15% de ellos prolongan su visita por más de un día y necesariamente deben pernoctar en el poblado, y eventualmente visitar los baños termales.

El poblado de Machupicchu se localiza en las desembocaduras de las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo (Foto 1), sobre un cono aluvial que se ha formado por aluviones antiguos (Fig.1). Durante los últimos 60 años se han registrado numerosos flujos aluviónicos en el poblado, siendo el más antiguo del que se tiene referencia, el que ocurrió en febrero de 1946 y cuyo origen fue un deslizamiento localizado 2 km aguas arriba del río Aguas Calientes. El desembalse ocasionó un aluvión de piedras, lodo, troncos y palos que destruyó puentes peatonales, el puente del ferrocarril y la minicentral hidroeléctrica. Este aluvión relleno el cauce del río que, según los moradores, tenía unos 15 m de profundidad. En 1961 se produjo otro huayco de menor magnitud y sin consecuencias importantes. En 1985, un derrumbe afectó el sector de Media Naranja. El 5 de marzo de 1995 ocurrió un huayco en Aguas Calientes y otro menor en Alcamayo, y fueron destruidos los baños termales (Foto 2), tres puentes y algunas viviendas. Los dos últimos registros corresponden al huayco del 22 de diciembre de 1997, que dañó los baños termales, y el de marzo de 1998 que no ocasionó grandes daños, pero su origen estuvo relacionado con un derrumbe en la parte alta del río Aguas Calientes (Foto 3).

Estos antecedentes motivaron a las autoridades locales y regionales a tomar acciones de prevención y mitigación de desastres. El Programa Machupicchu, un Proyecto Especial de FONCODES y PROFONANPE que funcionó con un presupuesto proveniente del canje de deuda externa entre los gobiernos de Perú y Finlandia, se ocupó de realizar estas acciones en el poblado de Machupicchu. Así se desarrollaron una serie de estudios geológicos, geodinámicos y de peligros con el fin de determinar los grados de vulnerabilidad del poblado, para adecuarse a un Plan de Prevención y Mitigación de Desastres y a un Plan de Ordenamiento Urbano que se enmarcasen dentro de los objetivos de conservación de un área natural protegida por el Estado (ANPE), como el Santuario Histórico de Machupicchu.



Foto 1. Imagen satélite que muestra el poblado de Machupicchu en el cono aluvial formado por los ríos Aguas Calientes y Alcamayo.



Foto 2. Quebrada Aguas Calientes y los baños termales construidas en pleno cauce del río. La infraestructura fue afectada por el aluvión de 1995.

Los estudios comprendieron tres fases: la primera (1998) se ocupó de la geología, la geodinámica, los peligros y la vulnerabilidad de las cuencas de Aguas Calientes y Alcamayo (Candia, 1998). La segunda fase (1999-2000) permitió realizar una zonificación de los peligros y la vulnerabilidad de Aguas Calientes para integrarla al Plan de Ordenamiento Urbano, este estudio fue realizado por el Centro Guamán Poma de Ayala, con un equipo de profesionales dirigido por el arquitecto Augusto Ortiz de Zevallos y se encargó la parte de peligros geológicos a V. Carlotto. La tercera fase contemplaba la ejecución de obras como consecuencia de los proyectos de las fases anteriores y se realizó en forma parcial, pues se hizo un tratamiento parcial de la quebrada Aguas Calientes, principalmente en la parte del poblado, pero no así en la quebrada Alcamayo, a pesar de que los fondos económicos estaban disponibles.



Foto 3. Derrumbe que causó el aluvión de 1998, ubicado aguas arriba de los baños termales en la quebrada Aguas Calientes.

Crónicas de un desastre anunciado

En el contexto posterior a los estudios y trabajos descritos, los hechos del aluvión ocurrido el sábado 10 de abril del 2004 pueden describirse como la crónica de un desastre anunciado. En efecto, el mapa de peligros geológicos (Carlotto et al., 2001) indicaba las zonas vulnerables a los aluviones y deslizamientos. Por ejemplo, cerca de la desembocadura del Alcamayo en el Urubamba, su cauce fue estrechado por la construcción de dos puentes de la línea férrea y un restaurante que pertenece a uno de los hoteles de turistas (Foto 4); además, en la desembocadura se construyeron viviendas, incluyendo la del alcalde de la época. Estas áreas fueron destruidas por el huayco del 2004 (Fotos 5 y 6) que ocasionó también la pérdida de 11 vidas humanas. Como se verá más adelante, todo lo ocurrido estaba lamentablemente previsto pero no se tomaron las acciones necesarias basadas en las propuestas dadas oportunamente, lo que pudo evitar al menos la muerte de seres humanos.

El jueves 26 de abril del 2007, un deslizamiento en la quebrada Aguas Calientes originó un represamiento cuyo desembalse produjo un nuevo aluvión. El flujo fue de pequeña magnitud pero afectó el 40% del sistema de captación de agua potable y los muros de contención del puente ubicado en el ingreso a los baños termales. No hubo daños personales, los habitantes y los turistas fueron evacuados rápidamente, pues funcionó el sistema de alarma temprana que Defensa Civil y el municipio habían instalado dos meses antes. Así los turistas extranjeros, nacionales y locales que se encontraban en los baños termales fueron replegados por personal de Defensa Civil. Las causas del deslizamiento y el aluvión fueron atribuidas a las intensas lluvias que cayeron en Aguas Calientes y que reactivaron un deslizamiento aguas arriba.

Geomorfología

El poblado de Machupicchu o Aguas Calientes se sitúa a una altura promedio de 2050 msnm, en la margen derecha del río Urubamba, en las desembocaduras de los ríos Aguas Calientes y Alcamayo, en plena Cordillera Oriental. Las unidades morfológicas son variadas y se describen a continuación.

El abanico aluvial de Aguas Calientes-Alcamayo se ha formado por la depositación de materiales traídos por aluviones antiguos, procedentes de las partes altas de las quebradas; una prueba de estos aluviones antiguos son los grandes bloques de granito que se ven en el poblado y constituyen los suelos de fundación. La quebrada Aguas Calientes tiene una dirección aproximada N-S y NE-SO, nace en la vertiente sur de la Cordillera Oriental a una altura de 4300 msnm. En la parte superior está conformada por dos valles glaciares en forma de "U": el Quishuarpata y Tunquihuaycco, que se unen a una altitud de 3200 msnm, formando el Aguas Calientes. Las laderas de esta quebrada tienen pendientes muy empinadas que



Foto 4. Puente angosto del tren en la quebrada Alcamayo. Vista tomada el año 2000.



Foto 5. Quebrada Alcamayo luego del aluvión del 2004 que destruyó los puentes y las construcciones de la ribera.



Foto 6. Nuevo puente del tren después del aluvión del 2004, compárese con la Foto 4.

pueden superar el 90%, como en la Leonera Baja, esto y las caídas en el cauce determinan una accesibilidad muy difícil. El valle del Alcamayo nace a una altura de 3900 msnm, la dirección general es NE-SO, tiene menor longitud y amplitud que el de Aguas Calientes y sus laderas tienen generalmente menor pendiente. Las laderas del Aguas Calientes y el Alcamayo son zonas propensas a desprendimientos y deslizamientos de rocas debido a la circulación de aguas superficiales y subterráneas, la alteración de los granitos y su alto grado de fracturamiento. Cerca de la población de Machupicchu se han reconocido las cumbres Media Naranja, Encantuyoc, Entre Ríos y Alcamayo, que alcanzan alturas desde los 3700 a 4400 msnm. El valle del río Urubamba constituye la unidad más baja (2000 msnm), por donde discurre el río del mismo nombre. En la zona de estudio, el lecho tiene un ancho aproximado de 60 m, no presenta terrazas y las laderas son muy empinadas, por lo que se le conoce también con el nombre de cañón del Urubamba.

Geología y geodinámica externa

En las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo predominan las rocas graníticas del batolito de Machupicchu. Sin embargo, en las cabeceras de la quebrada de Aguas Calientes afloran pizarras y cuarcitas de la Formación San José del Ordovícico (Fig.1); existen también depósitos aluviales, fluviales, glaciares y coluviales, incluyendo los conos de escombros. Las características estructurales más importantes de la zona son las diaclasas y las fracturas, que se presentan en tres principales familias: NO-SE, E-O y NE-SO, y que han producido un trituramiento tectónico e influenciado en el modelaje geomorfológico. Además, fallas de importancia regional NO-SE como la falla Urubamba afectan la zona, pero en ningún caso son fallas activas.

Los depósitos aluviales forman abanicos que están constituidos por bloques de granito (5 m de diámetro) en una matriz arenosa-limosa; ellos son el resultado de aluviones o huaycos antiguos y evidencian la fuerte actividad geodinámica de la zona. El poblado de Machupicchu se fundó sobre los abanicos de Aguas Calientes y Alcamayo (Fig. 1 y Foto 1). Los depósitos glaciares o morrénicos se ubican en la cabecera de la quebrada Aguas Calientes, donde se encuentran bloques de granito en una matriz de grava y arena arcillosa. Las morrenas tienen espesores hasta de 25m y son bastante estables, pues no presentan signos de activación de deslizamientos o erosiones que podrían alimentar a futuros huaycos, como es el caso de la quebrada Aobamba.

Los depósitos coluviales son importantes y se han formado en las laderas por efecto del intemperismo de las rocas graníticas; hay también bloques de granito que se han separado del afloramiento (caos granítico), estando algunos inestables y otros relativamente estables ya que son protegidos por la importante vegetación que ha crecido entre ellos. Los deslizamientos se han desarrollado principalmente sobre suelos coluviales y muestran signos de activación o reactivación; destacan los deslizamientos de Alcamayo, cabecera Las Orquídeas (Fig. 1 y Foto 7) y los del

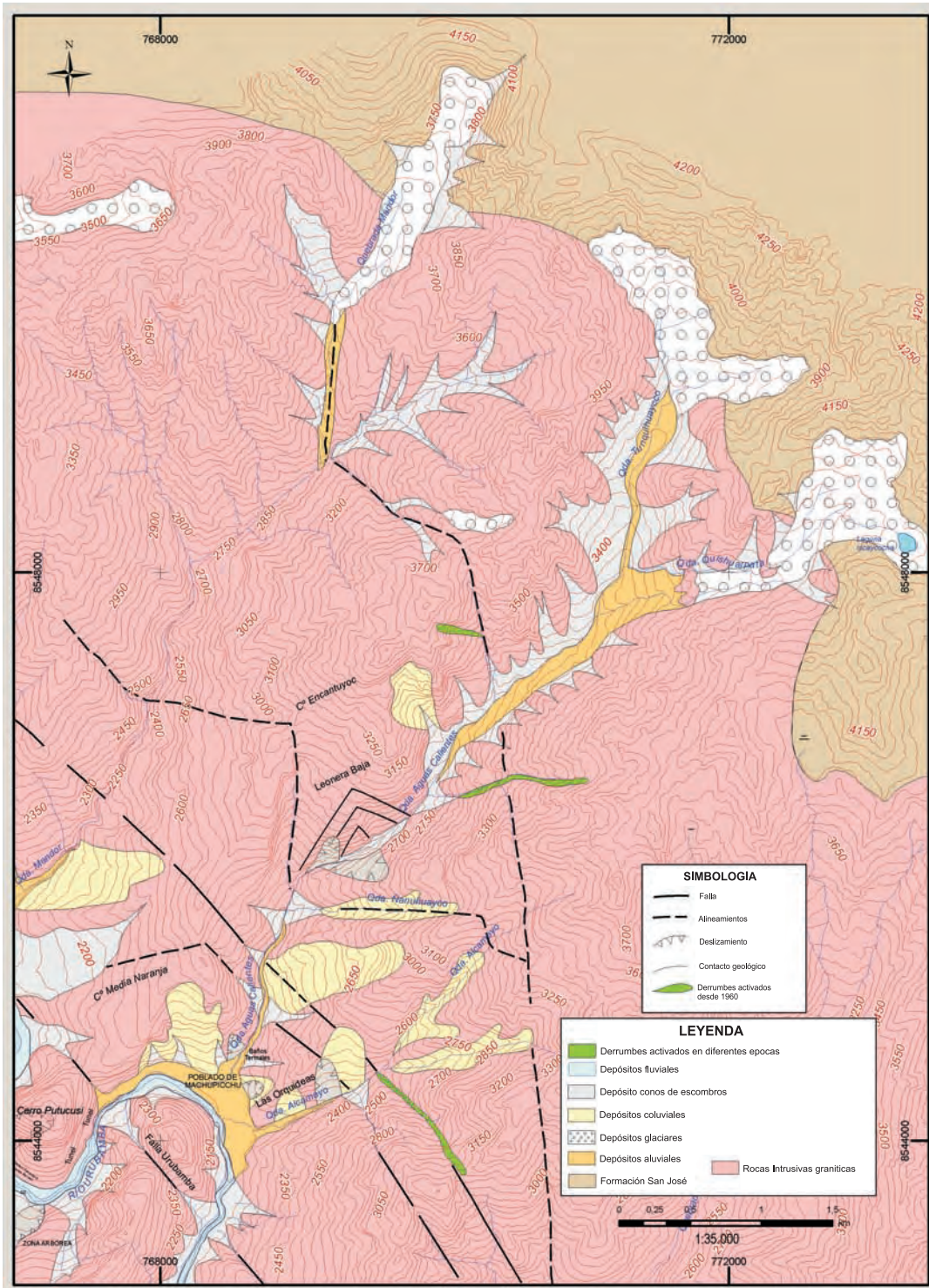


Fig. 1. Mapa geológico de Aguas Calientes y Alcamayo. Modificado de Carlotto et al. (2001).

suroeste y norte de los baños termales de Aguas Calientes. Los derrumbes se originan y desarrollan sobre depósitos coluviales en zonas de fuertes pendientes, ayudados por las precipitaciones pluviales.

La caída de rocas es importante en las laderas de la zona debido al alto grado de fracturamiento de los granitos y la fuerte pendiente de las laderas; son de diferente tamaño, se desprenden del macizo rocoso y caen pendiente abajo, formando caos granítico. Un ejemplo de este fenómeno existe en el sector de la Leonera Baja, que se represó por ser un tramo estrecho del río Aguas Calientes (Foto 8). Al norte del poblado de Machupicchu, y en la margen izquierda del río Aguas Calientes, se han distinguido zonas donde se ven bloques que están por desprenderse y caer, constituyendo un peligro latente para la población.

Las fracturas y diaclasas en los granitos son los principales condicionantes para la generación de fenómenos de geodinámica externa que ponen en peligro el poblado de Aguas Calientes. Los efectos de las lluvias contribuyen a la evolución de las vertientes, provocando o acelerando la caída de rocas, los deslizamientos, los derrumbes, etc. La circulación de aguas subterráneas a lo largo de planos de fallas y fracturas favorece el desprendimiento de grandes bloques de granitos, especialmente cuando están en el sentido de la pendiente.

Peligros geológicos

Una de las zonas de mayor peligro en la quebrada Aguas Calientes es la Leonera Baja, situada en la margen derecha, en la ladera del cerro Encantuyo. Aquí se observa una escarpa dejada por el derrumbe el año 1997, que tiene una longitud de 100 m y una pendiente de 70 a 90°; en el cauce se ven grandes bloques de granito, material suelto y las evidencias del represamiento del año 1997 (Foto 8), estos materiales acumulados constituyen un peligro para nuevos embalses. Los cálculos del análisis de estabilidad del talud rocoso muestran que este área es inestable (Candia, 1998). Otra zona es la Catarata que se localiza aproximadamente a unos 160 m aguas arriba de los baños termales; aquí, un derrumbe activo por desprendimiento de rocas de la ladera sur de las colinas de Media Naranja constituye un peligro potencial. La quebrada Ñañuhuayco, que es un afluente de la quebrada Aguas Calientes, presenta en su cauce gran volumen de material coluvial suelto, tiene una pendiente muy alta y constituye otra zona de peligro porque puede generar flujos de detritos (huaycos).

En 1988, en la parte media de la margen derecha de la quebrada Alcamayo se observaban deslizamientos antiguos y activos (Foto 9), así como bloques de granito de grandes dimensiones que bloqueaban el cauce y podían ocasionar un embalse. Igualmente, en la margen derecha y a una altura de 2300 a 2350 msnm, se presenta una cornisa de roca que se halla inestable por pérdida de cuña; esta cornisa se encuentra saturada de aguas subterráneas, constituyendo un área de caída de bloques y de reactivación del deslizamiento.

El 10 de abril del 2004, a la 1:40 a.m. se produjo un aluvión que duró aproximadamente media hora, ocurrió en oleadas, y dañó un sector del poblado de Machupicchu. El evento se inició en un tributario del Alcamayo situado aproximadamente a 1.5 km aguas arriba y con dirección NO-SE. El material coluvial, incluyendo los bloques de granito, se saturó de agua por las intensas lluvias, se transformó en un flujo que bajó hasta el Aobamba y erosionó el cauce y las zonas de deslizamiento de la parte media (descritas líneas arriba), y añadió más material al flujo que llegó al poblado y destruyó las viviendas ubicadas en el cauce y sus márgenes. En estas circunstancias fallecieron 11 personas.

El mapa de peligros elaborado para el poblado de Machupicchu se basa en la cartografía geológica, geodinámica y en los cálculos de matrices realizados a partir de datos obtenidos en campo y gabinete referentes a pendiente, litología, vegetación, hidrogeología, etc. (Carlotto et al., 2001). Tomando en cuenta los tipos de fenómenos geodinámicos que se manifiestan en la cuenca, es posible identificar: 1) Zona de peligro de aluviones, desbordes e inundación, y 2) Zonas de peligro de deslizamientos, derrumbes y caída de bloques (Fig. 2).

Peligro de aluviones o huaycos

Los deslizamientos y derrumbes producidos en las cuencas altas de Aguas Calientes y Alcamayo son difíciles de tratar: las laderas son casi verticales y están formadas por rocas graníticas muy fracturadas, lo que las hace inaccesibles y por tanto la ocurrencia de aluviones es probable. En este caso una de las zonas más peligrosas en el poblado de Machupicchu es el cauce actual del río Aguas Calientes (Fig. 2), por lo que se recomendó una obra de encauzamiento y profundización para evitar los desbordes de los aluviones; esta obra fue realizada y soportó el aluvión del 2007. Otra zona de peligro es la de los baños termales debido a que la infraestructura fue construida en el mismo cauce del río, por ejemplo, la caseta de control está ubicada en esta zona donde el cauce se angosta, lo que obligaría a que el flujo aluviónico se desborde y discurra por la calle Pachacutec y también por la margen izquierda, afectando al barrio de Las Orquídeas (Fig. 2). El puente de la línea férrea constituye otra zona de peligro porque el cauce se estrangula y un huayco podría obstaculizar el flujo y derivar el material por la calle Imperio de los Incas y la carretera de acceso a la ciudad inca de Machupicchu.

Las zonas más peligrosas en la quebrada Alcamayo (Fig. 2) (Carlotto et al., 2001) son las partes norte y este del Hotel Machupicchu Pueblo, donde el cauce del río podía desbordarse; igualmente, el borde sureste de la Manzana F del barrio de Las Orquídeas y el límite con el cauce del río, donde existe un talud alto que estaba siendo erosionado lateralmente, afectando los lotes que existían en esa época. Entre la Manzana E y el puente del tren, la margen derecha mostraba signos de erosión de las laderas, constituyendo una zona de peligro para las construcciones que limitan con el borde del talud. El tramo entre los dos puentes del tren, sobre el río Alcamayo, estrangulaba también el cauce, constituyendo una zona de alto

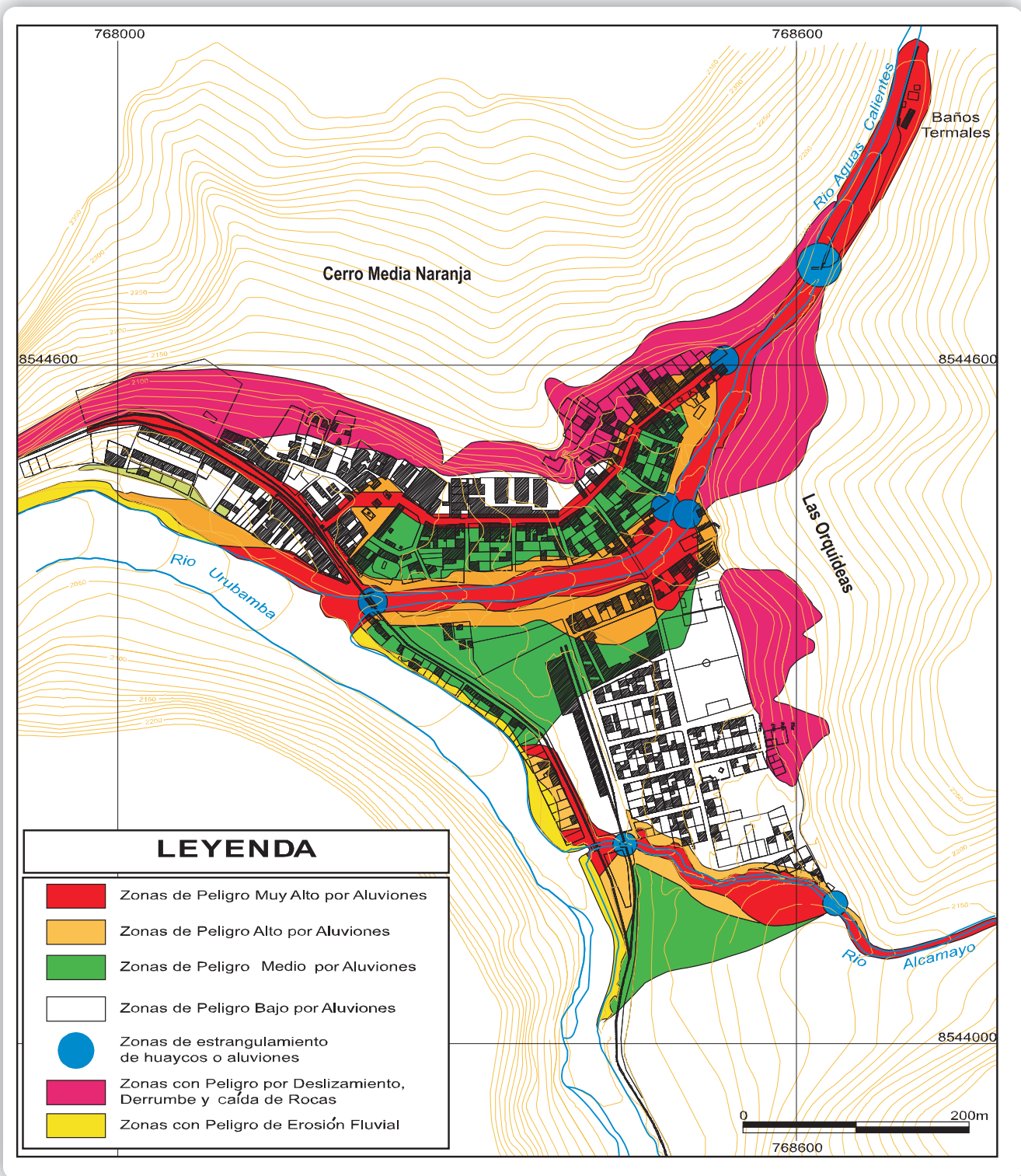


Fig. 2. Mapa de peligros por aluviones, deslizamientos y erosión fluvial del poblado de Machupicchu (Carlotto et al., 2001).



Foto 7. Deslizamiento en Las Orquídeas en el año 1999.



Foto 8. Caída de bloques gigantes de granitos que represaron la quebrada Aguas Calientes el año 1997.

peligro por aluviones. Estos puentes represarían el material con el consiguiente desembalse, afectando el comedor del hotel y las viviendas de la prolongación de la calle Imperio de los Incas. En este caso, el mapa de peligros elaborado el año 2000 mostraba lo que pasaría el 10 de abril del 2004: el aluvión afectó todas las zonas de peligro muy alto y alto que habían sido previstas en el mapa. Es decir, lo ocurrido estaba lamentablemente previsto.

Utilización del Modelo FLO 2D

Para comprobar los resultados del mapa de peligros generado con parámetros geológicos, es decir, en base a datos de campo, fotointerpretación, interpretación de flujos recientes, estudios sedimentológicos, etc., se realizó una simulación con el software FLO 2D para la quebrada de Aguas Calientes. Los resultados simulados son muy similares a los flujos que se presentan en la quebrada, tanto en las zonas que se verían afectadas por un flujo de detritos o huayco, así como en la cantidad de material que sería depositado en el río Urubamba, y que podría producir un represamiento parcial de sus aguas, generando peligros asociados (Fig. 3).

De las comparaciones de la simulación con el mapa de peligros realizado con parámetros geológicos, se puede concluir que ambos son correctos para el tratamiento de una emergencia de flujo de detritos en el poblado de Machupicchu.

Los parámetros utilizados fueron:

Caudal máximo simulado: $10.33 \text{ m}^3/\text{s}$, para un tiempo de retorno de 50 años.

Rugosidad "n" de Manning: 0.065.

Concentración de sedimentos en el flujo: de 25 a 30%.

Generación del hidrograma: metodología del Soil Conservation Service (SCS) debido a que es uno de los métodos más sencillos para el cálculo de un hidrograma.

Topografía: curvas cada 10 m.

Tamaño de grilla para la simulación: grillas de 20 x 20 m.

Numero total de grillas para la simulación: 1193 grillas.

Tiempo total simulado: 35 horas.

Tiempo de simulación real: 3.45 horas.

Resultados obtenidos

Balance de masa: volúmenes de entrada y salida.

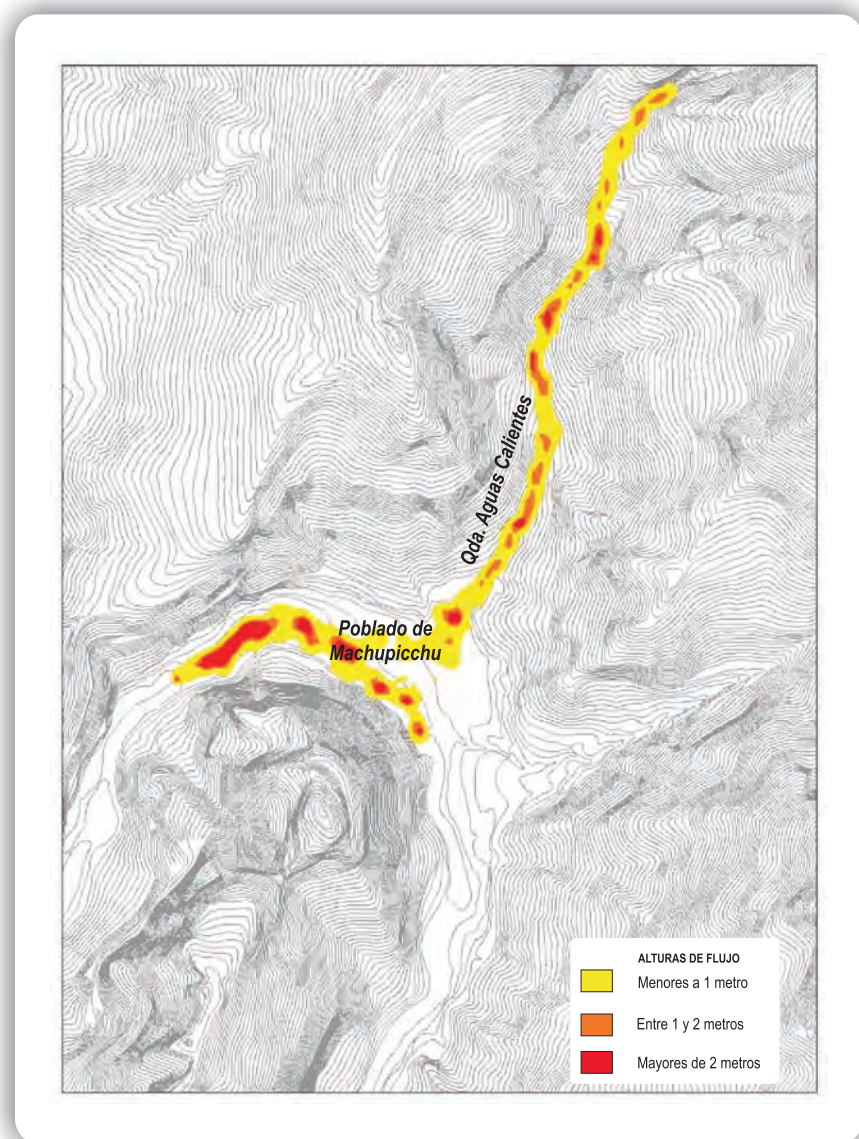


Fig. 3. Resultado de la aplicación del modelo Flo 2D en la quebrada Aguas Calientes.



Foto 9. Deslizamiento activo en la parte media de la margen derecha de la quebrada Alcamayo. Vista tomada el año 1999.

Entrada al sistema (m³)

	Agua	Agua y sedimentos
Hidrograma de entrada	241,095.60	248,045.67

Salida del sistema (m³)

Superficie de flujo	Agua	Agua y sedimentos
Almacenamiento en la zona de inundación	34,146.70	41,096.77
Salida de flujo del hidrograma	206,948.90	213,898.97

Totales (m³)

Descarga total del sistema de grilla:	206,948.90	209,848.90
Volumen total de salida y almacenamiento:	241,095.59	281,695.60
Área máxima inundada:	167,200.00 m ²	

Peligro por deslizamientos, derrumbes y caída de bloques

El área Las Orquídeas se ubica en la cabecera de la zona urbana del mismo nombre, en el extremo noroeste del campo deportivo (Fig. 2); presenta deslizamientos del material coluvial debido a que fue desestabilizada en la parte baja de la ladera, al retirarse su cuña inferior (Foto 7) cuando el sitio fue explotado como cantera para la extracción de material de construcción. Este área cobra especial importancia por encontrarse en la cabecera de un sector de "seguridad" para la población; allí se ubica el campo deportivo, el único lugar de libre acceso en caso de emergencia (Fig. 4), por ser un área abierta y de uso público y que en el año 2000 no contaba con cerco periférico. Por lo tanto, para establecer esta área de seguridad es necesaria la inmediata estabilización de la ladera Las Orquídeas. Sin embargo, el número de construcciones se ha incrementado y con ello ha aumentado el peligro; además, a un costado del deslizamiento y sobre restos de un cono de deyección se levantan nuevas construcciones que se van consolidando en cortes de terraplenes que desestabilizan la ladera, constituyendo una zona de alto peligro. Frente a la caseta de control de ingreso a los baños termales, en la margen izquierda del río Aguas Calientes, se presenta un cono de deyección con material coluvial que actualmente sufre procesos de reptación, y a pesar de ello se pretendía construir un hotel. Este cono es un peligro pues el terraplén de la obra desestabilizaría la ladera y produciría derrumbes y deslizamientos.

En el año 2000, el área del cerro Media Naranja mostraba evidencias de caída de rocas en tiempos recientes. La ladera del cerro es muy empinada y está conformada por depósitos coluviales, conos de deyección, granitos muy fracturados y desprendidos del macizo rocoso, mucho de los cuales han caído por gravedad. En la actualidad esta zona tiene muchos sectores con reptación de la ladera que afectaría a las zonas de expansión urbana informal de los lotes y viviendas pegados a la ladera. Se han reconocido varias zonas vulnerables como el sector entre el punto de partida del fallido proyecto teleférico, el Hostal Caminante, la Capilla-local del INC y la zona del reservorio de agua; sin embargo, estas zonas de peligro fueron ocupadas rápidamente, pues iban a ser declaradas intangibles. Un derrumbe afectó recientemente esta ladera, cerca de las nuevas construcciones de hoteles en la salida del poblado y con dirección a la ciudad inca (Foto 10).

A lo largo de la margen derecha del río Urubamba, el cauce está dirigido hacia esta ribera en tres diferentes zonas y genera el peligro de erosión y socavación (Fig. 2). Este peligro se acrecienta en lugares donde se construyen edificaciones basadas en columnas esbeltas que están cimentadas en el lecho del río al tratar de ganar espacio. En las zonas de erosión natural se requiere la construcción de defensas ribereñas y limpieza de cauce, y en las zonas de construcciones precarias se requiere de una evaluación minuciosa que puede determinar la evacuación de dichas estructuras.



Foto 10. Derrumbe producido el año 2007 en la salida del poblado de Machupicchu hacia Puente Ruinas. Al pie del derrumbe se pretendía ubicar el punto de partida del teleférico .

Conclusiones

La configuración urbana del poblado de Machupicchu y el crecimiento urbano, particularmente en zonas muy vulnerables, constituyen un riesgo para la población porque no se aplica el Plan de Ordenamiento Urbano (que debe estar desactualizado) para controlar y orientar el crecimiento urbano. En la actualidad ya no hay espacios para uso urbano debido a que casi todas las áreas no pobladas y parte de las pobladas corresponden a zonas de ocurrencia de algún fenómeno geodinámico peligroso. El patrón de asentamiento está caracterizado por calles y pasajes muy angostos, con pendientes muy pronunciadas que hacen difícil el tránsito peatonal y mucho más el vehicular. La densidad poblacional es otro factor que la hace aún más vulnerable, sobre todo en las épocas de afluencia de turistas, ya que un importante número de construcciones están orientadas a la actividad económica comercial, como servicios de hospedaje, alimentación y expendio de artículos varios.

Los cálculos realizados a partir de matrices que consideran valores de las áreas geomorfológicas y zonas de fenómenos geodinámicos indican la siguiente zonificación (Carlotto et al., 2001):

Zonas de protección, denominadas de Categoría 5 en el mapa de calidad para la conservación. Este valor indica que las zonas son de alto peligro por la posibilidad de aluviones y corresponden a las quebradas de Aguas Calientes, incluyendo los baños termales, y Alcamayo. Se incluye también el borde del río Urubamba debido a los fenómenos erosivos en época de crecidas.

Zonas de restricción por peligros de inundación y erosión, de Categoría 2. Corresponden a las zonas de peligro por inundaciones producidas por aluviones; son las zonas aledañas o de influencia por desbordes de los flujos aluviónicos.

Zonas de riesgo por procesos gravitacionales, de Categoría 2. Corresponden a las laderas de los cerros Media Naranja y Las Orquídeas, donde se presentan fenómenos de deslizamientos, derrumbes y caída de bloques.

Zonas sin variación específica ni limitaciones importantes, de Categoría 0. Son de mala calidad para usos y aprovechamientos, por lo que las eventuales construcciones y edificaciones conllevarían a desestabilizar la zona y a hacerla de alto peligro.

Los daños causados por el aluvión de abril del 2004 estaban lamentablemente previsto en el Plan de Ordenamiento Urbano del 2000 y no se tomaron las acciones necesarias a partir de las propuestas dadas oportunamente y que pudieron evitar, al menos, la pérdida de vidas humanas. Sin embargo, el sistema de alerta temprana, instalado recientemente permitió la evacuación de la población y los turistas durante el aluvión de abril del 2007. Además, las obras de encauzamiento permitieron evacuar el flujo de lodo y detritos del aluvión, lo que no hubiera sido posible si no se realizaban esos trabajos (Fotos 11 y 12).



Foto 11. Quebrada Aguas Calientes antes de la construcción de obras de mitigación (1995).



Foto 12. Quebrada Aguas Calientes con muros de encauzamiento y tratamiento paisajístico (2007).

Recomendaciones

Es necesario actualizar los mapas de peligros y sobre todo el mapa de evacuación, incluyendo las zonas de seguridad y rutas de escape en caso de aluviones (Fig. 4). Se debe tener en cuenta que el poblado ha crecido en los últimos años, sobre todo hacia los sitios de mayor peligro y en las zonas de seguridad.

Se debe delimitar la zona de crecimiento urbano mediante señalizaciones o enmallados; esta medida deberá apoyarse en normas restrictivas sobre el uso del espacio (suelo y recursos) comprendido en el ámbito de la zona urbana, laderas circundantes y las quebradas Agua Calientes y Alcamayo. Esta delimitación deberá actualizar las zonas de escape y protección de la población en caso de aluviones. Se trata de controlar y orientar el proceso de urbanización evitando la ubicación de edificaciones en zonas de laderas inestables

Debe prohibirse la explotación de materiales de construcción en las laderas de Las Orquídeas y Media Naranja, ya que provocan la desestabilización de los bloques de granito o de la roca granítica fracturada, lo que aumenta el peligro para la población.

Se necesita establecer una franja marginal con delimitación y señalización física visibles, como zona de amortiguamiento o seguridad a lo largo de las zonas ribereñas y circundantes a las laderas. Se debe acondicionar y cambiar el uso de dichas áreas con fines recreacionales o de actividades de carácter temporal.

Se debe controlar la tala de árboles en las laderas circundantes al centro poblado y las quebradas, con el fin de evitar la desestabilización de los taludes y también los deslizamientos y derrumbes.

Es necesario evaluar la factibilidad de la estabilización de los bloques rocosos inestables, ubicados en las laderas circundantes al centro poblado, mediante obras físicas que resulten convenientes para su tratamiento.

Se debe realizar una intensa campaña de información, capacitación y/o educación dirigida a la población sobre los peligros, vulnerabilidades y riesgos de desastres que existen en el poblado de Machupicchu, así como difundir las medidas correctivas y de tratamiento que es posible y necesario desarrollar. La difusión de los resultados debe partir de las autoridades locales, pasando por las organizaciones de base y las instituciones que promueven el turismo, con el involucramiento de sectores del Estado.

Se deben implementar las obras de ingeniería en las zonas críticas, partiendo de los numerosos estudios y expedientes técnicos ya existentes.

ZONAS DE SEGURIDAD Y RUTAS DE ESCAPE EN CASO DE ALUVIONES (HUAYCO) SECURITY ZONES AND SCAPE ROUTES IN CASE OF A FLASH FLOOD



Fig. 4. Mapa de zonas de seguridad y rutas de escape en caso de aluviones, tomado del Programa Machupicchu (Carlotto et al., 2001).

Referencias bibliográficas

Candia, M. (1998). Estudio geológico, geodinámico y zonificación de riesgos de la cuenca Aguas Calientes-Machupicchu, Cusco, Perú. PNUD Programa Machupicchu, 5 tomos.

Carlotto, V., Galdos, J., Solís, J., Arias, J., Machicao, P., y Mar, E. (2001). Plan para la mitigación de desastres del poblado de Machupicchu-Aguas Calientes. PROFONANPE, Programa Machupicchu, 180 p.

3. ALUVIÓN DEL AOBAMBA DE 1998: UN EVENTO PARA NO OLVIDAR

Victor Carlotto ^{1,2}, José Cárdenas ², Waldir Valdivia ¹

¹ INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja Lima.

² UNSAAC, Av. De la Cultura 733, Cusco.

Introducción

El año 1998, como consecuencia del Fenómeno del Niño, la Cordillera de Vilcabamba fue afectada por deslizamientos, inundaciones y aluviones. Uno de los fenómenos que llamó más la atención fue el aluvión de Aobamba que destruyó la Central Hidroeléctrica de Machupicchu (Carlotto et al., 1999).

La quebrada de Aobamba se ubica en el distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba y departamento del Cusco, y constituye el límite occidental del Santuario Histórico. Este valle tiene dirección norte-sur y nace de la confluencia de los ríos Orcospampa y Rayancancha, que a su vez nacen en los nevados de Salcantay (6264 msnm) y Huamantay (5459 msnm) (Fig. 1). El Aobamba desemboca a 1800 msnm, lo que genera un desnivel de 4464 m en tan solo 20 km, alcanzando una pendiente promedio de 10 %. La quebrada y sus afluentes han erosionado pizarras, cuarcitas y sobre todo granitos del batolito de Machupicchu. Las laderas de este valle son bastante empinadas y, hasta antes del aluvión de 1998, mostraba en la parte baja (1800-3500 msnm) depósitos cuaternarios recubiertos por vegetación típica de ceja de selva; encima de 3500 msnm, la vegetación de puna está representada por el ichu.

En época de estiaje, las aguas de la cuenca del Aobamba derivan de los deshielos de los glaciares del Salcantay, Paljay, Huamantay y nevados adyacentes, así como de las aguas subterráneas presentes en la zona. En época de verano, el caudal se incrementa debido a las precipitaciones pluviales propias de la época y por el aumento de los deshielos. Este aumento se relaciona con retroceso glaciar en los trópicos de latitudes bajas debido al calentamiento global de la Tierra. Un factor adicional a los deshielos ha sido la presencia del Fenómeno del Niño de 1998, que incrementó las temperaturas medias máximas.

Antecedentes

En los años noventa, se registraron varios fenómenos geodinámicos en el valle del Aobamba. En efecto, el 12 de julio de 1996 se originó un aluvión en la quebrada Orcospampa, que causó la muerte de cinco personas que habitaban una vivienda en las riberas del río. El origen del fenómeno fue relacionado a un desembalse violento de la laguna Sisaypampa, de origen morrénico y ubicado al pie del flanco noreste del nevado Salcantay. La caída de la masa glaciar sobre la laguna ocasionó

un rebalse y consecuentemente erosión y transporte de la morrena existente en el lugar. La erosión lateral del aluvión dañó las viviendas del borde del río y arrasó los terrenos de cultivo, pero sin efectos importantes en la vía férrea ni en la Central Hidroeléctrica de Machupicchu. En 1998 se produjeron tres aluviones importantes que represaron el río Urubamba y destruyeron consecutivamente la línea férrea Machupicchu-Quillabamba, la Central Hidroeléctrica de Machupicchu y lo poco que quedaba del poblado de Santa Teresa, afectado previamente por el aluvión de Sacsara (Carlotto et al., 1999).

El evento

El día 27 de febrero de 1998, aproximadamente a las 15:00 horas, un aluvión procedente de la quebrada Aobamba y originado en Pacchac Grande (Fig. 1) represó el río Urubamba. Posteriormente, el 12 de marzo de 1998, a las 23:40 horas ocurrió un segundo flujo aluviónico que incrementó la cantidad de material de represamiento y elevó la cresta del embalse aproximadamente en 3 m. Finalmente, el día 22 de noviembre de 1998 se presentó un tercer evento que afectó las zonas inestables dejadas por los aluviones anteriores.

Aluvión de Rayancancha-Aobamba

La quebrada Rayancancha es un tributario del Aobamba, tiene una dirección aproximada NNE-SSO y una longitud de 3 km en los nevados Salcantay y Huamantay (Fig. 1); la pendiente longitudinal es fuerte, aproximadamente de 12 %, con flancos muy empinados. La quebrada está emplazada sobre granitos fracturados del batolito de Machupicchu y es un valle relativamente amplio y de origen glaciario, relleno por un gran volumen de material morrénico (Foto 1).

La confluencia de los ríos Orcospampa y Rayancancha forma el río Aobamba con dirección N-S y longitud de 15 km. En la parte alta y media, el Aobamba se ha desarrollado sobre granitos del batolito de Machupicchu, en tanto que en la parte baja ocupa pizarras y cuarcitas de las formaciones San José y Sandia.

El 27 de febrero de 1998 se originó un aluvión en las nacientes de la quebrada Rayancancha, en las faldas del Salcantay, en el lugar denominado Pacchac Grande (Foto 1); el aluvión se desplazó por toda la quebrada Aobamba hasta llegar al valle de Urubamba, donde represó parcialmente las aguas del río.

A partir de las observaciones en las cabeceras del valle (Fotos 1 y 2), se sabe que existe un gran escarpe de deslizamiento cuya longitud es mayor a 500 m y el desnivel es de 50 a 100 m, que afecta las morrenas de la quebrada Rayancancha, lo que evidencia la magnitud del aluvión. En un primer momento, el material morrénico altamente saturado se deslizó y desestabilizó las morrenas laterales, que al deslizarse produjeron algunos represamientos y desembalses locales, cuyos productos fueron descendiendo por el Aobamba y erosionando ambas márgenes.

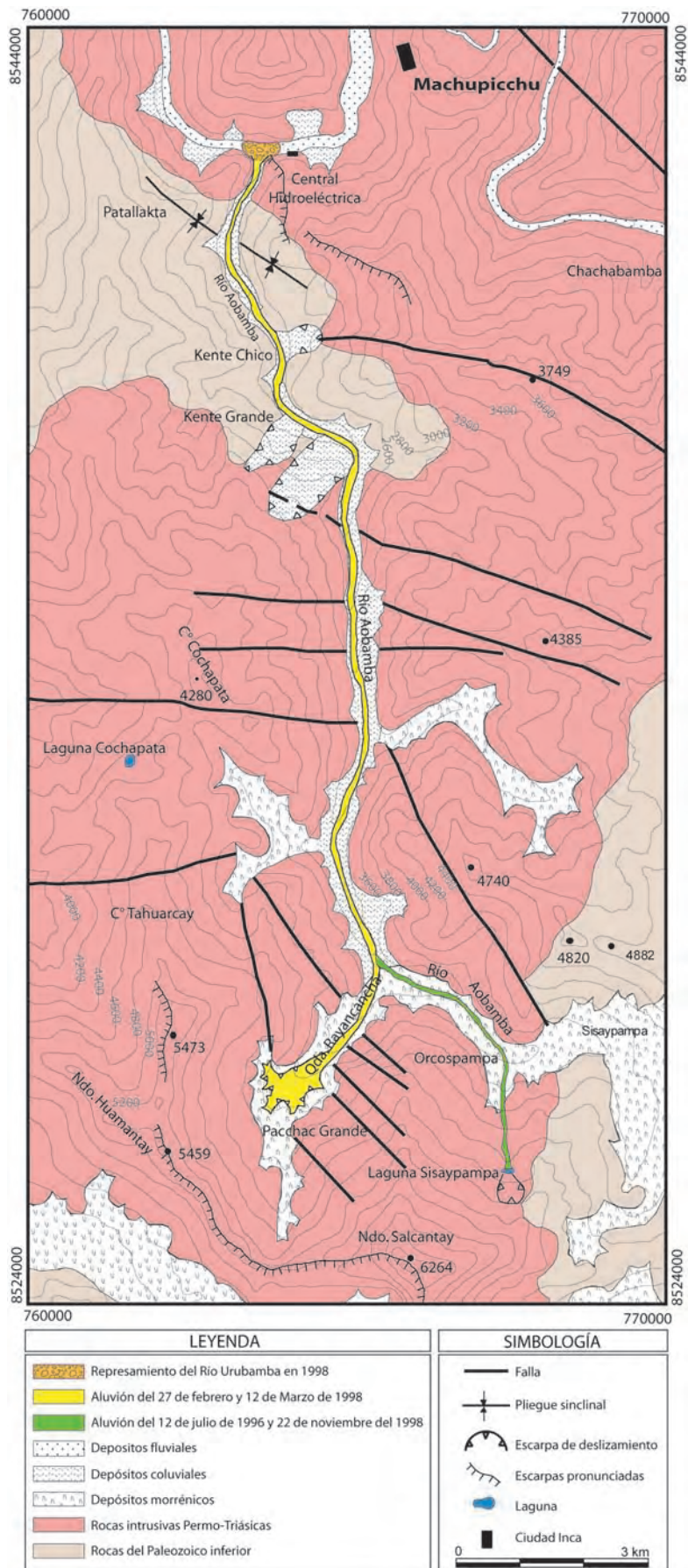


Fig. 1. Mapa geológico y geodinámico de la quebrada Aobamba relacionado con los aluviones ocurridos en la zona. Tomado y modificado de Carlotto et al. (1999).



Foto 1. Vista del nevado Salcantay y la zona de arranque del deslizamiento de las morrenas. Este deslizamiento originó el aluvión de 1998 en el Aobamba.



Foto 2. Zona de arranque del aluvión de Aobamba (1998) en la quebrada de Rayancancha, sector Pacchac Grande.

El primer gran arribo violento de flujo al río Urubamba provocó un embalse. A medida que había un retroceso relativamente continuo del escarpe del deslizamiento (deslizamiento retrogresivo), se produjeron oleadas pequeñas de flujos aluviónicos durante toda la noche del 27 de febrero. El flujo ha erosionado fuertemente el material de cobertura en algunos tramos, de manera que es posible ver la roca madre. El tramo comprendido entre la zona de arranque, es decir la cabecera de la quebrada Rayancancha y la confluencia de los ríos Aobamba y Urubamba, mostraba signos de fuerte erosión y depósitos (Foto 3).

Aluvión de Orcospampa-Aobamba

El río Orcospampa, que forma la quebrada del mismo nombre, es el otro tributario del río Aobamba (Fig. 1) y tiene una longitud aproximada de 7 km. Esta quebrada o valle se ha desarrollado en la parte alta sobre pizarras y esquistos de la Formación San José y en la parte baja sobre granitos del batolito de Machupicchu. El fondo del valle es relativamente amplio, con ancho promedio de 500 m, y está relleno por material morrénico producto de los glaciares que se desarrollaron al pie de los nevados Salcantay y Paljaj. Las laderas de este valle glaciar son empinadas al suroeste y medianamente empinadas al noreste. En el valle se originó un aluvión el 12 de julio de 1996 (Fig. 1); el 22 de noviembre de 1998 se produjo otro que parece haber tenido un origen similar al primero, es decir, la caída de una masa glaciar sobre la laguna, con rebalse y transporte de material morrénico que erosionó la quebrada Orcospampa.



Foto 3. Valle del Aobamba con la erosión y depósitos del aluvión de febrero de 1998.

Causas, magnitud y daños

Se han considerado como posibles causas del flujo aluviónico de 1998 a la saturación de los depósitos morrénicos en las cabeceras de la quebrada Rayancancha, al igual que la saturación de algunos depósitos aluviales antiguos en la parte inferior. Esto se debió a una fuerte fusión glaciaria por efecto de las altas temperaturas reinantes en esa época, que eran más altas de las normales máximas por efecto del Fenómeno del Niño. Por otra parte, la abundancia de agua estuvo también relacionada con las intensas lluvias que ocurrieron los días previos al aluvión y que fueron saturando los depósitos glaciares. Otros factores fueron la inestabilidad del material morrénico compuesto de bloques y gravas en una matriz areno-limosa, poco o nada compacta, y las pendientes relativamente fuertes de la zona. Todo lo anterior permite concluir que la ocurrencia de factores climáticos excepcionales en la época del aluvión estuvo relacionado con los efectos del Fenómeno del Niño (Carlotto et al., 1999).

La magnitud del aluvión a lo largo de los 18 km puede cuantificarse tomando en cuenta los desniveles de los escarpes de deslizamiento (Fotos 4 y 5), y también porque la altura del flujo alcanzó 40 m en algunos lugares, y la erosión abrió un cauce cuya sección promedio es de 10 m en la base y casi 80 m en la parte superior, con lo que el volumen de flujo arrastrado podría estimarse entre 25 y 50 millones de metros cúbicos. Por otra parte, a lo largo del tramo afectado han quedado evidencias de reactivación de deslizamientos o conos antiguos que han incrementado material en el flujo aluviónico. Asimismo, algunos taludes desestabilizados por el aluvión constituyen un peligro para la parte baja, tal como ocurrió con el aluvión de noviembre de 1998.

Los depósitos del aluvión del Aobamba represaron parcialmente las aguas del río Urubamba en su desembocadura (Fotos 6 y 7), lo que permitió la subida del nivel de la cota 1696 a 1770 msnm, es decir más de 70 m, inundando las instalaciones de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, cuya casa de máquinas (Fotos 8 y 9) se ubicaba solamente a 600 m aguas arriba de la confluencia. El aluvión del 12 de marzo incrementó la cantidad de material del represamiento y elevó el nivel del embalse aproximadamente en 3 m. Los daños causados en la central hidroeléctrica fueron estimados en más de 100 millones de dólares.

El material aluviónico no solo represó el río Urubamba en la confluencia del Aobamba, también relleno este valle en más de 50 km. En efecto, entre la zona represada y antes del poblado de Santa Teresa que hacen 6 km, el relleno va de 70 a 30 m (Foto 10); entre Santa Teresa y Maranura, esta última a 30 km de embalse, el material de relleno disminuye progresivamente y la sedimentación fue favorecida por la existencia de una planicie amplia en Tiobamba (Foto 11). Es decir, el nuevo cauce del río Urubamba recorre sobre el material aluviónico. En los tramos descritos anteriormente, el aluvión destruyó los puentes de Santa Teresa, Chaullay y Maranura, y gran parte de la línea férrea desde la Central Hidroeléctrica de Machupicchu hasta Quillabamba (45 km). Por otra parte, las observaciones de



Foto 4. Quebrada del Aobamba antes de los aluviones de febrero y marzo de 1998.



Foto 5. Río Aobamba después de los aluviones de febrero y marzo de 1998.

campo muestran que la sedimentación de material aluviónico ocurrió al menos hasta el puente Chahuares (a 85 km del represamiento), donde en los bordes del río se observan arenas de 1 m de espesor. Sin embargo, los efectos del aluvión de Aobamba llegaron hasta el Pongo de Mainique, a más de 150 km de distancia, ya que las aguas cargadas de lodo erosionaron varios tramos de la carretera Quillabamba-Kiteni, desestabilizaron los puentes Pavayoc (Quillabamba) y Echarate, y destruyeron partes de la carretera que estaban ubicadas cerca del río, particularmente en los tramos de Salaspampa, a 3 km de Quillabamba, y La Victoria, a 8 km de Quillabamba, en el sector de Collotayoc, a 6 km de Chahuares, y en Quellomayo, cerca de Palmareal. Finalmente, se sabe que este huayco dañó las estructuras de una pasarela en Ivochote, a más de 100 km del represamiento.

El día 22 de noviembre de 1998 se presentó un nuevo aluvión en el Aobamba. El origen del fenómeno fue localizado en la quebrada de Orcospampa y se debió a un desprendimiento de lenguas glaciarias que cayeron sobre una laguna y que ocasionaron un desagüe brusco. Este fenómeno estuvo relacionado con las fuertes precipitaciones pluviales que incrementaron el caudal del río Aobamba. Todo esto provocó la erosión de los taludes en varias zonas que habían quedado inestables debido a los aluviones de febrero y marzo, particularmente a la altura de Kente Chico y Kente Grande (Fig. 1).



Foto 6. Central Hidroeléctrica de Machupicchu en el valle del Urubamba, antes del represamiento por efecto del aluvión de Aobamba de 1998.

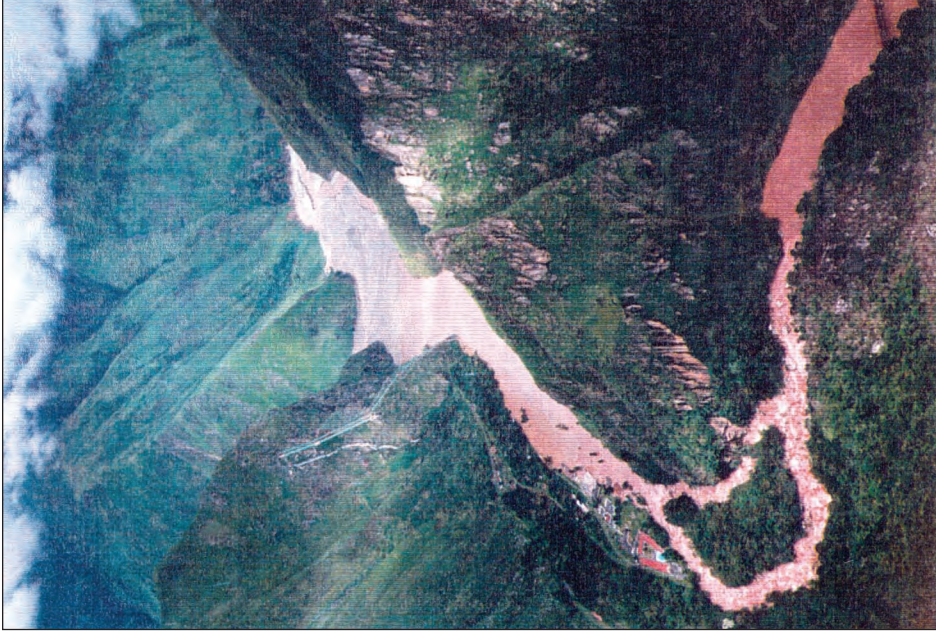


Foto 7. Central Hidroeléctrica de Machupicchu después del represamiento por efecto del aluvión de Aobamba.



Foto 8. Represamiento del río Urubamba que provocó la destrucción de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu (1998).



Foto 9. Vista tomada después del desembalse del represamiento del río Urubamba. La foto muestra la sala de máquinas y el antiguo nivel del agua.



Foto 10. Vista del río Urubamba a 1.5 km aguas abajo del Aobamba, recorriendo sobre material aluviónico que ha rellenado el valle.



Foto 11. Río Urubamba en el sector de Tiobamba, a 42 km aguas abajo del Aobamba, donde se ven los restos de material aluviónico y los daños causados (1998).

Desembocadura del Aobamba

A fines del año 2003 se realizó una evaluación rápida de la desembocadura del río Aobamba (Carlotto y Cárdenas, 2004), donde en 1998 ocurrió un represamiento del río Urubamba. Esta evaluación se realizó porque se pretendía reubicar a los comerciantes de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu en una llanura formada sobre los depósitos del abanico aluvial que represó el río (Foto 12). Además, este sitio sería ocupado por parte de la población de Santa Teresa, localidad situada unos 6 km aguas abajo del río Urubamba, y que fue afectada por el aluvión de Sacsara ocurrido también en 1998 (Carlotto et al., 1999).

En esa época se observó la construcción de muros de contención “provisionales”, que eran amontonamientos de bloques de rocas y gravas que desviaban el curso de agua del río Aobamba hacia su margen izquierda, y dejaban gran parte del cono aluvial libre, con una superficie plana e hipotéticamente muy favorable para establecer un poblado (Foto 13).

Sin embargo, las descripciones del aluvión de 1998 y las evaluaciones recientes, obligan a no descartar que en un futuro próximo se origine un nuevo aluvión que arrasaría con todo lo que encuentre a su paso, incluyendo cualquier poblado. En consecuencia, el área que se quiera establecer en la desembocadura del Aobamba es de muy alto peligro por los aluviones, pues en las laderas del Salcantay todavía

existe una gran cantidad de material morrénico, agua y deslizamientos que pueden reactivarse en cualquier momento y generar un aluvión similar al ocurrido en 1998.

El muro provisional que se ha construido no ofrece ninguna garantía para evitar un flujo de detritos producido por un aluvión de regulares dimensiones. Por eso se recomendó al Gobierno Regional del Cusco que no autorice construcciones, menos la de un poblado, en la desembocadura del Aobamba, por ser una zona de muy alto peligro y vulnerable a los huaycos o aluviones (Carlotto y Cárdenas, 2004).



Foto 12. Llanura aluvial formada en 1998 en la desembocadura de la quebrada Aobamba en el río Urubamba.



Foto 13. Margen derecha de la desembocadura del Aobamba relleno por material aluviónico en 1998. Ahora se pretende ubicar una población en esta zona que es de muy alto peligro por los aluviones. Al fondo, el río Urubamba y un puente que permite el acceso desde Santa Teresa.

Referencias bibliográficas

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. Lima. 320 p.

Carlotto, V. y Cárdenas, J. (2004). Informe geológico sobre la ubicación de un poblado en la desembocadura del Aobamba en el Vilcanota. Gerencia de Recursos Naturales y Ambientales, Gobierno Regional del Cusco, 5 p.

4. GEOLOGÍA, GEODINÁMICA Y SIMULACIÓN DE FLUJOS FLO 2D PARA EL MAPA DE PELIGROS EN LA QUEBRADA RUNTUMAYO-NEVADO VERÓNICA (CUSCO)

José Cárdenas¹, Patricio Valderrama² y Víctor Carlotto^{1,2}

¹ UNSAAC Av. De la Cultura 733, Cusco, cardenasroque@gmail.com

² INGEMMET Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, pvalderrama@ingemmet.gob.pe

Introducción

El 12 de octubre del 2005 ocurrió un alud o avalancha debido a un desprendimiento de hielo y rocas del nevado Verónica o Wakaywillque; aguas abajo, en la quebrada Runtumayo, se convirtió en un flujo de detritos o aluvión que represó parcialmente las aguas del Urubamba y afectó unos 400 metros de la línea del ferrocarril, además de dañar terrenos agrícolas, sistemas de riego y agua potable. Afortunadamente no hubo víctimas en el incidente. Esta noticia cautivó la atención nacional e internacional debido al bloqueo de la línea férrea y por lo tanto de los turistas que viajaban a Machupicchu (Fig. 1). En vista de estas circunstancias, geólogos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) y del INGEMMET, con la participación de Defensa Civil, realizaron trabajos de reconocimiento en el terreno, una evaluación del fenómeno (Cárdenas et al., 2005; Cárdenas et al., 2006) y la posterior simulación de éste con el software FLO 2D (Valderrama et al., 2006); la experiencia acumulada permitió construir el mapa de peligros por aluviones.

Marco geológico

La quebrada Runtumayo se localiza en la zona de amortiguamiento del Santuario Histórico de Machupicchu, es un afluente del río Urubamba por la margen derecha y en su nacimiento está el nevado Verónica que forma parte de la Cordillera Oriental. El nombre original de este nevado es Wakaywillque y tiene una altura de 5893 msnm, mientras que la quebrada Runtumayo desemboca en el río Urubamba en la cota de 2730 msnm, marcando un desnivel aproximado de 3000 m. El nevado tiene una longitud aproximada de 10 km en dirección aproximada este-oeste y 2 km de ancho; en él se han desarrollado glaciares de montaña cuya altura mínima de nieves es 4600 msnm en promedio. Este nevado se caracteriza por tener una topografía muy agreste, con pendientes empinadas y muy empinadas que pasan los 40 grados y que lo hacen propenso a desarrollar aludes.

El valle o quebrada Runtumayo tiene dirección noreste-suroeste, es de origen glaciar y nace de los deshielos del nevado Verónica; tiene forma en "V" por la erosión glaciar y aluvial, su longitud es de 6.5 km y la pendiente promedio es de 20%. En su cauce, desde 4500 hasta 2900 msnm, se observa material morrénico producto de glaciares antiguos. En la desembocadura del Runtumayo al Urubamba se ha formado un cono o abanico aluvial típico (Fig. 2) como resultado de varios

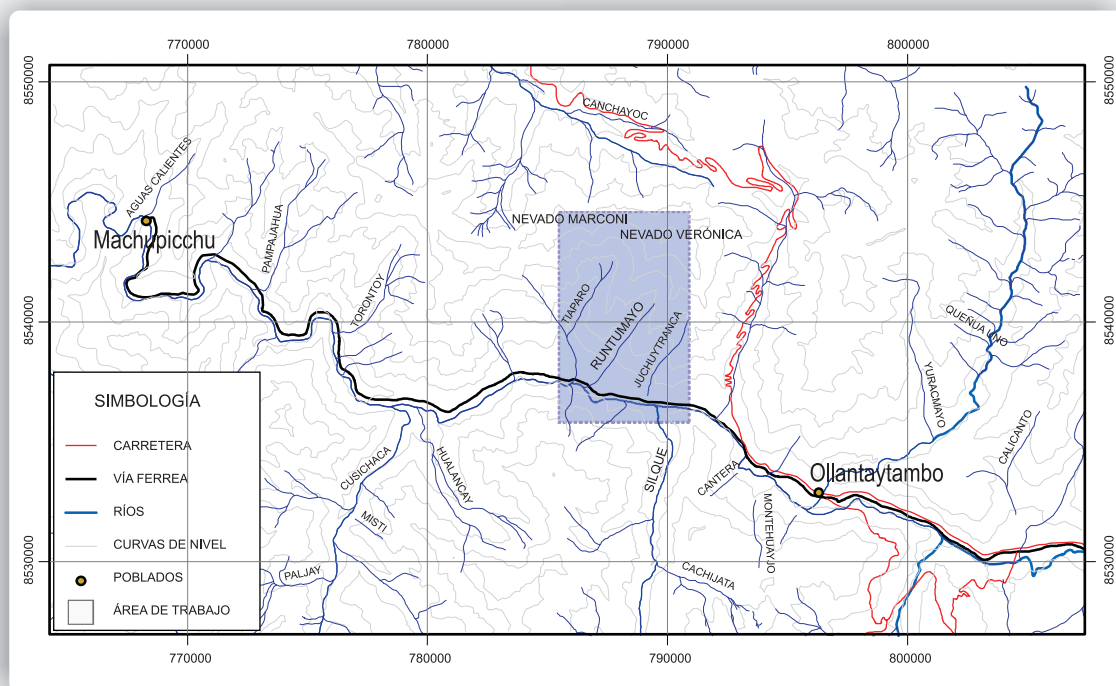


Fig. 1. Mapa de ubicación de la quebrada Runtumayo.

flujos aluviónicos desde épocas antiguas (Fig. 3). El abanico o cono está compuesto por gravas y grandes bloques de roca en una matriz areno-limosa, y es posible que varios de los aluviones que lo formaron hayan estado relacionados con aludes. La altura del cono aluvial va desde 3000 a 2930 msnm y tiene un relieve algo plano, con pendiente moderadamente inclinada. En él se sitúan las comunidades de Palomar y Tiaparo que desarrollan labores de agricultura y ganadería.

El río Urubamba se caracteriza por tener un piso de valle con un ancho promedio de 800 m, formado por conos aluviales como el Runtumayo o terrazas fluviales formadas por los depósitos del río Urubamba; su riqueza agrícola y arqueológica le ha dado el nombre de Valle Sagrado de los Incas.

El mapa geológico (Fig 2) de la zona de estudio nos muestra la Formación Ollantaytambo (Cámbrico-Ordovícico), compuesta principalmente por pizarras, esquistos, cuarcitas y niveles volcánicos; la Formación Verónica (Ordovícico) que está formada por conglomerados y finalmente la Formación San José (Ordovícico) compuesta por pizarras y cuarcitas. Entre los depósitos cuaternarios destacan los morrénicos que son el resultado del avance y retroceso del nevado Verónica y los depósitos aluviales que han formado conos o abanicos como el de Runtumayo. Este último fue construido por cuatro depósitos aluviales (Cárdenas et al., 2005) que se describen a continuación (Fig. 3):

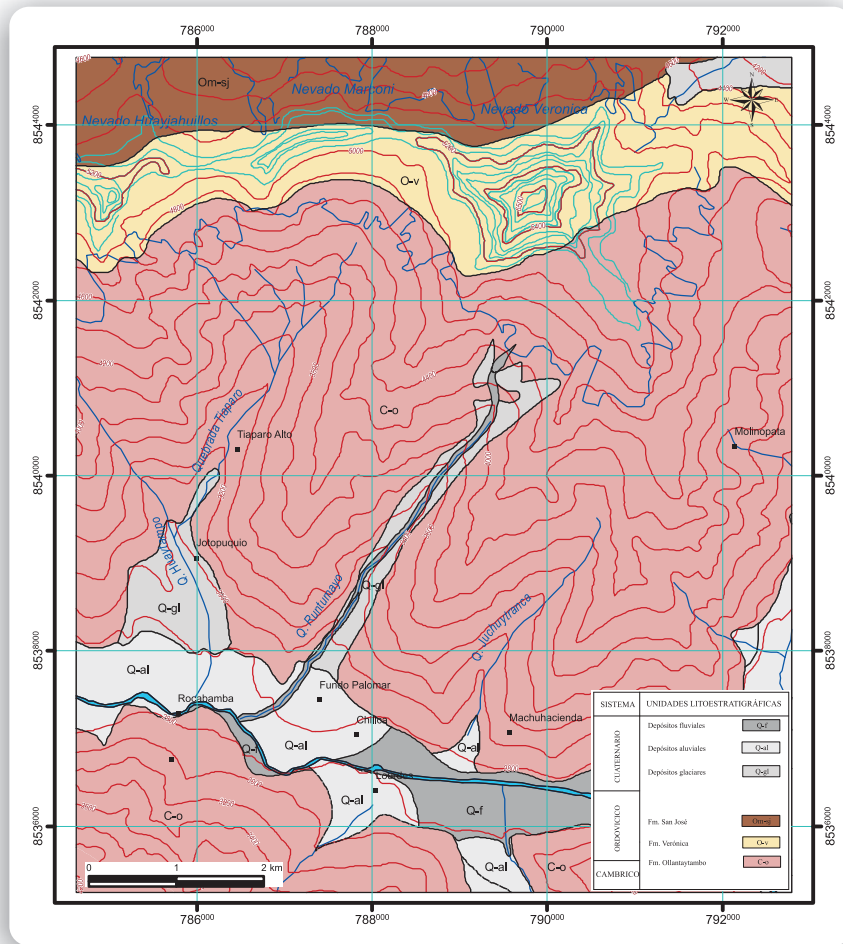


Fig. 2. Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Carlotto et al. (1996).

AL1: Son los más antiguos e importantes, ocupan una superficie mayor, aproximadamente de 2 x 1.2 km. El espesor observado en ambas márgenes de la quebrada Runtumayo es de 6 a 10 m. Este depósito está compuesto por bloques de rocas y clastos en una matriz areno-arcillosa; los bloques tienen diámetros de 4 a 5m, mientras que los clastos miden en promedio 10 a 20 cm, en una matriz más fina de 2 cm.

AL2: Las fotos aéreas muestran un cono aluvial sobre AL1, y por lo tanto posterior, que en realidad corresponde al desborde de un aluvión que no soportó el canal natural de la quebrada Runtumayo. En superficie se ven bloques de rocas y efectos de flujos de lodo poco importantes que siguieron sobre parte de la superficie de AL1. La actividad agrícola ha borrado parcialmente las evidencias.

AL3: Son más recientes que AL1 y AL2, se ven claramente entre 3100 y 3200 msnm y en el cauce de la quebrada. Su espesor es de 1 a 2 m, con clastos máximos de

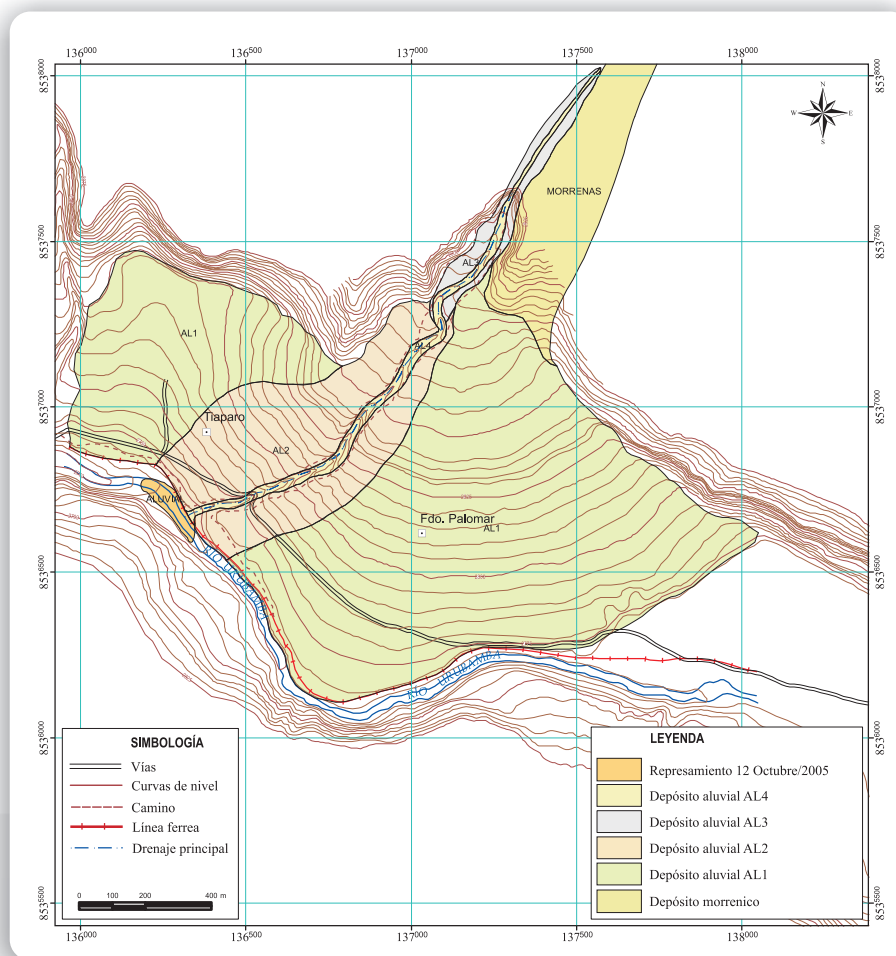


Fig. 3. Mapa que muestra los depósitos de cuatro eventos aluviales que formaron el cono aluvial de Runtumayo (Cárdenas et al., 2005).

15cm en una matriz limo-arcillosa roja que predomina. Los restos de troncos de árboles que se conservan en la masa aluvial inducen a pensar que se trata de un evento reciente pero anterior al ocurrido el 12 de octubre del 2005.

AL4: Se formaron por el aluvión del 12 de octubre del 2005. Se caracterizan por clastos de tamaño promedio de 20 cm de cuarcitas, esquistos e intrusivos, en una matriz areno-arcillosa. Los bloques tienen diámetros máximos de 2 m como promedio.

Geodinámica externa

El 12 de octubre del 2005, aproximadamente a las 22 horas, ocurrió un alud en la parte alta del nevado Verónica, que fue canalizado por la quebrada Runtumayo. El desarrollo del alud y el flujo de detritos permitieron definir tres zonas principales del recorrido (Cárdenas et al., 2005): salida, trayecto y depósito (Figs. 4 y 5).

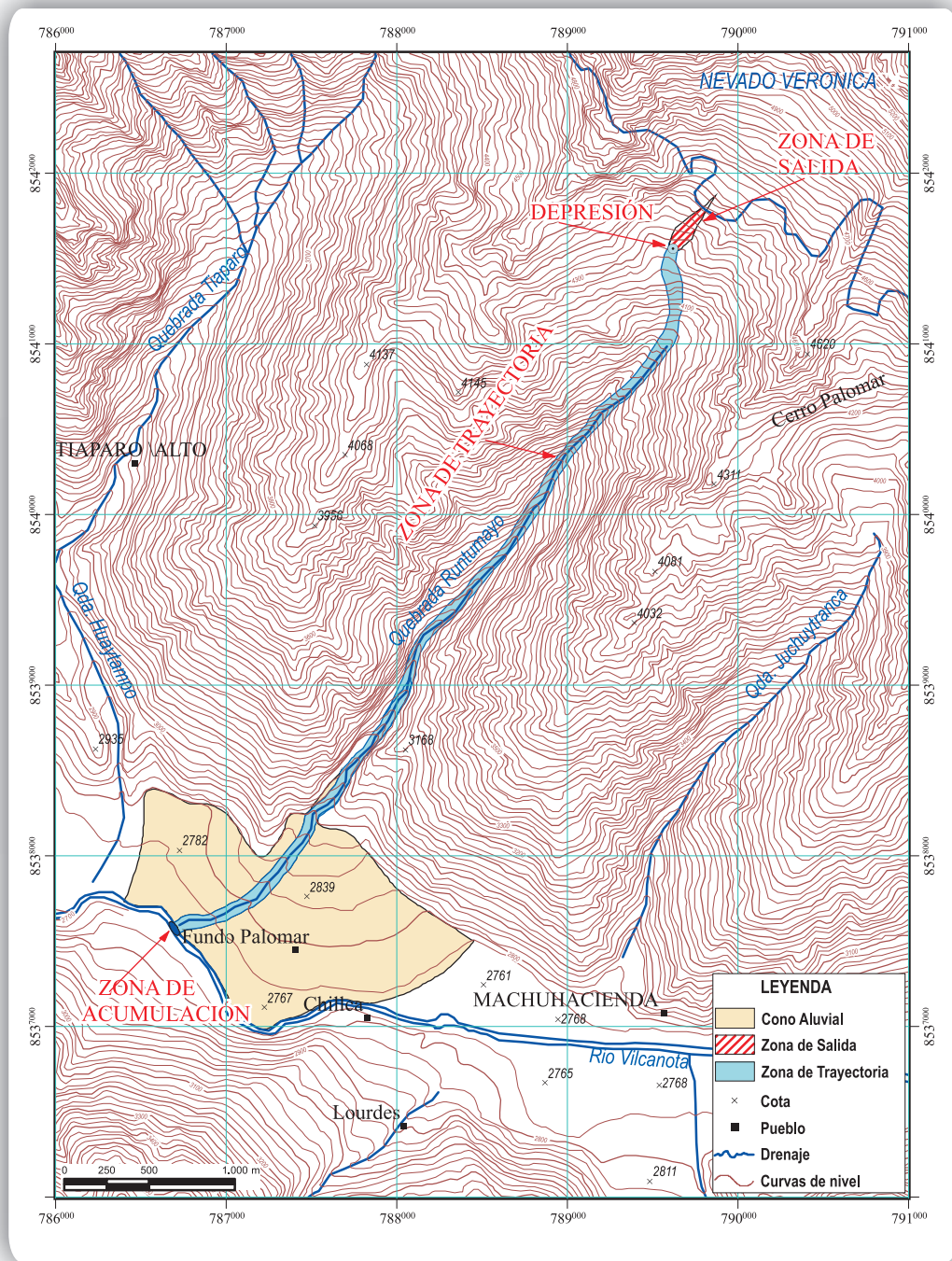


Fig. 4. Mapa de la quebrada Runtumayo que muestra la zonas de salida, trayecto y depósito del aluvión del 12 de octubre de 2005.

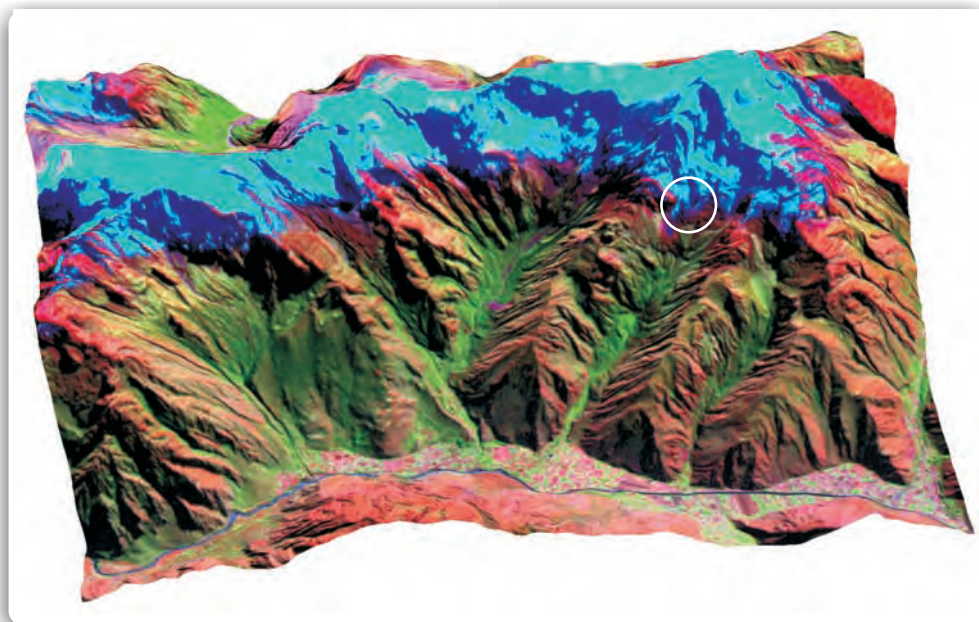


Fig. 5. Imagen de elevación digital de la quebrada Runtumayo, en la que se resalta una pequeña lengua que se desprendió el año 2005.

La zona de salida

Se denomina así al lugar donde la nieve inestable empieza a moverse por aceleración significativa de la masa de nieve. Se localiza a más de 4300 msnm y corresponde a una topografía muy abrupta, con pendiente de más de 20 grados. La imagen satelital Landsat J033-2544 del año 2001 muestra en esta zona una pequeña lengua o restos de glaciar (Fig. 5), que posiblemente fue la que se desprendió y originó el aluvión del 12 de octubre (Foto 1).

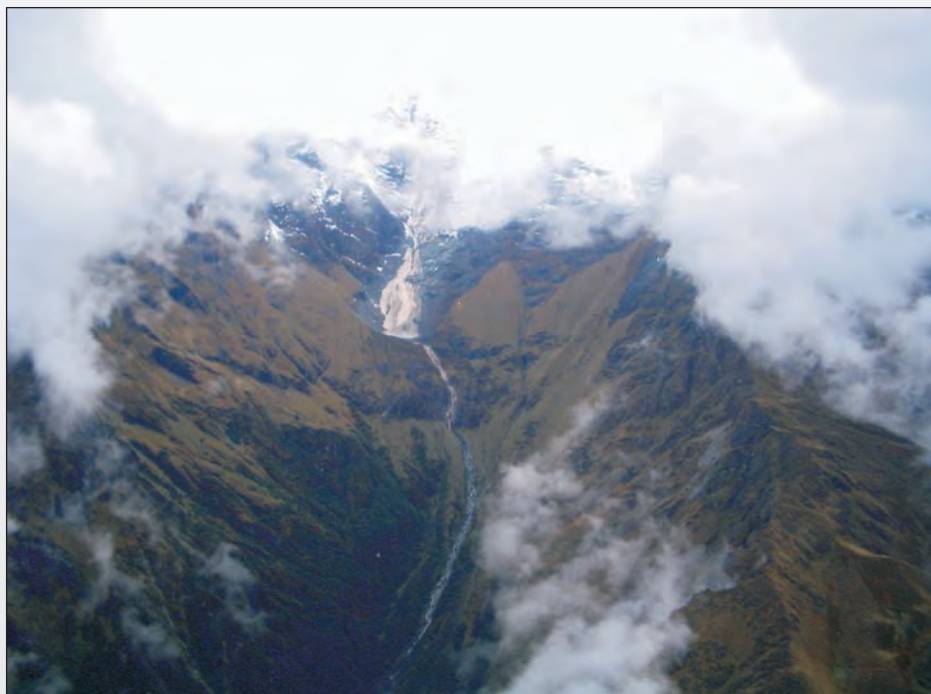


Foto 1. Vista aérea que muestra la zona de arranque del alud del 12 de octubre del 2005.

La zona de trayecto

La zona de trayecto se conecta con la zona de salida y la zona de depósito, es decir, pendiente arriba y abajo; en ella la masa del alud, que luego se comporta como flujo de agua, lodo y detritos (aluvión), alcanza su máximo valor. En esta zona se producen las incorporaciones y/o pérdidas de nieve y material sólido, y corresponde en gran parte a la quebrada Runtumayo, desde 4300 hasta 2720 msnm, en la confluencia con el río Urubamba. La pendiente es muy variada: desde 4300 a 3500 msnm es fuertemente inclinada (23°); de 3500 a 3000 msnm es moderadamente inclinada (15°) y de 3000 a 2720 msnm es solo de 10° (Foto 2).



Foto 2. Zona de trayecto con áreas con erosión y desborde del flujo de detritos.

La zona de depósito

La zona de depósito es el área donde la desaceleración es rápida, el flujo se deposita y se detiene. En este caso, el alud transformado en flujo de detritos se desaceleró por la baja pendiente y se depositó dando origen a un represamiento parcial de las aguas del río Urubamba (Fotos 3 y 4). El dique de represamiento medía 6 m de altura, 40 m de ancho y 200 m de longitud, lo que significa aproximadamente $48,000 \text{ m}^3$ de material depositado. Este represamiento destruyó una parte de la línea férrea e inundó otra (Foto 4).



Foto 3. Represamiento parcial del río Urubamba por efecto del flujo de detritos del 12 de octubre.



Foto 4. Vista aérea de parte de la zona de trayecto y la zona de depósito con represamiento parcial del río Urubamba.

Causas

En los estudios realizados por Cárdenas et al. (2005) se planteaba la existencia de una pequeña laguna que se desembalsó por efecto del alud, pero al explorar la zona no encontraron ninguna evidencia. Sin embargo, imágenes satélites tomadas antes del alud, muestran la laguna (Fig. 6); por lo tanto la causa fue un alud que desembalsó y destruyó la laguna. Luego, el flujo bajó por la ladera con mucha fuerza, erosionando e incorporando los depósitos de morrenas y transformándose en un flujo de detritos. Los detonantes que desencadenaron el alud se encuentran en la ruptura del equilibrio mecánico o térmico (deshielo). Las fuerzas que favorecen el movimiento están relacionadas con el peso de la nieve y las fuerzas que se oponen al movimiento son: la cohesión interna de la nieve, las fuerzas de rozamiento, las fuerzas de anclaje, etc. Las causas y situaciones en las que se rompe el equilibrio son muy variables y por tanto pueden ocurrir muchos tipos de avalanchas o aludes.

Es muy posible que el detonante haya estado relacionado en este caso con las variaciones extremas de temperatura, por ser muy sensible a los efectos térmicos; estas variaciones son frecuentes en las vertientes muy empinadas. Además, debió influir la forma muy agreste de la topografía, donde la nieve posiblemente no se ha adherido a la capa inferior y ha descendido, deslizándose por una rotura de su equilibrio, ya sea por causa mecánica o térmica. Días antes del alud, durante la época del año en la que normalmente la temperatura aumenta, se produjo un friaje y nevó en la zona, produciendo acumulaciones de nieve que pudieron romperse y generar el fenómeno (Cárdenas et al., 2005,2006).

Las causas del alud no han sido determinadas exactamente, pero una combinación de varios factores pudo desencadenarlo. Sin embargo, no hay que olvidar que el calentamiento global es la causa del rápido retroceso de los glaciares. Un estudio del nevado Verónica a partir de las imágenes satélites del 2001 y las fotos aéreas de 1963 concluye que existe un fuerte retroceso de decenas de metros de altitud (Cárdenas et al., 2005). Los nevados cercanos como el Salcantay o el Chicón muestran los mismos efectos de retroceso asociados a aludes y aluviones, poniendo en riesgo la infraestructura y las poblaciones.

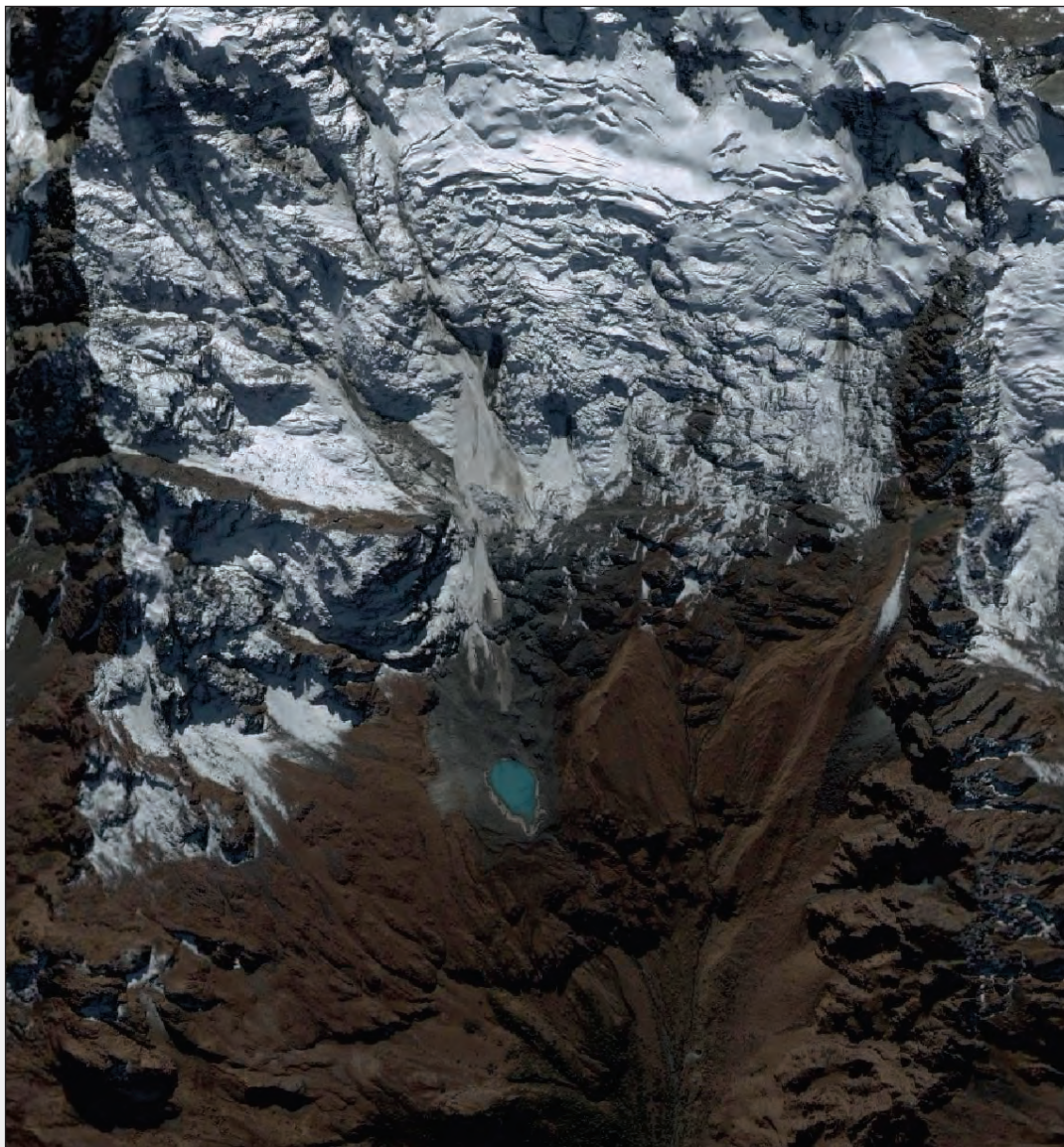


Fig. 6. Nevado Verónica y la laguna que fue arrasada por el alud del 12 de octubre del 2005.

Daños

Los daños que provocaron el alud y los flujos de detritos asociados fueron la destrucción parcial y el cubrimiento de la línea férrea Ollantaytambo-Machupicchu, en un tramo de 200 m (Foto 5), la erosión y el cubrimiento del puente carrozable Ollantaytambo-Piscacucho (Foto 6), la destrucción con caída de los pilares del puente peatonal Tiaparo-Palomar, así como la erosión y destrucción de las obras de captación de aguas para las comunidades Palomar y Tiaparo, ubicadas en la margen izquierda y derecha del río Runtumayo. También fueron afectadas las plantaciones de árboles de eucalipto de las terrazas más bajas, el desborde del flujo afectó algunos terrenos de cultivo y partes del borde de la quebrada Runtumayo fueron erosionadas. El problema mayor fue el represamiento parcial del río Urubamba por acumulación del flujo de detritos, lo que provocó la inundación de la línea férrea hasta una altura aproximada de 1.50 m y que formó un espejo que medía aproximadamente 400 m de largo y 50 m de ancho. El embalse parcial duró tres días, luego el río fue desembalsado con ayuda de maquinaria pesada que lo devolvió a su cauce normal, evitando la erosión lateral particularmente de su margen izquierda.



Foto 5. Línea férrea habilitada después del 12 de octubre del 2005. Nótese los depósitos del aluvión en ambas márgenes del río Urubamba.



Foto 6. Puente carrozable inhabilitado por los depósitos del aluvión.

Simulación del flujo hiperconcentrado en la quebrada Runtumayo: Modelo FLO-2D

El FLO-2D es un modelo numérico bidimensional que permite la inclusión de topografías complejas sobre áreas urbanizadas y planicies de inundación. El modelo se puede utilizar para simular flujos hiperconcentrados, ya sea flujo de detritos, inundaciones de barro o flujos de barro (O'Brien, 2000). Como datos de entrada se requieren una serie de factores que son descritos a continuación.

Topografía. La micro cuenca Runtumayo tiene una superficie de 10.5 km², presenta una altitud mínima de 2370 msnm y una máxima de 5893 msnm. La longitud del eje de cauce principal es de 6.5 km, con una pendiente promedio de 10%. Se han utilizado mapas topográficos a escala 1:25,000 y un mapa 1:10,000 con curvas cada 5 m; el primer mapa fue utilizado para la delimitación de la cuenca y el cálculo de los parámetros geomorfológicos, en tanto que el segundo fue empleado para la simulación.

Hidrología. Para la simulación de los flujos de lodo y escombros aplicando el FLO-2D, es necesario conocer las características hidrológicas de la cuenca y su respuesta ante una tormenta específica. Esta se representa en un hidrograma líquido construido en base al modelo hidrológico HEC-HMS y la metodología del *Soil Conservation Service* (SCS), así se obtuvo un hidrograma líquido con un caudal pico de 10.33 m³/seg (Valderrama et al., 2006).

Información de campo y gabinete. El alud transformado en flujo de detritos se desaceleró por la poca pendiente, se depositó en el río Urubamba y dio origen a un represamiento. El dique tuvo aproximadamente 6 m de altura máxima, 40 m de ancho y 200 m de longitud, lo que significa aproximadamente 48,000 m³ de material depositado.

Definición de parámetros para la simulación. El tramo simulado tiene una longitud aproximada de 1.5 km aguas arriba, desde la confluencia con el río Urubamba. Sobre el mapa 1:10,000 se generó una malla de 11,985 celdas de 15 x 15 m cada una, cubriendo parte de la garganta y la confluencia con el río Urubamba. Se introdujeron los datos de entrada como el hidrograma de caudal líquido, con su respectiva distribución de concentración de sedimentos, las propiedades del sedimento y los parámetros reológicos. Luego se aplicó el modelo bidimensional FLO-2D para la simulación del flujo hiperconcentrado de barro y escombros; para la simulación se consideraron concentraciones de sedimentos que varían entre 25 y 50%.

Simulación. Se analizó un tiempo de simulación de 36 horas. El volumen total de la creciente simulada es de 0.6 millones de metros cúbicos, de los cuales 0.24 millones son agua y 0.36 millones corresponden a sedimento (volumen almacenado+volumen fuera del área de simulación). El área de inundación

reportada por el modelo es de 191,744 m². Se aprecian tirantes máximos de 8.5 m con velocidades hasta de 2 m/s en el cauce de la quebrada y tirantes de 5 m con velocidades hasta de 4 m/s en la confluencia con el río Urubamba (Figs. 7 y 8).

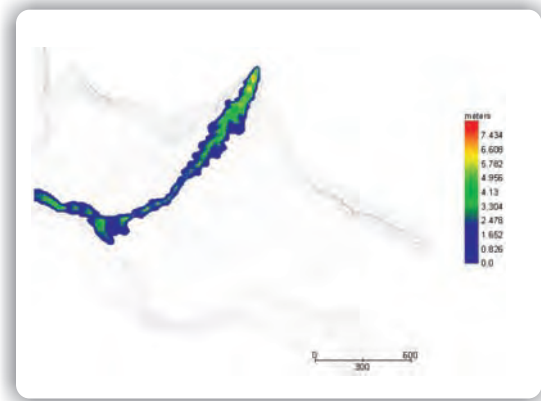


Fig. 7. Profundidades de flujo máximas.

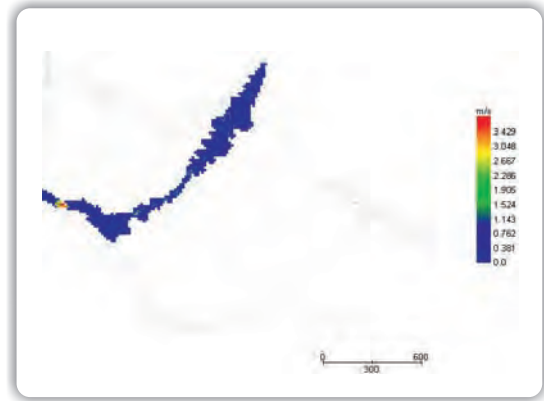


Fig. 8. Velocidades del flujo máximas.

Además se realizaron cuatro escenarios posibles con mayores flujos hiperconcentrados que puedan afectar la quebrada y se determinó el peligro inminente de las poblaciones y terrenos de cultivo aledaños.

Análisis e interpretación de resultados

De los resultados obtenidos para la quebrada Runtumayo, y más específicamente en el cono aluvial, se observa en la parte superior mayor presencia de tirantes del flujo que van desde 4 a 7.5 metros; también se observa un pequeño desborde del flujo en ambos márgenes del cauce principal. En la parte baja de la quebrada se ven tirantes del flujo de 3 a 4 m. Estas alturas del flujo han sido comparadas con las evidencias de campo, donde el comportamiento del flujo simulado ha sido similar a los puntos de control fijados dentro de la quebrada (Foto 7). Por otro lado, en la zona de represamiento se observan tirantes de hasta 6 m, lo que se asemeja a lo visto en campo, es decir, se produce un represamiento aguas abajo del río Urubamba. En esta zona de confluencia se encuentran las mayores velocidades de flujo, es decir 3.5 m/s.

El modelo FLO-2D ha reportado un volumen de agua de 241,087 m³, que se presume se debe la contribución por la lluvia y/o por el derretimiento de los bloques de hielo que se desplomaron del glaciar. Se ha considerado que el caudal pico líquido del hidrograma de entrada es igual al caudal previsto de ambos fenómenos. El modelo ha reportado también un volumen de sedimentos dentro de la quebrada igual a 118,412 m³, que viene a ser el volumen de represamiento en el río y el

volumen depositado a lo largo del cauce principal. En la simulación se observa un cierre de la línea férrea de 200 m aproximadamente, por material proveniente del flujo de detritos en la desembocadura de la quebrada Runtumayo. En conclusión, los resultados muestran que el modelo teórico respecto al flujo de detritos es similar a lo ocurrido el 12 de octubre del 2005, y por tanto dan validez al modelo (Valderrama et al., 2006).

Mapa de peligros

En base a la cartografía de los diferentes conos aluviales (Fig. 3), el estudio del alud-flujo de detritos del 12 de octubre y la aplicación del modelo numérico bidimensional FLO-2D de simulación digital, se ha realizado el mapa de peligros por aluviones en la desembocadura de la quebrada Runtumayo (Fig. 9).

a) Peligro muy alto: En caso de ocurrir un flujo de detritos similar al 12 de octubre las zonas más afectadas serían el cauce actual del río Runtumayo y los bordes de este cauce/canal, ya que se pueden formar nuevas represas y desembalses desviando el flujo de detritos (aluvión) y afectando terrenos de cultivo y viviendas. Los límites de la zona de peligro muy alto vienen del modelo FLO-2D.

b) Peligro alto: Un aluvión similar al AL2, que originó un cono superficial sobre AL1, afectaría el lugar. En ese caso sería una zona de peligro muy alto, pero la escasa frecuencia de ocurrencia, ya que es algo antigua, la convierte en una zona de peligro alto. En este caso un flujo de detritos de mayor dimensión que el ocurrido el 12 de octubre sobrepasaría el canal natural de la quebrada Runtumayo y saldría de una manera similar a AL2, afectando no solo terrenos de cultivo sino también algunas construcciones existentes y poniendo en riesgo las vidas humanas.

c) Peligro medio: Corresponde a toda la superficie del cono aluvial de Runtumayo. Un fenómeno de grandes dimensiones, que no está descartado, provocaría el desprendimiento de una gran masa de nieve y roca, y ocasionaría un flujo también de grandes dimensiones y que afectaría a todo el cono aluvial.



Foto 7. Área afectada por desbordes del flujo de detritos que también aparece en el modelo.

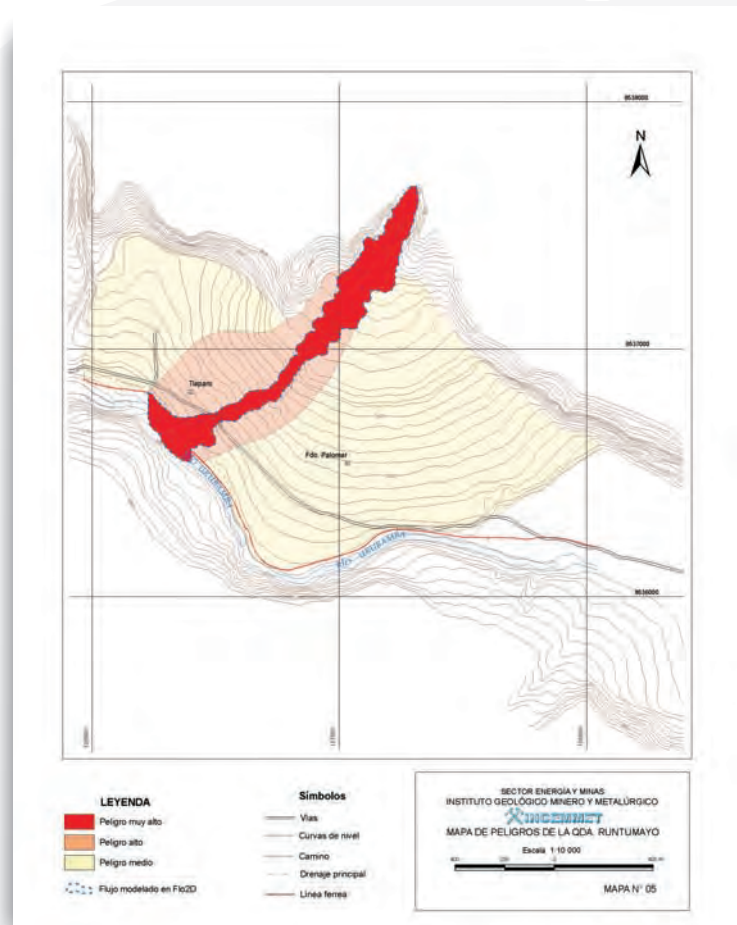


Fig. 9. Mapa de de peligros de la quebrada Runtumayo.

Conclusiones

El alud y el flujo de detritos del 12 de octubre del 2005 constituyeron un fenómeno de origen geológico y climático que está relacionado con el retroceso del nevado Verónica. Si bien este fenómeno es de pequeñas dimensiones, es un llamado de atención para prevenir otros que pueden ocurrir en las quebradas adyacentes, o relacionados con nevados cercanos como el Salcantay o Chicón; este último puede afectar a la ciudad de Urubamba.

Como ejemplo y modelo a seguir se ha realizado un mapa de peligros por aluviones de la quebrada Runtumayo, donde se combinan las evidencias geológicas de eventos antiguos y recientes con el modelo numérico de flujos FLO 2D. Este último fue testado y dio valores similares al del aluvión del 12 de octubre del 2005.

Una evaluación detallada del nevado Verónica, no solo a la altura de Runtumayo sino también de las otras quebradas que nacen en esta montaña, es de suma importancia para descartar o confirmar la presencia de peligros geológicos. La realización de estudios glaciológicos y de peligros geológicos es de gran importancia a nivel de la Cordillera de Vilcabamba y del valle del Urubamba, particularmente dentro del Santuario Histórico de Machupicchu.

Referencias bibliográficas

Cárdenas, J., Carlotto, V., Valderrama, P., Castillo, L., Fidel, L. y Tintaya, D., (2005). Geología, geodinámica y peligros en la quebrada Runtumayo (Cusco): Avalancha y aluvión del 12 de octubre del 2005. Informe Técnico INGEMMET, Lima-Perú, 38 p.

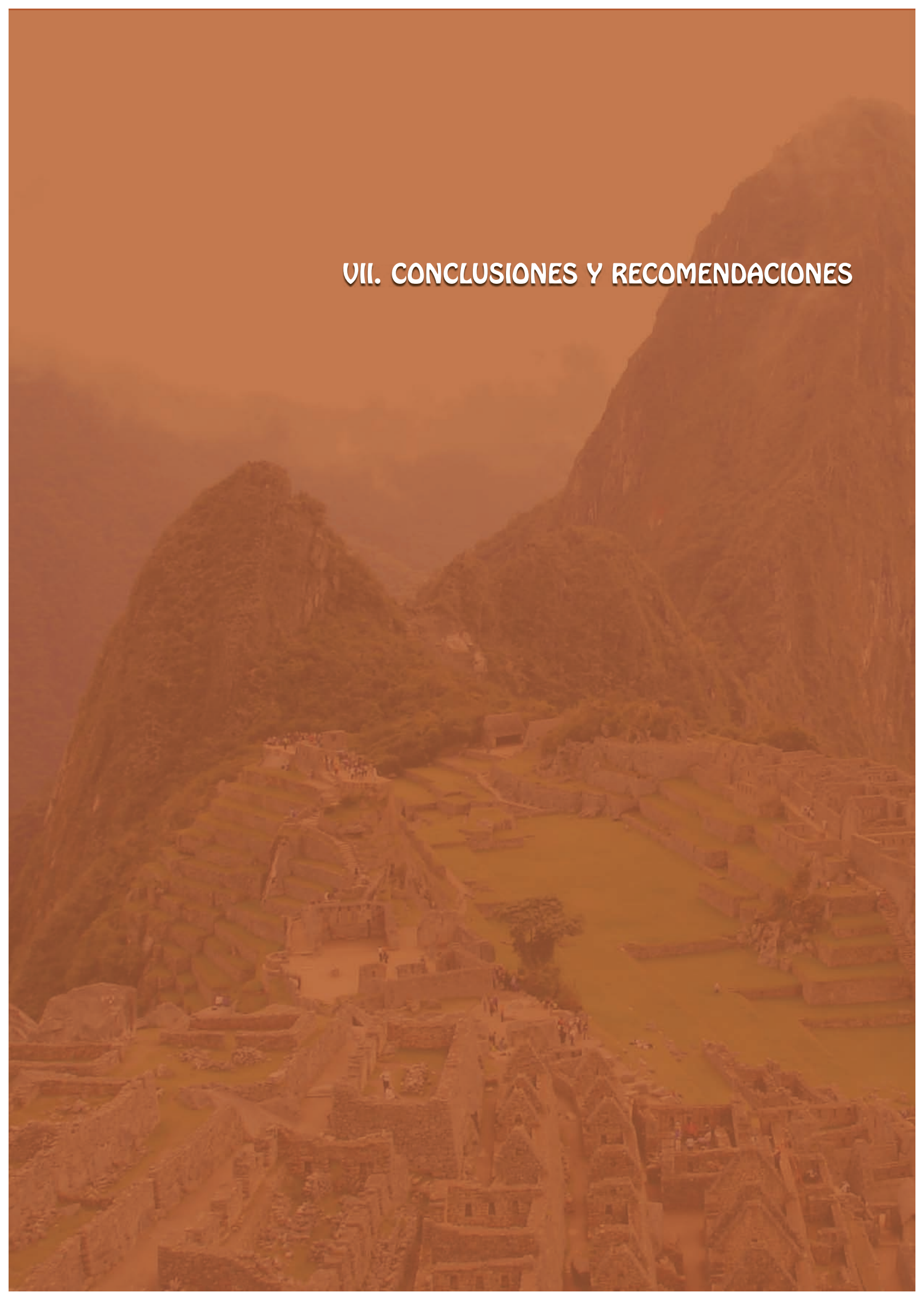
Cárdenas, J., Carlotto, V., Valderrama, P., Fidel, L. y Tintaya, D. (2006). Geología y geodinámica en la quebrada Runtumayo-Nevado Verónica (Cusco): Alud y flujo de detritos del 12 de octubre del 2005. XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú. Resúmenes Extendido, p. 84-87.

Carlotto, V., Gil, W., Cárdenas, J y Chávez, R. (1996). Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. Carta Geológica Nacional INGEMMET, Boletín 65, Serie A, Lima. 245 p.

O'Brien J.S. (2000). FLO-2D User's Manual, Versión 2000.10, Nutrioso, Arizona. Consultado en <http://www.flo-2d.com>.

Valderrama, P., Castillo, L., Cárdenas, J., Carlotto, V. y Fidel, L. (2006). Mapa de peligros y simulación del flujo FLO-2D en la quebrada Runtumayo (Cusco): Alud y flujo de detritos del 12 de octubre del 2005. XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú. Resúmenes Extendido, p. 167-170.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CONCLUSIONES

1. El Santuario Histórico de Machupicchu se sitúa en plena Cordillera Oriental, al norte limita con los nevados Verónica (5750 msnm) y Bonanta (5024 msnm), y al sur con el Salcantay (6264 msnm) y Huamantay (5459msnm). La ciudad inca de Machupicchu está situada a 2450 msnm, 500 m encima del río, debido al cañón del Urubamba que recorta la cordillera en un área en que el paisaje es muy accidentado, el clima es similar al de ceja de selva, con abundantes lluvias, alta humedad, temperaturas cálidas y alta nubosidad.
2. Gran parte del Santuario Histórico de Machupicchu se halla sobre rocas ígneas intrusivas del batolito de Machupicchu de edad Pérmica-Triásica, predominando el granito. La mayoría de sitios arqueológicos, incluyendo la ciudad y los caminos incas, se han construido sobre depósitos cuaternarios coluviales y aluviales.
3. En los cerros Machupicchu, Waynapicchu y en los alrededores afloran los granitos, sin embargo, la ciudad inca ha sido construida principalmente sobre depósitos de caos granítico, que son apilamientos de bloques de granitos de dimensiones variables, que han aprovechado las fracturas del macizo rocoso y la gravedad para separarse.
4. Las fallas y diaclasas son importantes y cortan las rocas graníticas; ellas han condicionado la evolución morfológica de la región, particularmente el desarrollo de caos granítico; sin embargo, las fallas no están activas y no tienen relación con los fenómenos geodinámicos actuales que afectan a la ciudad inca y otros sitios arqueológicos.
5. Los fenómenos que afectan a la ciudad inca son de geodinámica externa, cuyo origen está relacionado directamente con el agua y la gravedad, y son: los asentamientos, la sufusión, los derrumbes, la caída de rocas, los deslizamientos superficiales, la erosión superficial y la reptación.
6. La ciudad inca de Machupicchu ha sido fundada principalmente sobre el caos granítico, en una zona bastante inestable que los incas estabilizaron mediante andenes y muros, y solamente después construyeron sus templos, como el Torreón, además de sus viviendas y almacenes. Durante la ocupación inca, los andenes y todas las construcciones en general eran conservadas mediante canales de drenaje dentro un sistema planificado de evacuación integral de las aguas pluviales que son abundantes en esta zona. Además, las viviendas tenían techos cuyas caídas estaban integradas a los sistemas de canaletas.
7. En la actualidad, la ausencia de techos en las construcciones y la falta de conservación y/o funcionamiento de los drenes en la ciudad inca hacen que las aguas penetren al suelo, lavando las arcillas y limos que se hallan entre los bloques del caos granítico (sufusión), haciendo perder la capacidad de carga

de los suelos existentes, y produciendo asentamientos, tal como se observa en el Templo Principal, Templo de las Tres Ventanas, el Torreón, Aposento de la Ñusta, etc., con el consiguiente desequilibrio, movimiento de bloques y las separaciones de juntas en las construcciones. La ciudad ha experimentado también numerosos deslizamientos superficiales por la falta de restauración o mantenimiento del sistema de drenaje.

8. La capacidad de carga se relaciona con problemas geológicos en sitios específicos de la ciudad, como la plataforma continua, al sur del Intiwatana, donde un muro muestra signos de deformación y puede colapsar y poner en peligro la seguridad física de los visitantes. Lo que se observa en la ciudad inca es falta de organización, orden, disciplina en los circuitos y tiempos de recorrido, y buen comportamiento de muchos visitantes y guías.
9. El año 2001, Machupicchu fue el centro de la atención mundial luego de que el equipo de investigadores japoneses, coordinando con UNESCO, sembró la alarma internacional al afirmar que la ciudad inca, Patrimonio Mundial de la Humanidad, corría un riesgo inminente de desplome, tras comprobar mediante medidas de extensómetros que un sector de la ladera se había desplazado 12 mm durante el mes de diciembre del año 2000. Según los japoneses, esto era una prueba de la existencia de grandes deslizamientos que destruirían la ciudad inca. A pesar de que fueron desmentidos por autoridades y especialistas peruanos, se convocó a otras misiones científicas, como la checa-eslovaca, italiana y peruana-canadiense, quienes expusieron sus resultados en el taller internacional llevado a cabo en septiembre del 2005 y cuya conclusión principal fue que no existe tal deslizamiento que amenaza a Machupicchu.
10. Los fenómenos geodinámicos que afectan al Camino Inca Tradicional y al Camino Sagrado son: erosión superficial, derrumbes, deslizamientos, desprendimiento o caída de rocas, aluviones, reptaciones, erosión de ríos, asentamientos y sufusión. Estos fenómenos, casi todos relacionados con los efectos del agua, han originado y continúan causando la destrucción parcial o total de algunos sectores del camino.
11. A partir de las matrices de evaluación de impacto ambiental en el Camino Inca Tradicional, se concluye que los factores ambientales más impactados están relacionados con el deterioro de los suelos, la estabilidad de los taludes y la seguridad de los sitios arqueológicos. Las actividades antrópicas que más impactan son los incendios, luego, las construcciones e instalación de postes, la deforestación, la instalación y las actividades en las áreas de camping. Los fenómenos geológicos se han caracterizado para cada tramo, y se ha elaborado una zonificación de los peligros. Las acciones comunes que impactan el medio ambiente son la generación de residuos sólidos, la deforestación y la excesiva capacidad de carga.

12. En base a la problemática descrita, las evaluaciones y las recomendaciones realizadas, la capacidad de carga en el Camino Inca Tradicional no deberá exceder a 500 visitantes por día, cifra que ya está establecida.
13. El relieve muy accidentado y las condiciones climáticas variadas del Santuario Histórico de Machupicchu han contribuido al desarrollo de numerosos fenómenos de geodinámica externa, destacando los que se presentan en las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo, en cuya desembocadura se asienta el poblado de Machupicchu. Otras zonas de importancia son las quebradas de Aobamba y Runtumayo, esta última en la zona de amortiguamiento del Santuario Histórico.
14. La configuración urbana del poblado de Machupicchu y el crecimiento urbano en zonas muy vulnerables constituyen un riesgo para la población, porque no se aplica un Plan de Ordenamiento Urbano que controle y oriente el crecimiento del poblado. Actualmente no existen espacios para uso urbano debido a que casi todas las áreas despobladas y parte de las pobladas corresponden a zonas de ocurrencia de algún fenómeno peligroso, particularmente aluviones y derrumbes, que son frecuentes en las quebradas Aguas Calientes y Alcamayo. Así, los daños causados por el aluvión de abril del 2004 estaban previstos en el Plan de Ordenamiento Urbano del 2000 y no se tomaron las acciones necesarias (basadas en las propuestas dadas oportunamente), que pudieron evitar al menos la pérdida de vidas humanas. Sin embargo, un sistema de alerta temprana recientemente instalado permitió la evacuación de la población y los turistas durante el aluvión de abril del 2007.
15. Al menos dos eventos aluviónicos en la quebrada Aobamba represaron parcialmente el río Urubamba en 1998. Se ha considerado como posible causa del flujo a la saturación de los depósitos morrénicos al pie del Salcantay, por efecto de temperaturas más altas de las máximas normales, relacionadas con el Fenómeno del Niño. La magnitud del aluvión ha sido calculada entre 25 y 50 millones de metros cúbicos en base al volumen del material transportado por el flujo aluviónico. El aluvión destruyó la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, con pérdidas estimadas en más de 100 millones de dólares. A pesar de ser una zona de alto peligro, la desembocadura del Aobamba en el Urubamba, ahora con un relieve plano y amplio, es tentada por los comerciantes y agricultores de la zona para establecer un centro poblado.
16. Un alud o avalancha producido por el desprendimiento de hielo y rocas del nevado Verónica o Wakaywillque ocurrió el día 12 de octubre del 2005. Esta avalancha se convirtió, aguas abajo, en la quebrada Runtumayo, en un flujo de detritos (aluvión) que al llegar al río Urubamba represó parcialmente sus aguas y afectó unos 400 m de la línea del ferrocarril, único medio directo para llegar a la ciudad inca de Machupicchu. El aluvión afectó también los terrenos

agrícolas, los sistemas de riego y el agua potable, pero no se registraron víctimas.

RECOMENDACIONES

1. Poner en valor el sistema de drenaje inca mediante restauraciones y/o reconstrucciones en los sitios donde ya no existe, lo que permitirá una adecuada evacuación de las aguas pluviales que son la causa principal de los problemas geodinámicos que afectan a la ciudad inca de Machupicchu. Con este fin se deben utilizar los mapas de evacuación de aguas pluviales propuestos en este estudio para los diferentes conjuntos, y que se integrarían al plan general de sistemas de drenaje de la ciudad inca.
2. Realizar las recomendaciones descritas para cada conjunto, siendo algunas comunes, como la compactación de terraplenes, construcción o restauración de pisos impermeables, pero con una inclinación hacia los drenajes. Igualmente, se debe monitorear el movimiento en las separaciones de juntas en los templos y otros conjuntos que presenten estos problemas. En el Templo Principal se deben colocar calces para amortiguar y repartir mejor las presiones en las juntas de separación formadas por los asentamientos. En las fuentes litúrgicas se debe revisar todo el sistema para poder suprimir las pérdidas de agua; además se debe monitorear continuamente los caudales de entrada y salida.
3. Dar seguridad a la plataforma continua al Intiwatana, donde un muro puede colapsar y poner en peligro la seguridad física de los visitantes.
4. Tomar en cuenta los resultados del Taller Internacional de Machupicchu 2005 y que las autoridades no sean sorprendidas por misiones de investigación que tratan de conseguir financiamientos, generando incertidumbre sobre la integridad física de la ciudad inca.
5. Considerar los resultados de estos estudios y otros similares en los planes maestro y, sobre todo, las conclusiones y recomendaciones para las acciones correspondientes.
6. Las principales medidas correctivas recomendables en los caminos incas son la restauración, la refacción, la construcción, la reconstrucción y el mantenimiento, incluyendo los muros de contención, drenes, gradas y plataformas. Se debe considerar la estabilidad de los taludes evitando la tala y promoviendo la reforestación; se debe controlar la erosión de los ríos y la reptación de los suelos mediante muros de contención o la rehabilitación de los que existían en épocas incas. Las obras deberán tomar en cuenta, en lo posible,

las técnicas incas que resultan menos costosas y casi siempre son más eficaces.

7. Continuar con el monitoreo y evaluación detallada de los fenómenos geodinámicos en los caminos incas y alrededores, particularmente en las zonas de mayor peligro y que puedan incidir en la seguridad de los visitantes.
8. Se debe actualizar los mapas de peligros del poblado de Machupicchu, y principalmente el mapa de evacuación, las zonas de seguridad y las rutas de escape para el caso de aluviones, teniendo en cuenta que el poblado ha crecido en los últimos años, sobre todo en los sitios de mayor peligro y en las zonas designadas como de seguridad en el mapa del año 2000.
9. Delimitar la zona de crecimiento urbano mediante señalizaciones o enmallados. Esta zona delimitada deberá estar apoyada por normas restrictivas sobre el uso del espacio comprendido en el ámbito de la zona urbana, las laderas circundantes y las quebradas Agua Calientes y Alcamayo. Controlar y orientar el proceso de urbanización evitando la ubicación de edificaciones en zonas de laderas inestables. Implementar las obras de ingeniería en zonas críticas con base en los numerosos estudios y expedientes técnicos existentes.
10. Desarrollar una intensa campaña de información, capacitación y/o educación a la población sobre los peligros, vulnerabilidades y riesgos de desastres existentes en el poblado de Machupicchu, y también sobre las medidas correctivas y de tratamiento que es posible y necesario desarrollar. La difusión de los resultados debe partir de las autoridades locales, pasando por las organizaciones de base e instituciones que promueven el turismo, con los sectores del Estado involucrados.
11. Prohibir el establecimiento de un centro poblado en la desembocadura del Aobamba por ser una zona de alto peligro por los aluviones.
12. Realizar las evaluaciones y el monitoreo glaciológico de los nevados que forman parte del Santuario Histórico de Machupicchu y de la zona de amortiguamiento, para descartar o confirmar la presencia de peligros geológicos que incidan en las poblaciones, las vías de comunicación y los sitios arqueológicos.