



## **Peligro geológico por movimientos en masa e inundación fluvial en la ciudad de Cusco**

**Lima, Perú  
2021**





INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica  
N° 80

# **Peligro geológico por movimientos en masa e inundación fluvial en la ciudad de Cusco**

**Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico**

## **Equipo de Investigación:**

**Lucio Medina Allcca  
Mauricio Núñez Peredo  
Manuel Vílchez Mata  
Fluquer Peña Laureano  
Hugo Gómez Velasquez  
Norma Sosa Senticala**

Lima, Perú  
2021

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica  
N° 80

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-06832

Nombre del autor(es). "Esta es una obra colectiva"

Razón Social: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú

Primera Edición, INGEMMET 2021

Se terminó de imprimir el 06 de julio 2021 en los talleres del INGEMMET

Tiraje: 25

## © INGEMMET

Presidente Ejecutivo: Víctor Manuel Díaz Yosa.

Gerente General: Luis Panizo Uriarte.

Comité Editor: Lionel Fidel Smoll, Yorri Carrasco Pinares.

### **Dirección encargada del estudio**

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico: Lionel Fidel Smoll.

### **Unidad encargada de edición**

Unidad de Relaciones Institucionales: Yorri Carrasco Pinares.

**Revisión Técnica:** Jesús Torres Guerra.

**Revisor Externo:** Pedro Isique Chanamé.

Corrección gramatical y de estilo: Benjamín Caballero Pacheco.

Diagramación: Ray Granados Huaylinos.

Fotografía de la carátula: Escarpa de deslizamiento en el cerro Pícol.

### **Referencia bibliográfica**

Medina, L.; Nuñez, M.; Vílchez, M.; Peña, F.; Gómez, H. & Sosa, N. (2021) - Peligro geológico por movimientos en masa e inundación fluvial en la ciudad de Cusco. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 80, 206 p., 10 mapas.

Publicación disponible en libre acceso en el Repositorio Institucional del INGEMMET. La utilización, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están autorizadas, a condición de que se cite la fuente original ya sea contenida en medio impreso o digital (<https://repositorio.ingemmet.gob.pe>).

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen, son de exclusiva responsabilidad del equipo de investigación.

# Contenido

RESUMEN.....	7
ABSTRACT .....	9
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>11</b>
INTRODUCCIÓN .....	11
1.1 PRESENTACIÓN .....	11
1.2 OBJETIVOS .....	11
1.3 ANTECEDENTES O ESTUDIOS ANTERIORES.....	11
1.4 METODOLOGÍA.....	11
1.5 ALCANCES DEL ESTUDIO .....	12
1.6 PARTICIPACIÓN.....	12
1.7 AGRADECIMIENTOS .....	13
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>15</b>
ASPECTOS GENERALES.....	15
2.1 SITUACIÓN Y EXTENSIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO .....	15
2.2 VÍAS DE ACCESO .....	15
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN .....	15
2.4 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS .....	19
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>21</b>
ASPECTOS LITOLÓGICOS .....	21
3.1 DEPÓSITOS INCONSOLIDADOS.....	21
3.2 UNIDADES DEL SUBSTRATO ROCOSO .....	25
3.2.1 Rocas intrusivas (II) .....	25
3.2.2 Rocas volcánicas (III).....	25
3.2.3 Rocas volcano-sedimentarias (IV): .....	26
3.2.4 Rocas sedimentarias (V):.....	26
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>37</b>
CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MACIZOS ROCOSOS .....	37
4.1 GENERALIDADES.....	37
4.2 METODOLOGÍA.....	38
4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS .....	39
4.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES .....	41
4.5 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA.....	48
4.6 ZONIFICACIÓN GEOMECÁNICA.....	50
4.6.1 Macizos con calidad muy mala .....	50
4.6.2 Macizos con calidad mala .....	52
4.6.3 Macizos con calidad regular.....	57
4.6.4 Macizos con calidad buena.....	59
4.6.5 Macizos con calidad muy buena .....	61

<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>63</b>
CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA.....	63
5.1 INTRODUCCIÓN.....	63
5.2 PENDIENTE DE LOS TERRENOS.....	63
5.3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA.....	64
5.3.1 Geoformas de carácter tectónico-degradacional y erosional.....	64
5.3.2 Geoformas de carácter depositacional y erosional.....	66
5.3.3 Geoformas particulares.....	67
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	<b>69</b>
HIDROGEOLOGÍA.....	69
6.1 GENERALIDADES.....	69
6.2 INVENTARIO DE MANANTIALES.....	69
6.3 CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES.....	75
6.4 CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	76
6.4.1 Caracterización hidrogeológica.....	76
<b>CAPÍTULO VII</b> .....	<b>85</b>
COBERTURA VEGETAL.....	85
7.1 GENERALIDADES.....	85
7.2 UNIDADES DE COBERTURA VEGETAL.....	85
<b>CAPÍTULO VIII</b> .....	<b>93</b>
PELIGROS GEOLÓGICOS POR MOVIMIENTOS EN MASA E INUNDACIÓN FLUVIAL.....	93
8.1 CONCEPTOS GENERALES BÁSICOS.....	93
8.2 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA EVALUACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA.....	97
8.3 INFORMACIÓN HISTÓRICA DE PELIGROS GEOLÓGICOS POR MOVIMIENTOS EN MASA Y OTROS PELIGROS.....	98
8.4 OCURRENCIAS DE MOVIMIENTOS EN MASA Y OTROS PELIGROS GEOLÓGICOS.....	100
8.4.1 Ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros por distrito.....	102
<b>CAPÍTULO IX</b> .....	<b>107</b>
SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA E INUNDACIÓN FLUVIAL.....	107
9.1 SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS EN MASA.....	107
9.1.1 Factores condicionantes de la inestabilidad y determinación del peso.....	107
9.1.2 Mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa.....	113
9.1.3 Grados de susceptibilidad a los movimientos en masa.....	113
9.2 SUSCEPTIBILIDAD A LAS INUNDACIONES Y EROSIÓN FLUVIAL.....	114
9.2.1 Método de análisis y elección de variables.....	115
<b>CAPÍTULO X</b> .....	<b>119</b>
ÁREAS CRÍTICAS.....	119
10.1 GENERALIDADES.....	119
10.2 PUNTOS CRÍTICOS IDENTIFICADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	119
<b>CAPÍTULO XI</b> .....	<b>161</b>
ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE PROBLEMAS DE MOVIMIENTOS EN MASA.....	161
11.1 GENERALIDADES.....	161
11.2 MEDIDAS PREVENTIVAS, CORRECTIVAS Y DE MITIGACIÓN.....	161
11.2.1 Medidas correctivas para deslizamientos, derrumbes y caídas de rocas.....	161

11.2.2	Medidas correctivas para zonas de flujos y cárcavas .....	179
11.2.3	Otras medidas de prevención para deslizamientos y cárcavas .....	184
11.2.4	Medidas correctivas para lechos fluviales secos .....	185
11.2.5	Medidas preventivas y/o correctivas para inundaciones y flujos rápidos.....	187
11.2.6	Sistemas de alarmas.....	187
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>189</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>191</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>193</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>197</b>
<b>RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES.....</b>		<b>199</b>





## RESUMEN

La presente publicación es el resultado de los estudios de peligros geológico por movimientos en masa que desarrolla la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Ingemmet, a través del Programa Nacional de Riesgo Geológico. Con este trabajo, nuestra institución continúa aportando con estudios para la gestión prospectiva y correctiva del riesgo en ciudades más pobladas de nuestro país, y su adecuación a los planes de ordenamiento territorial.

El área de estudio ubicada a una altitud promedio de 3400 m s. n. m. en el sur del Perú, abarca la ciudad de Cusco y sus intermicrocuencas y microcuencas a los que se le denominaron Chocco, Saphy, Cachimayo, Pumamarca, Huacotomayo, Cacllacancha, La Rinconada, Pampa Grande y Tancarpata; además, el área, es parte de los distritos de Cusco, San Sebastián, San Jerónimo, Santiago y Wanchaq; provincia y departamento del Cusco.

El trabajo se efectuó mediante la interpretación visual de imágenes de satélite multiespectral de alta resolución y fotografía aéreas antiguas; además, se generó modelo de elevación digital (DEM) con "Imágenes satelitales Pleiades proporcionadas por el Centro Nacional de Operaciones de Imágenes Satelitales (CNOIS) de la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) y procesadas por el Ingemmet para la generación de curvas de nivel; también, se usó el DEM y las curvas de nivel con 5 metros de equidistancia proporcionados por el Centro Huamanpoma de Ayala.

Según el estudio realizado, a nivel general, se identificó 478 ocurrencias de peligros geológicos por movimientos en masa y

otros peligros geológicos, de los cuales, el 38.9 % corresponde a erosión en cárcava, 23.4 % a derrumbes, 13.2 % a deslizamiento rotacional, 7.3 % a reptación de suelos, 4.2 % a flujos de detritos, 3.8 a flujos de lodo, 3.1 % a erosión en surco, 2.5 % a deslizamiento traslacional, 1.3 % a hundimientos, 1.0 % a inundación fluvial, 0.6 % a caída de rocas y 0.6 % a erosión fluvial. Así mismo, el 50.8 % corresponde a eventos activos, el 25.5 % antiguos y el 23.6% a latentes. La mayor cantidad de ocurrencias se identificaron en el área del distrito de San Sebastián; le siguen los distritos de San Jerónimo, Cusco, Santiago y finalmente Wanchaq. En estos distritos, a excepción de Wanchaq, predomina la ocurrencia de erosión en cárcava.

Además, se identificó 26 puntos críticos que se distribuyen entre los distritos de San Sebastián (10 puntos), San Jerónimo (5 puntos), Cusco (6 puntos), Santiago (4 puntos) y Wanchaq (1).

Para diferenciar los grados de susceptibilidad, se usó el método basado en la categorización y ponderación de factores (Método heurístico, indirecto y cualitativo), cuyo objetivo principal es indicar y priorizar áreas donde las condiciones existentes hacen probable la ocurrencia de movimientos en masa. El proceso de elaboración se inició con el análisis de los factores (mapas: Litológico, Zonificación geomecánica de macizo rocoso, Pendientes del terreno, Geomorfológico, Hidrogeológico y Cobertura vegetal) relacionados con la ocurrencia de fenómenos inventariados y cartografiados.

Finalmente, en el presente estudio, se proponen algunas alternativas generales para el manejo de los problemas generados por los movimientos en masa e inundaciones en el área de estudio.



## ABSTRACT

This publication is the result of studies of geological hazards about mass movements developed by the Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico of Ingemmet, through the National Geological Risk Program. With this work, our institution continues to provide studies for prospective and corrective risk management in more populated cities of our country and its adaptation to the land use plans.

The study area is located at an average altitude of 3400 m above sea level in southern Peru. It encompasses Cusco and its inter-microbasins and microbasins such as Chocco, Saphy, Cachimayo, Pumamarca, Huacotomayo, Cacllacancha, La Rinconada, Pampa Grande and Tancarpata. Also, the area is part of the districts of Cusco, San Sebastián, San Jerónimo, Santiago and Wanchaq; province and department of Cusco.

The work was done by visual interpretation of multispectral images of high-resolution satellite photography and photographs old areas. Also, digital elevation model (DEM) was generated with "Pleiades satellite images provided by the National Operations Center Satellite Images (CNOIS) of the National Commission for Aerospace Research and Development (CONIDA) and processed by the INGEMMET for generating contour lines. Thus, DEM was also used and contours 5 meters' equidistance provided by the Huamanpoma de Ayala Center.

According to the study, in general 478 occurrences of geological hazards due to mass movements and other geological hazards were identified. For instance, 38.9% are erosion gully, 23.4%

corresponds to landslides, 13.2%, to rotational slide, 7.3%, to soil creep, 4.2%, to debris flows, 3.9, to mudflows, 3.1%, to erosion groove, translational 2.5% to translational slide 1.3% to subsidence, 1.0% to river flood, 0.6% to rockfall and 0.6% corresponds to fluvial erosion. Likewise, 50.9% are active events, 25.5% old events and 23.6% to latent events. Most occurrences were identified in the area of San Sebastián district; followed by the districts of San Jerónimo, Cusco, Santiago and finally Wanchaq. In these districts, except Wanchaq; there is predominant occurrence of gully erosion.

In addition, 25 critical points distributed among the districts of San Sebastián (10 points) were identified, for example, San Jerónimo (5 points), Cusco (6 points), Santiago (4 points) and Wanchaq (1 point).

In order to differentiate degrees of susceptibility, the method based on categorization and factor weighting was used (Heuristic, qualitative and indirect method). Its main purpose is to indicate and prioritize areas where the conditions make it likely the occurrence of mass movements. The elaboration process began with the analysis of the factors (maps: lithologic, geomechanical rock mass zoning, Terrain slopes, geomorphological, Hydrogeological and vegetation) related to the occurrence of phenomena inventoried and mapped.

Finally, in the present study some alternatives for handling the problems caused by mass movements and floods in the study area are proposed.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PRESENTACIÓN

Los peligros geológicos por movimientos en masa son considerados como procesos de origen natural que ocasionan desastres; afectan en diferente grado a las poblaciones, vías de comunicación, infraestructura hidráulica, entre otros, lo que genera altos costos en trabajos de recuperación de las áreas afectadas; a esto se suma, pérdida de vidas humanas y económicas; así mismo, la interrupción de las actividades socio-económicas y comerciales; por esta razón, son muy importantes su reconocimiento y evaluación.

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet), a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), es el ente encargado de la elaboración de estudios de peligros geológicos que afectan el territorio nacional y su incidencia sobre la seguridad física de centros poblados y obras de infraestructura, así como también de realizar estudios hidrogeológicos y brindar apoyo a las comunidades. En el marco de estas funciones, el 2017 se inició con el estudio de peligros geológicos por movimientos en masa e inundación fluvial para la ciudad del Cusco que la afectan.

La presente publicación representa los resultados obtenidos por los profesionales de la DGAR, que se pone a consideración tanto de la comunidad científica, profesionales técnicos de la región, autoridades del gobierno regional y municipalidades en los temas de la gestión de riesgos de desastres.

### 1.2 OBJETIVOS

EL objetivo principal fue desarrollar un estudio de peligros geológicos por movimientos en masa y geohidrológicos (inundación fluvial) para la ciudad de Cusco a escala 1:10 000; además, asegurar que la información temática sobre peligros geológicos que afectan al territorio de la ciudad de Cusco, sea una herramienta básica y de utilidad para la gestión del riesgo de desastres y su adecuación a los planes de Ordenamiento Territorial.

### 1.3 ANTECEDENTES O ESTUDIOS ANTERIORES

Los trabajos de investigación científica, realizados en la ciudad del Cusco y su entorno, son diversos; han tratado temáticas de geología, geodinámica, geotecnia, entre otros.

Algunos trabajos de investigación y de carácter técnico con información valiosa realizados por Ingemmet, que fue útil para elaborar el presente informe son los siguientes:

- Geología del Cuadrángulo de Cusco 28-s - 1:50 000, elaborado por Calotto *et al.* (2011). Presenta cuatro mapas geológicos a escala 1:50 000 que corresponden a los cuadrantes del mapa topográfico a escala 1:100 000 de Cusco (28 s). Incluye anexos que acompañan a la carta geológica, como los mapas geomorfológicos, estructural y de dominios tectónicos, metalogenético, hidrogeológico, ocurrencia de peligros geológicos, de geopatrimonio, de sitios de interés geológico y de geoturismo.
- Neotectónica y peligro sísmico en la Región Cusco, trabajo de investigación realizada por Benavente *et al.* (2013). Pone en evidencia las deformaciones Plio-cuaternarias relacionadas con la evolución neotectónica de la región del Cusco. La neotectónica estudia las últimas deformaciones de la corteza terrestre con la finalidad de entender la evolución geodinámica reciente de cadenas montañosas y de determinar áreas de amenaza sísmica a partir de la evaluación del potencial sismogénico de una falla (Benavente *et al.*, 2013).
- Peligro geológico en la región Cusco, estudio desarrollado por Vílchez *et al.* (2020) en el que se analiza la susceptibilidad a los movimientos en masa a escala regional; además, presenta el inventario de peligros geológicos principales e identifica las zonas críticas.

### 1.4 METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente estudio, consta de tres etapas distribuidas de la siguiente forma:

**Gabinete I:**

Los trabajos de gabinete o preliminares consistieron en:

- Recopilación y evaluación de información bibliográfica; topográfica, geológica, sísmica, hidrogeológica, uso de suelo, información sobre obras de infraestructura y registro histórico de desastres.
- Generación del modelo de elevación digital (DEM) con "Imágenes satelitales Pléiades proporcionadas por el CNOIS y procesadas por el Ingemmet".
- Generación de la base cartográfica digital con curvas de nivel con 5 metros de equidistancia a partir del modelo de elevaciones digital (DEM) proporcionado por el Centro Huampoma de Ayala (organismo no gubernamental).
- Elaboración de mapas temáticos preliminares sobre litología, geomorfología, pendientes de los terrenos y cobertura vegetal para su respectiva comprobación en trabajos de campo.
- Interpretación visual y cartografiado de peligros geológicos (movimientos en masa) y geohidrológicos (inundaciones) mediante el uso de imágenes de satélite multiespectral y fotografías aéreas antiguas. También, incluye los procesos de erosión en ladera (cárcavas y surcos).

**Campo:**

Los trabajos de campo se efectuaron en diferentes fechas donde se realizaron las siguientes actividades:

- Visita a las diferentes instituciones de la municipalidad provincial del Cusco para recopilación de información histórica de ocurrencias de peligros geológicos y de estudios anteriores.
- Cartografía e inventario de ocurrencias de movimientos en masa y otros peligros geológicos.
- Identificación de áreas críticas a la ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos.
- Levantamiento de columna estratigráfica para la validación de mapa litológico.
- Toma de datos mediante el llenado de fichas en estaciones geomecánicas para elaborar el mapa de zonificación geomecánica del macizo rocoso.
- Validación del mapa hidrogeológico e inventario de fuentes de agua.
- Actividad de socialización del estudio (reuniones técnicas de información, entrevista en medios de comunicación, ponencia y charla).

**Gabinete II:**

Los trabajos de gabinete II consistieron en:

- Procesamiento y depuración de datos obtenidos en las etapas anteriores.
- Elaboración de mapas temáticos finales.
- Preparación y redacción del informe final para su publicación como boletín.

**1.5 ALCANCES DEL ESTUDIO**

El alcance principal de este estudio es el conocimiento geológico aplicado a la identificación de los peligros geológicos por movimientos en masa y geohidrológicos (inundaciones y erosión fluvial); la evaluación o análisis de susceptibilidad en el ámbito local que utiliza métodos heurísticos donde es importante la experiencia del evaluador con ayuda de los sistemas de información geográfica - SIG para generar información adecuada del medio físico, básica y muy útil para la gestión de riesgo de desastres, como para planificación y ordenamiento territorial.

**1.6 PARTICIPACIÓN**

En el presente estudio, participaron profesionales de ingeniería geológica, expertos en la evaluación de peligros geológicos de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico y profesionales especialistas en SIG de la Dirección de Sistemas de Información del Ingemmet:

**Geología, geomorfología, geodinámica, geomecánica de rocas, cartografía, inventario, evaluación de peligros geológicos y análisis de susceptibilidad.**

Ing. Lucio Medina Allcca (jefe de proyecto)

Bach. Mauricio Núñez Peredo

Msc. Manuel Vílchez Mata

Ing. Hugo Dulio Gómez

Ing. Norma Sosa Senticala

Bach. Percy Meza Cabrera

**Hidrogeología**

Msc. Fluquer Peña

Bach. John Marlon Ccopa

**Composición, preparación e impresión de mapas**

Ing. Samuel Lu León

## **1.7 AGRADECIMIENTOS**

Se hace extensivo el agradecimiento a las autoridades de la Municipalidad Provincial de Cusco del periodo 2015-2018, principalmente a los funcionarios y al personal voluntario (de

2018) de la Oficina de Defensa Civil y de la Subgerencia de Ordenamiento Territorial, cuyo apoyo fue valioso durante la ejecución de los trabajos de investigación en la etapa de campo.





## CAPÍTULO II

### ASPECTOS GENERALES

#### 2.1 SITUACIÓN Y EXTENSIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, con aproximadamente 264 km<sup>2</sup>, abarca la ciudad de Cusco y sus intermicrocuencas y microcuencas a los que se les denominaron Chocco, Saphy, Cachimayo, Pumamarca, Huacotomayo, Cacllacancha, La Rinconada,

Pampa Grande y Tancarpatá; además, el área, es parte de los distritos de Cusco, San Sebastián, San Jerónimo, Santiago y Wanchaq; provincia y departamento del Cusco (figura 2.1).

Morfológicamente, está ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, sobre los 3 400 m s. n. m. El área pertenece a la cuenca del río Huatanay, afluente del Vilcanota.

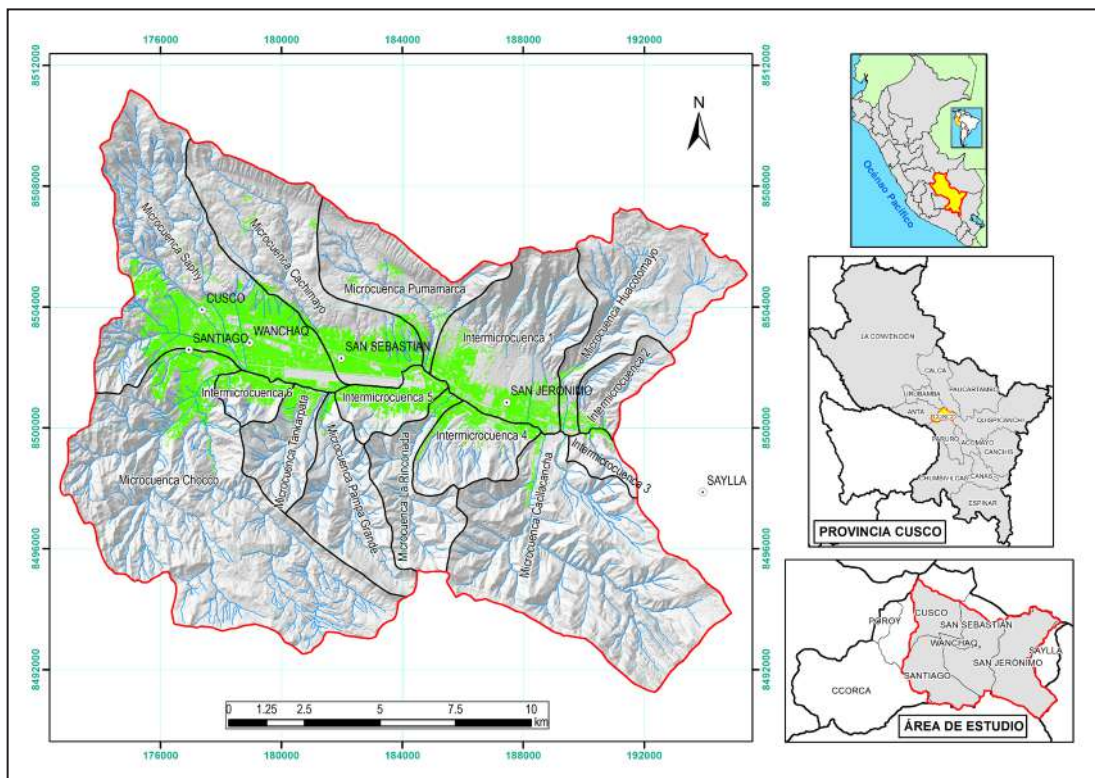


Figura 2.1 Mapa de ubicación.

#### 2.2 VÍAS DE ACCESO

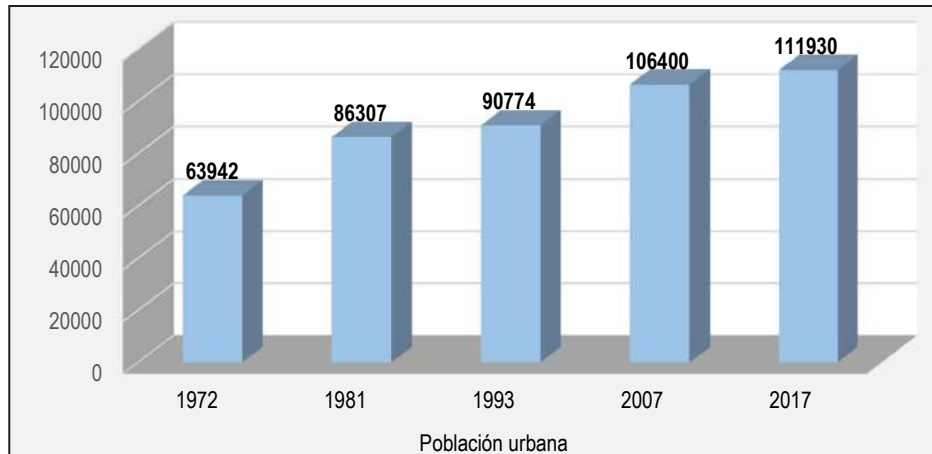
El acceso a la ciudad del Cusco desde Lima se realiza por vía aérea y terrestre. Por vía terrestre, se accede por la carretera Panamericana Sur hasta Nazca, luego se continúa por la carretera Nazca – Abancay – Cusco. Por vía aérea, existe ruta directa desde Lima.

#### 2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN

La población urbana censada en el área de estudio, según los resultados definitivos de los Censos Nacionales 2017, realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017) es de 429 352 habitantes; de ellos, 111 930 pertenecen al distrito de Cusco, 110 817 a San Sebastián, 92 729 a Santiago, 58 541 a Wanchaq y 55 335 a San Jerónimo (figuras 2.2 al 2.6).

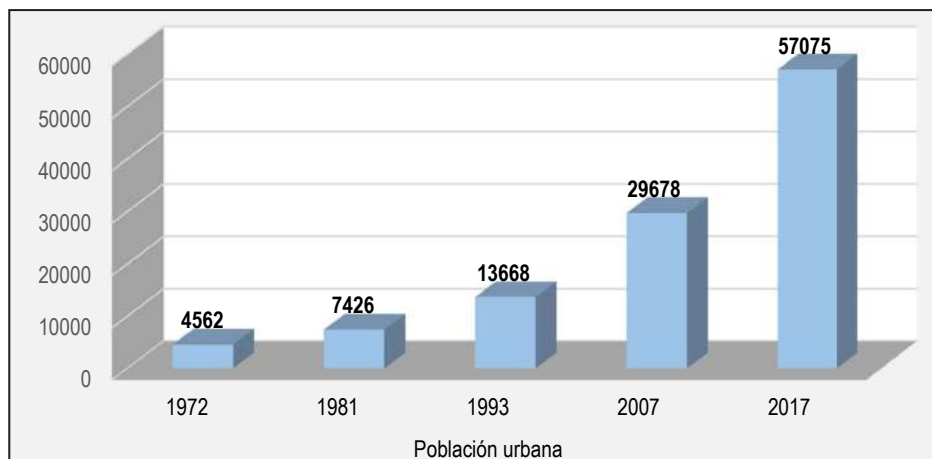
Considerando, la población de los años 1972, 1981, 1993, 2007; figuras 2.2 al 2.5, se observa el incremento considerable de la población en los distritos de Cusco, San Jerónimo, San

Sebastián y Santiago; sin embargo, en el distrito de Wanchaq la población ha disminuido de 59 134 a 58541 entre los años 2007 y 2017 (figura 2.6).



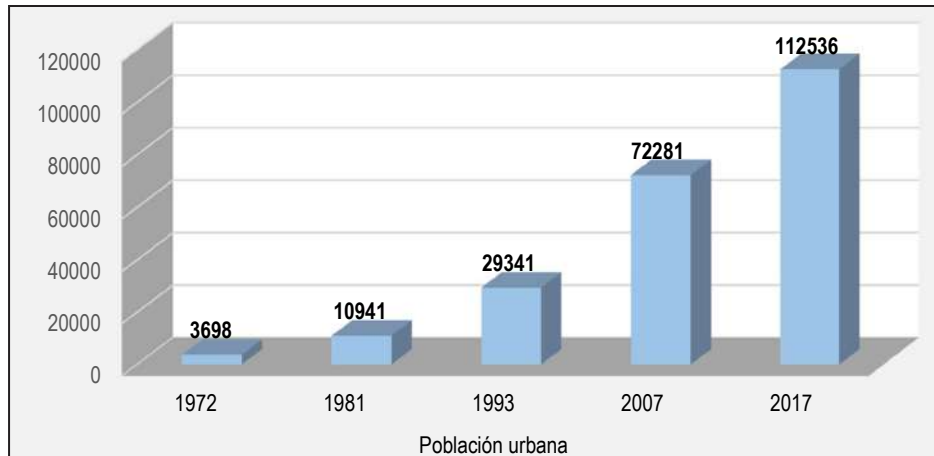
**Figura 2.2** Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de Cusco.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018; tomado de Municipalidad provincial del Cusco, 2013.



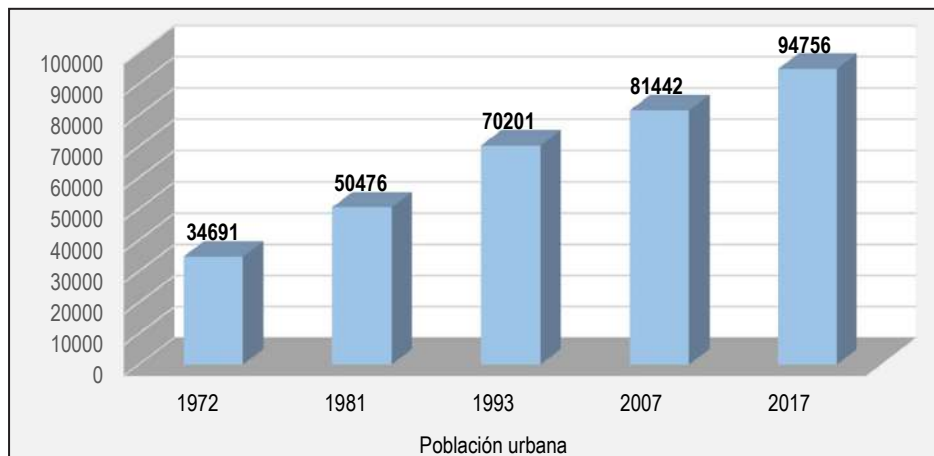
**Figura 2.3** Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de San Jerónimo.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018; tomado de Municipalidad provincial del Cusco, 2013.



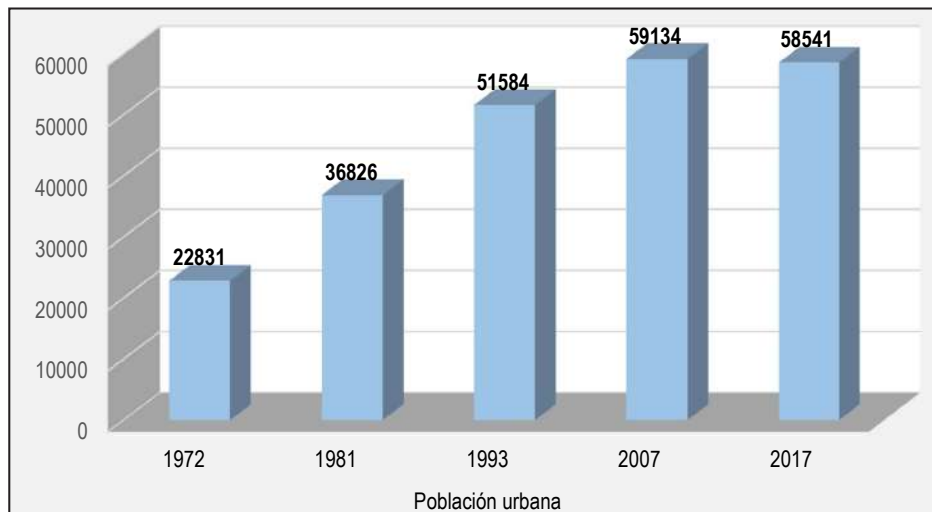
**Figura 2.4** Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de San Sebastián.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018; tomado de Municipalidad provincial del Cusco, 2013.



**Figura 2.5** Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de Santiago.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018; tomado de Municipalidad provincial del Cusco, 2013.

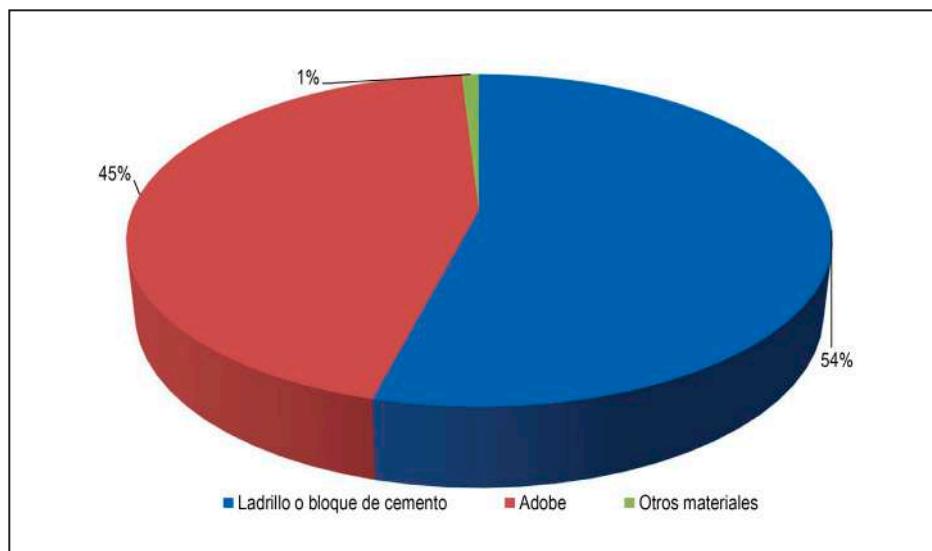


**Figura 2.6** Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de Santiago.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018; tomado de Municipalidad provincial del Cusco, 2013.

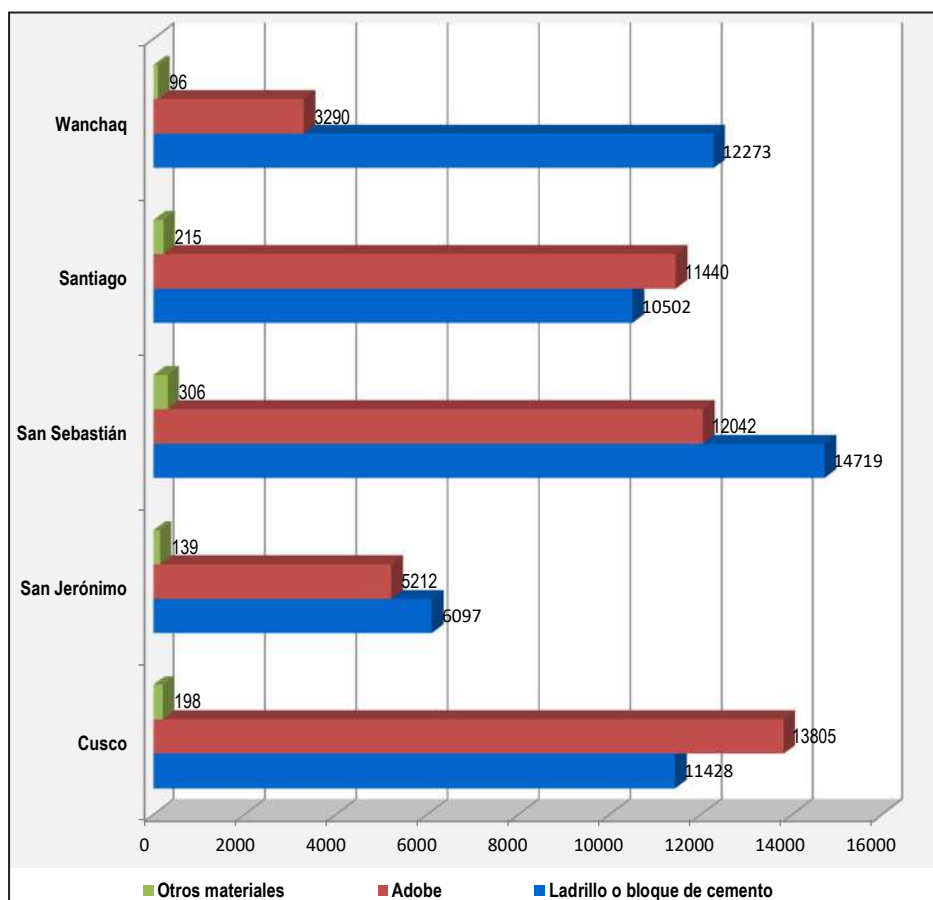
En relación a las viviendas de materiales de construcción predominantemente en las paredes, de las 203 524 viviendas, el 54 % están construidas con ladrillo o bloque de cemento, el 45 % de adobe y de otros materiales (piedra o sillar con cal o cemento; tapia; quincha; madera; triplay) el 1 % (figura 2.7). Además,

la mayor cantidad de viviendas construidas con paredes de ladrillo o bloque de cemento se encuentran en los distritos de San Sebastián y Wanchaq; sin embargo, la mayor cantidad de viviendas construidas con adobe están en los distritos de Cusco y Santiago (figura 2.8).



**Figura 2.7** Distribución porcentual de materiales de construcción predominante en las paredes en el área urbana de la ciudad del Cusco.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018.



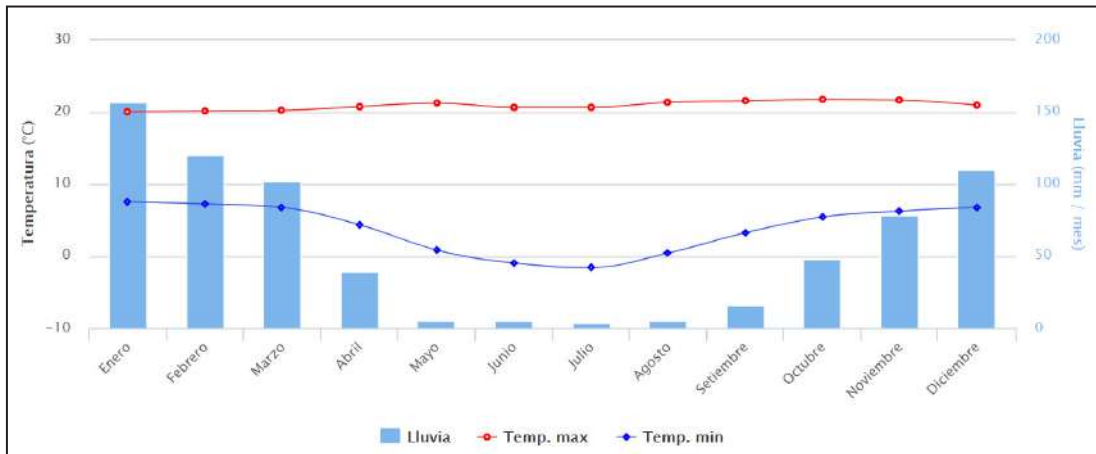
**Figura 2.8** Materiales de construcción predominante en las paredes en el área urbana de la ciudad del Cusco.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

El clima en la Ciudad del Cusco es relativamente fresco, aunque muy cambiante; puede pasar de un sol radiante a una lluvia torrencial, en solo minutos. Cusco goza de un clima que varía en 2 estaciones al año: la temporada seca y la temporada de lluvias (figura 2.9).

En Cusco, el mes con temperatura más alta es octubre (21.7 °C) y la más baja se da en julio (-1.6 °C); además, la lluvia con mayor intensidad cae en enero (156.32 mm/mes). Ver figura 2.9.



**Figura 2.8** Promedio de temperatura normal para Cusco.

Fuente: SENAMHI.

## CAPÍTULO III

### ASPECTOS LITOLÓGICOS

El análisis litológico se desarrolló en base a los mapas geológicos pertenecientes a los cuadrángulos de Urubamba, Hoja 27-r-II; Calca, Hoja 27-s-III; Tambobamba, Hoja 28-r-I; y Cusco, Hoja 28-s-IV. Los mismos fueron actualizados y publicados por Carlotto *et al.* (2006); Galdós & Carrasco (2002) y Carlotto *et al.* (2010) respectivamente. También, se trabajó en base a la interpretación de fotografías aéreas, imágenes de satélite (disponibles en ArcGIS Online) y observaciones en campo.

Las principales unidades litológicas han sido clasificadas en dos grandes unidades como son: depósitos inconsolidados y unidades de los substratos rocosos.

#### 3.1 DEPÓSITOS INCONSOLIDADOS

La unidad de los depósitos inconsolidados agrupa a los depósitos o materiales poco o nada coherentes, de extensión y grosor variable, de naturaleza litológica heterogénea y heterométrica, depositados en el pleistoceno y cuaternario reciente, agrupados en función a su origen, los cuales son:

##### Depósito residual (I-1)

Son materiales derivados de la descomposición física y química de la roca *in situ* (proceso de meteorización intensa), los cuales no han sido transportados desde su localización original y en parte conservan la estructura de la roca original (fotografía 3.1).



**Fotografía 3.1** Meteorización intensa que dio origen a material residual en el sector de Pumamarca.

##### Depósito fluvial (I-2)

Son fragmentos rocosos heterométricos (arenas, cantos, bolos, etc.) transportados por la corriente de los ríos y depositados

en forma de terrazas o playas, removibles por el curso de los actuales del río y quebradas (fotografía 3.2).



**Fotografía 3.2** Depósitos fluviales transportados y depositados al centro y márgenes del río; quebrada Saphy, en la parte noroeste de la ciudad del Cusco.

### **Depósito aluvial (I-3)**

Generalmente, está compuesto por una mezcla de pequeños fragmentos rocosos (bolos, gravas, arenas, etc.), polimícticos,

heterométricos, angulosos, subangulosos y subredondeados en matriz de arenas, limos y arcillas.



**Fotografía 3.3** Ejemplo de la distribución de fragmentos de roca y matriz fina en un depósito aluvial; distrito de San Jerónimo.



**Depósito proluvial (I-4)**

Están conformados por pequeños fragmentos de rocas polimícticas y heterométricas en matriz limo arenoso-arcilloso (fotografía 3.4), depositados principalmente en las

desembocaduras de las quebradas Huacotomayo, Unucñahuin, Arcoputo, Thuniyoc, Huanacahuire, Timpoc, Rinconada entre otros; están distribuidos en forma de abanicos y conos deyeativos.



**Fotografía 3.4** Depósito proluvial en la margen del río Huacotomayo; distrito de San Jerónimo.

**Depósito deluvial (I-5)**

Están conformados por capas de suelo fino y arcillas arenosas con inclusiones de fragmentos rocosos. Se depositan en laderas de los cerros con taludes suaves a moderados; estos depósitos han sido removidos por la escorrentía formada por precipitaciones pluviales, la cual no se encuentra encauzada o ha sido transportada por torrentes de corto recorrido.

**Depósito coluvial (I-6)**

Se les reconoce por su geometría y deben su origen a movimientos en masa como deslizamientos, derrumbes, caída de rocas, entre otros, con fuente de origen cercana (fotografía 3.4). Están formados por material grueso de naturaleza homogénea, heterométricos, mezclados con materiales finos como arena, limo y arcilla en menor proporción. Su distribución es caótica y constituyen talus de escombros, detritos de ladera y piedemonte.



**Fotografía 3.5** Depósito coluvial en la quebrada del río Saphy, hacia el norte a pocos minutos de la plaza de armas de la ciudad.

### **Depósito glaciar (I-8)**

Dentro de esta subunidad, se ha considerado los depósitos de origen netamente glaciar (morrenas), así como los materiales

de origen glaciar que fueron transportados y redepositados por escorrentía pluvial o por deshielo de los nevados.



**Fotografía 3.6** Depósitos glaciares en las montañas del Pachatusan, donde se destaca el depósito de tipo morrena; sector noreste de la ciudad.

**Depósito biogénico (I-10)**

Corresponde a los depósitos que rodean a los oconales; está compuesto por suelos orgánicos de composición limoarcilloso (champa).

**Depósito antropógeno (I-13)**

Es un material generado por la actividad del hombre sin intervención de procesos de transformación industrial; en el área de estudio, el depósito antropógeno está compuesto por botaderos de desechos orgánicos.

**3.2 UNIDADES DEL SUBSTRATO ROCOSO**

Las unidades del sustrato rocoso han sido divididas de tal forma que agrupan a las diferentes litologías según su composición principal; se diferencian el área de estudio cuatro grandes grupos: rocas intrusivas (II), volcánicas (III), volcánico-sedimentarias (IV) y sedimentarias (V), las cuales se describen a continuación:

**3.2.1 Rocas intrusivas (II)**

Están conformadas de una sola subunidad compuesta por dioritas (P/di), que se describen a continuación:

**Diorita (II-3)**

Fue descrito por Carlotto *et al.* (2010) como sotck de Saqsaywaman, con una apósis denominado El Rodadero que tiene aproximadamente 200 m de diámetro; este cuerpo muestra superficies pulidas y acanaladas que cubre casi todo el afloramiento de diorita y constituye una serie de resbaladeros naturales en forma de tobogán, de donde deriva su nombre; además, las estrías tienen una dirección preferencial N-S (Dueñas, 1907; Gregory, 1914b, 1916; Gabelman, 1967; Marocco, 1978).

Los cuerpos intruyen a arcillitas, yesos y calizas de las formaciones Maras y Ayabacas del Albiano-Turoniano, formando en algunos casos zonas con débil metamorfismo de contacto (Carlotto *et al.*, 2010).

Su litología es una roca maciza densa de grano fino y textura granular, en la cual se distinguen cristales de coloración oscura de augita y pequeños agregados de epidota. Los cuerpos de este sector pueden clasificarse como pórfidos dioríticos con augita. Generalmente, se encuentran bastante alterados, y la augita, la plagioclasa y la ortosa (escasa) están respectivamente reemplazadas por clorita, tremolita, epidota, prenita, calcita y sericita. Los minerales accesorios están representados por titanita, apatita, ilmenita (Carlotto *et al.*, 2010).

El origen de las estrías de El Rodadero es muy discutido y existiendo varias teorías; sin embargo, predominan las que se deberían a un fenómeno de espejos de falla por arqueamiento diferencial de dos bloques entre las calizas y el borde del intrusivo (Citado por Carlotto *et al.*, 2010).

**3.2.2 Rocas volcánicas (III)**

Dentro del área de estudio, aflora una sola subunidad volcánica:

**Secuencia de lava andesítica / dacítica (III-3)**

Esta subunidad ubica en las cercanías del cerro Pachatusan en forma de domo. En su totalidad, está representada por la Formación Rumicolca (NpQ-ru); fue descrita por Mendivil y Dávila (1994) a un conjunto de cuerpos volcánicos de dimensiones pequeñas que afloran a lo largo del límite Altiplano-Cordillera Oriental. Específicamente, afloran en las cercanías del centro poblado Huaccoto en forma de domo-lavas; estas coladas volcánicas, de acuerdo a su composición geoquímica, se componen de shoshonita, andesita, traquita y dacita (Carlotto *et al.*, 2011).



**Fotografía 3.7** Afloramiento de roca volcánica de la Formación Rumicolca (NPQ-ru) ubicado en el sector de Huaccoto, distrito de San Jerónimo.

### 3.2.3 Rocas volcano-sedimentarias (IV):

Dentro de la zona de estudio, solamente aflora una subunidad; se ubica en el sector noreste de la ciudad del Cusco, la cual se describe a continuación:

#### Lavas, aglomerados y brechas volcánicas IV-2

Es conformada por rocas de la Formación Pachatusan (Ji-pa). Según Gregory (1916) y Candia & Carlotto (1985), el nombre de la montaña proviene de las montañas del Pachatusan donde afloran ampliamente. Litológicamente, está constituido por brechas, aglomerados y coladas volcánicas de basaltos; aunque también se presentan riolitas e ignimbritas. Estas rocas, se intercalan con rocas sedimentarias, que se caracterizan por su color rojo violáceo; también, presenta conglomerados de conos aluviales y areniscas fluviales que están intercalados con las rocas volcánicas (Candia & Carlotto, 1985).

### 3.2.4 Rocas sedimentarias (V):

Esta unidad abarca la mayor parte de la zona de estudio. A su vez, se distingue 6 subunidades litológicas que se detallan a continuación:

#### Areniscas, arcillitas y conglomerados (V-2)

Abarcan la mayor parte de la zona de estudio y conforman el mayor espesor en comparación a otras secuencias litológicas

encontradas. Esta subunidad se compone de rocas clásticas como areniscas, arcillitas y conglomerados intercaladas entre sí y pequeñas ocurrencias de minerales de cobre, en su mayoría en forma de malaquita. Las formaciones geológicas agrupadas en esta subunidad litológica son (figura 3.1):

- Fm. Huancané (Ki-hn): Dentro del área de estudio, aflora en un pequeño sector del límite noreste de la cuenca. Está compuesta por areniscas, areniscas conglomerádicas, areniscas cuarzosas con laminaciones oblicuas fluviales y eólicas, además de niveles finos de arcillitas rojas o negras (Carlotto *et al.*, 1996).
- Fm. Paucarbamba del Grupo Yuncaypata (Ki-pb): Al igual que las areniscas Huancané, aflora en un pequeño sector del límite noreste de la cuenca. Está compuesta por areniscas calcáreas, margas, arcillitas amarillas, rojizas y verdes que forman secuencias grano-estrato crecientes, depositados en una plataforma litoral (Carlotto *et al.*, 1996).
- Fm. Quilque (Pp-qu): Aflora al oeste de la ciudad del Cusco. Se compone de arcillitas rojas lacustres que pasan gradualmente a espesores mayores de areniscas y microconglomerados fluviales, estos últimos con clastos calcáreos y calizas, todos de origen fluvial. Tiene presencia de carofitas.

- Grupo San Jerónimo (Peo-sj): Consiste en una potente serie roja de origen continental de más de 6000 m de espesor que es conocida como Grupo San Jerónimo (Córdova, 1986). En la zona de estudio, forman parte de este grupo las formaciones Kayra y Soncco (citado por Carlotto *et al.*, 2011), las cuales forman un conjunto que está principalmente constituido por areniscas feldespáticas intercaladas con arcillitas, limolitas y algunos bancos de conglomerados, todos de origen fluvial.
- Formación Kayra del Grupo San Jerónimo (Peo-ky): Con gran extensión y espesor en el área de estudio, está compuesta por areniscas feldespáticas, intercaladas con niveles de arcillitas rojas de medios fluviales. Hacia el techo, posee areniscas y microconglomerados con clastos volcánicos y cuarcíticos de medios fluviales altamente entrelazados. La formación acaba con facies areno-pelíticas de llanura de inundación y canales divagantes (citado por Carlotto *et al.*, 2011). Además, durante los trabajos de campo, se observó minerales de malaquita en algunos estratos de arenisca cerca al límite este de la cuenca.
- Fm. Soncco – II del Grupo San Jerónimo (Peo-so II): El miembro II de la Formación Soncco aflora en el sector sur de la cuenca y está compuesto por areniscas con clastos blandos, intercalado con niveles de conglomerados de clastos volcánicos y niveles mínimos de arcillitas rojas de llanura de inundación.
- Fm. Punacancha (Nom-pu II): El miembro II de la Formación Punacancha aflora en un pequeño sector del límite sur del área de estudio. Está compuesta por areniscas fluviales y conglomerados con clastos volcánicos, calizas y escasamente yesos.

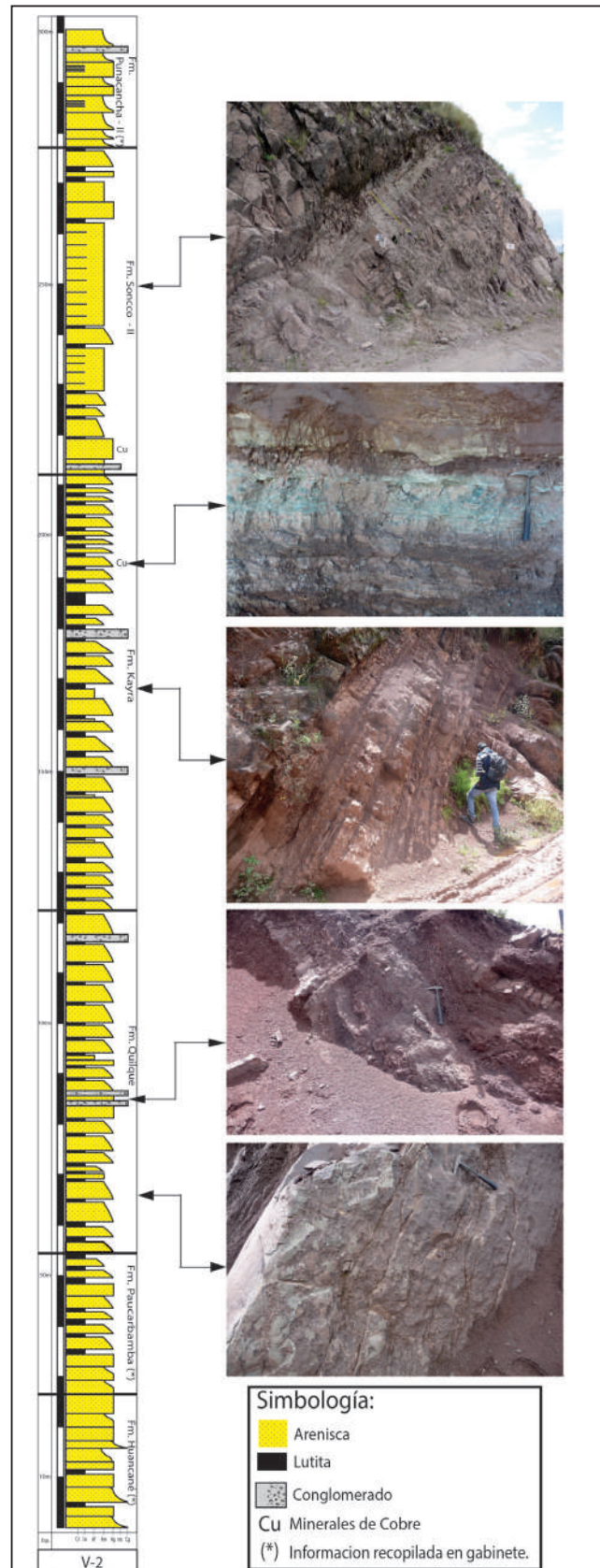


Figura 3.1 Columna litológica de la subunidad unidad V-2.

**Limolitas y limoarcillitas (V-3)**

En esta subunidad, la mayor parte se ubica en el piso de valle de la cuenca, sobre el cual se asienta la ciudad del Cusco. Además, presenta en su mayoría rocas semiconsolidadas; está conformada por la Formación Sebastián (figura 3.2), la cual se describe a continuación:

- Fm. San Sebastián (Q-sa): Predomina en todo el valle de la ciudad. La Formación San Sebastián fue definida por Gregory (1916) en la Depresión de Cusco. Se

podieron observar dos secuencias grano decreciente de limolitas, limoarcillitas, areniscas fluviales y niveles de microconglomerados semiconsolidados. La primera, grano decreciente, está constituida por secuencias de areniscas fluviales de canales entrelazados deltaicos, y arcillitas lacustres o palustres. Niveles diatomíticos y calcáreos caracterizan la parte superior. La segunda, grano creciente, está compuesta por conglomerados y areniscas de conoterrazas fluvio-torrencales, que indican el cierre de la cuenca.

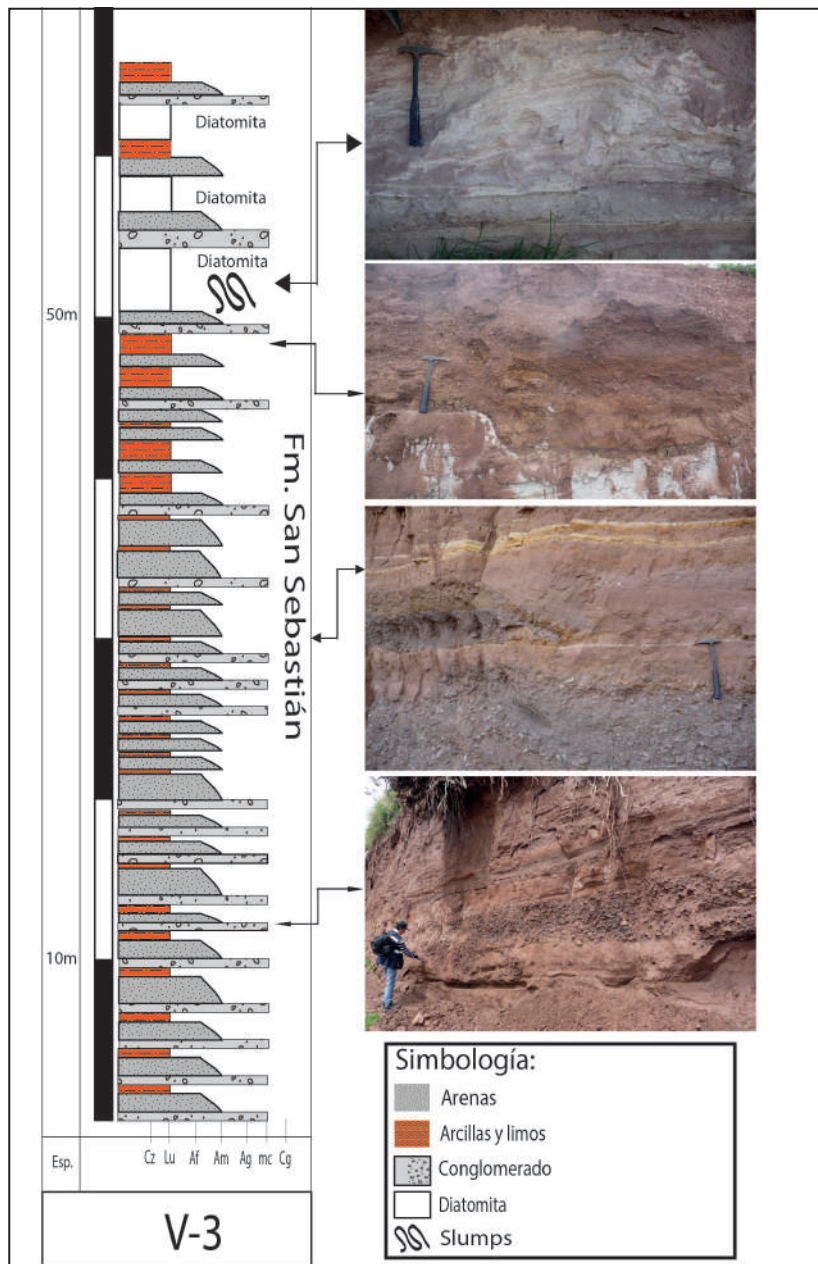


Figura 3.2 Columna litológica de la unidad.

### Arcillitas (V-4)

Esta subunidad aflora en diferentes sectores del área de estudio, la cual abarca una mayor área hacia el suroeste de la ciudad del Cusco. Las siguientes formaciones que conforman esta subunidad se caracterizan por predominancia de niveles finos de arcillita en sus secuencias (figura 3.3), las cuales son:

- Fm. Puquín del Grupo Yuncaypata (Ks-Pu): Aflora en varios sectores del área de estudio, con su mayor extensión hacia el suroeste. Está compuesta por arcillitas rojas, moradas y verdes de origen lacustre con presencia de carofitas y yesos de sabkha continental. Además, posee arcillitas negras marinas muy poco profundas intercaladas con areniscas fluviales.
- Fm. Chilca (Pp-ch): Aflora en su mayoría hacia el oeste de la ciudad del Cusco y es reconocible por sus secuencias rojizas. Está conformada por arcillitas rojas y margas con intercalaciones delgadas de yesos de medios lacustres y pequeños niveles de areniscas fluviales hacia la parte superior.
- Fm. Soncco - I del Grupo San Jerónimo (Peo-so I): El miembro I de la Formación Soncco abarca una pequeña franja con poco espesor entre la Formación Kayra y el miembro I de la Formación Soncco en el sector sur. Está compuesta por arcillitas rojas de llanura de inundación, intercaladas con niveles de areniscas finas a medias.
- Fm. Punacancha (Nom-pu I): El miembro I de la Formación Punacancha aflora en una pequeña área en el límite sur de la cuenca y forma parte del sinclinal de Punacancha. En esta zona, la litología está compuesta por arcillitas rojas de llanuras de inundación intercaladas con microconglomerados fluviales.



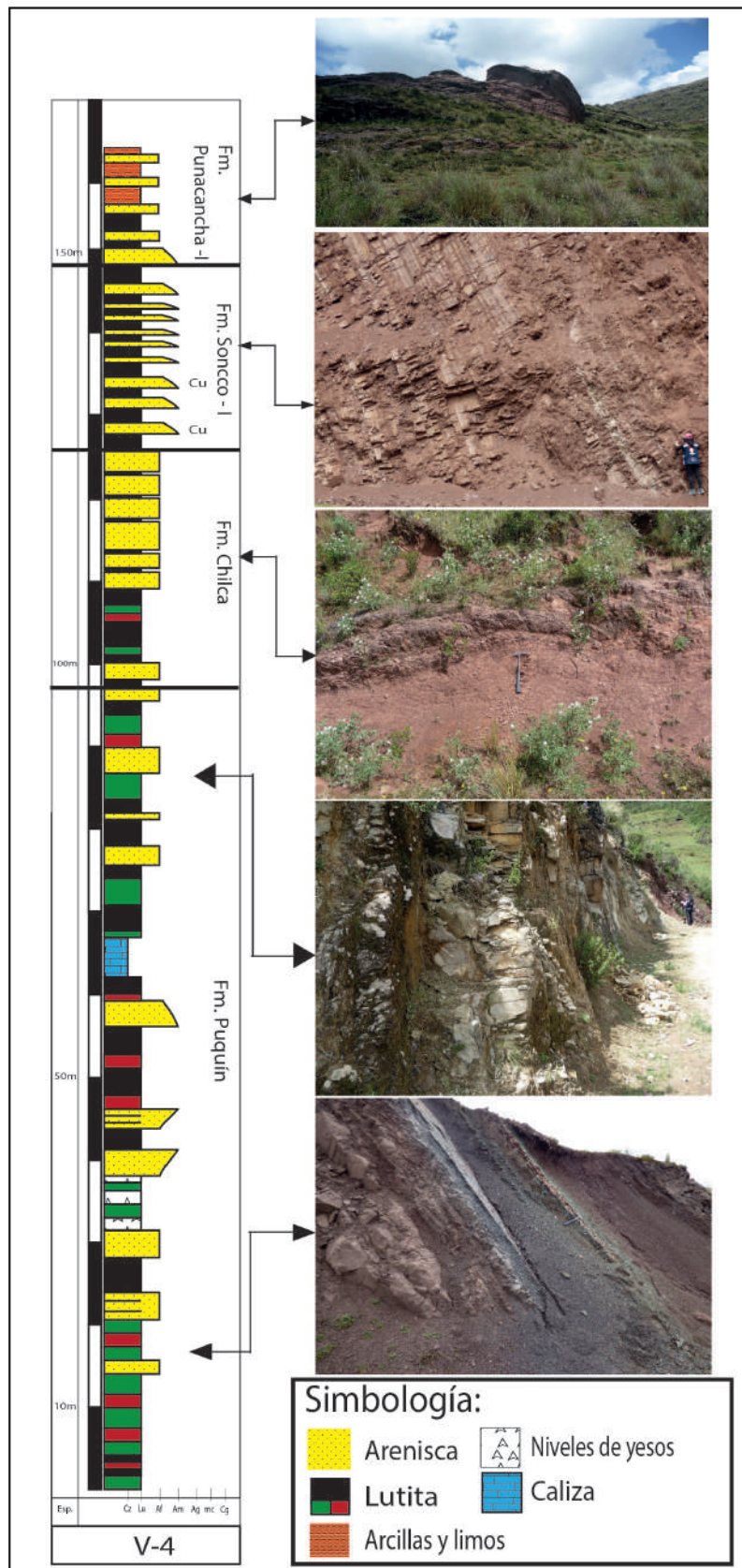


Figura 3.3 Columna litológica de la unidad V-4.

**Conglomerados, areniscas y arcillitas (V-5)**

Dentro del área de estudio, existen pequeños niveles de conglomerados dentro de las secuencias litológicas de otras unidades ya mencionadas; sin embargo, en esta unidad existe una predominancia de conglomerados como es el caso de la Formación Chincheros (figura 3.4), la cual se describirá a continuación:

- Fm. Chincheros (Np-cc): Aflora en gran parte del sector norte de la ciudad del Cusco. Litológicamente, está compuesta por brechas torrenciales y niveles de conglomerados de matriz arcillo-arenosa con clastos de caliza, yesos y arcillitas; estos clastos provienen de la erosión de otras formaciones como Maras, Ayabacas y Puquín. (Cabrera, 1988).

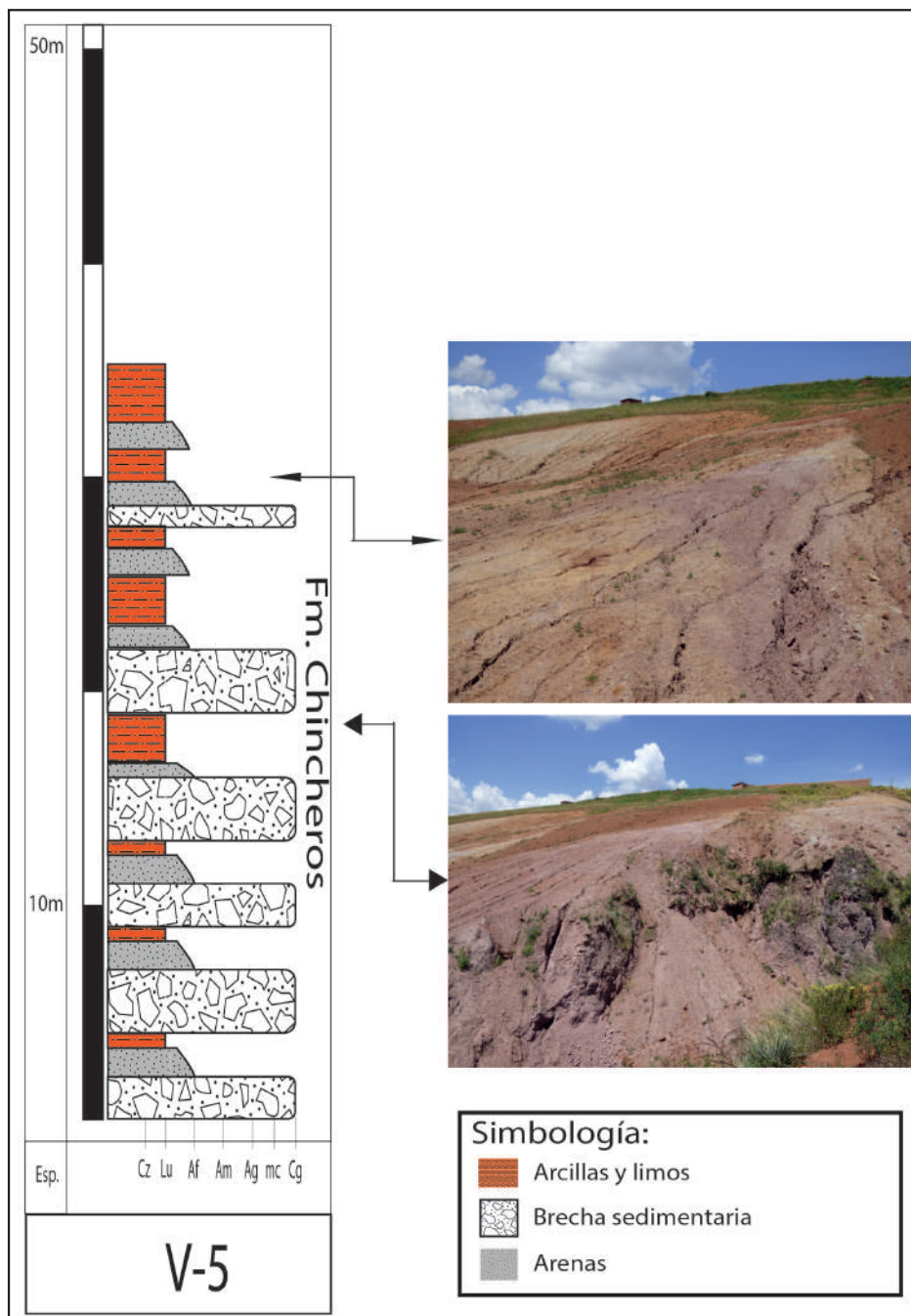


Figura 3.4 Columna litológica de la unidad V-5.

**Caliza maciza (V-8)**

Dentro de la zona de estudio, esta subunidad no aflora como una secuencia maciza continua, sino que se encuentra dispersa a manera de enormes bloques (figura 3.5) sobre la secuencia de yesos.

- Formación Ayabacas del Grupo Yuncaypata (Kis-ay): Afloran a manera de bloques u olistolitos dispersos en todo el sector norte y noroeste de la ciudad del Cusco. Su litología está compuesta por calizas del tipo *mudstone* a *wackstone* de plataforma interna muy poco profunda (Carlotto *et al.*, 1992).

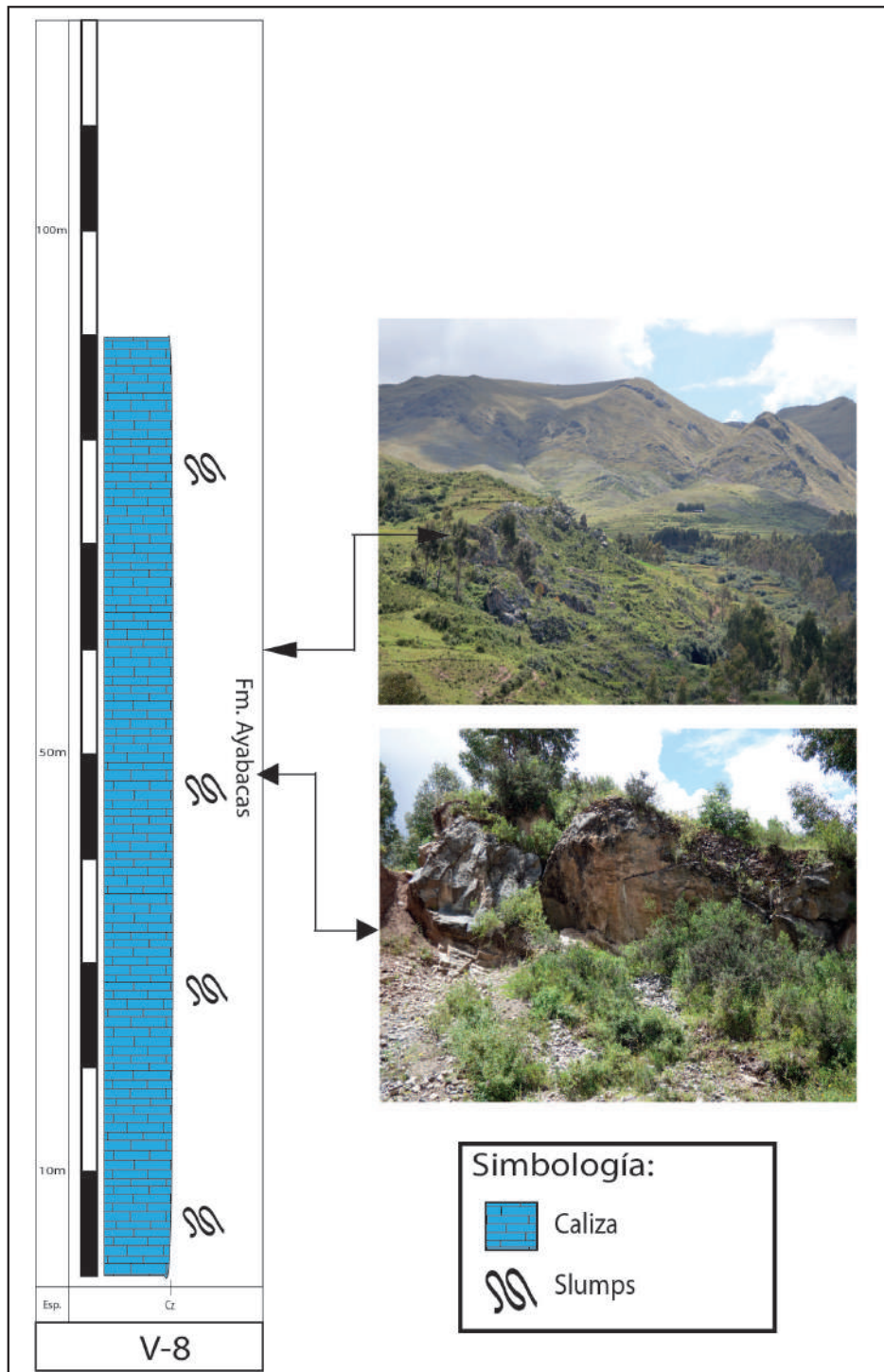


Figura 3.5 Columna litológica de la unidad V-8.

**Mezclas caóticas de yesos (V-9)**

En general, esta subunidad hace referencia a las grandes áreas ocupadas por yesos, y algunos niveles de arcillita y calizas (figura 3.6), las cuales abarcan todo el sector noroeste de la zona de estudio:

- Formación Maras (Ki-ma): Afloran en toda la meseta de Saqsayhuaman en la parte norte y noroeste de la ciudad del Cusco. Su litología es básicamente una mezcla caótica de yesos, arcillitas rojas y verdes y algunos cuerpos de calizas. Estas deposiciones sufrieron removilizaciones de masas debido a efectos tectónicos y diapíricos (Carlotto *et al.*, 1996).

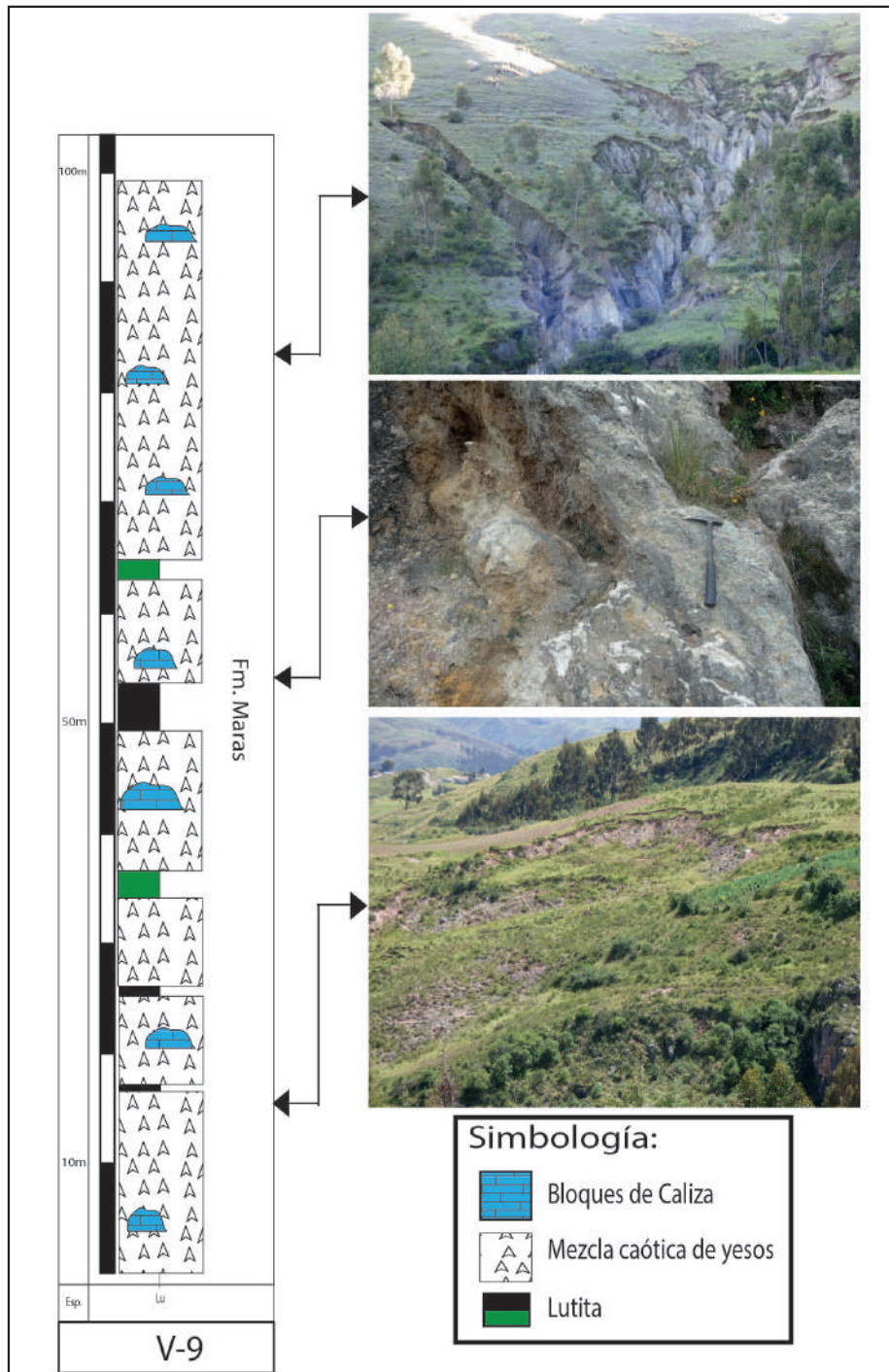


Figura 3.6 Columna litológica de la unidad V-9.

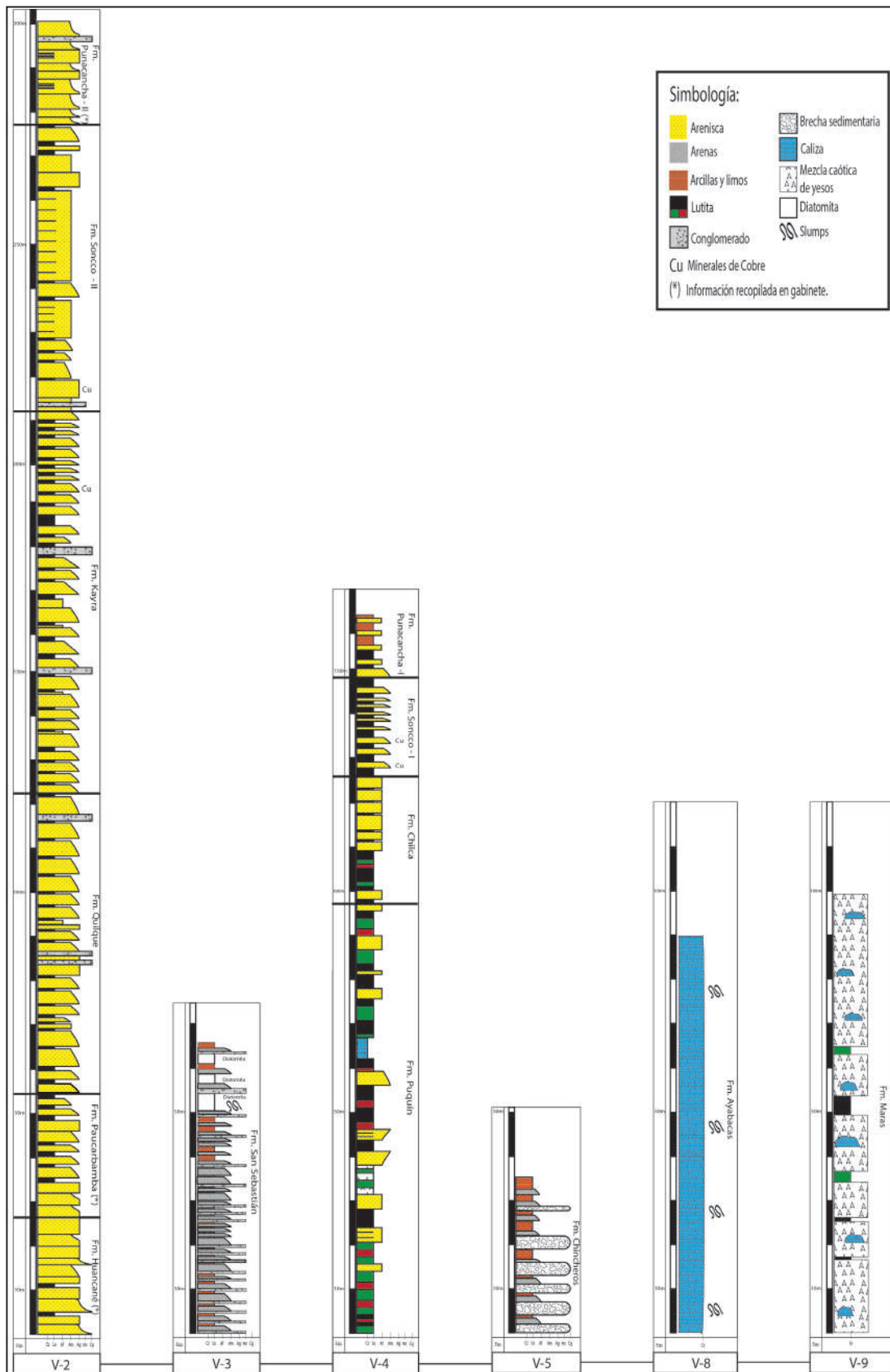


Figura 3.7 Columna litológica generalizada de las unidades litológicas y formaciones geológicas.



# CAPÍTULO IV

## CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MACIZOS ROCOSOS

### 4.1 GENERALIDADES

La caracterización y clasificación geomecánica, descrita en este capítulo, tiene como objetivo principal proporcionar una evaluación de los macizos rocosos (definido como un conjunto de matriz rocosa y discontinuidades) presentes en la ciudad del Cusco y sus alrededores, el cual fue estudiado a partir de un ensayo simple (ensayo del esclerómetro), observaciones y levantamiento de campo.

El término discontinuidad está definido como cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso, con resistencia a tracción muy pequeña o nula, que implica un comportamiento mecánico no continuo del macizo (Barton *et al.*, 1978; Ferrer & González de Vallejo, 1999).

La descripción de las discontinuidades se realizó siguiendo la metodología de Ferrer & González de Vallejo (1999) que las clasifican como diaclasas o juntas, fallas, planos de estratificación, planos de esquistosidad, superficies de laminación y superficies de contacto.

Las discontinuidades casi nunca se disponen en el espacio de forma aleatoria, sino que siguen un patrón espacial relacionado con la historia geológica de la roca (Price, 1966). De esta forma, los planos de discontinuidad se presentan paralelos y ordenados en el espacio formando planos con orientaciones preferentes conocidas como familia de discontinuidades (Goodman, 1989).

Una vez detectadas las familias de discontinuidades, el siguiente paso es caracterizarlas y obtener información cuantitativa y cualitativa de los parámetros que se describirán más adelante; de esta manera, la clasificación geomecánica permite caracterizar los macizos rocosos a partir de datos de afloramientos. La evaluación de estos parámetros se realizó a partir de valores de estaciones geomecánicas de RMR, obtenidos al aplicar la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989) y valores de GSI aplicados de la clasificación de Hoek y Brown (1997).

Para su desarrollo, se efectuaron 61 estaciones geomecánicas dispersas en toda el área de estudio (figura 4.1) y distribuidas según la litología que se presenta a continuación:

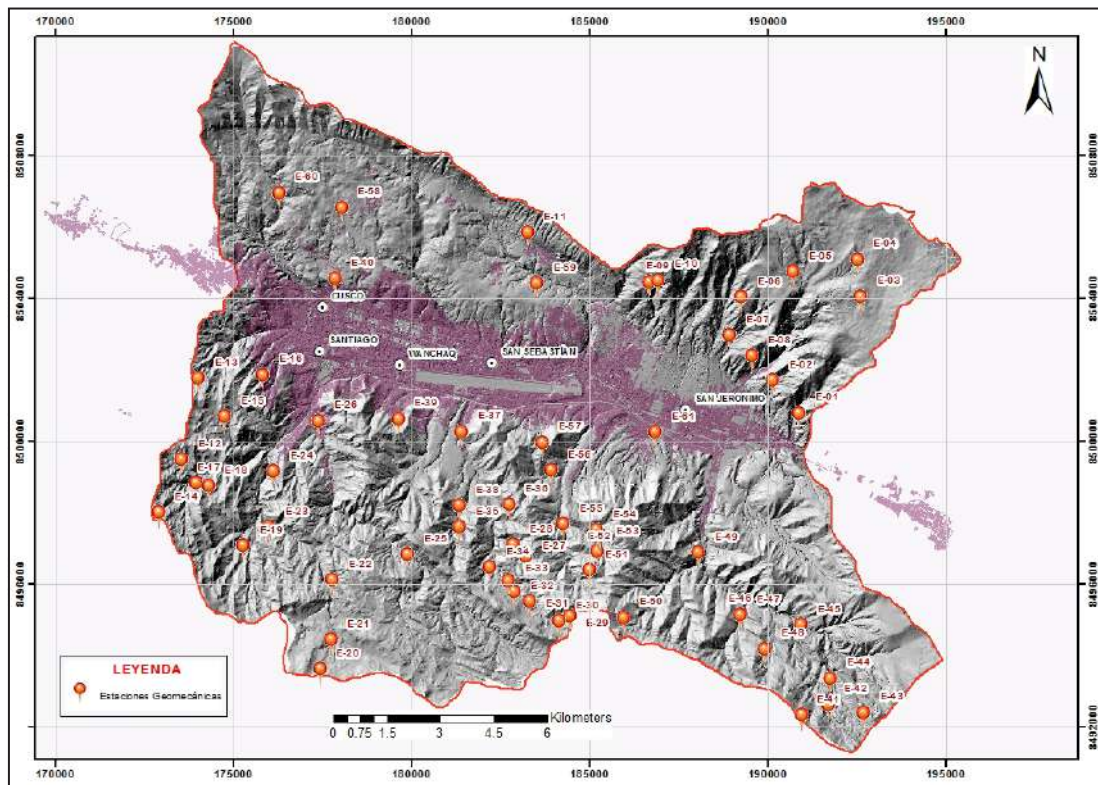


Figura 4.1 Mapa de ubicación de las estaciones geomecánicas realizadas.

## 4.2 METODOLOGÍA

Para la obtención de los datos geomecánicos, se utilizó la metodología de “línea de detalle” también denominado SCALINE, el cual consiste en el trazo de una línea horizontal en una determinada dirección del macizo rocoso, de tal manera que corte la mayor cantidad de discontinuidades y de los cuales podamos obtener los datos necesarios para la caracterización, lo cual determina la orientación de las discontinuidades y sus principales características.

Las medidas realizadas incluyen, principalmente, discontinuidades de tipo inherente y sistemático en la roca

(superficies de estratificación), así como las discontinuidades inducidas y no sistemáticas (juntas, diaclasas, fallas, microfallas).

Los parámetros de observación y medición fueron obtenidos en formatos de registro adecuados a las normas sugeridas por Working Party of the Geological Society (1977) y la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), presentados por Romana & Serón (2003). Estos parámetros fueron: tipo de roca, tipo de discontinuidad, resistencia, orientación, espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno, espesor del relleno, ondulación, meteorización y presencia de agua.





Figura 4.2 Metodología empleada (Scaline) y toma de datos en formatos de registros adecuados a las normas sugeridas por Working Party of the Geological Society (1977) y la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).

### 4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

La resistencia de la matriz rocosa fue estimada en el afloramiento mediante índices de campo: Índice manual o martillo de geólogo y el esclerómetro o martillo de Schmidt, que permiten una aproximación inicial al valor de la resistencia de la roca.

Mediante el martillo de Schmidt, se midió la resistencia al rebote de la superficie rocosa, valor que se correlaciona con la compresión simple de roca (figura 4.3).

La metodología fue adaptada de la ISRM a través de un análisis estadístico con la toma de 18 datos por cada estación realizada (anotado en el formato de datos geomecánicos), para luego eliminar los 9 datos más bajos y sacar un promedio con los 9 más altos.

En función de la posición del martillo respecto al plano de roca ensayado y el valor de rebote promedio calculado, se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico de Schimdt para después ser clasificado en base a los criterios que se muestra en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1

Criterio para el ensayo de resistencia con el martillo de Schmidt (ISRM, 1981)

Resistencia a la compresión simple	Descripción
1 – 5	Muy baja / Muy blanda
5 – 25	Muy baja / Blanda
25 – 50	Baja / Moderadamente dura
50 – 100	Media / Dura
100 – 250	Alta / Muy dura
Mayor a 250	Muy alta / Extremadamente dura

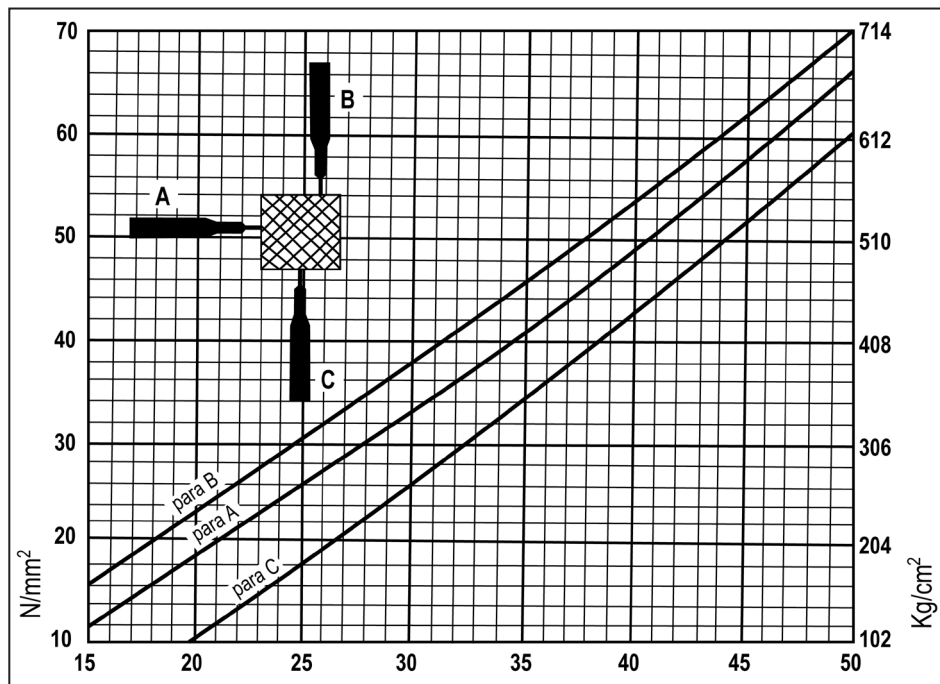


Figura 4.3 Gráfico de correlación de la resistencia a la compresión simple propuesta por Schmidt.

Los datos generales que se obtuvieron se presentan en la figura 4.4, donde se muestra los resultados de resistencias a la compresión simple entre 30 y 60 MPa, que representan

calidades de rocas entre moderadamente dura y dura, con predominancias de resistencias moderadamente duras.

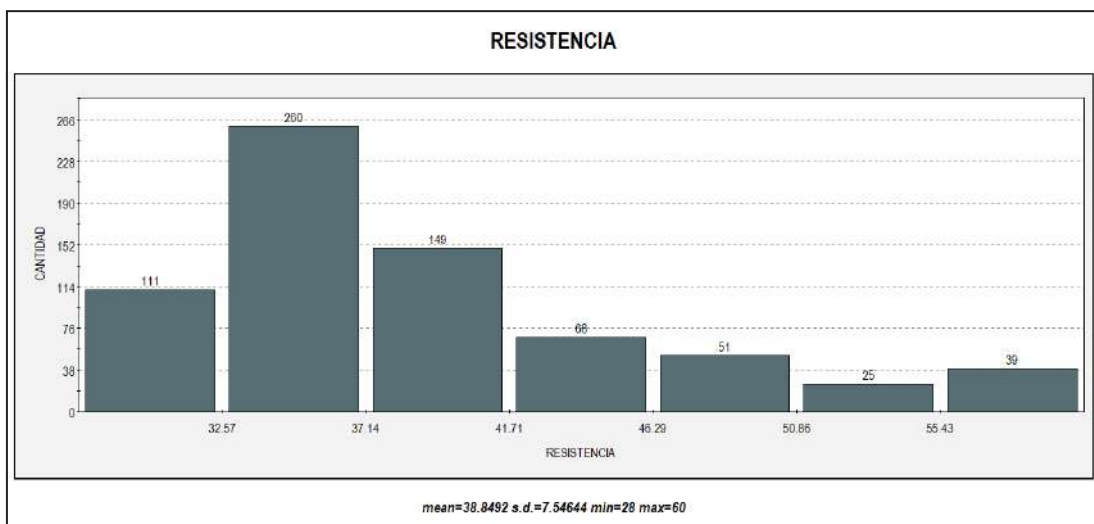


Figura 4.4 Histograma de resistencias generales.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS DISCONTINUIDADES

La caracterización de las familias de las discontinuidades (figura 4.5) se realizó según los criterios geomecánicos (no geométricos) y geométricos (Barton *et al.*, 1978; Bieniawski, 1989; Slob, 2010):

- Geomecánicos: Son independientes del sistema de referencia, lo cual se considera así como de escala de observación utilizada, y se encuentran los siguientes parámetros: Relleno (existencia y naturaleza en su interior), presencia de agua en la discontinuidad, resistencia de las paredes de las discontinuidades, número de familias de discontinuidad.

- Geométricos: Se refiere a las características de las discontinuidades que se pueden definir atendiendo a su geometría espacial en un sistema de referencia global o local. Estas características son: Orientación (dirección y buzamiento del plano de discontinuidad), espaciado (distancia media entre los planos de debilidad), continuidad o persistencia de la extensión de la discontinuidad, rugosidad (irregularidades a gran y pequeña escala de la superficie de la discontinuidad), apertura o abertura.

De esta manera, el comportamiento de un macizo rocoso puede venir gobernado o bien por las discontinuidades, si el macizo está muy fracturado, o bien por la matriz rocosa si está muy meteorizado y el macizo está poco fracturado, o en su defecto por ambas.

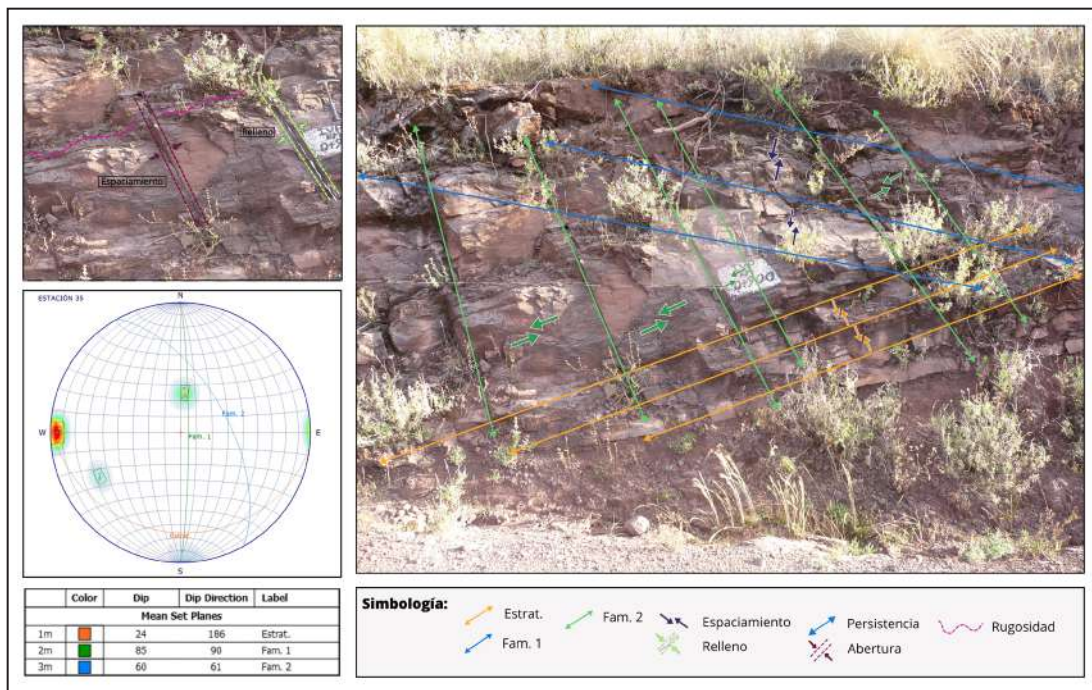


Figura 4.5 Representación gráfica de las características de las discontinuidades que se tomaron en cada estación geomecánica.

Las juntas fueron las discontinuidades más comunes que presentaron los macizos rocosos, además de planos de estratificación y algunas microfallas encontradas.

Algunos de estos parámetros, como la persistencia, abertura, rugosidad, meteorización y relleno, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia al corte de las discontinuidades.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicarse 61 estaciones geomecánicas dispersas en toda el área de estudio y distribuidas según la litología que se presenta:

#### Orientación

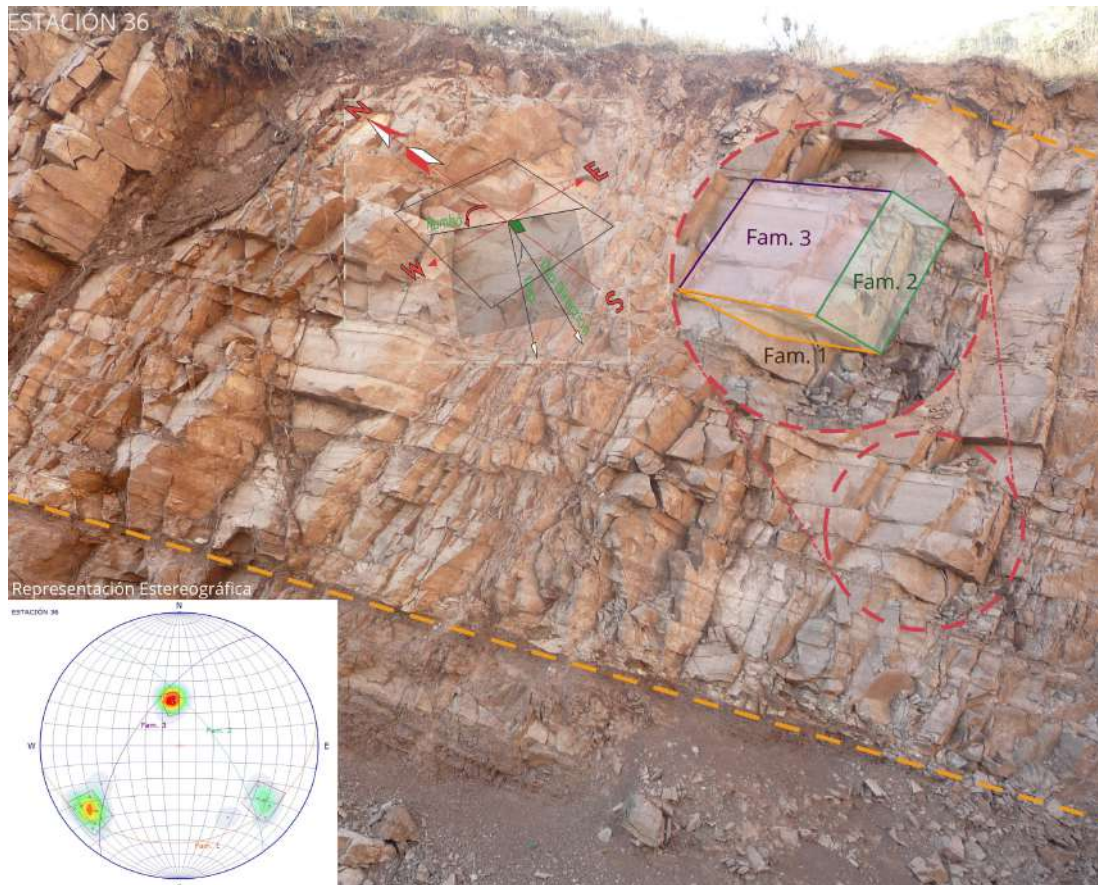
Las discontinuidades sistemáticas se presentan en familias con orientaciones y características más o menos homogéneas (González de Vallejo, 2004).

Según la nomenclatura recomendada por la ISRM, la orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección del buzamiento, Dip Direction (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al

norte) y el buzamiento, Dip (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea) (Barton *et al.*, 1978), los cuales fueron estimados mediante trabajo de campo y el empleo de una brújula.

La representación gráfica de la orientación permite una visión general de la geometría de los conjuntos rocosos, que visualizan

de una forma sencilla las orientaciones de las fracturas (figura 4.6). De esta manera, el procesamiento de los datos de orientación se realizó mediante técnicas de proyección estereográfica equiareales, y emplearon el software DIPS v.6.0 de la marca Rocscience.



**Figura 4.6** Representación gráfica de las orientaciones obtenidas en una estación geomecánica.

Para el análisis de la orientación de las discontinuidades, se tomaron un total de 443 datos estructurales entre todas las diferentes familias reconocidas en cada estación; en las figuras 4.7 y 4.8, se muestra toda la dispersión de datos tomados, y en la cual se observa que la nube de datos totales tiende a agruparse alrededor de 3 familias principales y, en general, cada estación geomecánica trabajada refleja del mismo modo 3 sistemas de familias primordiales.

Según los datos obtenidos y la representación del diagrama de rosetas, se observa que las discontinuidades presentan una orientación heterogénea, con orientaciones predominantes de NE-SW cuya génesis de estas es producto de las tensiones entre las fallas Tambomachay y Pícol y otro sistema de NW-SE, que obedecen a las direcciones de estas mismas fallas.

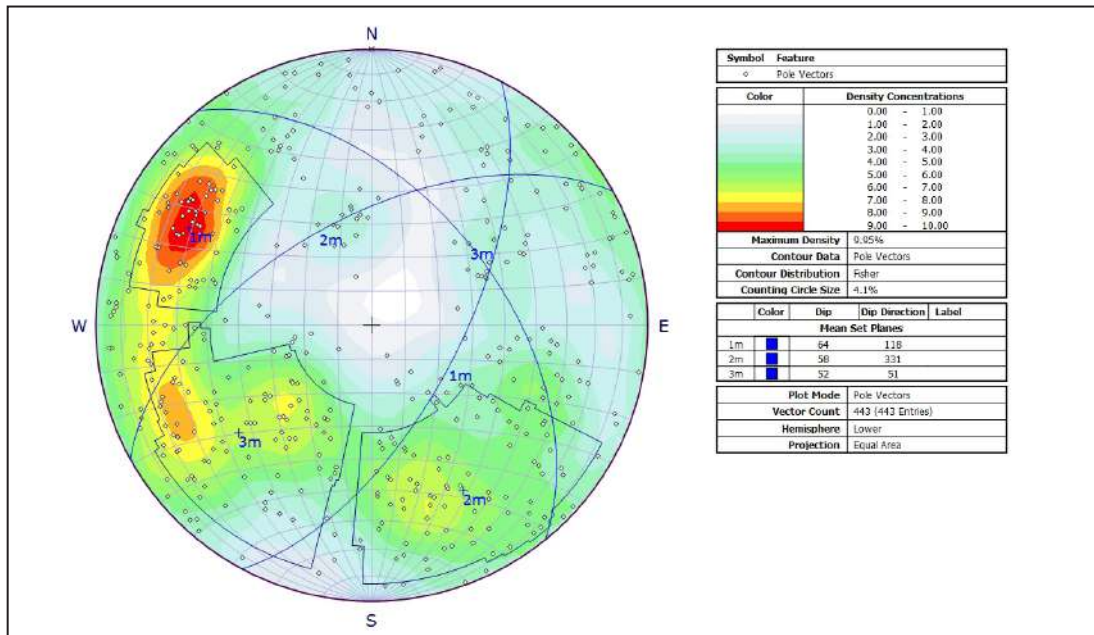


Figura 4.7 Representación estereográfica equiarial de dispersión de datos estructurales de las discontinuidades (Juntas) que utilizan el programa Dips v.6.0 de la compañía Rocscience.

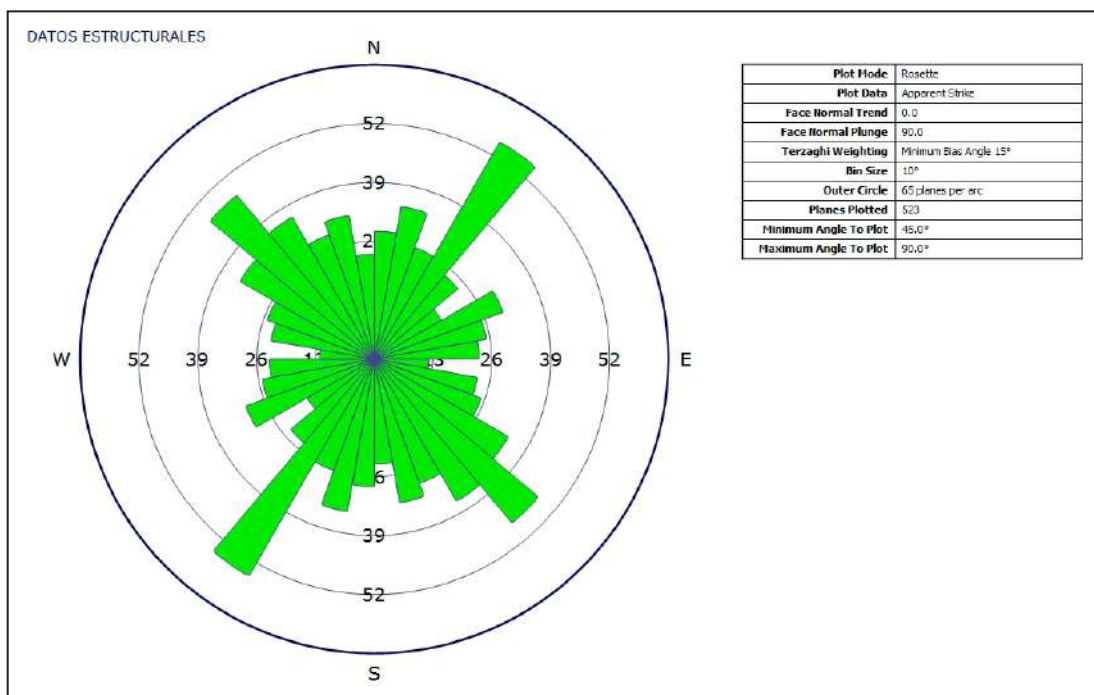


Figura 4.8 Diagrama de rosetas de las discontinuidades que utilizan el programa Dips v.6.0 de la compañía Rocscience.

**Espaciado:**

El espaciado se determinó midiendo la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia y en dirección perpendicular o también como un valor del espaciado promedio; esta se realizó con una cinta métrica, colocándose perpendicularmente a los planos, para luego ser llenados en las fichas de registro por cada uno de los espaciamientos de cada estación.

Según los datos obtenidos y a partir del histograma (figura 4.9), se observa que la zona de estudio es un tanto heterogénea con valores predominantes de 8 y 10 que corresponden a espaciamientos próximos y medianamente separadas; esto es, de acuerdo al cuadro de descripción del espaciamiento (cuadro 4.2).

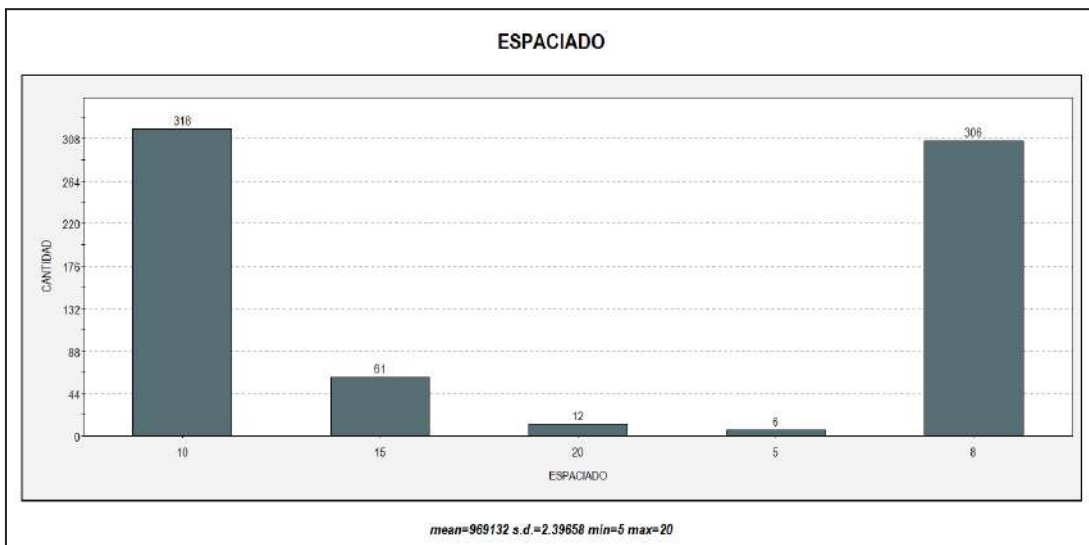


Figura 4.9 Histograma de las discontinuidades.

**Cuadro 4.2**

**Criterio para la descripción del espaciado de discontinuidades**

Descripción	Espaciado	Valor
Muy separadas	> 2.00 m	20
Separadas	2.00 – 0.60 m	15
Medianamente separadas	0.60 – 0.20 m	10
Próximas	0.20 – 0.06 m	8
Muy próximas	< 0.03 m	5

Fuente: González de Vallejo, 2004.

**Continuidad o persistencia:**

La persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial según la longitud de la dirección del plano y según su buzamiento, medidos con una cinta métrica. Estos resultados obtenidos son comparados con los valores del cuadro 4.3 de evaluación de la persistencia sugerida por la INTERNATIONAL

SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - ISRM (1981), y de la cual se observa que las familias más persistentes con valores de 0 y persistencias mayores a 20 m corresponden a planos de estratificación y, según el histograma generado, la zona de estudio presenta una persistencia media de 3 a 10 m de continuidad (figura 4.10).

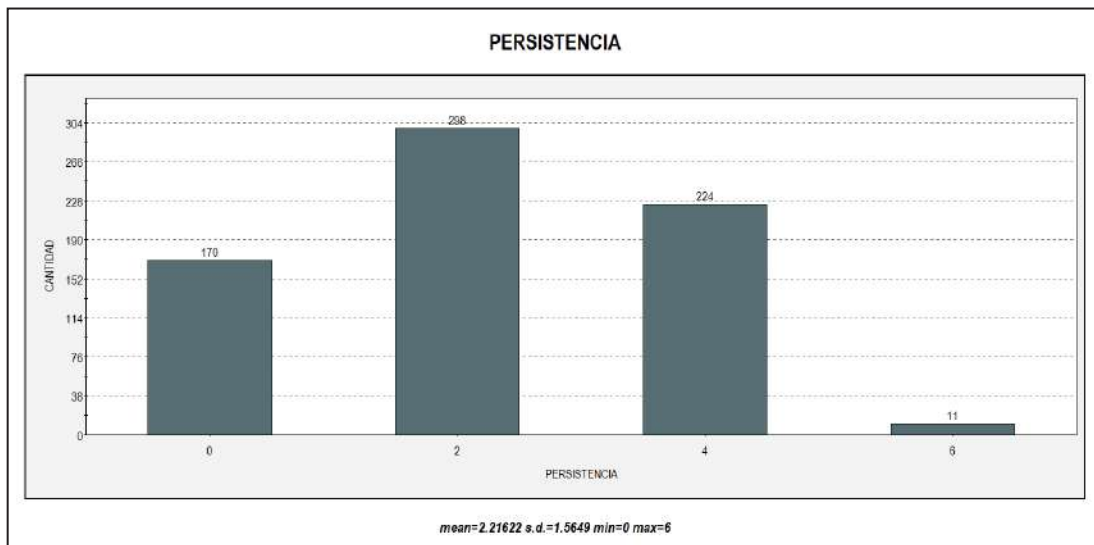


Figura 4.10 Izquierda: Histograma de persistencias. Derecha: tabla de reconocimiento de la descripción de las persistencias.

Cuadro 4.3

**Criterio para la descripción de la persistencia de las discontinuidades**

Descripción	Persistencia	Valor
Muy baja persistencia	< 1 m	6
Baja persistencia	1 – 3 m	4
Persistencia media	3 – 10 m	2
Alta persistencia	10 – 20 m	1
Muy alta persistencia	> 20 m	0

Fuente: González de Vallejo, 2004.

**Abertura:**

La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de las discontinuidades cuando no existe relleno. La descripción se realizó según criterio de descripción que se muestra en el cuadro 4.4. Las medidas se han realizado para cada familia de

discontinuidades, que adoptan los valores más representativos de cada una de ellas. Según el histograma, se puede apreciar mediciones comunes de 1 a 5 mm como aberturas recurrentes (figura 4.11).

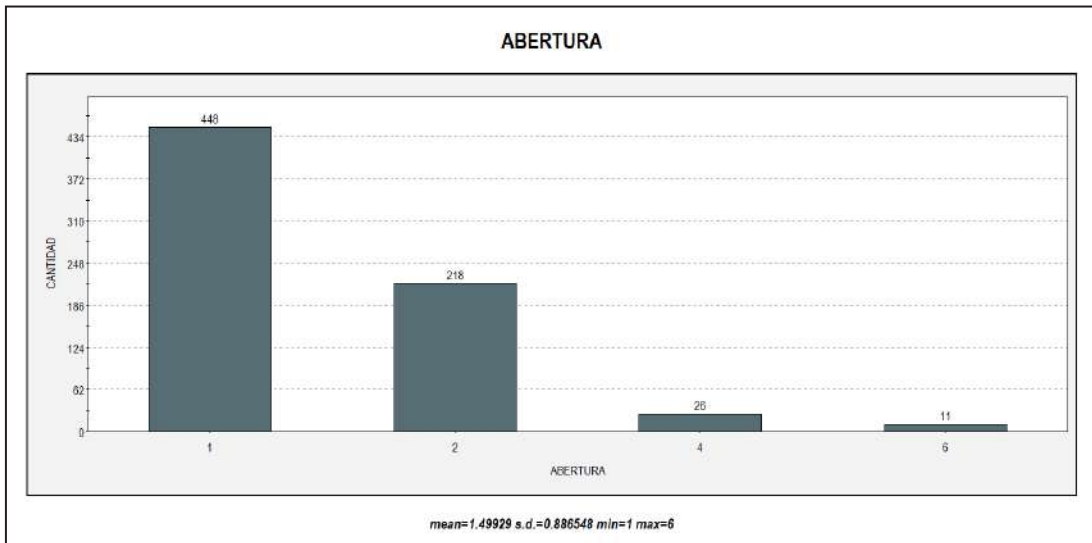


Figura 4.11 Histograma de abertura en discontinuidades.

**Cuadro 4.4**

**Criterio para la descripción de la abertura en discontinuidades**

Descripción	Abertura	Valor
Cerrada	< 0.1 mm	5
Algo abierta	0.1 – 1.0 mm	4
Abierta	1 – 5 mm	1
Muy abierta	>5 mm	0

Fuente: González de Vallejo, 2004.

**Rugosidad:**

La rugosidad hace referencia a la ondulación de las superficies de discontinuidad, como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos. La descripción se estimó de acuerdo a dos escalas de observación:

- Escala decimétrica y métrica, para la ondulación de las superficies: superficies planas, onduladas o escalonadas.

- Escala milimétrica y centimétrica para la rugosidad o irregularidad: superficies pulidas, lisas o rugosas.

La rugosidad está en el orden de lisa a ligeramente rugosa (figura 4.12 y cuadro 4.5).



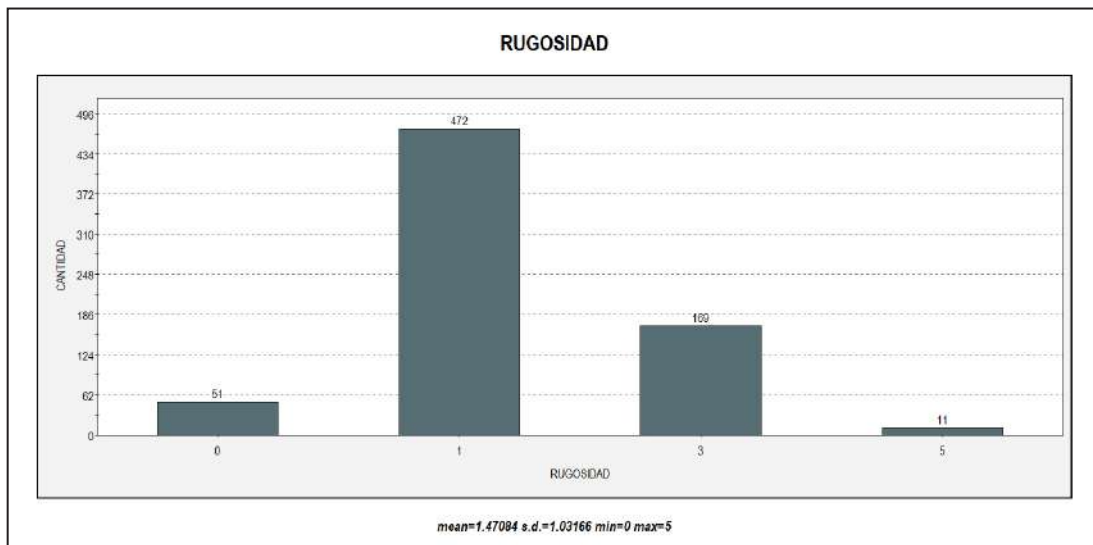


Figura 4.12 Izquierda: Histograma de la rugosidad. Derecha: tabla de reconocimiento de la descripción de la rugosidad.

Cuadro 4.5

**Criterio para la descripción de la rugosidad en las superficies de las discontinuidades**

Descripción	Valor
Muy rugosa	6
Rugosa	5
Ligeramente rugosa	3
Lisa	1
Espejo de falla	0

Fuente: González de Vallejo, 2004.

**Caracterización del RQD**

El RQD (Rock Quality Designation) se ha estimado mediante el parámetro  $\lambda$  (frecuencia de discontinuidades), que representa el número total de discontinuidades por cada familia, y que interceptan una longitud determinada. El valor fue determinado usando la fórmula:

$$\lambda = \frac{\text{n}^\circ \text{de discontinuidades}}{L \text{ (m)}}$$

Donde:

$\lambda$  = Frecuencias de discontinuidades

L = Longitud lineal en metros

La estimación del índice RQD se realizó a partir de la frecuencia de discontinuidades ( $\lambda$ ), mediante la siguiente expresión que proporciona el valor teórico mínimo del RQD (Hudson, 1989) y clasificado de acuerdo al cuadro 4.6:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

**Cuadro 4.6**

**Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el tipo RQD**

RQD	Calidad
<25	Muy Mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Media
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

Fuente: Bieniawski, 1989.

En general, el grado de fracturación que se muestra en la figura 4.13 se caracteriza por que la zona de estudio es heterogénea, con valores predominantes de 40 a 60 y 65 a 75

que corresponden a fracturamientos de calidad mala a media según el criterio del RQD (cuadro 4.7).

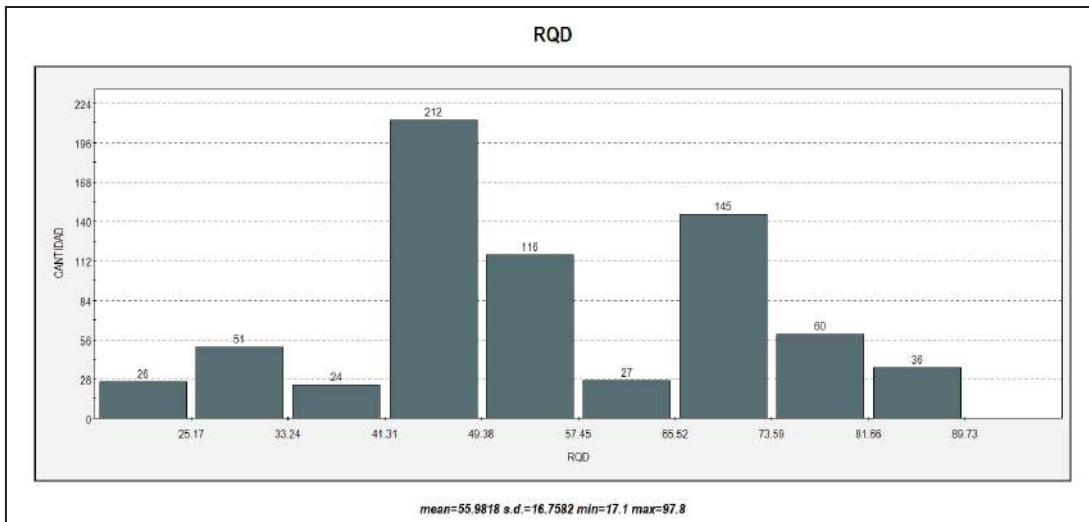


Figura 4.13 Histograma que muestra la variación del RQD.

**4.5 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA**

**Clasificación Rock Mas Rating - RMR**

Esta clasificación se basa en el índice RMR; indica una estimación de la calidad del macizo rocoso teniendo en cuenta los siguientes factores (cuadro 4.7):

- (1.) Resistencia de la matriz rocosa.
- (2.) Grado de Fracturación (RQD) .
- (3.) Espaciado de las discontinuidades (distancia media entre los planos de debilidad).

- (4.) Condición juntas o de las discontinuidades, que incluye: a) Continuidad o persistencia; b) Abertura; c) Rugosidad; d) Relleno; e) Meteorización.
- (5.) Presencia de agua subterránea.

A cada uno de estos parámetros, se le asigna un valor y el RMR se obtiene como la suma de todos ellos:

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

**Cuadro 4.7**

**Parámetros de clasificación geomecánica RMR**

Parámetros		Rango de valores							
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-May	5-Jan	<1
		(Martillo de Schmidt)							
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50 %	<25 %		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Espaciamiento		>2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	<0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Condición de Juntas	Persistencia	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Cerrada	<0.1 mm	0.1-1 mm	1-5 mm	>5 mm		
		Puntuación	6	5	2	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Lig Rugosa	Lisa	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Limpia	Duro <5 mm	Duro >5 mm	Suave <5 mm	Suave >5 mm		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Meteorización	Sana	Lig. Mete.	Mode. Mete.	Muy Mete.	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua Subterránea		Seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		
<b>Clase de macizo rocoso</b>									
RMR		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0			
Descripción		I Muy buena	II Buena	III Regular	IV Mala	V Muy mala			

Adaptado de González de Vallejo, 2004.

**Clasificación Índice de Resistencia Geológica - GSI**

El índice de resistencia geológica (GSI) fue desarrollado por Hoek (1994); es utilizado para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR y para evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown.

La caracterización del macizo rocoso es simple y está basado en la interpretación visual de la estructura rocosa, en términos de estructura y condición superficial de las discontinuidades. La combinación de estos dos parámetros proporciona una base práctica para describir un rango amplio de tipos de macizos rocosos.

La determinación de los parámetros de GSI se basa en la descripción de la calidad del macizo rocoso, en lugar de formular datos de entradas cuantitativas como el sistema RMR. El GSI es principalmente útil para macizos rocosos con RMR bajos.

Para su determinación, se realizó a partir de la figura 4.14, a la que se ingresa desde 2 puntos diferentes: uno horizontal, referente a la estructura y tamaño de la matriz rocosa y el ingreso vertical que es referente a las condiciones de las discontinuidades en superficie; se converge posteriormente en el valor del GSI dispuesto en las líneas diagonales.







	Estructura	CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENO	BUENO	EQUITATIVO	POBRE	MUY POBRE
		Drecese la calidad de Superficie				
	<b>INTACTO O MASIVO</b> - Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasa discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N//A	N//A
	<b>FRACTURADO EN BLOQUE</b> - Masa de roca bien unido, consiste de un bloque cubico formado por 3 conjuntos de intersecciones discontinuas.	80	70			
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES</b> Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más conjuntos de familias.		60	50		
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO</b> - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formado por la intersección de numerosos sets de estructuras.			40	30	
	<b>DESINTEGRADO</b> - Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.				20	
	<b>LAMINADO/CIZALLADO</b> - Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistocidad que prevalece sobre otras estructuras.	N//A	N//A			10

Figura 4.14 Estimación del GSI, basado en observaciones geológicas.

Adaptado de Hoek (2006).

Respecto al uso del índice GSI para caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso, se debe indicar los criterios utilizados:

- No fue aplicado en aquellos casos en que el comportamiento del macizo rocoso presentaba un claro control estructural.
- No se consideró la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, ya que al evaluar la resistencia del macizo se incluyen los parámetros que definen el criterio de Hoek-Brown. Además, no se considera el espaciamiento de las discontinuidades, ya que está implícitamente descrito al evaluar la estructura del macizo rocoso.
- No se considera la condición de aguas porque el criterio de Hoek-Brown se define en términos de esfuerzos efectivos.
- Por último, el GSI se expresa en base a un rango y no como un valor específico.

#### 4.6 ZONIFICACIÓN GEOMECAÁNICA

Para la zonificación geomecánica, se seleccionaron 61 estaciones geomecánicas en lugares representativos como

afloramientos en taludes de montañas, colinas y cortes de carretera. En general, por las características litológicas, estructurales y la calidad de los macizos rocosos, el área presenta calidades con valores que van desde muy malas hasta muy buenas; sin embargo, en su conjunto, está dominada por calidades de roca que van de regular a mala (ver detalle en anexo I).

Aplicando los métodos de Bieniawski (RMR) y GSI, se obtuvieron los siguientes resultados:

##### 4.6.1 Macizos con calidad muy mala

Dentro este rango de clasificación, se encuentra la subunidad litológica compuesta por conglomerados, areniscas y arcillitas pertenecientes a la Formación Chincheros donde el valor de GSI oscila entre 10 a 20 (figura 4.15).

El macizo presenta una estructura desintegrada, extremadamente rota con una mezcla de fragmentos fácilmente disgregables, angulosos y redondeados. La condición de superficie es muy pobre y fuertemente meteorizada.








	Estructura	CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENO	BUENO	EQUITATIVO	POBRE	MUY POBRE
		Drecese la calidad de Superficie				
	<b>INTACTO O MASIVO</b> - Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasa discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N//A	N//A
	<b>FRACTURADO EN BLOQUE</b> - Masa de roca bien unido, consiste de un bloque cubico formado por 3 conjuntos de intersecciones discontinuas.	80	70			
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES</b> Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más conjuntos de familias.		60			
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO</b> - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formado por la intersección de numerosos sets de estructuras.			50		
	<b>DESINTEGRADO</b> - Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.			40		
	<b>LAMINADO/CIZALLADO</b> - Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistocidad que prevalece sobre otras estructuras.			30	20	
<b>A)</b> 		N//A	N//A			10



Figura 4.15 a) valor GSI estimado para la subunidad de conglomerados, areniscas y arcillitas; b), c) y d) se observa la estructura del macizo completamente desintegrada, fácilmente disgregable y fuertemente meteorizado.

### 4.6.2 Macizos con calidad mala

Dentro de este rango de clasificación, se encuentran las subunidades litológicas compuestas por dioritas, donde el valor de GSI oscila entre 30 a 40 (figura 4.16). La estructura de este

macizo rocoso se caracteriza por ser fuertemente fracturada, con bloques en contacto de forma irregular, formados por cuatro a más familias de discontinuidades. La condición de superficie es pobre, fuertemente meteorizado y rellenada de material fino.

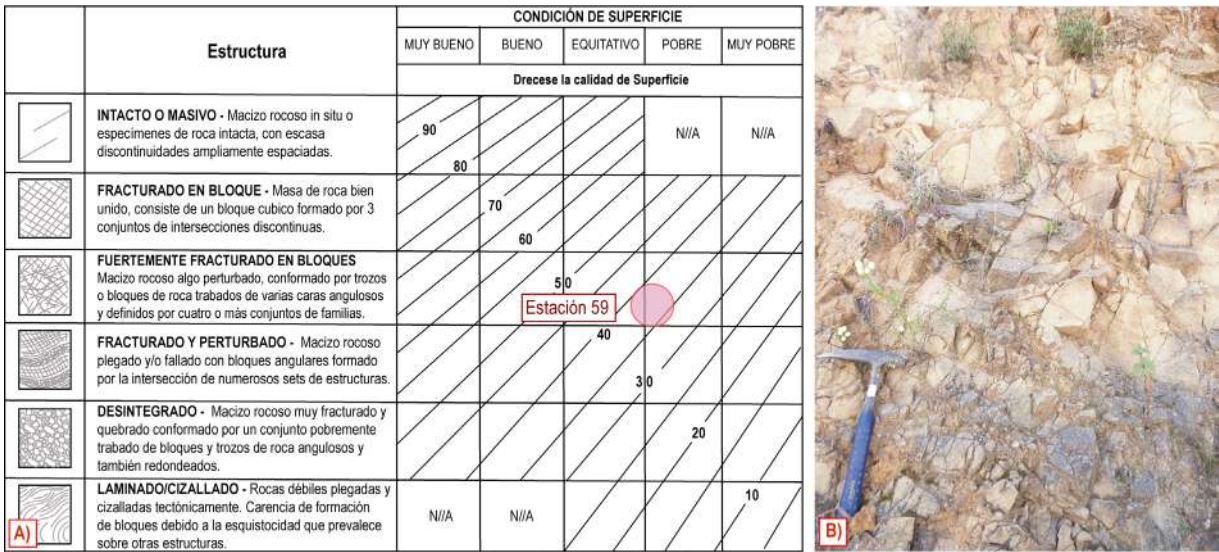








Figura 4.16 a) valor GSI estimado para la subunidad de dioritas; b) macizo fuertemente fracturado y meteorizado.

La subunidad litológica está compuesta por limolitas, limoarcillitas y arenas, pertenecientes a la Formación San Sebastián, donde el valor de GSI oscila entre 10 a 20 (figura 4.17). Su estructura se caracteriza por ser fuertemente desintegrado, no percibe rastros de fracturaciones visibles y fragmentos fácilmente disgregables. La condición de superficie es muy pobre, blanda con superficies muy meteorizadas.

La subunidad litológica está compuesta por arcillitas y areniscas, pertenecientes a las Formaciones Punacancha, Soncco, Kayra,

Quilque, Paucarbamba y Huancané, donde el valor de GSI varía entre 10 y 40 (figura 4.18), y valores de RMR resultantes clasifican a los macizos de calidad mala (figura 4.19).

Además, según su clasificación GSI, presentan una estructura fracturada a desintegrada, que forman bloques angulosos formados por la intersección de numerosas discontinuidades y con un alto contenido de material fino. La condición de superficie es de pobre a muy pobre y fuertemente meteorizada.

	Estructura	CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENO	BUENO	EQUITATIVO	POBRE	MUY POBRE
		Drecese la calidad de Superficie				
	<b>INTACTO O MASIVO</b> - Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasa discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N//A	N//A
	<b>FRACTURADO EN BLOQUE</b> - Masa de roca bien unido, consiste de un bloque cubico formado por 3 conjuntos de intersecciones discontinuas.		70			
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES</b> Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más conjuntos de familias.			50		
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO</b> - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formado por la intersección de numerosos sets de estructuras.				40	
	<b>DESINTEGRADO</b> - Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.					30
	<b>LAMINADO/CIZALLADO</b> - Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistocidad que prevalece sobre otras estructuras.	N//A	N//A			20
<b>A)</b>						10

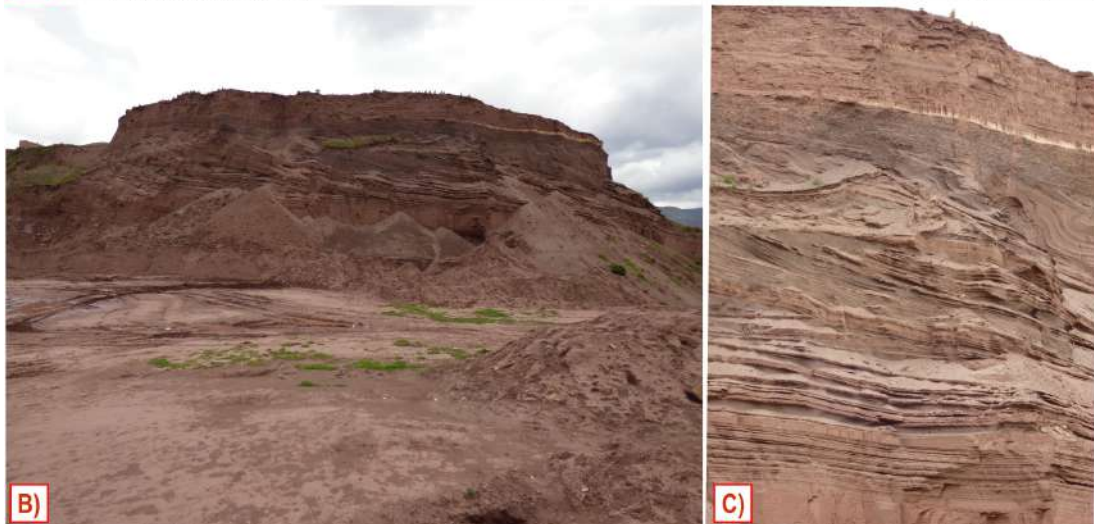


Figura 4.17 a) valor GSI estimado para la subunidad de limolitas, limoarcillitas y arenas; b) y c) se observa un macizo desintegrado, sin fracturaciones visibles y muy meteorizado.







	Estructura	CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENO	BUENO	EQUITATIVO	POBRE	MUY POBRE
		Decrese la calidad de Superficie				
	<b>INTACTO O MASIVO</b> - Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasa discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	<b>FRACTURADO EN BLOQUE</b> - Masa de roca bien unido, consiste de un bloque cubico formado por 3 conjuntos de intersecciones discontinuas.	80	70			
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES</b> Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más conjuntos de familias.		60	50		
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO</b> - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formado por la intersección de numerosos sets de estructuras.			30		
	<b>DESINTEGRADO</b> - Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.				20	
	<b>LAMINADO/CIZALLADO</b> - Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistocidad que prevalece sobre otras estructuras.	N/A	N/A			10

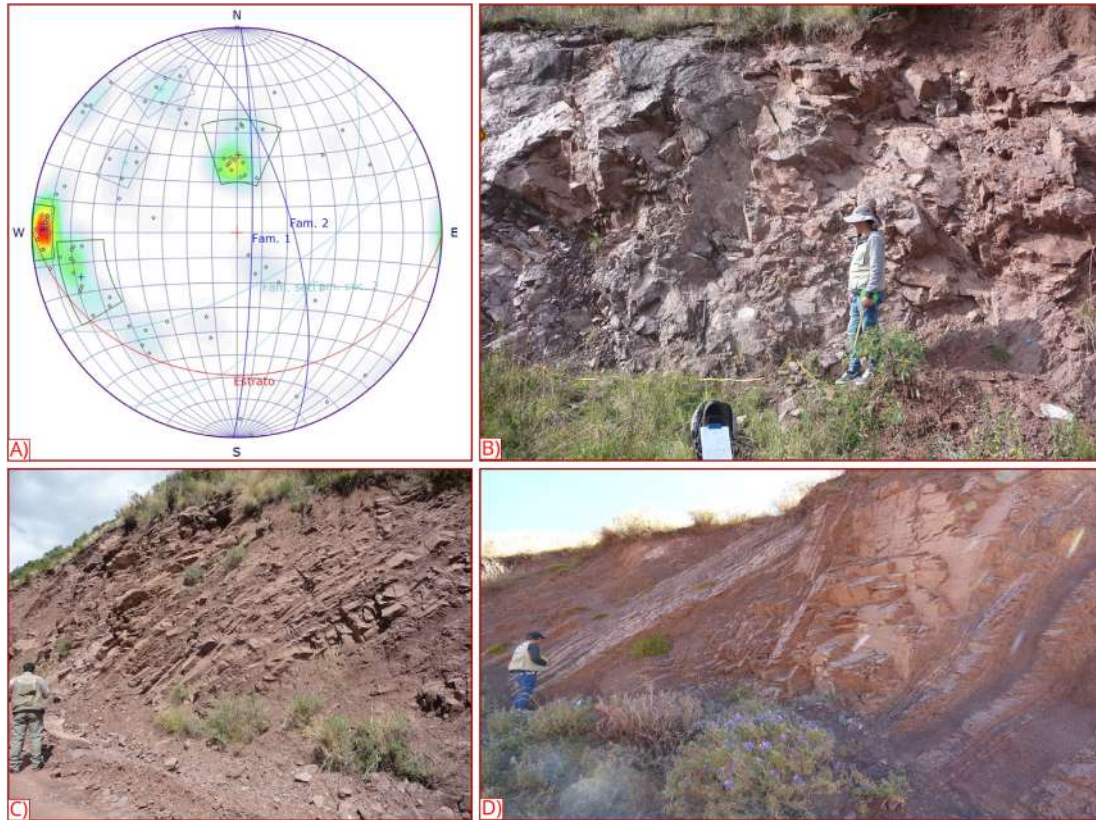


Figura 4.18 a) valor GSI estimado para la subunidad de arcillitas y areniscas; b) formado por un macizo desintegrado sin discontinuidades visibles, gran contenido de material fino y fuertemente meteorizado; c) macizo fracturado y perturbado, con numerosas discontinuidades e igualmente muy meteorizado.

En relación a su clasificación RMR, presentan resistencias predominantemente muy bajas (25-50 Mpa), un grado de fracturación, en términos de RQD, malo (25-50 %), las juntas se encuentran medianamente separadas (0.6-0.2 m), la

continuidad media de las discontinuidades es baja (1-3 m), las discontinuidades están parcialmente abiertas (0.1-5 mm), onduladas lisas a suaves, con rellenos suaves (<5 mm), y la meteorización varía de moderada a muy meteorizada.





**Figura 4.19** a) orientación de las discontinuidades en la subunidad de arcillitas y areniscas; b) macizo con resistencia baja, fuertemente fracturado y afectado por la falla Tambomachay; c) macizo muy fracturado, RQD malo, juntas medianamente separadas, continuidad media, moderadamente meteorizada; d) macizo muy fracturado, RQD malo, continuidad media-baja muy meteorizada.

La subunidad litológica está compuesta por mezclas caóticas de yesos, perteneciente a la Formación Maras, donde el valor de GSI varía entre 10 a 20 (figura 4.20) y los valores de RMR resultantes lo clasifican como macizo de calidad mala (figura 4.21).

Según su clasificación GSI, presenta una estructura desintegrada, extremadamente rota con una mezcla de fragmentos fácilmente disgregables, angulosos y redondeados. La condición de superficie es de pobre a muy pobre y fuertemente meteorizada.

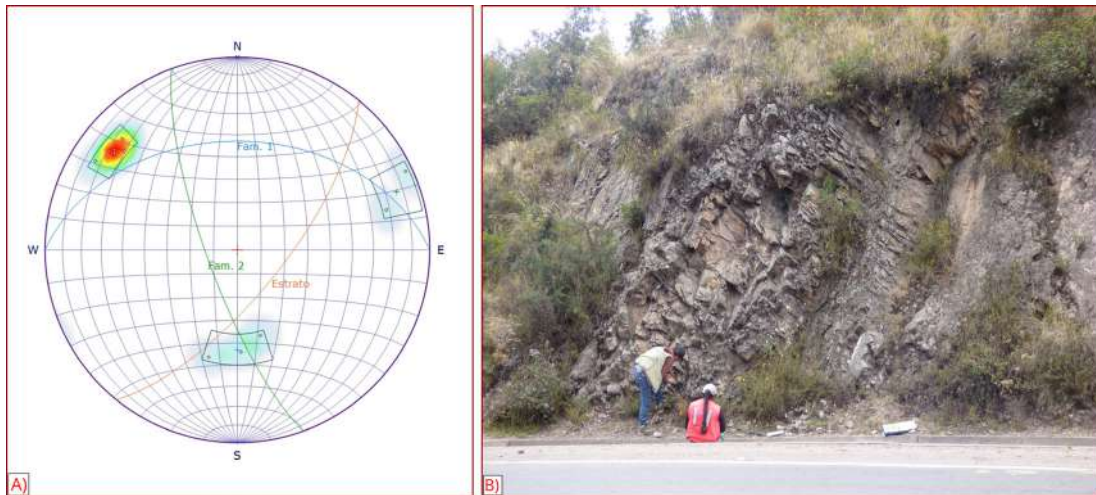
	Estructura	CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENO	BUENO	EQUITATIVO	POBRE	MUY POBRE
		Drecese la calidad de Superficie				
	<b>INTACTO O MASIVO</b> - Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasa discontinuidades ampliamente espaciadas.	90 80			N/A	N/A
	<b>FRACTURADO EN BLOQUE</b> - Masa de roca bien unido, consiste de un bloque cubico formado por 3 conjuntos de intersecciones discontinuas.		70 60			
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES</b> Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más conjuntos de familias.			50		
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO</b> - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formado por la intersección de numerosos sets de estructuras.			40		
	<b>DESINTEGRADO</b> - Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.			30		
	<b>LAMINADO/CIZALLADO</b> - Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistocidad que prevalece sobre otras estructuras.	N/A	N/A			10



Figura 4.20 a) valor de GSI estimado para la subunidad de yesos; b) macizo desintegrado sin discontinuidades visibles, gran contenido de material fino y fuertemente meteorizado.

En relación a su clasificación RMR, en algunos sectores (figura 4.21) presenta resistencia baja (25-50 Mpa), grado de fracturación malo (RQD 25-50 %); las juntas se encuentran próximas (0.06-0.2 m); la continuidad promedio es baja (1-3 m);

las discontinuidades se encuentran abiertas a algo abiertas (0.1-5 mm), onduladas lisas; presenta relleno suave y se encuentra muy meteorizada.



**Figura 4.21** a) orientación de las discontinuidades encontradas en el macizo rocoso; b) macizo de resistencia baja con RQD malo, juntas próximas, continuidad baja y muy meteorizado.

#### 4.6.3 Macizos con calidad regular

Dentro de este rango de clasificación, se encuentran la subunidad litológica compuesta por areniscas, arcillitas y conglomerados, pertenecientes a las Formaciones Punacancha, Soncco, Kayra, Quilque, Paucarbamba y Huancané, donde el valor de GSI varía entre 30 a 40 (figura 4.22), y valores de RMR resultante clasifican a los macizos rocosos de calidad media (figura 4.23).

Según su clasificación GSI, presentan una estructura fracturada a desintegrada, con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con alto contenido de material fino. La condición de superficie es equitativa a pobre y de moderada a muy meteorizada.

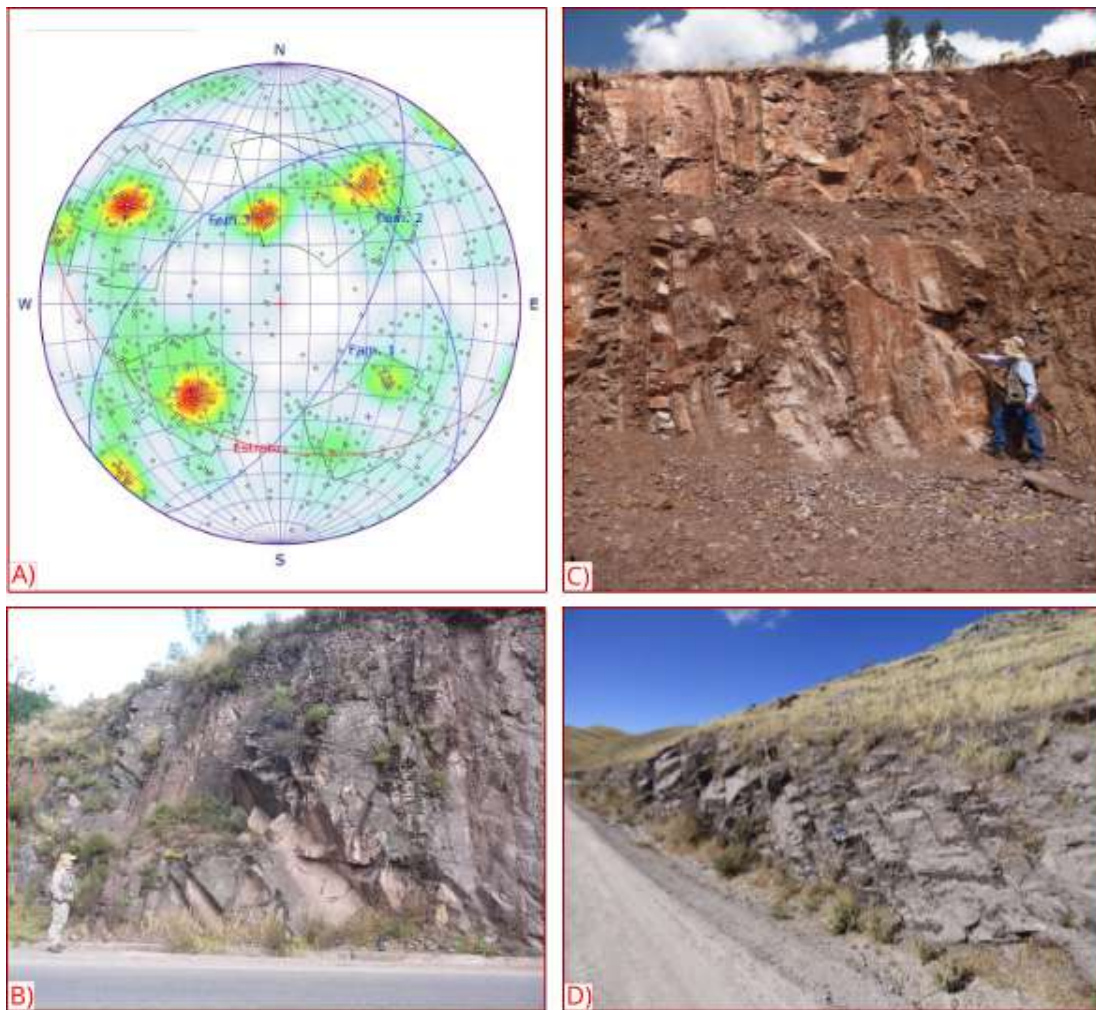
	Estructura	CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENO	BUENO	EQUITATIVO	POBRE	MUY POBRE
		Drecese la calidad de Superficie				
	<b>INTACTO O MASIVO</b> - Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasa discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	<b>FRACTURADO EN BLOQUE</b> - Masa de roca bien unido, consiste de un bloque cubico formado por 3 conjuntos de intersecciones discontinuas.		70			
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES</b> Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más conjuntos de familias.			50		
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO</b> - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formado por la intersección de numerosos sets de estructuras.				40	Estación 12
	<b>DESINTEGRADO</b> - Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.					20
	<b>LAMINADO/CIZALLADO</b> - Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistocidad que prevalece sobre otras estructuras.	N/A	N/A			10



Figura 4.22 a) valores de GSI estimados para la subunidad de areniscas, arcillitas y conglomerados; b) Estación N° 08 presenta macizo desintegrado sin discontinuidades visibles, gran contenido de material fino y fuertemente meteorizado; c) Estación N° 12 formado por macizo de estructura fracturada y perturbada, con numerosas discontinuidades y fuertemente meteorizado.

En relación a su clasificación RMR, la resistencia de la matriz es baja (25-50 Mpa); sin embargo, también presenta resistencias medias (50-100 Mpa), aunque la meteorización de algunas estaciones pueda hacer que estos valores disminuya. En función del grado de fracturación, los macizos tienen una calidad heterogénea que varía entre media y buena (RQD 50-90 %);

las juntas se encuentran moderadamente separadas a próximas (0.06-0.6 m); la continuidad promedio de las juntas es media (3-10m); las discontinuidades se encuentran abiertas a algo abiertas (0.1-5 mm), onduladas lisas a ligeramente rugosas; algunas estaciones no presenta relleno; otras, con relleno suave y la meteorización varía de ligera a moderada.



**Figura 4.23** a) orientación de las discontinuidades formadas principalmente por 3 familias; b) macizo de resistencia baja, fracturamiento malo, persistencia media; c) macizo plegado y fracturado de calidad regular, de continuidad promedio media; d) macizo de fracturamiento medio, poco persistente, discontinuidades onduladas lisas.

#### 4.6.4 Macizos con calidad buena

Dentro de este rango de clasificación, se encuentra la subunidad litológica compuesta por Secuencia lávica andesítica/dacítica perteneciente a la Formación Rumicola, donde el valor del RMR resultante clasifica al macizo con calidad buena (figura 4.24).

Estos macizos presentan resistencias medias (50-100 Mpa), grado de fracturación muy buena (RQD 90-100 %); las juntas

se encuentran separadas a muy separadas (0.6 a más de 2 m); la continuidad media de las discontinuidades es baja (1 a 3 m); las discontinuidades están abiertas a algo abiertas (0.5-5 mm), onduladas a algo rugosas; en algunas se observa un relleno suave, en otras no y la meteorización es ligera.

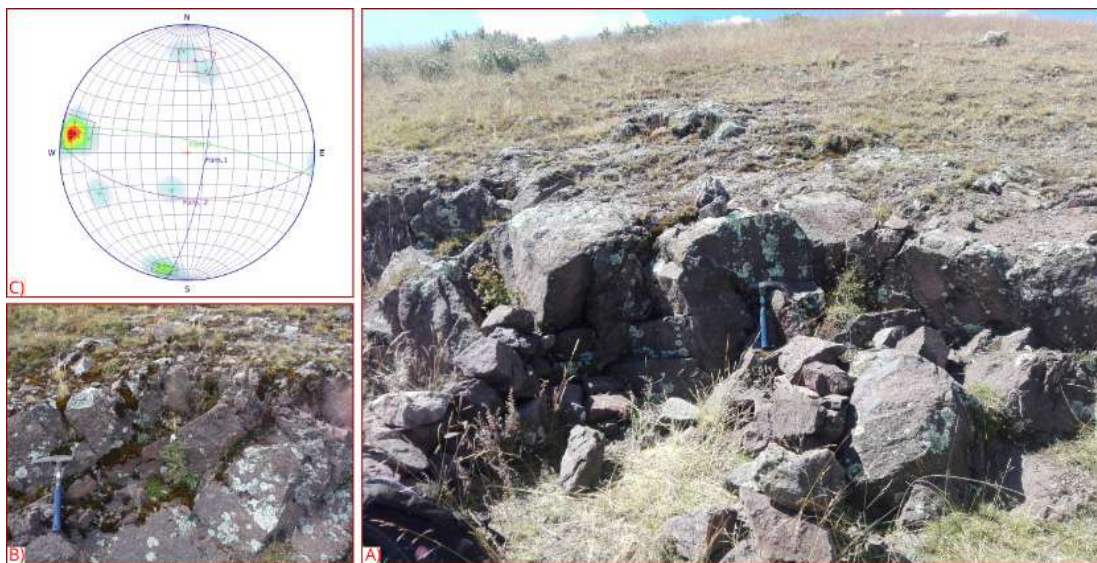


**Figura 4.24** a) y b) macizo de resistencia media, grado de fracturación muy bueno; las juntas se encuentran muy separadas y de continuidad baja; c) orientación de las discontinuidades que forman 3 familias.

La subunidad litológica está compuesta por lavas, aglomerados y brecha volcánica, pertenecientes a la Formación Pachatusan, donde el valor del RMR resultante clasifica al macizo con calidad buena (figura 4.25).

Estos macizos presentan resistencias medias (50-100 Mpa), grado de fracturación bueno (RQD 75-90 %); las juntas

se encuentran medianamente separadas (0.6-0.2 m); la continuidad media de las discontinuidades es muy baja (<1m); las discontinuidades se encuentran cerradas, onduladas a algo rugosas; no presentan relleno y la meteorización que presenta es ligera.









**Figura 4.25** a) y b) macizo de resistencia media, grado de fracturación buena, las juntas se encuentran medianamente separadas y de continuidad baja; c) orientación de las discontinuidades encontradas

### 4.6.5 Macizos con calidad muy buena

Dentro de este rango de clasificación, se encuentran la subunidad litológica compuesta por caliza maciza, perteneciente a la Formación Ayabaca, donde el valor de GSI oscila entre 75 a 85 (figura 4.26). La estructura de este macizo rocoso se caracteriza por ser intacta o masiva, ampliamente separada

y formada por escasas discontinuidades. La condición de superficie es buena, muy resistente y ligeramente meteorizada; sin embargo, podría presentar cavernas dentro del macizo.

En el cuadro 4.8, se presenta de manera resumida la variación porcentual de la calidad del macizo rocoso en relación con las unidades litológicas presentes en el área de estudio.

	Estructura	CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENO	BUENO	EQUITATIVO	POBRE	MUY POBRE
		Drecese la calidad de Superficie				
	<b>INTACTO O MASIVO</b> - Macizo rocoso in situ o especímenes de roca intacta, con escasas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90 80	Estación 60		N//A	N//A
	<b>FRACTURADO EN BLOQUE</b> - Masa de roca bien unido, consiste de un bloque cubico formado por 3 conjuntos de intersecciones discontinuas.		70 60			
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES</b> Macizo rocoso algo perturbado, conformado por trozos o bloques de roca trabados de varias caras angulosos y definidos por cuatro o más conjuntos de familias.			50		
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO</b> - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formado por la intersección de numerosos sets de estructuras.			40	30	
	<b>DESINTEGRADO</b> - Macizo rocoso muy fracturado y quebrado conformado por un conjunto pobremente trabado de bloques y trozos de roca angulosos y también redondeados.				20	
 <b>A)</b>	<b>LAMINADO/CIZALLADO</b> - Rocas débiles plegadas y cizalladas tectónicamente. Carencia de formación de bloques debido a la esquistocidad que prevalece sobre otras estructuras.	N//A	N//A			10



**Figura 4.26** Presenta una estructura intacta o masiva, con escasas discontinuidades ampliamente separadas. La condición de superficie es buena, muy resistente y levemente meteorizadas.

Cuadro 4.8

## Resumen de porcentajes correspondientes a cada litología y su calidad de roca evaluada

Estación geomecánica	Símbolo de formaciones geológicas	Unidades litológicas	Área de ocupación en porcentaje	Calidad del macizo
Cuaternario			13.15	Inconsolidado/ *No clasificado
E-40	P/di	Dioritas	0.2	Mala
E-03	NpQ-ru	Secuencia lávica andesítica/dacítica	0.55	Buena
E-04	Ji-pa	Lavas, aglomerados y brecha volcánica	0.62	Buena
E-01, E-02, E-06, E-07, E-08, E-09, E-10, E-12, E-13, E-14, E-15, E-16, E-17, E-22, E-23, E-24, E-25, E-26, E-28, E-29, E-30, E-31, E-32, E-33, E-34, E-36, E-37, E-38, E-39, E-41, E-42, E-45, E-46, E-47, E-48, E-49, E-50, E-51, E-53, E-54, E-55, E-56, E-57	Nom-pu II	Areniscas, arcillitas y conglomerados	52.15	Regular
	Peo-so II			
	Peo-ky			
	Pp-qu			
	Ki-pb			
	Ki-hn			
E-61	Q-sa	Limolitas, limoarcillitas y arenas	13.53	Mala
E-05, E-11, E-18, E-19, E-20, E-27, E-35, E-43, E-44, E-52	Nom-pu I	Arcillitas y areniscas	8.04	Mala
	Peo-so I			
	Ks-pu			
	Pp-ch			
E-59	Np-cc	Conglomerados, areniscas y arcillitas	2.55	Muy Mala
E-60	Kis-ay	Caliza maciza	0.48	Muy Buena
E-21, E-58	Ki-ma	Mezclas caóticas de yesos	8.74	Mala



# CAPÍTULO V

## CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

### 5.1 INTRODUCCIÓN

La geomorfología pasó de ser una disciplina académica a una ciencia con aplicación pragmática en las últimas décadas; sirve para resolver problemas de riesgos originados por los peligros de origen natural, potencialidad de aguas subterráneas, caracterización del substrato para la construcción de obras de infraestructura, etc. Además, sirve como apoyo en la toma de decisiones relacionadas con la planificación del territorio y el mejoramiento de la calidad de vida del hombre sin el deterioro del medio ambiente (Villota, 2005). Se independiza de la ciencia geológica a finales del siglo XIX y se consolida en el siglo XX; en la década de 1970, se incorporó los problemas relacionados a los procesos formadores del paisaje, que incluyen movimientos en masa, costeros y procesos hidrológicos que afectan a las poblaciones e infraestructura diversa, por lo que es fundamental la determinación de las geoformas existentes en un área o región (Zavala, 2010).

El reconocimiento y la caracterización de las unidades geomorfológicas en la ciudad de Cusco y su entorno son de mucha importancia para el análisis de la susceptibilidad; además, el mapa geomorfológico es útil para los planes Ordenamiento Territorial y la elaboración de planes de gestión del riesgo de desastres.

### 5.2 PENDIENTE DE LOS TERRENOS

La pendiente es uno de los principales factores dinámicos y particulares en la ocurrencia de los movimientos en masa, ya que determinan la cantidad de energía cinética y potencial de una masa inestable. Además, es un parámetro importante en la evaluación de procesos de movimientos en masa como factor condicionante (Vilchez *et al.*, 2013).

Se puede decir que es más propenso que ocurran movimientos en masa en laderas y cauces cuyas pendientes varían entre media a fuerte ( $> 30^\circ$ ). También, es más alta la erosión de laderas (laminar, surcos y cárcavas) en colinas o montañas, ya que a mayor pendiente se facilita el escurrimiento superficial y, por ende, la erosión hídrica o pluvial (Vilchez *et al.*, 2013).

Sin embargo, algunos procesos lentos como la reptación de suelos y ocasionales deslizamientos ocurren con un mínimo de pendiente. En el caso de las inundaciones y erosión fluvial, condicionante es la suave pendiente, además de influir otros factores netamente geomorfológicos y dinámicos.

El mapa de pendientes para el estudio de la ciudad del Cusco ha sido elaborado utilizando el modelo de elevación digital (DEM) con píxeles de 5 m proporcionado por el organismo no gubernamental Centro Guamán Poma de Ayala, los cuales fueron procesados en el software ArcGis.

Para categorización de la pendiente, se adaptó la propuesta realizada por Martín-Serrano *et al.* (2004.) y se consideró seis rangos o grados: terrenos llanos (menor a  $1^\circ$ , muy baja), inclinados con pendiente suave ( $1^\circ$ - $5^\circ$ , baja), pendiente moderada ( $5^\circ$ - $15^\circ$ , media), pendiente fuerte ( $15^\circ$ - $25^\circ$ ), pendiente muy fuerte o escarpado ( $25^\circ$ - $45^\circ$ ) y pendiente muy escarpada ( $>45^\circ$ , abrupta); estas se describen a continuación:

#### Terrenos llanos ( $<1^\circ$ )

Comprende al 0.45 % de área de estudio. Los terrenos son casi planos con sectores ondulados; se distribuyen en el fondo de valle. Algunas áreas están sujetas a erosión fluvial e inundaciones de tipo fluvial y pluvial.

#### Terrenos inclinados con pendiente suave ( $1^\circ$ - $5^\circ$ )

Este rango de pendiente tiene regular distribución en el fondo de valle donde se asienta la ciudad del Cusco; ocupa el 6.65 % de área; también, lo conforman las cimas de lomadas y colinas bajas. El porcentaje de ocupación de área de esta unidad es referencial por la distorsión que existe en el DEM al considerar las paredes de las viviendas como pendiente moderada y fuerte.

#### Pendiente moderada ( $5^\circ$ - $15^\circ$ )

Los terrenos de moderada pendiente corresponden principalmente a las unidades de lomadas y colinas existentes en el área de estudio. Este rango ocupa aproximadamente el 28.25 % de área; sin embargo, este valor también es referencia por las mismas consideraciones explicadas en el párrafo anterior.

En este rango de pendiente, generalmente se registran fenómenos de movimientos en masa de tipo reptación de suelos y en los cortes de taludes pueden ocurrir deslizamientos, derrumbes o caídas de rocas.

#### **Pendiente fuerte (15° – 25°)**

Los terrenos de pendiente fuerte ocupan una extensión de 28.49 % del total del área de estudio; se distribuyen indistintamente en las laderas de las colinas y montañas.

#### **Pendiente muy fuerte o escarpado (25° - 45°)**

Los terrenos con pendiente muy fuerte tienen una muy buena distribución; ocupan el 34.21 % de área del estudio y representan la mayor cantidad de ocupación; se encuentran repartidos a lo largo de las laderas de montañas y de quebradas donde ocurren procesos de erosión en cárcava.

#### **Pendiente muy escarpado (> 45°)**

Ocupa áreas muy reducidas de 1.95 %; se distribuye indistintamente en las laderas de montañas y en quebradas donde existe erosión cárcava.

### **5.3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA**

Desde el punto de vista morfológico, basados en la geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación de tierras (Villota, 2005), la cartografía permitió diferenciar dos grandes grupos de geoformas como son de:

- Carácter tectónico-degradacional y denudacional
- Carácter depositacional o agradacional

Además, en función a la escala de trabajo (1:10 000), se ha diferenciado las unidades considerando principalmente dos aspectos fundamentales:

- Homogeneidad litológica y carácter estructural
- Aspectos del relieve en relación a la erosión y sedimentación

Las geoformas individuales se agrupan en cuatro tipos generales de relieve en función a su altura relativa y pendiente: 1) montañas, colinas, lomadas o lomerío, 2) piedemontes y 3) planicies; además, se consideró las geoformas particulares como bofedales, lagunas, cuerpos de agua y depósitos antrópicos (cuadro 5.1). En la descripción de cada una de ellas, se incluye la pendiente del terreno, asociación litológica y control estructural.

La base topográfica utilizada para la caracterización de las unidades y subunidades geomorfológicas se generaron a partir del modelo de elevación digital (DEM) con píxeles de 5 m proporcionado por el organismo no gubernamental Centro Guamán Poma de Ayala. Además, para el cartografiado de los depósitos de acumulación reciente (movimientos en masa) se

utilizaron "Imágenes satelitales PeruSat-1 proporcionadas por el CNOIS y procesadas por el Ingemmet y fotografías aéreas.

A continuación, se describe las unidades y subunidades geomorfológicas (mapa 3); se detalla su ubicación y distribución geográfica, acompañadas de algunas fotografías ilustrativas de las geoformas características.

#### **5.3.1 Geoformas de carácter tectónico-degradacional y erosional**

Resultan del efecto progresivo de los procesos morfodinámicos degradacionales sobre los relieves iniciales originados por la tectónica o sobre algunos paisajes construidos por procesos exógenos agradacionales. Estos conducen a su modificación parcial o total a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes (Villota, 2005). Ocupa el 62.98 % de área de estudio y rodea la ciudad del Cusco.

Los paisajes morfológicos resultantes de los procesos denudativos forman parte de las cadenas montañosas, colinas, altillanuras (planicies), superficies onduladas y lomadas. Dentro de este grupo se tienen las siguientes unidades:

##### **a) Unidad de montañas**

Las montañas, presentan la mayor distribución en el área de estudio (44.95 %); son geoformas que alcanzan alturas mayores a los 300 m respecto al nivel de base local (citado por Villota, 2005) donde se reconocen cumbres y estribaciones producto de las deformaciones sufridas por la erosión y la influencia de otros eventos de diferente naturaleza (levantamiento, glaciación, etc.).

Comprende las siguientes subunidades:

##### **Montaña en roca volcano-sedimentaria (RM-rvs)**

Es una subunidad geomorfológica modelada sobre roca volcano-sedimentaria de la Formación Pachatusan, compuesta por intercalación de rocas sedimentarias y brechas, aglomerados, coladas volcánicas de basaltos; también, se presentan riolitas e ignimbritas. Además, esta subunidad se encuentra cubierta por depósitos glaciares y fluvioglaciares que, en algunos casos, forman morrenas.

La pendiente de sus laderas comúnmente varía entre 15° y 45° (pendiente fuerte a muy fuerte o escarpada). Además, en el área de estudio, se desarrolla en altitudes que varían desde los 4100 m s. n. m. hasta los 4425 m s. n. m. y se ubica al noreste del sector Huaccoto.

##### **Montaña en roca sedimentaria (RM-rs)**

Es una subunidad geomorfológica modelada en roca sedimentaria perteneciente a las formaciones Kayra, Paucarbamba, Quilque,

Sonco, Chilca, Puquin; las formaciones geológicas se muestran intensamente afectadas por procesos tectónicos y erosivos.

Localmente, está compuesta por laderas de pendiente muy fuerte (pendiente que varía entre 25° a 45°) a muy escarpados (pendiente mayor a 45°); sin embargo, en sus cimas la pendiente varía de moderada a fuerte (5° a 25°).

#### **Montaña estructural en roca sedimentaria (RME-rs)**

La morfología de esta subunidad geomorfológica se debe al plegamiento de las rocas superficiales de la corteza terrestre y que todavía conservan rasgos reconocibles de las estructuras originales a pesar de haber sido afectadas por procesos denudacionales.

Su asociación litológica es principalmente sedimentaria perteneciente a las formaciones Kayra y Soncco; estructuralmente, se presenta como alineamientos montañosos compuestos por secuencias bien estratificadas, plegadas con buzamientos de las capas que controlan la pendiente de las laderas. Se encuentran conformando anticlinales, sinclinales, cuevas y espinazos, que le dan una característica particular en las imágenes de satélite.

#### **b) Unidad de colinas y lomadas**

Corresponde a relieves complejos con diferentes grados de disección; son de menor altura que una montaña (menor de 300 m desde el nivel de base local) y con inclinación de laderas promedio superior a 16 % (citado por Villota, 2005); conforman alineamientos de carácter estructural y denudativo que, en conjunto, ocupan un área de 17.30 % dentro del área de estudio. Esta unidad geomorfológica, generalmente, se ubica próxima a la unidad de montañas y viene a formar parte de las estribaciones andinas.

Dentro de este grupo, se diferenciaron siete subunidades geomorfológicas y son:

##### **Colina en roca sedimentaria (RC-rs)**

Corresponde a relieve modelado sobre rocas sedimentarias, conformada por las formaciones Kayra, Quilque y Puquín. La pendiente de sus laderas varía de 5° a 25° principalmente; sin embargo; existen sectores donde la pendiente varía entre 25° y 45°. Se ubican en margen derecha de la quebrada Cacllacancha (noroeste del cerro Uchuypacuyos), margen izquierda del río Tankarpata, margen derecha del río Huatanay (sector Huancaro), sectores Amacho y Oscahuayjo y en el suroeste del sector Tancarcancha.

##### **Colina estructural en roca sedimentaria (RCE-rs)**

Corresponde a superficies compuestas por alineamientos colinosos conformada por rocas sedimentarias; sigue un patrón

estructural donde resalta principalmente el buzamiento de los estratos (diferenciable en imágenes de satélite) con dirección noreste; además, presenta un sistema de drenaje subparalelo. Se ubica en la quebrada Huancapite y en la naciente del río Chirimayo.

Las pendientes de los terrenos de sus laderas varían entre 5° y 25°, con sectores muy reducidos donde la pendiente varía desde 25° a 45° y resalta morfológicamente el buzamiento.

##### **Lomada en roca intrusiva (RL-ri)**

Corresponde a superficie formada en roca intrusiva de tipo diorítico intensamente meteorizado; además, presenta cimas redondeadas y laderas con pendientes que varían principalmente entre 5° y 25°. Esta subunidad se ubica en el sector de Quenko

##### **Lomada en roca sedimentaria (RL-rs)**

Corresponde a superficie modelada sobre rocas sedimentarias de las formaciones Chincheros y Maras donde la incisión fluvial profunda es limitada en comparación con las montañas. Sus cimas son redondeadas con laderas que presentan pendientes que varían principalmente entre 1° y 15°; sin embargo, el rango de pendiente en las laderas de las quebrada y ríos que nacen en la subunidad varía de 15° y 25° con sector dispersos de 25° a 45°. Se ubica entre los ríos Saphy y Pumamarca.

##### **Relieve Kárstico (R-k)**

Según Pedraza (1996), el conjunto de procesos que desarrollan modelados kársticos propiamente dichos recibe el nombre de karstificación; es una meteorización mezcla de acciones químicas (disolución, hidratación, sustitución iónica y óxido reducción) y físicas (transferencia de masa y difusión).

En el área de estudio, esta subunidad se desarrolla en la Formación Ayabacas del Grupo Yuncaypata; además, se encuentra rodeada por una mezcla cáotica de yeso de la formación Maras.

##### **Altiplanicie sedimentaria (AP-s)**

Es una superficie casi plana con pendiente entre 0° y 5°; se presenta en las alturas tomando el nombre de altiplanicie; en el área de estudio es poco extenso (0.18 % de ocupación de área); presenta material sedimentario semiconsolidado, que fue depositado por el arrastre de las aguas fluviales.

##### **Domo volcánico (Do-v)**

Carlotto (2011) lo denomina Domo de Lavas Huaccoto. Esta subunidad consta de una superficie convexa o cómica ubicada en la cima del edificio volcánico; ocupa el 0.55 % de área). La pendiente de sus laderas varía de 5° a 15° en el lado sureste y entre 15° a 45° en el lado noroeste.

### 5.3.2 Geoformas de carácter depositacional y erosional

Las geoformas de carácter depositacional y erosional dentro del área de estudio ocupan el 32.46 % de superficie aproximadamente y tiene las siguientes subunidades:

#### Vertiente glacial o de gelifración (V-gl)

Es una subunidad ubicada a una altitud superior a los 4065 m s. n. m. entre los cerros Atlas y Pachatusan; su material está compuesto por gravas y bloques de diferentes tamaños con matriz variable entre limos arenosos y arcillas. La pendiente del terreno varía entre 5° y 15°.

Esta subunidad, en algunos sectores, se presenta en forma de morrenas y superficies onduladas. Además, muestra escarpas visibles de posibles fallas geológicas.

#### Vertiente glacio-fluvial (V-gfl)

Es una superficie muy limitada en el área de estudio. Está formada por sedimentos transportados de forma irregular por el fondo del valle de la zona; además, está asociada a una morfogénesis de origen glacial o periglacial.

#### Vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd)

Esta subunidad corresponde a las acumulaciones de ladera originadas por procesos de movimientos en masa prehistóricos, antiguos y recientes de tipo deslizamiento.

#### Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial (V-cd)

Las características geológicas, climáticas y tectónicas ocurridas en el área de estudio han condicionado la ocurrencia de movimientos en masa. Los paisajes originados por estos procesos gravitacionales varían de pequeños a grandes dimensiones, probablemente detonados por lluvias excepcionales o asociados a eventos sísmicos importantes.

Esta subunidad corresponde a las acumulaciones de ladera originadas por procesos de movimientos en masa prehistóricos, antiguos y recientes, así como también a las acumulaciones de material fino y detrítico movilizado por escorrentía superficial, las que se acumulan lentamente en las laderas.

Generalmente, lo conforman depósitos inconsolidados a ligeramente consolidados; muestran una composición litológica homogénea; se trata de depósitos con corto a mediano recorrido relacionados a las laderas superiores adyacentes de áreas fluviales o periglaciares. Su morfología es usualmente convexa y su disposición semicircular a elongada en relación a la zona de arranque o despegue del movimiento en masa.

#### Vertiente coluvial de detritos (V-d)

Corresponde a subunidades geomorfológicas que se formaron por depósitos inconsolidados acumulados al pie de superficies escarpadas en forma de talús de detritos de origen coluvial; generalmente son de edad reciente.

Por encontrarse cerca de su fuente de origen, presentan una naturaleza litológica homogénea; sin embargo, su granulometría es variable, con fragmentos angulosos y su grado de compacidad es bajo (no consolidado). Está asociado generalmente a pequeñas ocurrencias sucesivas de derrumbes.

#### Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial (P-at)

Corresponde a una planicie inclinada extendida al pie del sistema montañoso, formada por el acarreo de material aluvial, arrastrado por corrientes de agua estacional y de carácter excepcional, en ocasiones a manera de flujos y avalanchas de detritos. Se depositan en la desembocadura de las quebradas y están asociadas usualmente a lluvias excepcionales.

#### Vertiente o piedemonte aluvio-lacustre (P-al)

Corresponde a una planicie ligeramente inclinada y extendida en el pie del sistema montañoso de área de estudio, formada por el acarreo del material aluvial o arrastrado por corrientes de agua estacional y de carácter excepcional, en ocasiones a manera de flujos y avalanchas de detritos (geológicamente pertenece a la Formación San Sebastián). Están depositadas en las desembocaduras de las quebradas. La pendiente del terreno de esta subunidad geomorfológica varía de 1° a 5° (terreno inclinado con pendiente suave).

Esta subunidad, en la actualidad, se encuentra disectada por cauces de quebradas y ríos.

#### Terraza aluvial (T-al)

Son porciones de terreno alargado ligeramente inclinado (pendiente menor a 5°) que se encuentran dispuestas a los costados del cauce principal del río Huatanay. Su composición litológica es resultado de la acumulación de fragmentos de roca de diferente granulometría (bolos, cantos, gravas con matriz de arenas y limos) que corresponden principalmente a rocas polimícticas. Estos materiales fueron acarreados y depositados por el caudal del río Huatanay y sus afluentes.

#### Terraza fluvial (T-fl)

Corresponde a la subunidad geomorfológica modelada por el río Huatanay; en la actualidad, se encuentra modificada por la actividad antropogénica donde la susceptibilidad a inundación fluvial es alta.

### 5.3.3 Geoformas particulares

Está compuesto por forma del terreno relacionado a bofedales (Bo), relieve depresionado (R-d) asociado a dolinas, laguna y cuerpos de agua (Lg/ca), depósito antrópico (Dan) compuesto

por depósito de residuos sólidos principalmente y erosión en ladera (EL) generada por el escurrimiento superficial. En total ocupa el 4.56 % del área de estudio.

**Cuadro 5.1**

**Porcentaje de ocupación de área de las subunidades geomorfológicas**

Geoforma	Unidad	Sub unidad	Área (%)	
De carácter tectónico degradacional y erosional (62.98%)	Montañas (44.95 %)	Montaña en roca volcano-sedimentaria	RM-rvs	0.62
		Montaña en roca sedimentaria	RM-rs	33.74
		Montaña estructural en roca sedimentaria	RME-rs	10.59
	Colinas y lomadas (17.30)	Colina en roca sedimentaria	RC-rs	1.68
		Colina estructural en roca sedimentaria	RCE-rs	4.15
		Lomada en roca intrusiva	RL-ri	0.18
		Lomada en roca sedimentaria	RL-rs	10.67
	Planicies (0.18 %)	Relieve Kárstico	R-k	0.62
	Volcánicas (0.55 %)	Altiplanicie sedimentaria	AP-s	0.18
		Domo volcánico	Do-v	0.55
De carácter depositacional o agradacional (32.46%)	Piedemonte (28.55 %)	Vertiente glacial o de gelifracción	V-gl	2.7
		Vertiente glacio-fluvial	V-gfl	0.03
		Vertiente con depósito de deslizamiento	V-dd	0.77
		Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	V-cd	6.79
		Vertiente coluvial de detritos	V-d	3.78
		Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial	P-at	4.88
		Vertiente o piedemonte aluvio-lacustre	P-al	9.6
	Planicies (3.91 %)	Terraza aluvial	T-al	2.73
		Terraza fluvial	T-fl	1.18
Geoformas particulares (4.56%)	Bofedales	Bo	0.1	
	Relieve depresionado	R-d	0.05	
	Laguna y cuerpos de agua	Lg/ca	0.02	
	Depósito antrópico	Dan	0.02	
	Erosión en ladera	EL	4.37	



# CAPÍTULO VI

## HIDROGEOLOGÍA

### 6.1 GENERALIDADES

En gran parte de la ciudad del Cusco y centros poblados periféricos, el abastecimiento de agua para consumo humano y riego proviene de las aguas subterráneas. El abastecimiento tiene como fuente a numerosos manantiales que son captados en forma directa mediante la técnica de alerones; otras fuentes de abastecimiento son las galerías filtrantes, que tienen uso conjunto para consumo humano y agrícola. Parte de la ciudad se abastece de pozos que se ubican en el acuífero poroso no consolidado de Piñipampa (cuenca del río Vilcanota); sin embargo, gran porcentaje del agua potable para la ciudad proviene de la laguna de Piuray (fuente superficial).

La presencia de aguas subterráneas, en acuíferos fisurados que tienen contacto con acuitardos, constituye un factor condicionante para la ocurrencia de peligros geológicos, principalmente los de movimientos en masa.

Por otra parte, el crecimiento urbano de la ciudad del Cusco es alarmante, puesto que gran parte de las viviendas tienden a ocupar áreas de laderas que se exponen a un inminente peligro. Este crecimiento urbano genera también mayor demanda de los recursos hídricos.

Para conocer detalles del comportamiento del agua subterránea relacionada a los movimientos en masa y a las demandas de la población, se realizó la presente evaluación hidrogeológica, que corresponde a la ciudad del Cusco y concretamente a la parte alta de la subcuenca del río Huatanay.

Para conocer el comportamiento hidrogeológico de las rocas y suelos, se realizó un inventario de fuentes de agua subterránea, cartografiado hidrogeológico, toma de muestras y pruebas hidráulicas para determinar parámetros hidrogeológicos como la conductividad hidráulica, gradiente hidráulico, etc. Esta información como datos de campo elementales fue usada para la elaboración del mapa hidrogeológico del Cusco. Para la representación de los colores en el mapa y la leyenda, se usó la guía de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos – AIH (Struckmeier y Margat, 1995). El mapa tiene por finalidad mostrar la distribución espacial de los acuíferos potenciales, zonas de

surgencia de aguas subterráneas relacionados a los peligros geológicos y zonas impermeables, las cuales se consideran variables elementales para el diagnóstico hidrogeológico del valle de Cusco. Adicionalmente, el informe hidrogeológico se usa para diseñar planes y proyectos adecuados que permitan encaminarnos a una gestión integrada de los recursos hídricos, la misma que contribuya con planes adecuados de expansión urbana de la ciudad del Cusco.

### 6.2 INVENTARIO DE MANANTIALES

Los trabajos de campo, para realizar el inventario de fuentes de aguas subterráneas, se realizaron en un solo periodo y que corresponde a la época de estío, concretamente los meses de septiembre y octubre de 2018.

El inventario de fuentes permitió encontrar las principales zonas de surgencia que tienen los acuíferos, conocer su ubicación, el control de surgencia (litológico o estructural), el comportamiento de sus caudales, etc. Para medir su composición química, se midieron parámetros físico-químicos in situ y se tomaron muestras para análisis químico e isotópico.

El inventario de fuentes y afloramientos en temporada de estío permitió conocer el verdadero caudal que proceden de los acuíferos.

Los trabajos de campo se desarrollaron cubriendo la mayor parte de los afloramientos o surgencias de aguas subterráneas que tiene el área de estudio, con el propósito de tener un diagnóstico completo de las manifestaciones de aguas subterráneas que salen del subsuelo a superficie.

Se inventariaron 34 fuentes de aguas subterráneas (cuadros 6.1 y 6.2), de las cuales 3 corresponden a manantiales, 21 a manantiales captados, 3 puntos de registro, una fuente termal, una laguna y 5 galerías filtrantes. De las fuentes inventariadas se seleccionaron 3 manantiales, 21 manantiales captados, 3 puntos de registro, 5 galerías filtrantes y una fuente termal para la toma de muestras.

Estas fuentes en su mayoría afloran condicionadas por cambios de litología, presencia de fallas y fracturas y/o cambios de pendiente.

Cuadro 6.1

## Inventario de fuentes de agua subterránea encontradas en el valle del Cusco

Cuadro resumen		Parámetros in situ	Descripción
Tipo de fuente	Cantidad de fuentes inventariadas set-oct 2018		
Manantiales	3	Q,T°,C.E.,STD,pH	Se tomaron muestras en las surgencias u ojos.
Manantiales captados	21	Q,T°,C.E.,STD,pH	Se tomaron muestras en las surgencias u ojos.
Fuente termal	1	Q,T°,C.E.,STD,pH	Se tomaron muestras en las surgencias u ojos.
Galerías filtrantes	5	Q,T°,C.E.,STD,pH	Se tomaron muestras en las bocatomas de salida.
Punto de registro	3	Q,T°,C.E.,STD,pH	Se tomaron muestras en las surgencias u ojos.
Laguna	1		
Total	34		

Cuadro 6.2

## Inventario de fuentes de agua subterránea y parámetros físico-químicos

N°	Código	Nombre	Tipo de fuente	Coordenadas		Z	CE	T	pH	TDS
				X	Y					
1	49949-06	Uñucñahui	manantial captado	183569	8505434	3548	868.2	14.6	7.74	425.9
2	49949-07	Huacoto	manantial captado	193862	8505066	4077	250.8	9.5	7	123.5
3	49949-08	Miskiuno	manantial captado	183494	8505028	3517	1380	13.6	7	677
4	49949-10	Pillco	manantial captado	184022	8504707	3463	1419	13.5	7	695.8
5	49949-11	Uñucñahui Chocco 1	manantial captado	178352	8504501	3575	1477	13.8	7.12	724.3
6	49949-12	Tambomachay 1	manantial captado	178706	8507939	3831	891.1	12.1	7.44	437.2
7	49949-13	Tambomachay 2 y 3	manantial captado	177966	8508485	3914	756.4	12	7.99	371.2
8	49949-14	Diagonal	manantial captado	180468	8502290	3331	1352	15.6	7.32	663.9
9	49949-15	Tupac Amaru	manantial captado	185546	8501211	3238	1657	17.4	8.07	816.2



Continuación...

N°	Código	Nombre	Tipo de fuente	Coordenadas		Z	CE	T	pH	TDS
				X	Y					
10	49949-16	Fedetrac	manantial captado	182620	8500928	3322	1706	19.8	7.51	837
11	49949-17	Seminario	manantial	180603	8500783	3309	1044	15	7.15	708.3
12	49949-18	Picol Orconpujio	manantial captado	186679	8500503	3227	1195	17.6	7.27	986
13	49949-19	Chimpahuaylla	manantial captado	187800	8500132	3217	976.2	17.2	7.5	482
14	49949-21	Huamancharpa	manantial captado	173539.31	8498075.75	3908	262.3	11.9	7	129
15	49949-22	Pantimocco	manantial captado	173628.17	8497919.88	3906	250.9	12.4	7.5	123.4
16	49949-23	Aguas Calientes	fuelle termal	178501	8497698	3550	2171	23.3	6.5	1050
17	49949-24	Uñucñahui Chocco 2	manantial	179082	8497659	3616	403.9	13	7	192.3
18	49949-25	Uñucñahui Chocco 1	manantial	179060	8497568	3574	418.3	11.1	7	205.8
19	49949-26	Quebrada Alexpujio	punto de registro	175504	8497065	3667	530.1	10.6	7	260
20	49949-27	Sipaspujio	manantial captado	179514	8497059	3708	367	16	7	180.2
21	49949-28	Pillao	manantial captado	184302	8496905	3502	390.5	13.5	7	191.8
22	49949-29	Alfapuquio	manantial captado	188016	8496728	3327	942.5	11.9	7.2	462.1
23	49949-30	Qoyllorpujio	punto de registro	180434	8496442	3762	241.8	14.8	7	119
24	49949-31	Soncco 1	punto de registro	188774	8495598	3506	609.1	11.7	6	299.1
25	49949-32	Huamachaca	manantial captado	183678	8495096	3753	342.9	12.7	7.8	168.5
26	49949-34	Saqramayo	manantial captado	175647	8502419	3639	790	13	6.5	387.5
27	49949-46	Salkantay	galería filtrante	175362	8508792	3873	255	9.4	8.08	125.2
28	49949-47	Saqramayo	galería filtrante	175869	8502419	3539	955.4	15.1	7	468.6
29	49949-48	Marashuayco	galería filtrante	188628	8502131	3412	474	13.3	8.05	231.4
30	49949-51	Pillao Matao	galería filtrante	184288	8497042	3483	653	15.9	6.5	315
31	49949-53	Tankarpata	galería filtrante	179843	8498409	3516	1004	18.4	7.11	513

Continuación...

N°	Código	Nombre	Tipo de fuente	Coordenadas		Z	CE	T	pH	TDS
				X	Y					
32	49949-54	Piscigranja / huacotto 2	manantial captado	190792	8504971	3950	496.6	9.4	7.83	230.5
33	49949-55	Cochapunku	manantial captado	184813	8504435	3443	1196	12	7.27	585.2
34	49949-56	Tambomachay	laguna	178023	8508132	3916	-	-	-	-

La presencia de estructuras geológicas como fallas, fracturas, diaclasas, condicionan también el movimiento y dirección de los flujos de aguas subterráneas; los cambios de litología, de aspecto permeable a impermeable, permiten al afloramiento de las aguas subterráneas. La presencia de fuentes o manantiales en medios heterogéneos (rocas por lo general de baja permeabilidad) en contacto con materiales no consolidados de cobertura caracterizan a las fuentes como procedentes de flujos

de circulación subsuperficial, donde el movimiento del agua se produce a través de materiales de cobertura de mínimos espesores.

Para visualizar espacialmente las fuentes de aguas subterráneas ubicadas en el valle del Cusco, se han clasificado por tipo de fuente (figura 6.1).

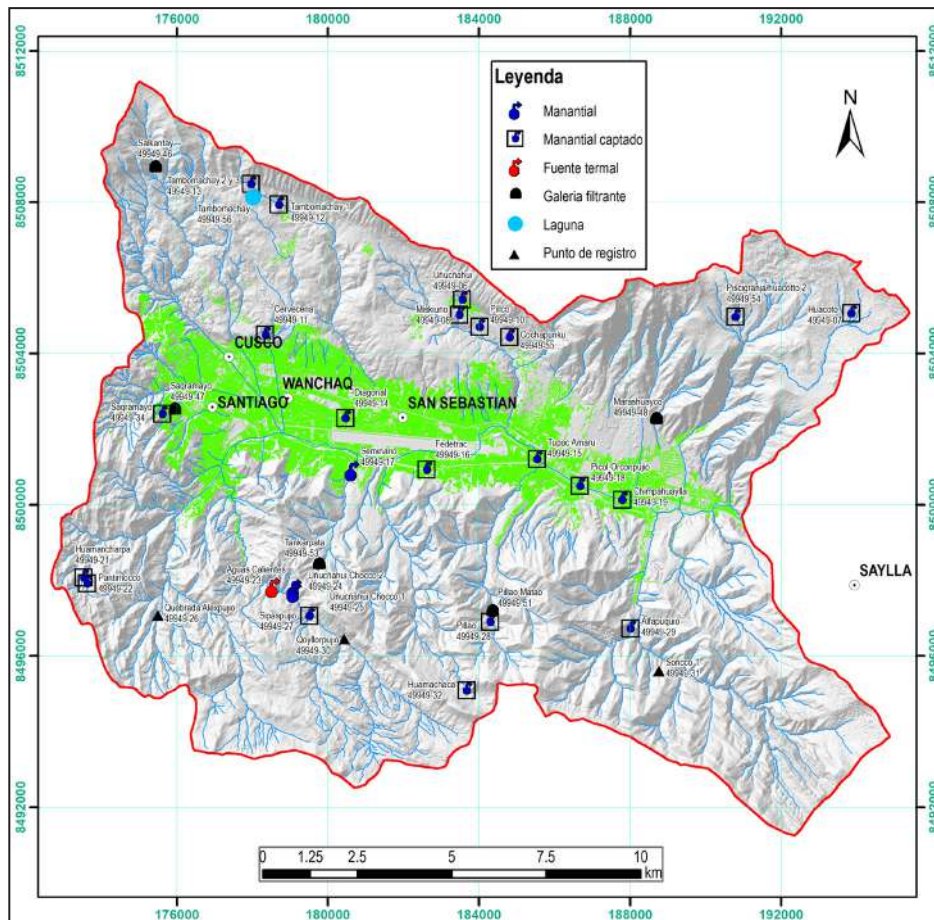
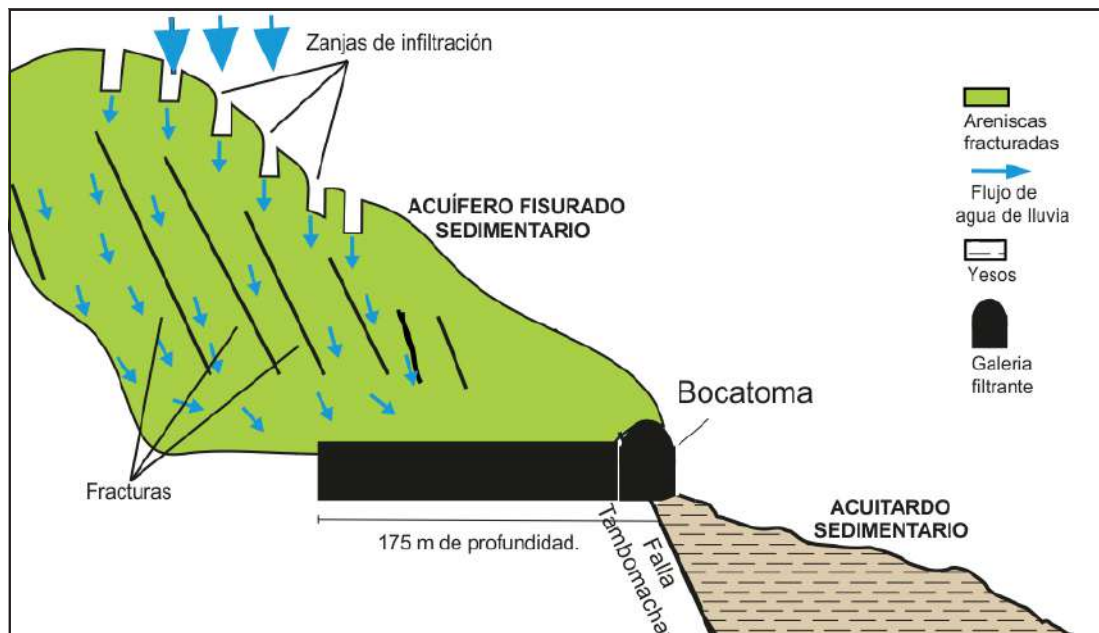


Figura 6.1 Inventario de fuentes de agua subterránea en época de estío (septiembre – octubre 2018).

**a) las galerías filtrantes**

La galería filtrante o galería de captación es una estructura subterránea construida para alcanzar un acuífero cuya estructura permeable está diseñada para perforar y captar las aguas subterráneas de acuíferos fisurados. A diferencia de los pozos, que se construyen con la misma finalidad, la galería filtrante es horizontal, pero se le proporciona una pendiente mínima determinada para que las aguas drenen hacia la bocatoma por gravedad. La galería tiene por finalidad la captación de aguas subterráneas, desde cuya bocatoma se puede conducir directamente o mediante obras auxiliares

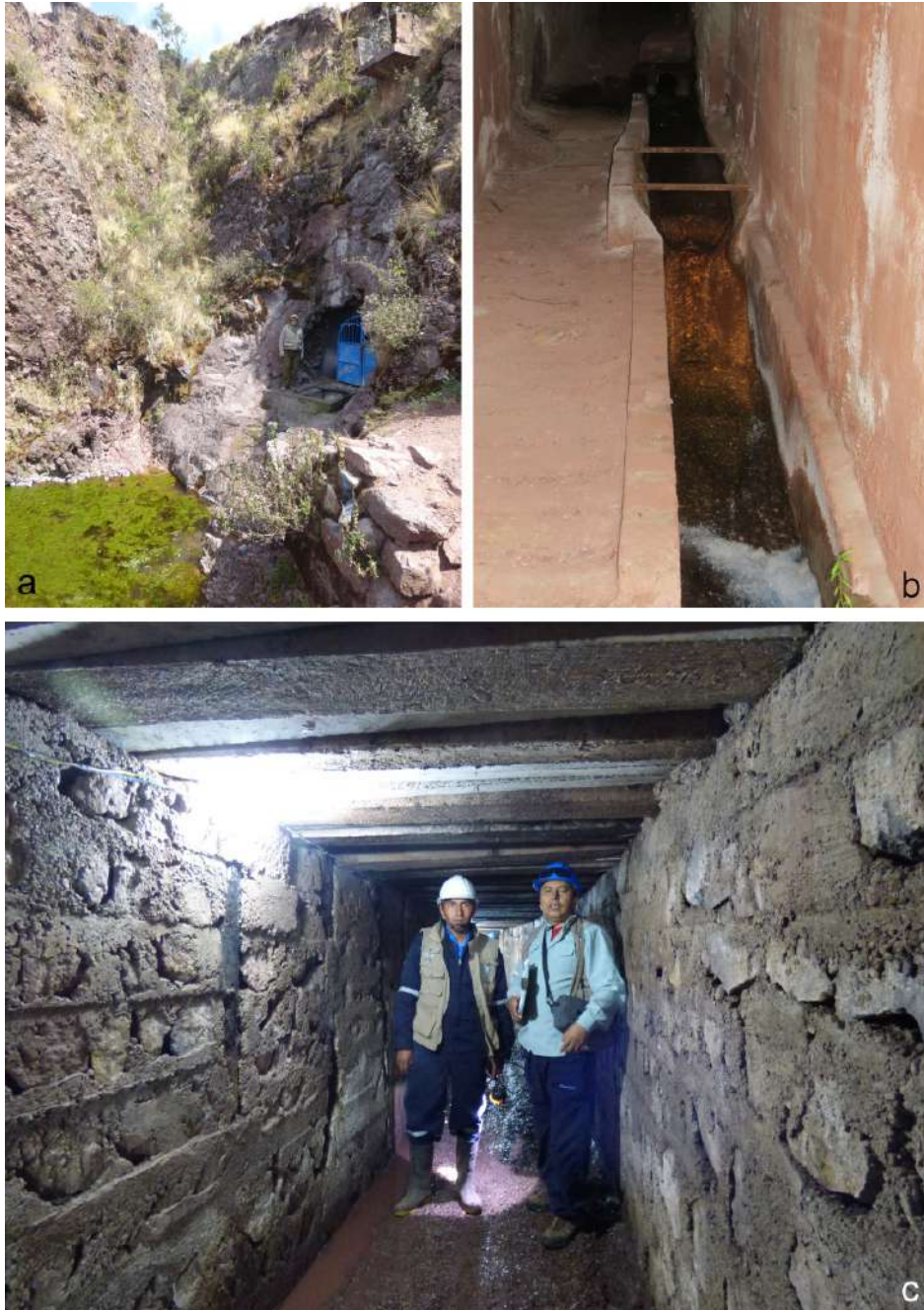
(acueductos, canalizaciones) hasta el lugar donde se va a aprovechar el agua. En el Cusco, desde la década de 1990, se viene aplicando exitosamente esta técnica que capta y explota aguas subterráneas de los acuíferos fisurados sedimentarios del Grupo San Jerónimo. La galería Tankarpata tiene una profundidad de 150 m drenando 22 L/s; la segunda Galería Salkantay (figura 6.2) tiene una longitud de 175 m y drena 25 L/s y es muy importante porque abastece alrededor de 27 000 habitantes de la zona noroccidental de la ciudad del Cusco y funciona adecuadamente con recarga artificial de acuíferos mediante zanjas de infiltración.



**Figura 6.2** Perfil esquemático de la galería filtrante de Salkantay; capta aguas subterráneas en los acuíferos fisurados sedimentarios de la Formación Kayra, condicionado por el cambio de litología y la falla Tambomachay.

En el valle del Cusco, existen 5 galerías filtrantes, Salkantay, Marashuayco, Tankarpata, Pillao Matao y Sacramayo (cuadro 6.3), desde las cuales se explotan aguas subterráneas de acuífero fisurados y constituyen una buena alternativa de captación de bajo costo para el abastecimiento de las

poblaciones, así como uso agrícola. La ubicación de estas galerías, parte alta o zona elevada de los cerros, permiten suministrar agua por gravedad con cantidad y calidad óptima que caracteriza a este tipo de acuíferos y que pueden ser usados con tratamientos mínimos adecuados (Apaza, 1997).



Fotografía 6.1 a) bocatoma de la galería filtrante de Salkantay; b) vista del caudal al interior de la galería filtrante de Saylla; c) vista al interior de una galería filtrante Oropesa.

**Cuadro 6.3**  
**Inventario de galerías filtrantes de la ciudad del Cusco**

Galería	Acuífero	Producción l/s	Longitud	Uso actual	Población beneficiaria
Salkantay	Kayra	25	170	Consumo humano	27 000 personas
Tankarpata	soncco	18	150	Agrícola	.....
Marashuayco	kayra	42	142	Consumo humano y agrícola	5000
Sacramayo	yun/puquin	2	60	Consumo humano	200 familias
Pillao Matao	kayra/soncco	2	80	Agrícola	300 personas

Modificado de Peña *et al.*, 2010.

### 6.3 CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES

Teniendo en cuenta las variables que condicionan la descarga y utilizando el sistema propuesto por Meinzer (cuadro 6.4), se han clasificado los manantiales de acuerdo a su volumen de descarga.

No se registraron manantiales de primera y segunda categoría, es decir, en la microcuenca no existe descarga de aguas subterráneas con caudales superiores a 283 l/s.

En temporada de estío, se registró un manantial de tercera categoría; se trata de la galería filtrante Marashuayco (49949-48) con 32.5 l/s. En época de recarga, se tienen registros anteriores de que ha llegado a descargar hasta 46 l/s.

Los manantiales Uñucñahui (49949-06), Cervecería (49949-11), Quebrada Alexpujio (49949-26), Huamachaca (49949-32), y las galerías filtrantes de Salkantay (49949-46) y Tankarpata (49949-53) con caudales de 13 l/s, 10 l/s, 10 l/s, 15.6 l/s, 11 l/s y 12 l/s, respectivamente son de cuarta categoría; los caudales han sido medidos en época de estío.

Los manantiales de quinta categoría son siete (7), sexta (10) y séptima categoría (7), son los más abundantes en la ciudad del Cusco, los mismos que en su mayoría se utilizan en el consumo humano y generan el crecimiento y desarrollo de los centros poblados más pequeños ubicados en la periferia de la ciudad como Pumamarca, parte alta de San Jerónimo, Marashuayco, Pillao Matao, Cachona, Chocco y Saqramayo.

**Cuadro 6.4**  
**Clasificación de la descarga según Meinzer (1923)**

Categoría	Caudal	Cantidad de fuentes
	(l/s)	Inventario fuentes
Primera	<2830	-
Segunda	283 – 2830	-
Tercera	28.3 - 283.0	1
Cuarta	10.0 - 28.3	6
Quinta	3.0 - 10.0	7
Sexta	1.0 - 3.0	10
Séptima	< 1.0	7

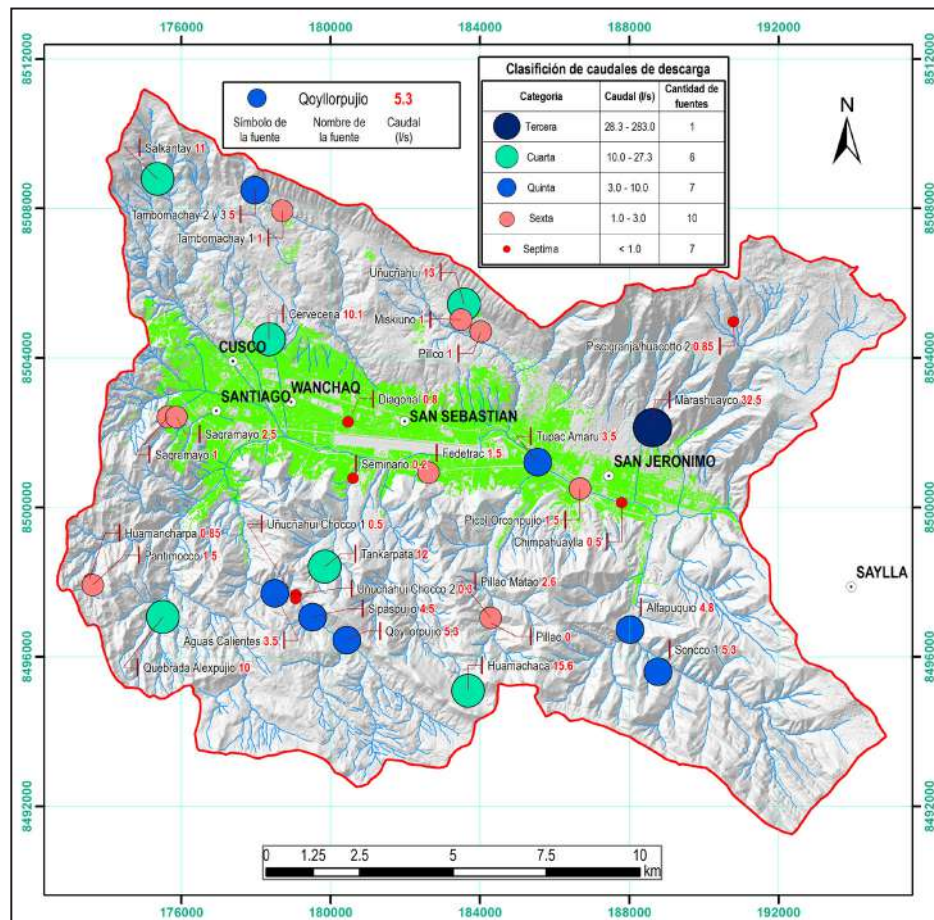


Figura 6.3 Mapa de caudales de descarga de agua subterránea.

El caudal de descarga de 31 fuentes suma unos 154.9 l/s. 31; de estas han sido aforados en época de estío, lo que permite interpretar que sus descargas están relacionadas al acuífero.

## 6.4 CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA

En el mapa hidrogeológico de la ciudad del Cusco a escala 1/10 000 (mapa hidrogeológico), se han zonificado los afloramientos rocosos clasificados según su capacidad de almacenar y transmitir aguas subterráneas. Evidentemente, las rocas que en superficie permiten la infiltración del agua son las que formarán acuíferos en profundidad, en contraste con las rocas impermeables que son generalmente acuitardos.

### 6.4.1 Caracterización hidrogeológica

Los materiales geológicos han sido clasificados de acuerdo a sus parámetros hidrogeológicos de porosidad y permeabilidad

y de acuerdo a su capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas en 4 grupos: porosos no consolidados, fisurados sedimentarios, fisurados kársticos y volcánico-sedimentarios. A los acuitardos se les ha agrupado en no consolidados, sedimentarios, volcánicos-sedimentarios e intrusivos (cuadro 6.5).

De acuerdo a la figura 6.4, el 37.01 % de su área total corresponde a acuitardos, los cuales se ubican predominantemente en la zona central de la ciudad del Cusco y el 62.39 % de las áreas corresponde a acuíferos (porosos no consolidados, fisurado kárstico, fisurado sedimentario y volcánico sedimentario) ubicados principalmente en la zona periférica de la ciudad y la distribución de las fuentes inventariadas es de más del 50 % que surgen en acuíferos.

**Cuadro 6.5**  
**Caracterización hidrogeológica según la litología de las formaciones geológicas**

Formación geológica		Litología	Clasificación hidrogeológica
Depósito residual	Q-re	Derivado de la descomposición física y química de la roca in situ (proceso de meteorización intensa). No son suelos transportados, en parte conservan la estructura de la roca original.	<b>Acuífero poroso no consolidado</b>
Depósito fluvial	Q-fl	Arenas, cantos, bolos transportados por la corriente de los ríos y depositados en forma de terrazas o playas, removibles por el curso actual del río.	
Depósito aluvial	Q-al	Bolos, gravas, arenas redondeados a subredondeados, transportados por la corriente de los ríos o quebradas.	
Depósito proluvial	Q-pl	Cantos, bolos, bloques con relleno limoarenoso-arcilloso depositado en el fondo de valles y conos de deyección en la confluencia con el río. Material arrastrado y lavado por la lluvia.	
Depósito deluvial	Q-dl	Conformados por capas de suelo fino, generalmente compuesto por limos, arcillas y arenas con inclusiones de fragmentos rocosos; se depositan en laderas de los cerros con taludes moderadas; han sido formados por la escorrentía pluvial de corto recorrido.	
Depósito glaciar / fluvio-glaciar	Q-gl/fl-gl	Morrenas y materiales de origen glaciar que fueron transportados y redepositados por escorrentía pluvial o por deshielo de los nevados.	
Depósito biogénico	Q-bi	Acumulación de restos orgánicos (champa) que rodea a los oconales y bofedales o a cualquier cuerpo de agua.	
Depósito antropógeno	Q-an	Depósito generado por el hombre mediante procesos de transformación industrial (desechos orgánicos).	<b>Acuitardo no consolidado</b>
Depósito coluvial	Q-cl	Bloques rocosos heterométricos y de litología homogénea, acumulados al pie de taludes escarpados. Los bloques angulosos más gruesos se depositan en la base y los tamaños menores disminuyen gradualmente hacia el ápice. Conforman taludes de reposo poco estables.	
Dioritas	P/di	Dioritas.	<b>Acuitardo intrusivo</b>
Formación Rumicolca	NpQ-ru	Secuencia lávica, andesítica/dacítica.	<b>Acuitardo volcánico</b>
Formación Pachatusan	Ji-pa	Lavas, aglomerados y brecha volcánica.	<b>Acuífero volcánico-sedimentario</b>
Fm. Punacancha	Nom-pu II	Areniscas fluviales y conglomerados con clastos volcánicos en la base.	<b>Acuífero fisurado sedimentario</b>
Fm. Soncco	Peo-so II	Areniscas feldespáticas fluviales blancas y verdosas. Al techo aparecen conglomerados fluviales en la base de bancos arenosos.	
Formación Kayra	Peo-ky	Areniscas feldespáticas, intercaladas con niveles de arcillitas de medios fluviales. Al techo aparecen conglomerados fluviales en la base de bancos arenosos.	
Fm. Huancané	Ki-hn	Areniscas cuarzosas con laminaciones oblicuas fluviales y eólicas, conglomerados y microconglomerados de cuarcitas, niveles finos de arcillitas rojas o negra.	
Fm. Ayabacas	Kis-ay	Calizas del tipo mudstone a wackstone con deformación sinsedimentaria de plataforma interna muy poco profunda.	<b>Acuífero fisurado kárstico</b>

Continuación...

Formación geológica		Litología	Clasificación hidrogeológica
Fm. San Sebastián	Q-sa	Limolitas, limoarcillitas y arenas.	<b>Acuitardo sedimentario</b>
Fm. Punacancha	Nom-pu I	Limolitas rojas de llanuras de inundación y areniscas fluviales. Al techo hay presencia de nivel volcánico.	
Fm. Soncco	Peo-so I	Arcillitas rojas de llanura de inundación, intercaladas con niveles de areniscas finas.	
Fm. Paucarbamba	Ki-pb	Areniscas calcáreas, margas, arcillitas amarillas, rojizas y verdes formando secuencias grano-estrato crecientes, depositados en una plataforma litoral.	
Fm. Puquín	Ks-pu	Arcillitas rojas y moradas, lacustres con carofitas, yesos de sabkha continental. Además, arcillitas negras marinas muy poco profundas y areniscas fluviales con flaser bedding.	
Fm. Quilque	Pp-qu	Areniscas, arcillitas y microconglomerados fluviales con clastos calcáreos de medios fluviales. Presencia de carofitas.	
Fm. Chilca	Pp-ch	Arcillitas y margas rojo ladrillo con intercalaciones delgadas de yesos de medios lacustres y areniscas fluviales hacia la parte superior. Presencia de carofitas.	
Fm. Chincheros	Np-cc	Conglomerados, areniscas y arcillitas.	
Fm. Maras	Ki-ma	Mezclas caóticas de yesos.	

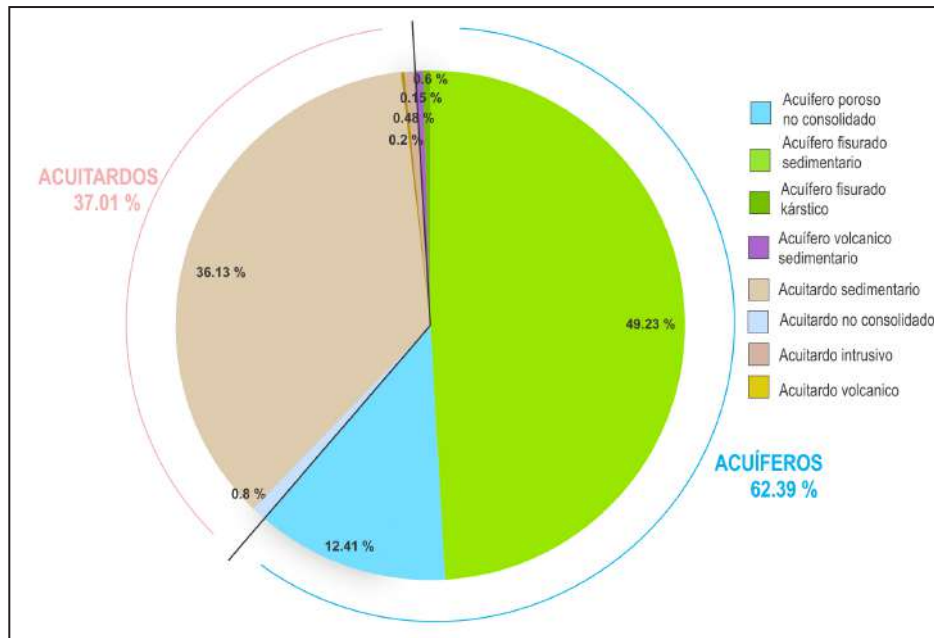


Figura 6.4 Porcentaje de ocupación de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio.

**a) Acuíferos**

Estos materiales pueden ser porosos no consolidados, fisurados sedimentarios, fisurados kársticos y volcánico sedimentarios.

Se distribuyen indistintamente en el área de estudio (figuras 6.5 y 6.6).



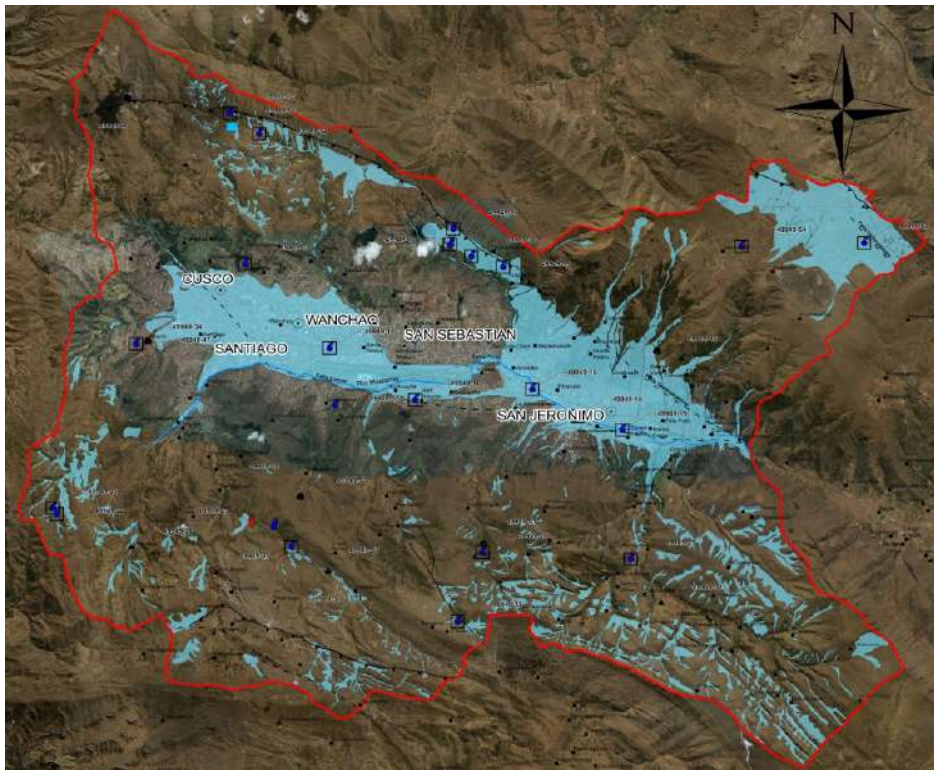


Figura 6.5 En color celeste, se muestra la distribución espacial de acuíferos porosos no consolidados en la ciudad del Cusco.

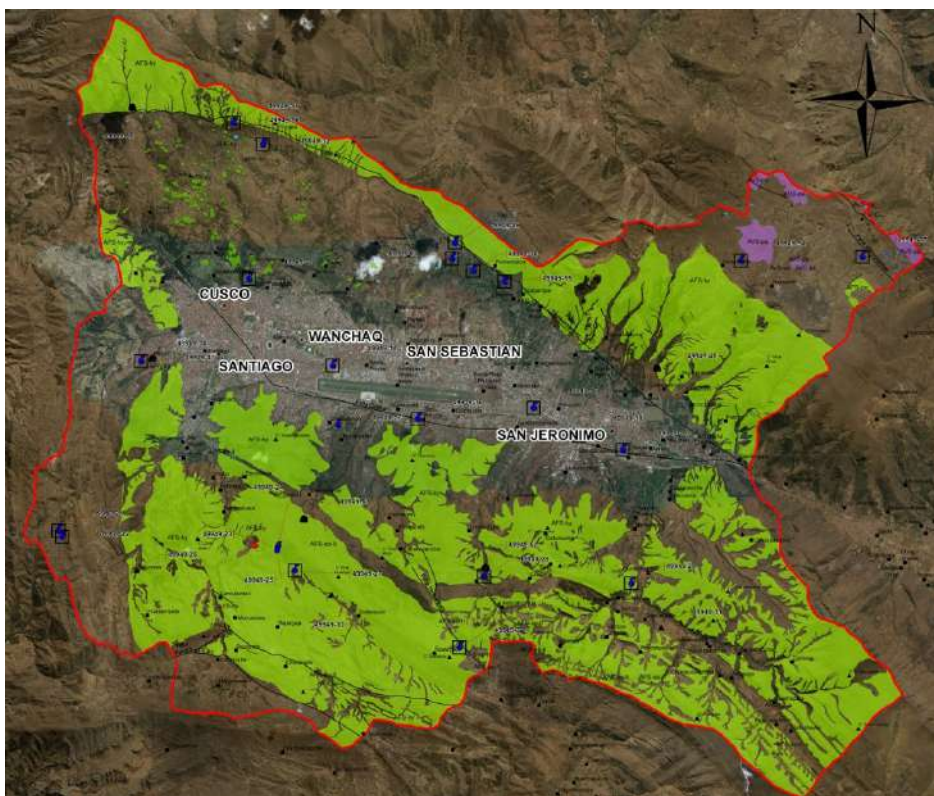


Figura 6.6 Distribución espacial de acuíferos fisurados sedimentarios (verde claro), acuíferos fisurados kársticos (verde oscuro) y acuífero volcánico sedimentario (violeta).

### **Acuífero poroso no consolidado**

#### **Acuífero poroso no consolidado fluvial**

Son depósitos cuaternarios delgados y alargados que se encuentran ubicados a lo largo del recorrido del río Huatanay. Está constituido en su mayoría por gravas arenosas de moderada profundidad muy permeables transportadas por la corriente del río Huatanay y depositadas en forma de terrazas o playas, removibles por su curso actual. Es considerado un acuífero potencial, ya que se ha explotado mediante pozos durante varios años, en especial en el centro histórico de la ciudad del Cusco.

#### **Acuífero poroso no consolidado residual**

Estos depósitos se encuentran ubicados en la quebrada Pumamarca al norte de la ciudad del Cusco, son materiales derivados de la descomposición física y química de la roca in situ (proceso de meteorización intensa). No son suelos transportados, en parte conservan la estructura de la roca original. Son materiales de baja permeabilidad y están conformados principalmente por gravas, areniscas, calizas. Superficialmente, afloran en extensiones muy reducidas por lo que se considera de poco interés, ocupa un área mínima de 0.95 km<sup>2</sup>.

#### **Acuífero poroso no consolidado glaciar**

Dentro de esta subunidad, se ha considerado los depósitos de origen netamente glaciar (morrenas), unidades con alta permeabilidad y moderada productividad, así como los materiales de origen glaciar que fueron transportados y redepositados por escorrentía pluvial o por deshielo de los nevados. Estos depósitos están ubicados a 4000 m s. n. m. aproximadamente sobre la meseta de Huacoto; al frente se observan las montañas Pachatusan. Ocupan un área de 7.4 km<sup>2</sup>.

Al contener intervalos permeables, sirven para conducir agua, pero por su posición topográfica elevada tiene moderado interés hidrogeológico.

#### **Acuífero no consolidado aluvial**

Son acuíferos continuos de moderada a alta permeabilidad; están compuestos por una mezcla de fragmentos rocosos heterométricos y heterogéneos (bolos, gravas, arenas, etc.), redondeados a subredondeados, transportados por la corriente

de los ríos o quebradas. Corresponde a los depósitos aluviales y algunas terrazas activas e inactivas ubicadas en piso de valle. Como evidencia de ello, se tienen varios pozos que vienen siendo explotados desde la década de 1990 que están ubicados en todo el centro histórico de la ciudad del Cusco hasta la zona de Marcavalle (gravas arenosas) y pozos exploratorios ubicados en las zonas de Tio y La Florida que son gerenciados por la empresa Sedacusco.

#### **Acuífero no consolidado proluvial**

Son fragmentos rocosos heterométricos (cantos, bolos, bloques, etc.) con relleno limo arenoso-arcilloso depositado en el fondo del valle y conos de deyección en la confluencia con el río. Es material arrastrado y lavado por la lluvia; además, ocupa un área de 0.95 km<sup>2</sup>.

#### **Acuífero no consolidado deluvial**

Están conformados por capas de suelo fino, generalmente compuesto por limos, arcillas y arenas con inclusiones de fragmentos rocosos; se depositan en laderas de los cerros con taludes moderados; ha sido formado por la escorrentía pluvial de corto recorrido, son continuos de moderada a alta permeabilidad, de alto interés hidrogeológico, pero de poca extensión en el área de estudio.

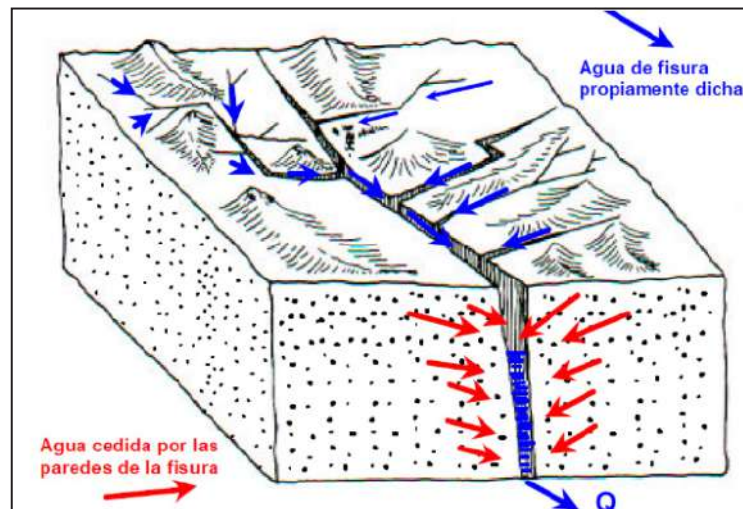
#### **Acuífero no consolidado biogénico**

Los localizamos en las altiplanicies, están conformados por arenas, limos y restos orgánicos que están alrededor de los oconales en la meseta de Huacoto; son pequeños y tienen un bajo interés hidrogeológico.

#### **Acuífero fisurado sedimentario**

Dentro del área de estudio este tipo de acuífero, está conformado principalmente por areniscas que presentan fisuras y fracturas, también diversas fallas activas de gran extensión como la falla Tambomachay y la falla Cusco. La zona de estudio es considerada una zona tectónicamente activa. Tales discontinuidades proveen a esas rocas de permeabilidad secundaria.

Es notorio que en la mayoría de esas discontinuidades se observa desplazamiento, abertura y separación, lo cual favorece la infiltración del agua de lluvia, la circulación en profundidad y el almacenamiento como reservorio.



**Figura 6.7** Sistema ideal de fracturas debido a deformación frágil en un material poroso y permeable.

Fuente: Condori, 2016.

#### Acuífero fisurado sedimentario Kayra

Se ubica en gran parte de la ciudad del Cusco siendo uno de los acuíferos principales por su extensión y la gran potencia de sus estratos, ocupa un área de 95.27 km<sup>2</sup> dentro de la zona de estudio. Está constituido principalmente por areniscas feldespáticas fracturadas, intercaladas con niveles de arcillitas de medios fluviales, al techo aparecen conglomerados fluviales en la base de bancos arenosos.

Las areniscas cuarzo-feldespáticas tienen una elevada permeabilidad, adquieren una porosidad secundaria a partir de las innumerables fracturas. Las diaclasas y la surgencia de aguas subterráneas están condicionadas por algunas fallas existentes como es el caso de la falla Tambomachay; en este acuífero, se encuentra un tercio de las fuentes inventariadas además que la mayoría de galerías filtrantes han sido construidas en este acuífero porque su alimentación y recarga es por la infiltración directa del agua de las precipitaciones. Es de extensión regional y sus aguas son generalmente blandas y de buena calidad, aptas para el consumo humano.

#### Acuífero fisurado sedimentario Soncco-II

En el área de estudio, se presenta en el borde suroeste de la ciudad del Cusco. Constituye un "acuífero de tipo libre", constituido por areniscas cuarzo-feldespáticas fluviales blancas y verdosas, al techo aparecen conglomerados fluviales en la base de bancos arenosos. Corresponde al miembro superior de la Formación Soncco del Eoceno. Es un afloramiento discontinuo donde ya se han construido galerías filtrantes que producen aguas subterráneas para las poblaciones aledañas; ocupa un área de 34.53 km<sup>2</sup>.

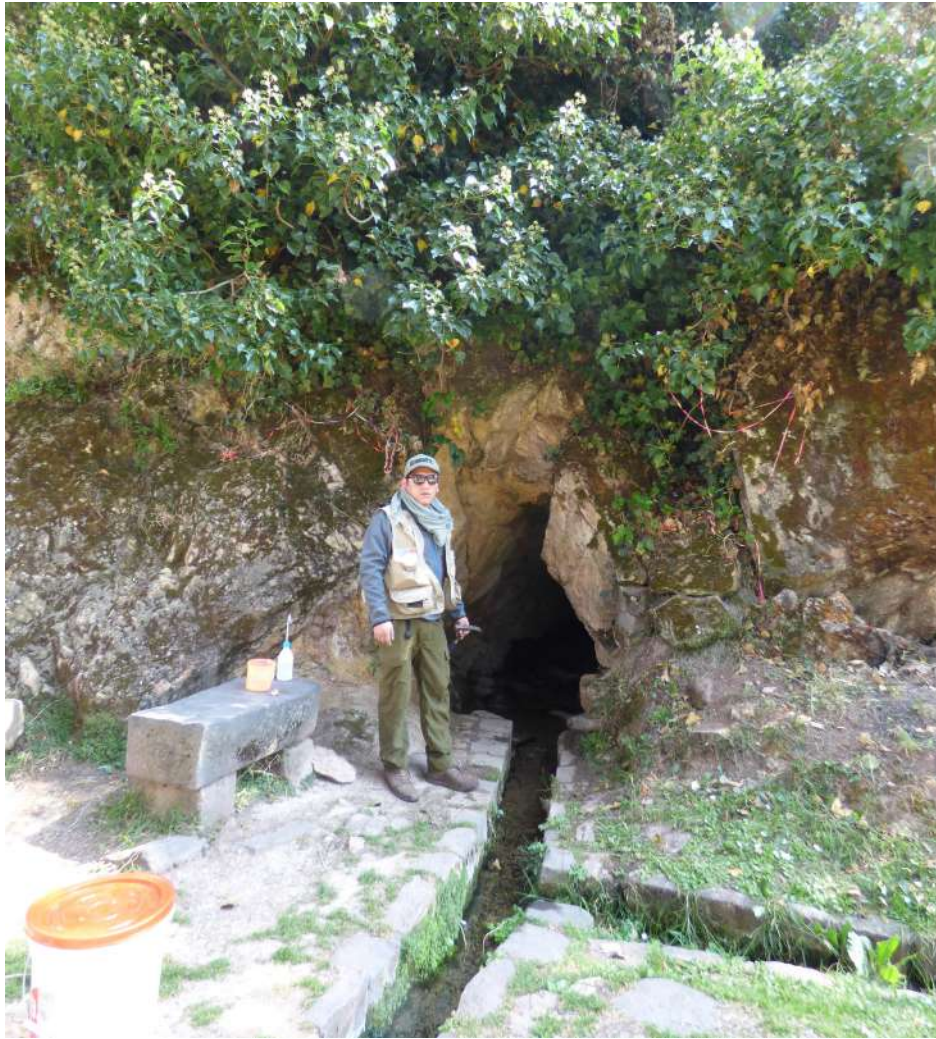
#### Acuífero fisurado sedimentario Huancané

Aflora de manera discontinua en la parte alta de la zona este y sureste de la subcuenca del río Huatanay y reúne las mejores características como acuífero. Litológicamente, está compuesto por conglomerados y microconglomerados de cuarcitas, areniscas cuarzosas con laminaciones oblicuas fluviales y eólicas. Sus rocas tienen buena permeabilidad primaria porque sus areniscas cuarzosas son redondeadas y tienen poca matriz, lo que permite el flujo del agua subterránea y una porosidad secundaria al estar fracturada. La recarga de este acuífero se da exclusivamente por infiltración de aguas de lluvia y está limitada por la poca potencia de sus estratos. En la zona de estudio tiene un alto interés hidrogeológico, pero extensión restringida (ocupa un área de 0.2314 km<sup>2</sup>)

#### Acuífero fisurado kárstico

##### Acuífero fisurado kárstico Ayabacas 1.26 km<sup>2</sup>

Son calizas del tipo mudstone a wackstone; además, son de ambiente de formación de plataforma interna muy poco profunda supratidal a intertidal y con mucha luz, lo que dio origen a la formación de buenas porosidades y fracturamiento. Son calizas plásticas con tendencia a la formación de karst; en la zona de estudio, su distribución es muy variada, ya que se reparte en bloques pequeños a lo largo de unos 23 km<sup>2</sup> englobados en arcillitas y yesos de la Formación Maras; su producción es estacional generalmente en época de lluvias.



**Fotografía 6.2** Calizas kárstificadas de la Formación Ayabacas con canales incas, depósitos residuales en la parte superior.

#### **Acuífero volcánico sedimentario**

##### **Acuífero volcánico sedimentario Pachatusan**

Está compuesta por lavas, aglomerados y brecha volcánica de basalto andesítico y riolitas de color rojo violáceo. Es considerado un buen acuífero fisurado, pero en la zona de estudio tiene alto interés hidrogeológico, pero por la pequeña área que ocupa (1.64 km<sup>2</sup>) es limitado.

##### **b) Acuitardos**

En la ciudad del Cusco, se tienen de los siguientes tipos: no consolidados, sedimentarios, volcano-sedimentarios e intrusivos (figura 6.8).

#### **Acuitardo no consolidado**

##### **Acuitardo no consolidado coluvial**

Son bloques rocosos heterométricos y de litología homogénea, acumulados al pie de taludes escarpados. Los bloques angulosos más gruesos se depositan en la base y los tamaños menores disminuyen gradualmente hacia el ápice. Conforman taludes de reposo poco estables. Ocupa un área de 2.16 km<sup>2</sup>.

##### **Acuitardo sedimentario**

##### **Acuitardo sedimentario Paucarbamba**

Aflora de manera puntual en la meseta de Huacoto en la zona noreste del área de estudio. Es un acuífero constituido por

areniscas calcáreas, margas, arcillitas amarillas, depositados en una plataforma litoral; predominan los materiales finos. Es un acuitardo aislado de muy pequeña extensión (0.15 km<sup>2</sup>), de escaso interés hidrogeológico.

#### **Acuitardo sedimentario Maras**

Está compuesto por mezclas caóticas de yesos, arcillitas rojas y algunos cuerpos de calizas, por efecto de deslizamiento sin sedimentarios y diapirismo; es un acuitardo de gran extensión que se ubica en la zona noroeste de la ciudad del Cusco.

#### **Acuitardo sedimentario Puquin**

Está constituido por materiales impermeables de escaso interés hidrogeológico; en zonas puntuales, puede albergar acuíferos muy locales en horizontes arenosos. Presenta arcillitas rojas y moradas, lacustres con carofitas, yesos de sabkha continental.

#### **Acuitardo sedimentario Quilque**

Es un acuitardo de extensión local, constituye el basamento de acuíferos fisurados y está compuesto por areniscas, arcillitas y microconglomerados fluviales con clastos calcáreos de medios fluviales.

#### **Acuitardo sedimentario Chilca**

Esta unidad localmente es confundida muchas veces con el acuífero Kayra; litológicamente, está compuesta por arcillitas y margas rojo ladrillo con intercalaciones delgadas de yesos de medios lacustres y areniscas fluviales hacia la parte superior. Existe presencia de carofitas.

#### **Acuitardo sedimentario Soncco-I**

Este acuífero forma la base de la Formación Soncco que está constituido por materiales finos como las arcillitas rojas de llanura de inundación, intercaladas con escasos niveles de areniscas finas; son materiales que tienen poco interés hidrogeológico, pero importantes porque por su posición condicionan la surgencia de aguas subterráneas.

#### **Acuitardo sedimentario Punacancha-I**

Se presenta puntualmente en la parte alta al sur de la ciudad del Cusco, al igual que el acuitardo Soncco; también está compuesta por materiales finos, litológicamente está compuesta por limolitas rojas de llanuras de inundación y areniscas fluviales. Al techo hay presencia de nivel volcánico.

#### **Acuitardo sedimentario Chincheros**

Compuesto por materiales impermeables de extensión limitada, brechas (roca sedimentaria detrítica) torrenciales con clastos de caliza con matriz arcillosa que impide una buena porosidad.

#### **Acuitardo sedimentario San Sebastián**

Está compuesto por arcillas y diatomitas que, en conjunto, son considerados como acuitardos; sin embargo, localmente las arenas son acuíferos confinados que se hallan entre niveles impermeables.

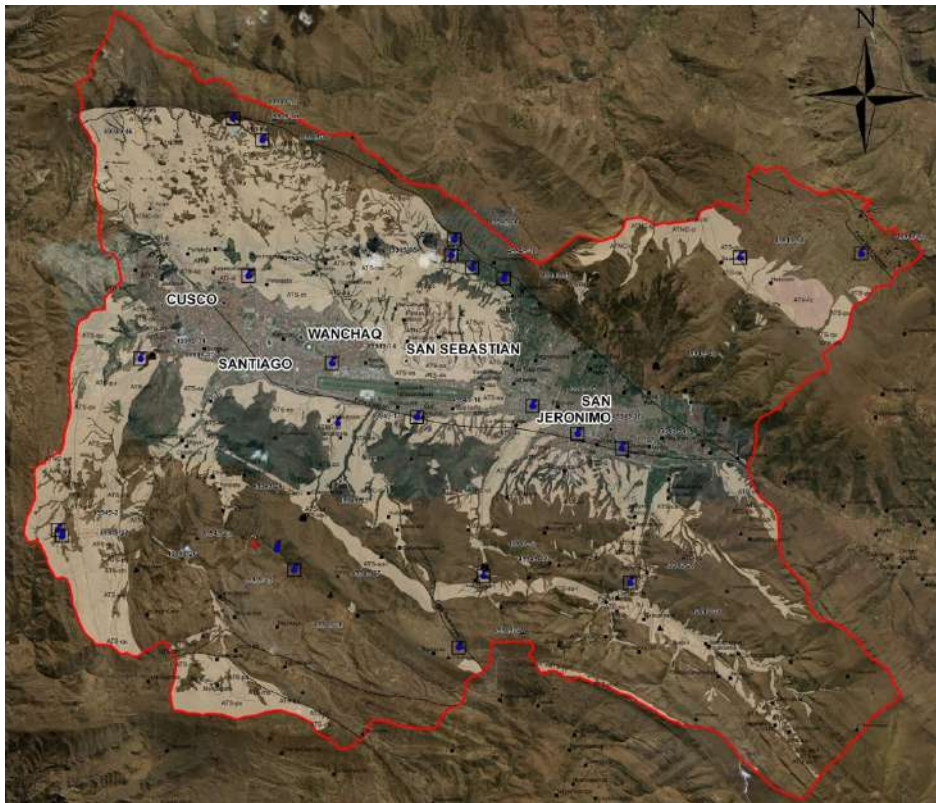
#### **Acuitardo volcánico sedimentario**

Es representado por la Formación Rumicolca; este tipo de acuitardo se localiza en la zona norte de la ciudad del Cusco en la meseta de Huacoto. Aflora en pequeña proporción y está conformado por coladas volcánicas de shoshonitas, andesitas, traquitas y dacita. Tiene una fuerte compactación y poco fracturamiento (figura 6.8).

#### **Acuitardo intrusivo**

Esta unidad aflora en la quebrada de Saphy y está asociada a los intrusivos de Sacsayhuaman; esta diorita presenta textura granular, grano fino bastante alterado donde la augita, la plagioclasa y la ortosa (escasa) están reemplazadas por clorita, tremolita, epidota, prenila, calcita y sericita.

Los intrusivos son materiales de escaso interés hidrogeológico por su impermeabilidad. En el área de estudio, tienen una extensión muy local (figura 6.8).



**Figura 6.8** Distribución espacial de acuitardos; en marrón claro los acuitardos sedimentarios y no consolidados (coluviales) y en marrón oscuro los acuitardos volcánicos e intrusivos.

# CAPÍTULO VII

## COBERTURA VEGETAL

### 7.1 GENERALIDADES

La caracterización de las unidades de cobertura vegetal se desarrolló en base a la interpretación visual de las “Imágenes Satelitales PeruSat-1 proporcionados por el CNOIS-CONIDA y procesadas por Ingemmet”.

Para considerar en el análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa, se clasificó el área de estudio en 10

unidades de cobertura vegetal (cuadro 7.1), tales como áreas de bosque denso, áreas de bosque disperso, matorrales, pastizales, tierras de cultivos, andenes, bofedales, sin cobertura vegetal, área urbana; finalmente, se hallan la agrupación de lagunas, oconales y cuerpos de agua.

**Cuadro 7.1**  
**Unidades de cobertura vegetal**

N°	Descripción	Símbolo	Área (Ha)	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)
1	Áreas de bosque denso	Abde	868	8 773 546	3.32
2	Áreas de bosque disperso	Abdi	2514	25 226 912	9.55
3	Matorrales	Ma	921	9 260 566	3.51
4	Pastizales	Pa	14784	147 884 214	55.99
5	Tierras de cultivos	Tcu	2718	27 341 581	10.35
6	Andenes	An	172	1 711 340	0.65
7	Bofedales	Bo	33	330 105	0.12
8	Sin cobertura vegetal	Scv	120	1 216 861	0.46
9	Área urbana	Au	4230	42 344 830	16.03
10	Lagunas, oconales y cuerpos de agua	Lag	3	62 039	0.02
Total					100

### 7.2 UNIDADES DE COBERTURA VEGETAL

#### Áreas de bosque denso (Abde)

En esta unidad, se puede observar la formación de macizos forestales con predominio de especies arbóreas en áreas cubiertas por bosques nativos de la zona de manera muy

concentrada y densa, caracterizada por una cubierta de dosel superior a 30 %. Los árboles, que son principalmente de eucalipto, llegan a medir de 10 a 30 m. Representan el 3.32 % de la superficie total del área de estudio y son localizados en las laderas que rodea la ciudad del Cusco (figura 7.1).

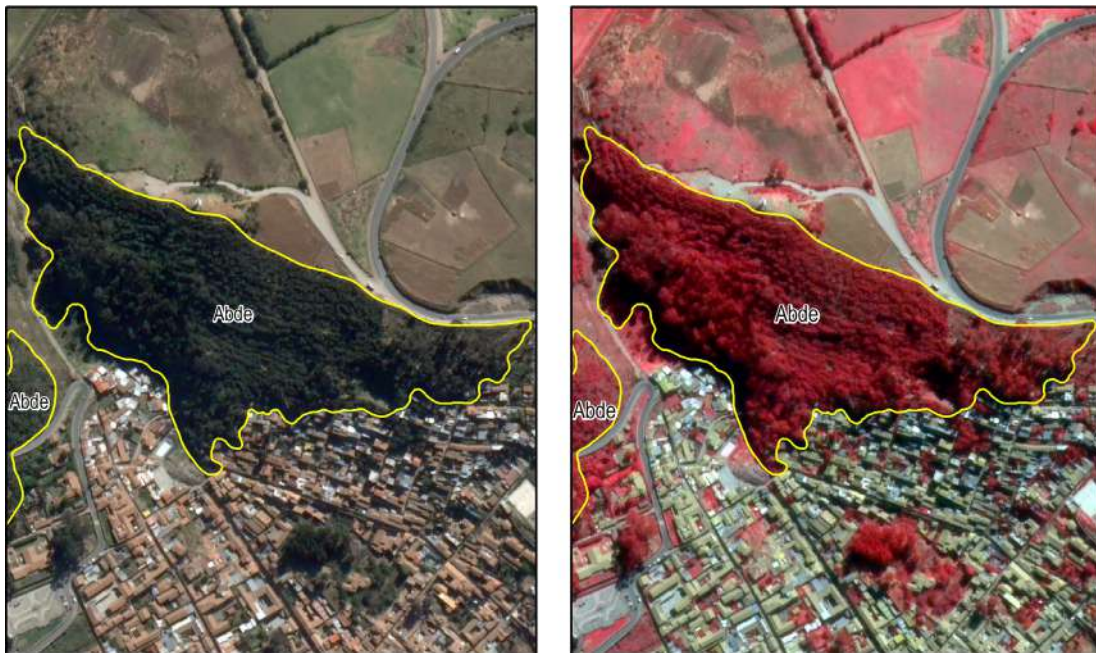


Figura 7.1 Vista de la unidad bosque denso (Abde) en imagen satelital Perusat-1 del 2018.

### Áreas de bosque disperso (Abdi)

Esta unidad comprende toda la formación vegetal con predominio de especies arbóreas en áreas cubiertas por bosques nativos de la zona que se disponen en forma dispersa, caracterizada por

una cubierta de dosel menor a 30 %. Los árboles, principalmente de eucalipto, llegan a medir de 5 a 20 m. Representan el 9.55 % de la superficie total del área de estudio (fotografía 6.1).



Fotografía 7.1 Vista de la unidad de bosque disperso (Abdi) formado principalmente por árboles de eucalipto de diferente altura.



### Matorrales (Ma)

Los matorrales constituyen áreas caracterizadas por una vegetación dominada principalmente por arbustos de menos de 5 m de altura, cuyas ramas se van ramificando desde su

base; están distribuidos principalmente en los márgenes de las quebradas y de forma dispersa. Se extienden sobre una superficie de 921 hectáreas que representa el 3.51 % de la superficie total del área de estudio (figura 7.2).

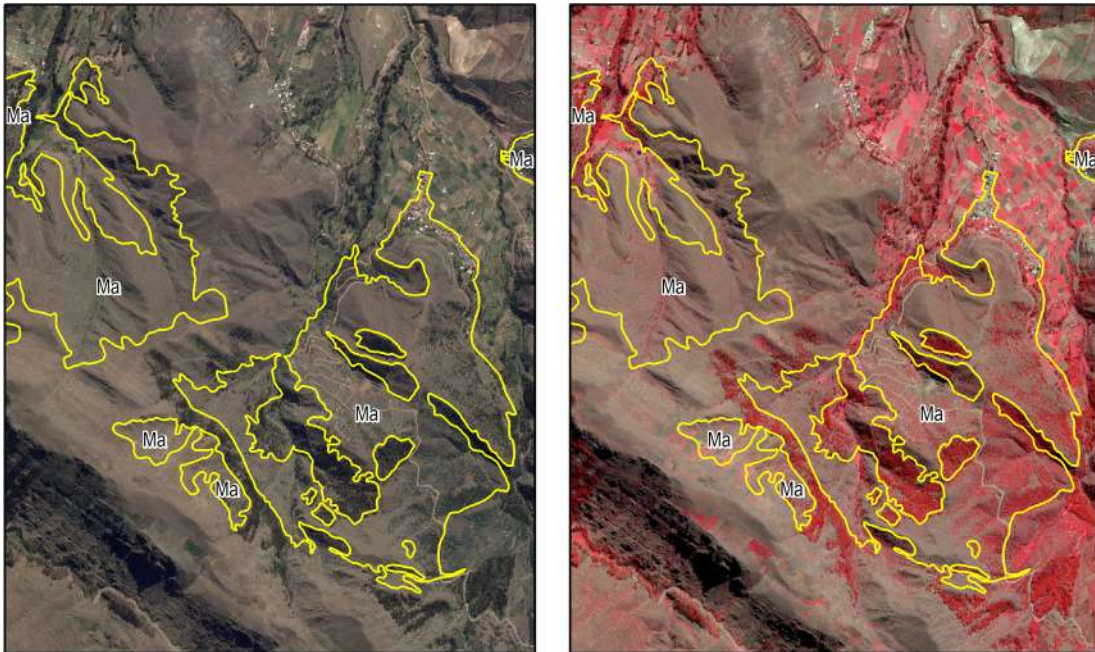


Figura 7.2 Vista de la imagen satelital Perusat-1 2018 (imagen de la izquierda) y su combinación de bandas 432 (imagen de la derecha) para la delimitación de la unidad de matorrales (Ma).

### Pastizales (Pa)

Los pastizales representan un tipo de cobertura vegetal conformado por herbazales, predominado por una diversidad de pastos o gramíneas que cubre el suelo de manera abundante.

Ocupan la mayor área y se extienden sobre una superficie de 14 784 hectáreas, que equivalen al 55.98 % de la superficie total (fotografía 7.2).

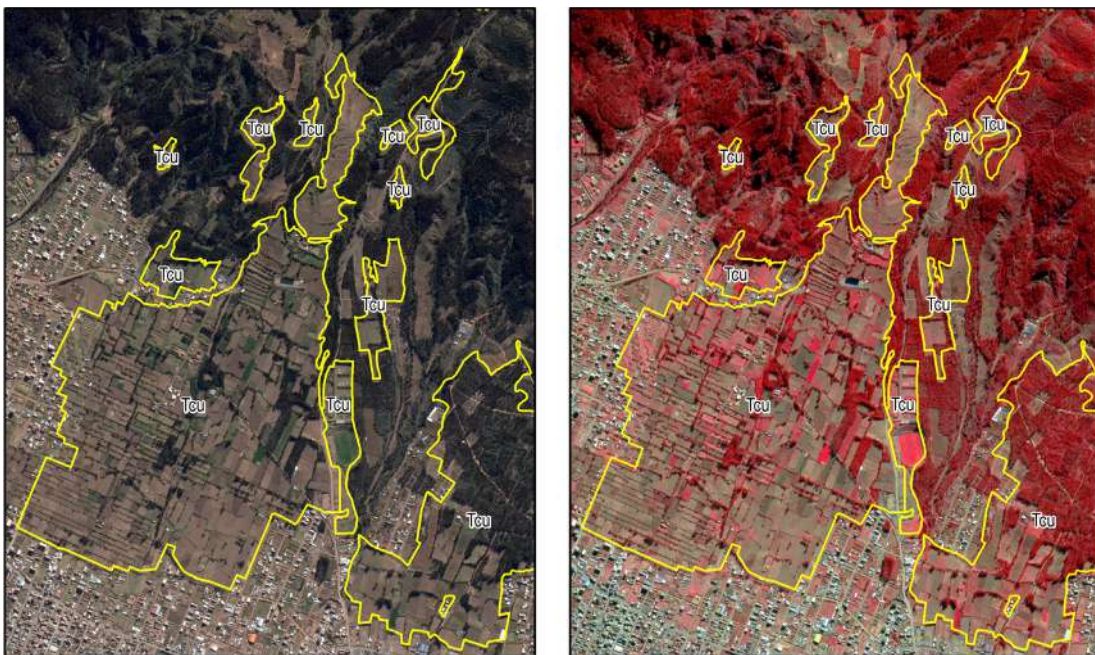


**Fotografía 7.2** Área de pastizales (Pa) que se extienden y cubre la mayor parte del área de estudio.

### Tierras de cultivos (Tcu)

Estas áreas se caracterizan porque en él se desarrollan actividades agrícolas de cultivo, actualmente activas y de riego natural o artificial. Las áreas de cultivo se extienden sobre

una superficie de 2718 hectáreas equivalentes al 10.35 % de la superficie total del área de estudio, y ubicadas en la parte alta, media y baja de la cuenca, con predominancia en la parte media (figura 7.3).



**Figura 7.3** Vista de la imagen satelital Perusat-1 2018 (imagen de la izquierda) y su procesamiento digital en bandas 432 (imagen de la derecha) para la delimitación de la unidad de cultivos (Tcu).

**Andenes (An)**

Las áreas de cultivos en andenes son el resultado de la tecnología agrícola ancestral del desarrollo de la cultura inca, caracterizada por la construcción de plataformas continuas escalonadas en las laderas y superficies inclinadas de quebradas; sin embargo, el descuido y la mala conservación hace que solo represente el 0.65 % de la superficie total del área de estudio.

**Bofedales (Bo)**

Constituyen ecosistemas hidromórficos, caracterizados por presentar un tipo de vegetación que se desarrolla en áreas que se inundan permanentemente o temporalmente, alimentados por aguas provenientes de afloramientos de agua subterránea o precipitaciones pluviales; se ubican en superficies planas o ligeramente inclinadas. Representa el 0.12 % de la superficie total del área de estudio (figura 7.4).

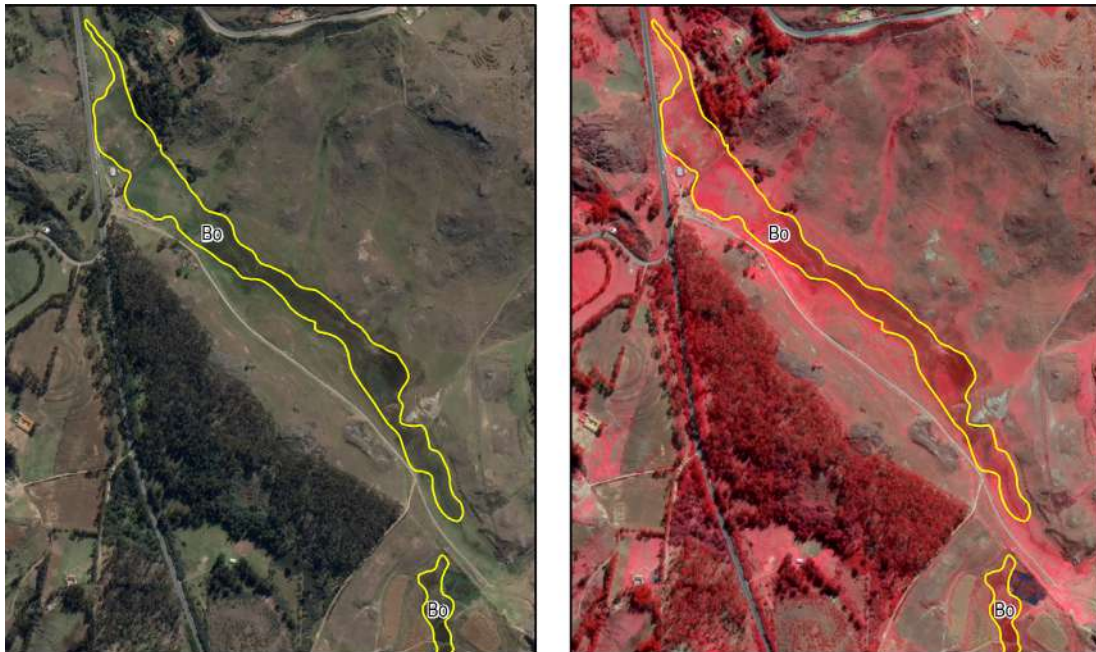


Figura 7.4 Vista de la unidad de cobertura vegetal: Bofedales (Bo), en imagen satelital Perusat-1 del 2018.

**Sin cobertura vegetal (Scv):**

Son caracterizadas por ser áreas en las cuales la cobertura vegetal no existe o es muy escasa (compuesta principalmente por suelos desnudos); también, son áreas producto de la

deforestación, erosión, movimientos en masa o afloramientos rocosos. Se extiende sobre una superficie de 120 hectáreas que representan el 0.46 % de la superficie total del área de estudio (fotografía 7.3).



**Fotografía 7.3** Vista de un área sin cobertura vegetal (Scv) producto de los procesos de erosión de ladera (cárcava) que ocurre en la cabecera de la quebrada Thuniyoc; cerro Picol.

#### **Área urbana (Au):**

El área urbana es aquella donde se encuentra establecida la ciudad del Cusco, conformada por un conjunto de viviendas delimitadas por calles y avenidas, y en general cuenta con

los servicios básicos (luz eléctrica, acueducto, sistema de alcantarillado, etc.). Ocupa una superficie de 4230 hectáreas, equivalentes al 16.03 % de la superficie total del área de estudio (fotografía 7.4).

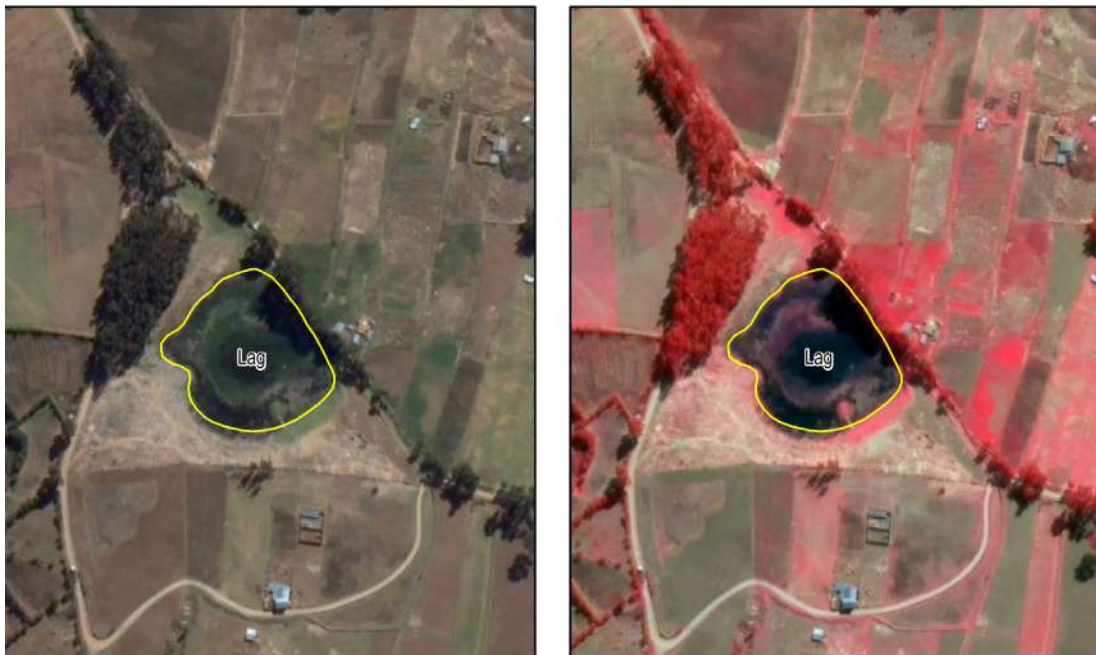


**Fotografía 7.4** Vista panorámica del área urbana.

**Lagunas, oconales y cuerpos de agua (Lag):**

Dentro de esta unidad, se agrupó a las lagunas, oconales y cuerpos de agua; algunos son de origen natural y otros de carácter artificial; además, son permanentes, intermitentes y

estacionales. Se encuentran dispersos en el área de estudio y ocupan en total una superficie ínfima de 3 hectáreas, equivalente al 0.02 % (figura 7.5).



**Figura 7.5** Vista de la imagen satelital Perusat-1 2018 (imagen de la izquierda) y su combinación de bandas 432 (imagen de la derecha) para la delimitación de la unidad de lagunas, oconales y cuerpos de agua (Lag).



# CAPÍTULO VIII

## PELIGROS GEOLÓGICOS POR MOVIMIENTOS EN MASA E INUNDACIÓN FLUVIAL

### 8.1 CONCEPTOS GENERALES BÁSICOS

#### a) Peligro o amenaza geológica

Es “un proceso o fenómeno geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales” (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, 2009). Por lo tanto, dentro de los peligros geológicos, se considera a los procesos u ocurrencias de movimientos en masa.

#### b) Procesos de movimientos en masa

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Además, son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra. Su origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la corteza terrestre y en la interface entre esta, la hidrósfera y la atmósfera. Así, si por una parte el levantamiento tectónico forma montañas, por otra la meteorización, las lluvias,

los sismos y otros eventos (incluyendo la acción del hombre) actúan sobre las laderas para desestabilizarlas y cambiar el relieve a una condición más plana (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).

#### c) Clasificación de movimientos en masa y otros peligros geológicos

En la literatura científica, se encuentran muchas clasificaciones de movimientos en masa; la mayoría de ellas se basan en el tipo de materiales, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el grado de saturación (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).

Para el caso de estudio de la ciudad del Cusco, se adaptó la clasificación (cuadro 8.1) propuesta por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, (2007) en su publicación denominada Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas.

**Cuadro 8.1**

**Tipos de movimientos en masa**

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca
	Derrumbe
Deslizamiento	Deslizamiento rotacional
	Deslizamiento traslacional
Flujo	Flujo de detritos
	Flujo de lodo
Reptación	Reptación de suelos

Además de los movimientos en masa, se identificó otros peligros geológicos como la erosión de ladera (cárcava y surcos), hundimientos y llanuras de inundación.

### Caída

La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra un desplazamiento cortante apreciable (figura 8.1). Una vez desprendido el material cae y se desplaza principalmente por el aire, lo cual puede efectuar golpes, rebotes y rodamientos (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido, se habla de una caída de roca o una caída de detritos.

En función al mecanismo principal y la morfología de las áreas afectadas por el movimiento, así como del material involucrado,

las caídas se subdividen en dos tipos principales: caída de rocas y derrumbes.

**Caída o desprendimiento de rocas:** ocurre en laderas de montañas y colinas de moderada a fuerte pendiente, frentes rocosos escarpados, montañas estructurales asociadas a litologías de diferente naturaleza (sedimentarias, ígneas y metamórficas), sujetas a fuerte fracturamiento, así como cuando se modifican los taludes cuando se realizan cortes en laderas para obras civiles.

Una característica importante de las caídas es que el movimiento no es masivo ni del tipo flujo. Existe interacción mecánica entre fragmentos individuales y su trayectoria, pero no entre los fragmentos en movimiento (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).

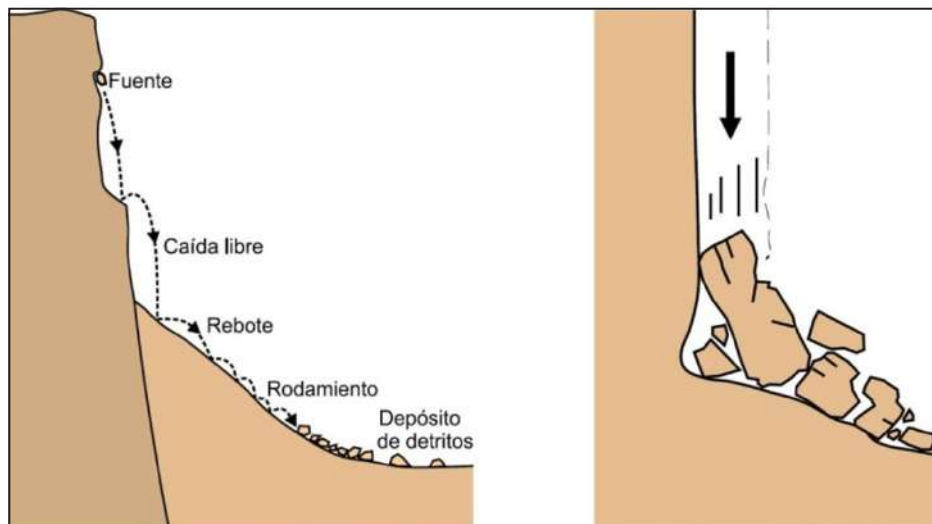


Figura 8.1 Esquema de la caída de rocas.

Fuente: PMA: GCA, 2007.

Derrumbes: son desprendimientos de masas de roca, suelo o ambas a lo largo de superficies irregulares de arranque o desplome como una sola unidad, desde pocos metros hasta decenas y centenas de metros (Vílchez *et al.*, 2010).

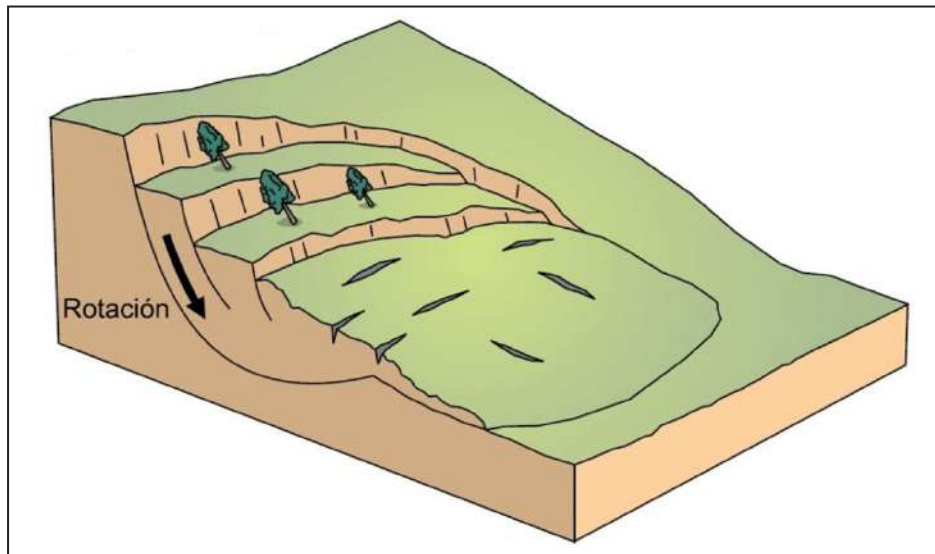
### Deslizamiento

Es un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007). Varnes (1978) clasifica a los deslizamientos según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material; estas

son traslacional y rotacional. El deslizamiento traslacional a su vez puede ser planares y/o en cuña.

**Deslizamiento rotacional:** Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal. La deformación interna de la masa desplazada es usualmente muy poca. Debido a que el mecanismo rotacional es autoestabilizante, y este ocurre en rocas poco competentes, la tasa de movimiento es con frecuencia baja, excepto en presencia de materiales altamente frágiles como las arcillas sensitivas (figura 8.2).

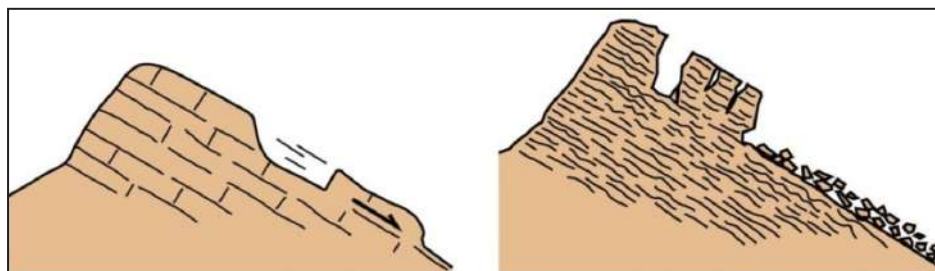




**Figura 8.2** Esquema de un deslizamiento rotacional que muestra los rasgos morfológicos característicos.  
Fuente: PMA: GCA, 2007.

Deslizamiento traslacional: La masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada (figura 8.3). Además, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella (Cruden y Varnes, 1996). En

un macizo rocoso, este mecanismo de falla ocurre cuando una discontinuidad geológica tiene una dirección aproximadamente paralela a la de la cara del talud y buza hacia esta con un ángulo mayor que el ángulo de fricción; en los casos en que la traslación se realiza a través de un solo plano, se denomina deslizamiento planar (Hoek y Bray, 1981).

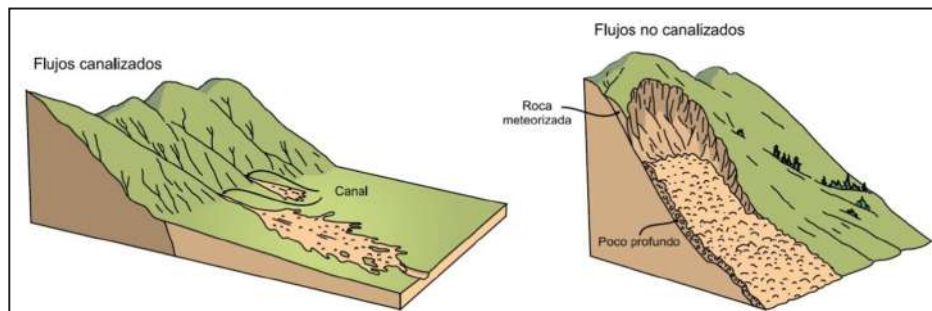


**Figura 8.3** Esquemas de deslizamientos traslacionales.  
Fuente: PMA: GCA, 2007.

### Flujo

El flujo es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos, se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea

un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978). Además, según la guía del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA (2007) los flujos pueden ser canalizados y no canalizados (figura 8.4). En el área de estudio, los flujos se clasifican en flujos de detritos y de lodo.



**Figura 8.4** Esquema de flujos canalizados y no canalizados, según Cruden y Varnes (1996).

Fuente: PMA: GCA, 2007.

**Flujo de detritos:** Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor al 5 %), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).

**Flujo de lodo:** Flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad mayor al 5 %). El carácter de este tipo de movimiento es similar al del flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).

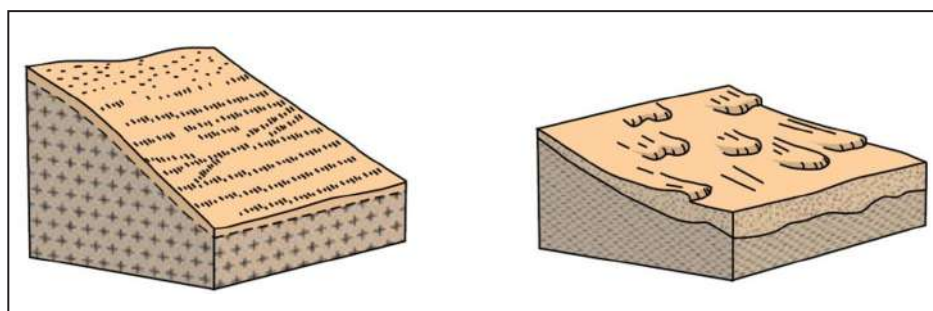
### Reptación

La reptación se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla (figura 8.5).

La reptación puede ser de tipo estacional cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).

Dentro de este movimiento, se incluyen la solifluxión y la gelifluxión; este último término reservado para ambientes periglaciales. Ambos procesos son causados por cambios de volumen de carácter estacional en capas superficiales del orden de 1 a 2 m de profundidad, combinados con el movimiento lento del material ladera abajo (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).

La reptación de suelos y la solifluxión son importantes en la contribución a la formación de delgadas capas de suelo coluvial a lo largo de laderas de alta pendiente. Estas capas pueden ser subsecuentemente la fuente de deslizamientos de detritos superficiales (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA, 2007).



**Figura 8.5** Esquemas de reptación y solifluxión, según Corominas Dulcet y García Yagué, 1997

Fuente: PMA: GCA, 2007.

### Erosión de laderas

La erosión de ladera es un proceso normal, inevitable y universal, que consiste en el desgaste y remodelado del paisaje terrestre original; puede ser laminar, surco o en cárcava (Villota, 2005).

Erosión laminar: se refiere a la remoción más o menos uniforme de láminas delgadas de suelo desde superficies inclinadas sin que se formen claramente canales de desagüe. En la erosión laminar, intervienen dos procesos fundamentales: a) el desprendimiento de partículas de suelo por la lluvia y b) el alejamiento de dichas partículas desde su emplazamiento primitivo por escurrimiento difuso (Citado por Villota, 2005).

Erosión en surcos: se desarrolla a partir de la erosión laminar, con la cual no tiene un límite definido. La remoción de suelo ocurre en mayor cantidad a lo largo de pequeños canales formados por cursos intermitentes de escorrentía. Ocurre en suelos poco permeables y con pendientes medias a fuertes o cuando la intensidad y la duración de las precipitaciones pluviales son intensas (Villota, 2005).

Erosión en cárcavas: proceso intenso de erosión hídrica causado por escurrimiento superficial concentrado, capaz de remover material de suelo hasta profundidades considerables. La intensidad y la amplitud de la formación de cárcavas guardan una íntima relación con la cantidad de agua de escurrimiento y su velocidad. Además, están reguladas por las características del suelo (permeabilidad y cohesión), del relieve, del clima y de la cobertura vegetal protectora. Las cárcavas pueden acrecentar sus dimensiones en profundidad, amplitud y longitud, gracias a diversos procesos que pueden ocurrir aislada o simultáneamente. El perfil transversal de las cárcavas puede ser en V o en U, todo depende del tipo de material existente (Villota, 2005).

### Hundimiento o dolinas

Son hoyos cerrados en forma de embudo con sus lados rocosos o cubiertos de suelo y vegetación, de forma circular o elíptica en vista de planta, cuyas dimensiones varían entre 2 y 100 m de profundidad y entre 10 y 100 m de diámetro; pueden ocurrir aisladas o en grupos (Villota, 2005).

### Inundación fluvial

La inundación fluvial es un proceso natural recurrente en la historia dinámica de un río. Están asociadas a precipitaciones pluviales extraordinarias que producen una excesiva descarga y aumento del caudal de los ríos, que originan avenidas que rebasan la capacidad de absorción del suelo y la capacidad de carga de los lechos o cauces (citado por Zavala *et al.*, 2014).

### Erosión fluvial

La erosión fluvial, como proceso geohidrológico, normalmente acompaña a una inundación, y muchas veces es la que precede a esta. Además, la erosión fluvial suele estar ligada también como consecuencia de flujos o avalancha de detritos, que erosionan las márgenes de los cauces por aumento considerable de sólidos o carga sólida.

En su ocurrencia, intervienen factores como:

- Morfología y dinámica del río, pendiente y ancho del cauce, tipo de drenaje (meandriforme, anastomosado, etc.), naturaleza del suelo o substrato en las márgenes, etc. (grado de compacidad del suelo)
- Tipo de avenida o crecida del río: máximas estacionales o excepcionales, relacionada a la pluviosidad de la región en un tiempo determinado, que incluyen la cantidad o volúmenes de sólidos, muchas veces generados por flujos de detritos o huaycos
- Ocupación de áreas susceptibles (áreas urbanas y rurales, obras viales)
- Falta de defensas ribereñas en las plataformas de carreteras (enrocados o gaviones aguas arriba), mal diseño de puentes (longitud, tirante y estribos), mala ubicación de estructuras

Los daños por procesos de erosión fluvial se dan sobre:

- Estribos y pilares centrales de puentes de diferente tipo de material y estructura, en ríos principales, tributarios o quebradas secundarias
- Plataformas de carreteras (asfaltadas o afirmadas) o trochas carrozables
- Terrazas (bajas y altas), conos proluvio-aluviales o "aluvionales", laderas ocupadas como áreas de cultivo, áreas urbanas y rurales, sin defensas ribereñas
- Otras obras de infraestructura mayor: bocatomas, canales de derivación, etc.

## 8.2 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA EVALUACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA

En la evaluación de los procesos de movimientos en masa que se identificó en el área de estudio, se ha utilizado la clasificación propuesta por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA: GCA (2007).

La cartografía se realizó sobre la base topográfica con curvas de 5 m de equidistancia proporcionado por el Centro Guamán Poma de Ayala (organismo no gubernamental). Además, se usó

“Imágenes satelitales PeruSat-1 proporcionadas por el CNOIS y procesadas por el Ingemmet”, imágenes disponibles en SAS. Planet y Google Earth Pro.

Para el inventario se ha usado una “ficha o formato de inventario”, donde se consignan datos morfométricos, geomorfológicos, geológicos, geotécnicos y de evaluación del peligro, de forma adecuada y fácil llenado.

Cada ocurrencia tiene un código de identificación, el que se ha asignado de acuerdo a la numeración de la hoja topográfica del IGN a escala 1:100 000. Por ejemplo, si el área donde se inventarió el peligro se ubica en el Cuadrángulo de Cusco, se tiene la numeración 2543 (código IGN), seguida del número de cuadrante (el cuadrángulo se ha dividido en cuatro cuadrantes, del 1 al 4) y el número correlativo con que se va inventariando. Se incluye en un gran porcentaje de fichas una o más fotografías.

Los datos consignados en las fichas fueron ingresados a la base de datos geocientífica del Ingemmet y trabajados en un software SIG, el cual permitió su representación gráfica,

debidamente ilustrada con ejemplos de los tipos principales de movimientos en masa (mapas 7), que permitió, a su vez, la actualización del Banco de Datos de Peligros Geológicos de Perú. Cada ocurrencia adicionalmente tiene una o más fotografías ilustrativas en formato digital.

### 8.3 INFORMACIÓN HISTÓRICA DE PELIGROS GEOLÓGICOS POR MOVIMIENTOS EN MASA Y OTROS PELIGROS

Todo estudio de evaluación del peligro parte del análisis de los eventos registrados en su entorno en forma cronológica; esto permite conocer la distribución de áreas afectadas en el pasado histórico. La información de los peligros que afectó el área de estudio fue extraída principalmente del Sistema Nacional de Información para la Prevención y Atención de Desastres - SINPAD y de los Compendios Estadísticos publicados por el Indeci, en sus programas de planificación y atención de desastres en el Perú en los últimos años (1997-2016).

**Cuadro 8.2**

#### **Cronología de principales peligros geológicos por movimiento en masa y otros ocurridos en el área de estudio**

<b>Fecha</b>	<b>Descripción del peligro y sus efectos</b>
21/5/1950	<b>Sismo en la ciudad del Cusco:</b> Tuvo una magnitud de 7.0 Mw e intensidad de VIII en la escala de Mercalli Modificada. Durante el sismo, se produjo licuefacción del suelo que generó el levantamiento del nivel freático al sur de la cuenca Cusco. Produjo el 50 % de daños en las viviendas, 120 muertos y 275 heridos (Sligado, 1978).
6/3/1997	<b>Inundación en el distrito del Cusco:</b> A consecuencia de la caída de lluvias intensas, se produce una inundación que ocasionó daños en la localidad de La Rinconada (Urbanización Machu Picchu) perteneciente al distrito del Cusco. Los daños fueron los siguientes: 6 personas damnificadas, 1 vivienda afectada. Fuente: Indeci.
20/2/1998	<b>Deslizamiento en el distrito de San Jerónimo:</b> El día 20 de febrero de 1998 se produce un deslizamiento que causó daños en el distrito de San Jerónimo. Los daños fueron los siguientes: 12 personas damnificadas, 2 viviendas destruidas. Fuente: Indeci.
23/2/1998	<b>Deslizamiento en el distrito de Santiago:</b> Con fecha 23 de febrero de 1998, producto de las torrenciales lluvias por efecto del Fenómeno El Niño, se produce un deslizamiento que causó daños en el distrito de Santiago. Los daños fueron los siguientes: 12 personas damnificadas, 2 viviendas afectadas. Fuente: Indeci.
11/1/2001	<b>Deslizamiento en el distrito de Santiago:</b> Con fecha 11 de enero de 2001, a consecuencia de las intensas lluvias, se produce un deslizamiento en el AA.HH. Tincoc. Los daños fueron los siguientes: 7 viviendas afectadas y 35 personas damnificadas.
31/1/2002	<b>Inundación en el distrito de San Jerónimo:</b> El 31 de enero de 2002, a consecuencia de las intensas lluvias, se produce el desborde del río Huatanay que inundó las urbanizaciones San Juan de Dios, Los Jardines, Virgen del Rosario, Perolpujio y Chimpahuaylla. Los daños fueron los siguientes: inundación de 4 viviendas y las calles de las urbanizaciones mencionadas, y 20 personas damnificadas.

Continuación...

Fecha	Descripción del peligro y sus efectos
4/1/2002	<b>Erosión de taludes en el distrito de San Sebastián:</b> El 4 de febrero de 2002 se produce el derrumbe de parte de una vivienda por erosión de bases por aguas del río en Naciones Unidas en el AA.HH. 1° de mayo, Naciones Unidas y Villa Córpac. Los daños fueron los siguientes: 35 personas damnificadas, inundación de 6 viviendas habitadas y 40 viviendas inhabitadas en San Antonio, colapso de vivienda por erosión de bases en Naciones Unidas.
7/2/2002	<b>Huaico en el distrito de Santiago:</b> El 7 febrero de 2002 se produjeron intensas lluvias que ocasionaron la caída de un huaico, lo que causó daños en el asentamiento Humanp Wimpillay. Los daños fueron los siguientes: 1 vivienda destruida y 6 personas heridas.
28/1/2003	<b>Inundación en San Sebastián:</b> El 28 e enero de 2003 se produjo una inundación por desborde del río Huatanay. Los daños fueron los siguientes: 65 personas damnificadas, 13 viviendas colapsadas, 600 ha de cultivos afectadas, 470 personas afectadas, 94 viviendas afectadas y 149 ha de cultivos perdidos.
30/1/2003	<b>Desborde de río en el sector Angostura – Saylla:</b> El 30 de enero de 2003 se produjo un desborde del río Huatanay en el sector Angostura del distrito de Saylla. Los daños fueron los siguientes: 78 personas afectadas y 13 viviendas afectadas.
3/1/2004	Deslizamiento en la ciudad del Cusco: El deslizamiento afectó a la vivienda del Lote E—13 en la Urb. Balconcillo de la ciudad del Cusco. Los daños fueron los siguientes: 5 personas afectadas y 1 vivienda afectada.
15/2/2004	<b>Ríos Chocco, Huancaro y Huatanay en el distrito de Santiago:</b> El 15 de febrero de 2004 se produjo el desborde de los ríos Chocco, Huancaro y Huatanay a consecuencia de las constantes precipitaciones pluviales en el distrito de Santiago. Los daños fueron los siguientes: 25 personas afectadas y 5 viviendas afectadas.
17/1/2006	<b>Inundación en el AA. HH. Tomás Catari en Cusco:</b> Fuertes lluvias ocasionaron desborde del río Saphy en el Asentamiento Humano Tomás Catari del distrito de Cusco. Los daños fueron los siguientes: 50 personas afectadas y 10 viviendas afectadas.
31/3/2006	<b>Deslizamiento en San Sebastián:</b> Un deslizamiento afectó viviendas de adobe en el sector de Tankarpata. Los daños fueron los siguientes: 19 personas damnificadas y 4 viviendas colapsadas.
7/4/2006	<b>Deslizamiento en San Sebastián:</b> Deslizamiento de talud en APV. Niño Manuelito. Los daños fueron los siguientes: 10 personas damnificadas y 2 viviendas colapsadas.
15/11/2008	<b>Colmatación de cauce de ríos en Cusco.</b> Una colmatación de cauces provocó el desborde de los ríos Shapy, Choquechaca, Sipaspugio del distrito de Cusco. Los daños fueron los siguientes: 1000 personas afectadas y 60 % del sistema de desagüe afectado.
11/1/2010	<b>Inundación en San Jerónimo:</b> Intensas lluvias provocaron el desborde de río Huatanay y posterior inundación del barrio San Juan de Dios del distrito de San Jerónimo. Los daños fueron los siguientes: 200 personas afectadas y 50 viviendas afectadas.
17/1/2010	<b>Huaico en la quebrada de Sipaspugio:</b> El 17 de enero de 2010 se produjo huaicos y deslizamientos en la quebrada de Sipaspugio del distrito de Cusco debido a las intensas lluvias. Los daños fueron los siguientes: 100 personas afectadas, 72 personas damnificadas, 20 viviendas afectadas y 12 viviendas colapsadas.
17/1/2010	<b>Deslizamiento de taludes y colapso de defensa ribereña en el río Saphy, distrito del Cusco:</b> El 17 de enero de 2010 se produjo deslizamiento de taludes en varios tramos con embalse de agua, colapso de defensa ribereña en 700 m por socavamiento de las bases del talud. Los daños fueron los siguientes: 200 personas afectadas y 7 km de canal de riego colapsado.
4/2/2011	<b>Huaico en quebrada Perol, Santa Rosa y San Sebastián:</b> Intensas lluvias provocaron huaico en la quebrada Perolhuayco en el sector de Santa Rosa del distrito de San Sebastián. Los daños fueron los siguientes: 5 personas afectadas, 13 personas damnificadas, 1 vivienda afectada y 2 viviendas colapsadas.

Continuación...

Fecha	Descripción del peligro y sus efectos
3/4/2011	<b>Deslizamiento en el sector de la zona noroccidente del distrito de Cusco, específicamente Sector Pueblo Joven Villa María Baja (Quebrada Ayahuaico):</b> El 3 de abril de 2011 se produjo un deslizamiento ocurrido en el sector de la zona noroccidente del distrito de Cusco, de volumen considerable, por saturación de suelos debido a las lluvias moderadas en la ciudad, que sepultó dos viviendas, lo cual comprometió estructuralmente otra vivienda, vía de comunicación férrea dañada, servicios de energía eléctrica y telefonía dañados. Los daños reportados según Indeci fueron los siguientes: 9 personas fallecidas, 42 personas damnificadas, 3 viviendas colapsadas y 6 personas heridas, entre otros.
3/1/2013	<b>Deslizamiento de tierras en el distrito de San Jerónimo:</b> A consecuencia de los cortes de talud y la sobresaturación de suelos, a la 1:30 pm se produjo un deslizamiento de gran magnitud de aproximadamente 200 m lineales y dejando un desnivel de 3 a 4 m de altura. Los daños fueron los siguientes: 73 personas damnificadas, 4 viviendas colapsadas y 8 viviendas inhabilitadas.
7/1/2013	<b>Huaico con impulsión de material de arrastre en APV señor de huanca zona noroccidental de la ciudad del Cusco:</b> El 7 de enero de 2013 un huaico, generado por lluvias torrenciales, generó el arrastre de material suelto, lodo y piedra en la microcuenca Infiernillo, lo que causó la incursión de dicho material al interior de 3 viviendas en la parte baja de la APV. Señor de Huanca. Los daños fueron los siguientes: 2 viviendas afectadas.
18/1/2013	<b>Deslizamiento de un talud en la APV San Silvestre provoca colapso de vivienda.</b> El deslizamiento de talud en la APV. San Silvestre provocó el colapso de una vivienda de material noble (condiciones precarias). Los daños fueron los siguientes: 5 personas damnificadas y 1 vivienda afectada.
9/2/2013	<b>Deslizamientos en el distrito de San Sebastián:</b> Las intensas precipitaciones registradas en la jurisdicción de San Sebastián provocaron el deslizamiento de grandes masas de suelo y colmatación de quebradas que ocasionaron el colapso de viviendas. Los daños fueron los siguientes: 40 personas afectadas, 8 viviendas afectadas y 2 km de carreteras afectadas.
29/1/2014	<b>Deslizamientos en el cerro Pícol en San Jerónimo:</b> A consecuencia de las intensas lluvias, en el cerro Pícol, se activaron deslizamientos y un flujo de detritos que colmató el dissipador 1, situación que puso en peligro a las urbanizaciones Larapa, Santa María y las APV. Huayna Pícol y Machu Pícol.
3/8/2017	<b>Deslizamiento del cerro Muyo Orcco Araway distrito de Santiago:</b> Un deslizamiento del cerro Muyo Orcco a la altura del área verde del PP.JJ. Araway y por la parte baja de la urbanización de Huancaro obstruyó el cauce del río Huancaro que afecta a la construcción de la defensa ribereña.

#### 8.4 OCURRENCIAS DE MOVIMIENTOS EN MASA Y OTROS PELIGROS GEOLÓGICOS

En el presente estudio, a nivel general, se han identificado 478 ocurrencias de peligros geológicos por movimientos en masa y otros peligros geológicos, tanto en los trabajos de campo (167 ocurrencias), como en gabinete (311 ocurrencias), de los cuales, el 38.9 % corresponde a erosión en cárcava, 23.4 % a derrumbes, 13.2 % a deslizamiento rotacional, 7.3 % a reptación de suelos, 4.2 % a flujos de detritos, 3.9 % a flujos de lodo, 3.1 % a erosión en surco, 2.5 % a deslizamiento traslacional, 1.3

% a hundimientos, 1.0 % a inundación fluvial, 0.6 % a caída de rocas y 0.6 % a erosión fluvial (figura 8.6). Así mismo, el 50.9 % corresponde a eventos activos, el 25.5 % antiguos y el 23.6 % a latentes (figura 8.7).

La mayor cantidad de ocurrencias de movimientos en masa y otros peligros geológicos se identificaron en el área que corresponde al distrito de San Sebastián; le siguen los distritos de San Jerónimo, Cusco, Santiago y finalmente Wanchaq. En estos distritos, a excepción de Wanchaq, predomina la ocurrencia de erosión en cárcava (figuras 8.9, 8.10 y 8.11).

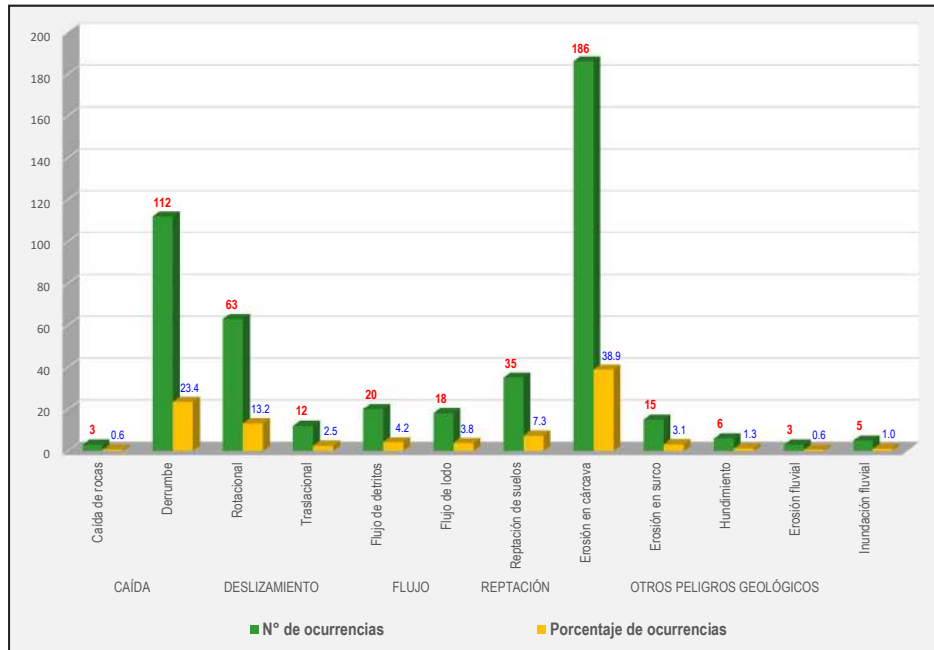


Figura 8.6 Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área de estudio.

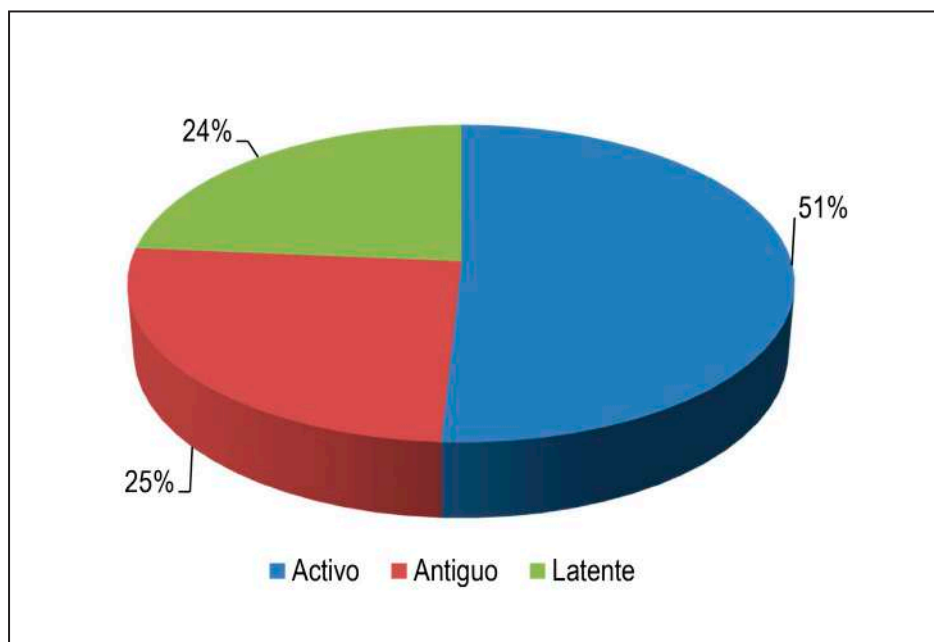


Figura 8.7 Porcentaje según la edad de los movimientos en masa y otros peligros que ocurrieron en el área de estudio.

### 8.4.1 Ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros por distrito

#### Área del distrito de Cusco

En el área del distrito del Cusco, se han identificado 102 ocurrencias de movimientos en masa y otros peligros geológicos (figura 8.8 y mapas 7), tanto en los trabajos de campo (32 ocurrencias), como en gabinete (70 ocurrencias), de los cuales 27 corresponde a erosión en cárcavas distribuidas en las vertientes de los ríos Cachimayo, Saphy y Soltero Huaico; 26 a deslizamientos rotacionales ubicados principalmente en las

quebradas afluentes al río Saphy; 26 a derrumbes, y se distribuye indistintamente entre las vertientes a los ríos Cachimayo, Saphy y quebrada Sipaspujio; 10 a reptación de suelos ubicados en las vertientes del río Saphy, Cachimayo, quebradas Soltero Huaico y Ayahuaico; 6 a hundimientos que se desarrollan sobre áreas ocupadas por las calizas de la Formación Ayavacas entre los ríos Saphy y Cachimayo; 3 a erosión en surco ubicados en las quebradas Infiernillo, Soltero Huaico y margen derecha del río Cachimayo; 1 a flujo de detritos ubicado en la desembocadura del río Saphy; 1 a caída de rocas; 1 a deslizamiento traslacional; finalmente 1 a erosión fluvial ubicado en el río Cachimayo.

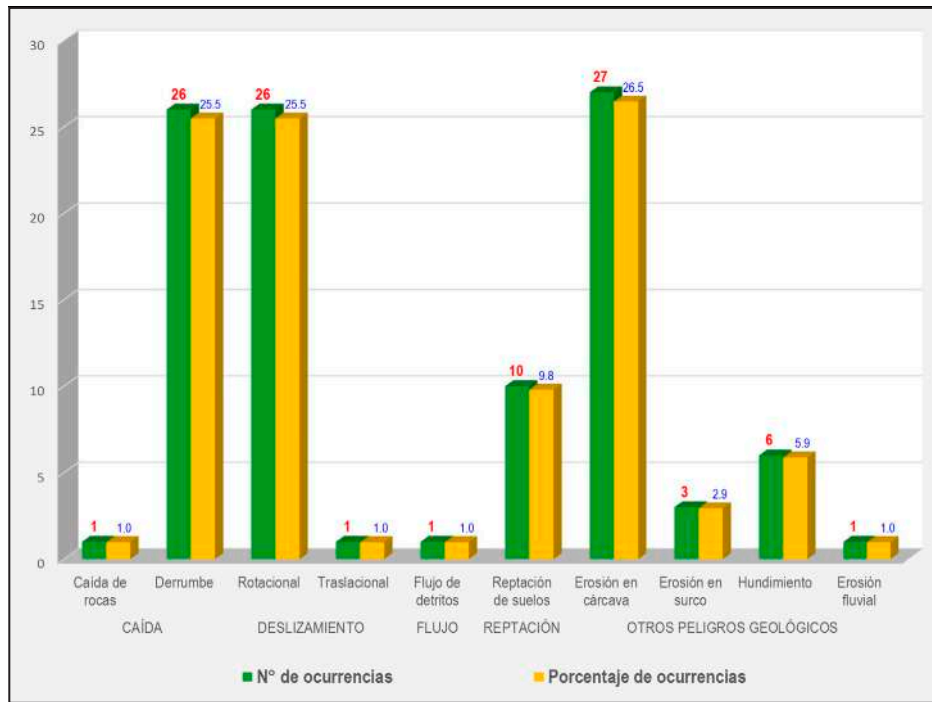


Figura 8.8 Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de Cusco.

#### Área del distrito de San Jerónimo

En el área del distrito de San Jerónimo, se han identificado 134 ocurrencias de movimientos en masa y otros peligros geológicos (figura 8.9 y mapas 7), tanto en los trabajos de campo (36 ocurrencias), como en gabinete (98 ocurrencias), de los cuales: 61 corresponde a erosión en cárcavas distribuidas que

rodean el área urbana del distrito de San Jerónimo (quebradas Llampahuayjo, Huacotomayo, Unucñahuin, Jatunhuayjo, Arcopunco, Thuniyoc, Timpoc, Huanacahuire, Cacllacancha, entre otras); 28 a derrumbe, se presenta en sectores con pendiente muy escarpada ubicados principalmente en las quebradas Huacotomayo y Huanacahuire; 16 a flujos de detritos,



se ubican en las desembocaduras de las quebradas; 10 a reptación de suelos ubicados principalmente en la quebrada Huanacahuire; 6 a flujo de lodo; 4 a deslizamiento rotacional;

3 a erosión en surco; 2 a erosión fluvial, 2 a inundación fluvial, 1 a caída de rocas; finalmente 1 a deslizamiento traslacional.

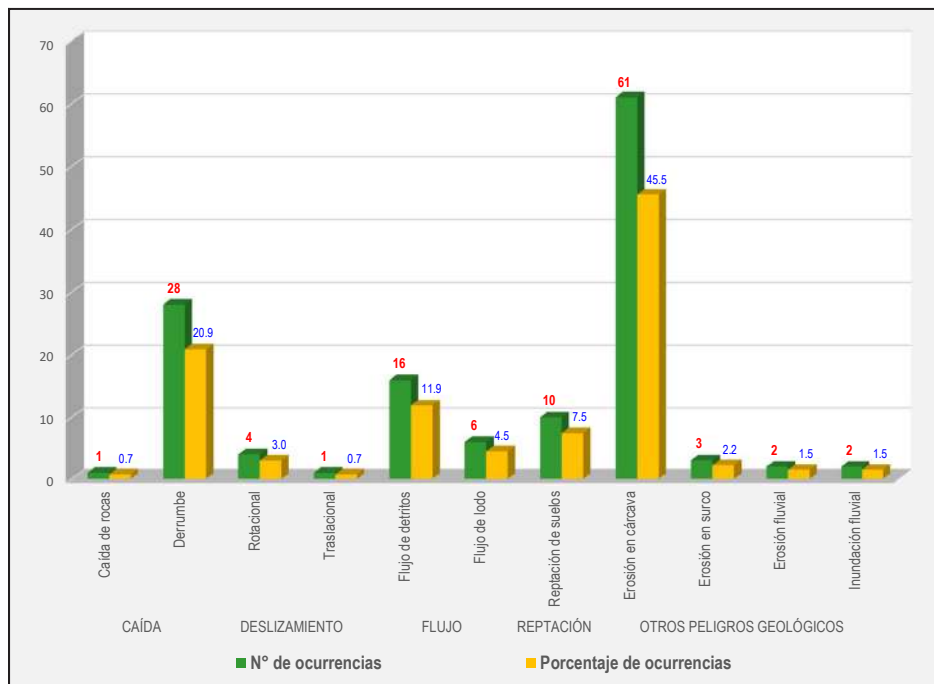
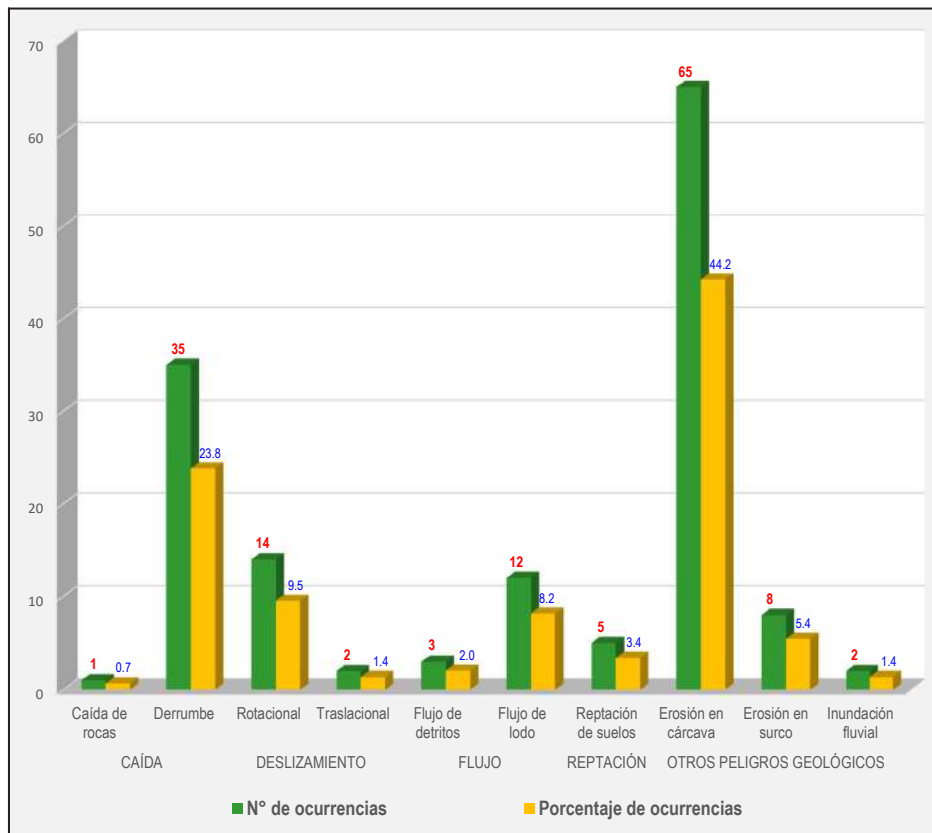


Figura 8.9 Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de San Jerónimo.

### Área del distrito de San Sebastián

En el área del distrito del San Sebastián, se han identificado 147 ocurrencias de movimientos en masa y otros peligros geológicos (figura 8.10 y mapas 7), tanto en los trabajos de campo (70 ocurrencias), como en gabinete (77 ocurrencias), de los cuales: 65 corresponden a erosión en cárcava distribuidas principalmente en las quebradas y ríos que drenan sus aguas a río Huatanay; 35 a derrumbe; estos eventos en algunos casos como los que ocurren en la quebrada Thuniyoc están asociados

a la erosión en cárcava; 14 a deslizamiento rotacional, se ubican en la quebrada Pumamarca y entre las quebradas La Rinconada y Tojoyoc; 12 a flujo de lodo ubicadas en desembocaduras de quebradas; 8 a erosión en surco que se desarrollan en la margen derecha de la quebrada Pumamarca; 5 reptación de suelos; 3 flujos de detritos; 2 deslizamiento traslacional; 2 áreas susceptibles a inundación fluvial; finalmente 1 ocurrencia corresponde a caída de rocas.



**Figura 8.10** Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de San Sebastián.

### Área del distrito de Santiago

En el área del distrito del Santiago, se han identificado 86 ocurrencias de movimientos en masa y otros peligros geológicos (figura 8.10 y mapas 7), tanto en los trabajos de campo (28 ocurrencias), como en gabinete (58 ocurrencias), de los cuales: 27 corresponden a erosión en cárcava ubicadas en las torrenteras afluentes a los ríos Chocco, Cachona, quebradas Ccorimachachuyaniyoc, Sagramayo e infiernillo; 21 a derrumbe, distribuidos en las vertientes de los ríos Choco, Cachona, Chirimayo y en la quebrada Sipaspujio; 20 a deslizamiento rotacional, se ubican principalmente en el río Cachona y en sus quebradas afluentes; 10 a reptación de suelos, se desarrollan en las quebradas afluentes a los ríos Chirimayo Cachona y en la quebrada Sipaspujio; 7 a deslizamiento traslacional, se concentra en la margen izquierda del río Cachona (cerca al deslizamiento de Huamancharpa); por último, 1 ocurrencia

corresponde a erosión en surco ubicada en la margen derecha de la quebrada Sipaspujio.

### Área del distrito de Wanchaq

En el distrito de Wanchaq, por su ubicación, se ha identificado solo 1 área susceptible a la ocurrencia de inundación fluvial; el mismo que se considera como punto crítico; esta área se ubica en la margen izquierda de río Huatanay donde se encuentra construido el aeropuerto Internacional Alejandro Velasco Astete. La inundación podría ocurrir por un desborde del río Huatanay al rebasar su capacidad de escorrentía.

La comparación de la fotografía aérea de 1962 y la imagen satelital de PeruSat-1 del 2018 nos muestra las modificaciones que realizaron al río Huatanay para la construcción del aeropuerto Internacional Alejandro Velasco Astete (figura 10.5).

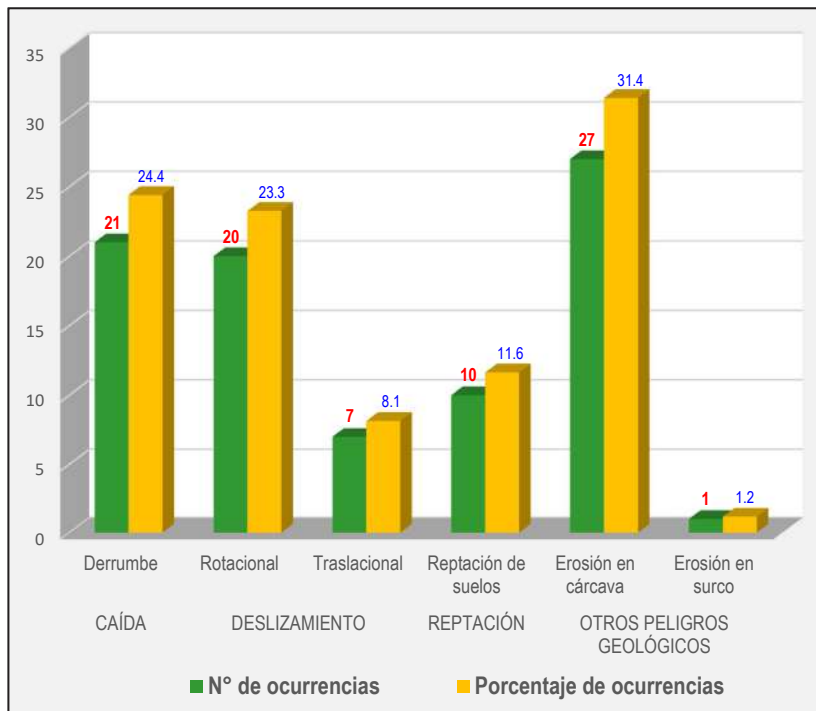


Figura 8.11 Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de Santiago.



# CAPÍTULO IX

## SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA E INUNDACIÓN FLUVIAL

### 9.1 SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

La susceptibilidad a los movimientos en masa está definida como la propensión que tiene una determinada zona a ser afectada por un determinado proceso geológico (movimiento en masa), expresado en grados cualitativos y relativos. Los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos geodinámicos pueden ser intrínsecos o externos (Vilchez *et al.*, 2013).

En la construcción del mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa, se tienen en cuenta una serie de variable o factores que tienen influencia en la ocurrencia de dichos fenómenos (Aguilar & Mendoza, 2002).

Para diferenciar los grados de susceptibilidad, se usó el método basado en la categorización y ponderación de factores (Método heurístico, indirecto y cualitativo), cuyo objetivo principal es indicar y priorizar áreas donde las condiciones existentes hacen probable la ocurrencia de movimientos en masa (Vilchez *et al.*, 2013). El proceso de elaboración se inició con el análisis de los factores (mapas temáticos) relacionados con la ocurrencia de estos fenómenos.

El mapa de susceptibilidad por procesos de movimientos en masa constituye una herramienta valiosa y necesaria para la

gestión de desastres y la planificación de la ciudad del Cusco. Una de sus funciones más resaltantes es indicar las áreas donde se hace necesaria o conveniente la realización de estudios más específicos y a mayor detalle.

#### 9.1.1 Factores condicionantes de la inestabilidad y determinación del peso

Los factores usados en el análisis de la susceptibilidad a los movimientos en masa fueron los mapas: litológico, pendiente de los terrenos, geomorfológico, hidrogeológico y cobertura vegetal.

Según las observaciones realizadas en trabajos de campo, a cada factor se le asignó un peso porcentual de forma cualitativa, dependiendo cómo se considere que influyen en la inestabilidad de las laderas; esto basado principalmente en la experiencia del geólogo encargado de hacer el estudio de susceptibilidad. Es así que este valor o peso representa en cuánto influye dicho factor en la predisposición a generación de movimientos en masa.

En el cuadro 9.1 se presentan los pesos en porcentaje asignados a cada uno de los factores usados en el análisis de la susceptibilidad.

**Cuadro 9.1**  
**Variables y porcentajes**

Variable o factor	Porcentaje (%)
Litología (L)	30
Pendiente (P)	35
Geomorfología (G)	17
Hidrogeología (H)	10
Cobertura vegetal y uso del suelo (CV)	8
Total	100

Por otro lado, cada factor (mapa temático) se analiza independientemente para valorar las unidades cartográficas diferenciadas en cada uno de ellos. A continuación, se presenta el análisis de cada variable.

### Litología (L)

La litología (mapa 1) es uno de los factores que se usa en el análisis de la susceptibilidad a los movimientos en masa; este parámetro es uno de los más complejos de evaluar por las diferentes asociaciones de rocas que se presentan y que condicionan su competencia geomecánica y resistencia.

De esta manera, se ha realizado un análisis de las propiedades de las formaciones geológicas y depósitos superficiales; propiedades como el tipo y composición de la roca, origen y tipo de material superficial, fracturamiento, grado de meteorización y presencia de agua. Este análisis busca relacionar sus

características geotécnicas (mapa 2) en la susceptibilidad a los procesos erosivos y movimientos en masa.

La parte estructural considera los sistemas de discontinuidades presentes en la roca, como planos de debilidad (estratificación, pliegues, fallas y diaclasas), estructuras tectónicas presentes en el material, en las cuales se ha presentado desplazamiento relativo de masas (Simons, 1990). Su influencia en la susceptibilidad está gobernada por su rumbo, buzamiento (en relación al talud o inclinación de laderas), espaciamiento y continuidad, grado de actividad (fallas activas, etc.), entre otros (Suárez, 1998).

En el cuadro 9.2, se presentan los valores asignados a las diferentes unidades del mapa litológico (mapa 1) considerando la clasificación geomecánica que se realizó para las unidades de los macizos rocosos (mapa 2).

**Cuadro 9.2**  
**Valoración de las unidades litológicas**

Unidad	Subunidad	Litología	Valor	Grado de susceptibilidad
<b>Depósitos inconsolidados</b>	I-1	Depósito residual	1	Muy bajo
	I-2	Depósito fluvial	1	Muy bajo
	I-3	Depósito aluvial	1	Muy bajo
	I-4	Depósito proluvial	3	Medio
	I-5	Depósito deluvial	4	Alto
	I-6	Depósito coluvial	5	Muy alto
	I-8	Depósito glaciar / fluvio-glaciar	2	Bajo
	I-10	Depósito biogénico	2	Bajo
	I-13	Depósito antropógeno	3	Medio
<b>Rocas intrusivas</b>	II-3	Dioritas	2	Bajo
<b>Rocas volcánicas</b>	III-3	Secuencia lávica andesítica / dacítica	1	Muy bajo
<b>Rocas volcano-sedimentarias</b>	IV-2	Lavas, aglomerados y brecha volcánica	2	Bajo
<b>Rocas sedimentarias</b>	V-2	Areniscas, arcillitas y conglomerados	3	Medio
	V-3	Limolitas, limoarcillitas y arenas	3	Medio
	V-4	Arcillitas y areniscas	4	Alto
	V-5	Conglomerados, areniscas y arcillitas	5	Muy alto
	V-8	Caliza maciza	2	Bajo
	V-9	Mezclas caóticas de yesos	2	Bajo

Continuación...

Unidad	Subunidad	Litología	Valor	Grado de susceptibilidad
Erosión de ladera			5	Muy alto
Lagunas y cuerpos de agua			1	Muy bajo

### Pendiente de los terrenos (P)

La pendiente de los terrenos se constituye en uno de los principales factores dinámicos y particularmente de los movimientos en masa, ya que determinan la cantidad de energía cinética y potencial de una masa inestable (citado por Vilchez *et al.*, 2013).

La pendiente como factor condicionante es un parámetro importante en la evaluación de todo tipo de proceso de movimientos en masa; para ello, diversos autores consideran a esta variable como fundamental en el análisis de susceptibilidad (Aguilar & Mendoza, 2002).

Respecto a la relación pendiente versus movimientos en masa, existen algunas divergencias en su análisis. En general, la correlación entre movimientos en masa y pendiente no es apropiado generalizarla para todos los ambientes climáticos. Diversos autores coinciden en que pendientes bajas y altas o muy altas son menos susceptibles a los movimientos en masa. Ocurre que cuanto mayor sea la pendiente, mayor debería ser la

susceptibilidad a la rotura de la formación superficial. Sin embargo, se observa que a partir de los 45° ocurre lo contrario y la pendiente de la ladera es demasiado empinada para retener a la formación superficial. Por esta razón, a pendientes elevadas donde solo aflora el sustrato rocoso, la posibilidad de aparición de roturas se reduce drásticamente (Ayala-Carcedo, 2002).

El mapa de pendientes de los terrenos (mapa 3) se elaboró a partir del modelo de elevación digital (DEM) con píxeles de 5 metros, proporcionado por el Centro Guamán Poma de Ayala; el proceso se realizó en software ArcGis, versión 10.4.1, con la herramienta *Spatial Análisis*, módulo slope. El resultado muestra que en las áreas de pendiente muy fuerte (25° - 45°) se registra la mayoría de problemas de movimientos en masa y en pendientes muy bajas o muy altas se ha registrado menor número de ocurrencia.

En el cuadro 9.3, se muestran la caracterización de los rangos y los valores asignados de acuerdo al grado de pendiente de los terrenos.

**Cuadro 9.3**  
**Valoración del tipo de pendiente**

Rango de pendiente	Clase	Comentarios	Valor	Grado de Susceptibilidad
<1°	Llano	La generación de peligros geológicos por procesos de movimientos en masa, en estos rangos de pendiente, es muy difícil que se origine; sin embargo, podría ser afectado por eventos originados en las porciones adyacentes o superiores de mayor pendiente (principalmente flujos e inundaciones).	1	Muy Bajo
1°-5°	Suave		1	Muy Bajo
5°-15°	Moderada	Conforman relieves inclinados, sus laderas presentan una susceptibilidad media a los movimientos en masa.	2	Bajo
15°-25°	Fuerte	Lo conforma superficies inclinadas susceptibles a la generación de movimientos en masa.	3	Medio
25°-45°	Muy Fuerte	Caracterizado por presentar muy alta susceptibilidad a los movimientos en masa.	5	Muy Alto
>45°	Muy escarpado	Son áreas abruptas, donde la ocurrencia de peligros dependerá de las condiciones intrínsecas de la roca (grado de fracturamiento y orientación, estratificación, etc.), así como de los detonantes (sismos, lluvia, en otros).	4	Alto

### Geomorfología (G)

La caracterización de las subunidades geomorfológicas como factor condicionante es muy importante para el análisis de la susceptibilidad a los peligros geológicos por procesos de movimientos en masa.

Las subunidades diferenciadas en el mapa geomorfológico (mapa 4) se valoraron de acuerdo a la cantidad de ocurrencias

de movimientos en masa registradas dentro del área de cada subunidad. Así mismo, se ha diferenciado los procesos de movimientos en masa y otros peligros de origen natural.

En el cuadro 9.4, se presenta los valores asignados a cada una de las subunidades diferenciadas en el mapa geomorfológico; en la valorización, también se considera a los procesos de movimientos en masa y otros peligros de origen natural.

**Cuadro 9.4**  
**Valoración de las unidades geomorfológicas**

Geoforma	Unidad	Subunidad	Valor	Grado de susceptibilidad	
De carácter tectónico degradacional y erosional	Montañas	Montaña en roca volcano-sedimentaria	RM-rvs	3	Medio
		Montaña en roca sedimentaria	RM-rs	5	Muy alto
		Montaña estructural en roca sedimentaria	RME-rs	4	Alto
	Colinas y lomadas	Colina en roca sedimentaria	RC-rs	3	Medio
		Colina estructural en roca sedimentaria	RCE-rs	2	Bajo
		Lomada en roca intrusiva	RL-ri	2	Bajo
		Lomada en roca sedimentaria	RL-rs	2	Bajo
		Relieve Kárstico	R-k	1	Muy bajo
	Planicies	Altiplanicie sedimentaria	AP-s	1	Muy bajo
	Volcánicas	Domo volcánico	Do-v	1	Muy bajo
De carácter depositacional o agradacional	Piedemonte	Vertiente glacial o de gelifracción	V-gl	3	Medio
		Vertiente glacio-fluvial	V-gfl	2	Bajo
		Vertiente con depósito de deslizamiento	V-dd	5	Muy alto
		Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	V-cd	4	Alto
		Vertiente coluvial de detritos	V-d	4	Alto
		Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial	P-at	2	Bajo
		Vertiente o piedemonte aluvio-lacustre	P-al	2	Bajo
	Planicies	Terraza aluvial	T-al	1	Muy bajo
		Terraza fluvial	T-fl	1	Muy bajo
Geoformas particulares	Bofedales	Bo	1	Muy bajo	
	Relieve depresionado	R-d	4	Alto	
	Laguna y cuerpos de agua	Lg/ca	1	Muy bajo	
	Depósito antrópico	Dan	3	Medio	
	Erosión en ladera	EL	4	Alto	



### Hidrogeología (H)

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con movimientos en masa y, en general, al fallamiento de los taludes, debido a que la mayoría de estos ocurren después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos prolongados, siendo entonces, el agua subterránea uno de los principales factores en su ocurrencia (Vilchez *et al.*, 2013).

Las precipitaciones pluviales, durante varios días consecutivos o con pocos días de diferencia, pueden producir acumulación de agua subterránea, debido que el talud o ladera no ha drenado el agua filtrada; al ocurrir la siguiente lluvia, se produce un ascenso del nivel freático. El régimen de aguas subterráneas en respuesta a las lluvias será diferente según la pendiente de la ladera, su litología y vegetación (Vilchez *et al.*, 2013).

El tiempo que se requiere para que una lluvia produzca un deslizamiento es mayor en una arcilla que en un material arenoso, debido a las diferencias de infiltración; este tiempo es inversamente proporcional a la permeabilidad para valores constantes de los demás parámetros (Duque & Escobar, 2001).

El volumen de agua que se infiltra en la tierra queda determinada además de la cantidad, intensidad y tipo de precipitación, estructura geológica (fracturamiento), la pendiente del terreno, cobertura y tipo de vegetación, por la permeabilidad de los suelos y rocas, relacionados a la estratigrafía o secuencia de estratos permeables e impermeables. Una infiltración alta puede producir problemas de presión del agua interna que genere un deslizamiento. En el caso de que el talud llegue a saturarse, la facilidad o dificultad con que este se autodrene depende de las formaciones geológicas circundantes. Por tanto, la presencia de mantos permeables de evacuación de agua favorece grandemente su estabilidad. Los materiales impermeables que impiden el paso de las corrientes de agua subterránea facilitan la ocurrencia de deslizamientos (Vilchez *et al.*, 2013).

En el terreno se dan dos tipos de flujo de agua subterránea: intergranular (a través de los poros en formaciones aluviales, coluviales, etc.) y a través de fisuras (rocas). El flujo de agua tiende a ser más a lo largo de las fisuras, conductos o juntas especialmente en suelos residuales. Respecto al flujo en rocas

y suelos residuales, se pueden señalar las siguientes premisas (Vilchez *et al.*, 2013).

- En rocas volcánicas a veces su porosidad es muy grande, pero sus poros no necesariamente están intercomunicados. El agua corre a través de grietas formadas al enfriarse y entre los derrames lávicos sucesivos.
- Las rocas ígneas y metamórficas pueden ser las menos saturadas y la poca agua presente procede de sus fracturas.
- Las areniscas y rocas sedimentarias permeables son formaciones acuíferas importantes y presentan grandes flujos de agua, especialmente en la dirección de la estratificación.

En calizas, su porosidad depende mucho de su disolución interna, pero cuando esta es importante da lugar a abundantes manantiales, ríos subterráneos, etc.

- En suelos residuales existe una relación del régimen de aguas subterráneas con la presencia de discontinuidades de tipo geológico. Los suelos de origen ígneo y metamórfico almacenan poca agua y en ellos las corrientes de agua están relacionadas, comúnmente, con fallas de origen tectónico. Es un caso común en formaciones residuales, que un talud posea capas alternadas de materiales permeables y casi impermeables que generan concentraciones de flujo sobre ciertos planos que pueden ser o llegar a ser planos críticos de falla.

De acuerdo a las concepciones teóricas expuestas, la diferenciación de unidades en el mapa hidrogeológico (mapa 5), se efectuó en función de su permeabilidad, y de las observaciones efectuadas en campo. Se ha considerado cinco grados de susceptibilidad (muy alta, alta, media, baja y muy baja).

En el análisis de esta variable, se ha tomado en cuenta la capacidad de almacenamiento de agua de cada unidad hidrogeológica. Las unidades con mayor contenido de agua son más susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa, a excepción de los depósitos no consolidados como los aluviales, fluviales y otros ubicados en las partes bajas de las quebradas. En el cuadro 9.5, se muestra la valoración asignada.

**Cuadro 9.5**  
**Valoración de las unidades hidrogeológicas**

Unidad	Clasificación		Valor	Grado de Susceptibilidad		
Acuífero	Poroso no consolidado	Depósitos fluviales	APNC-fl	1	Muy bajo	
		Depósitos glaciares / fluvio-glaciares	APNC-gl/fl-gl	4	Alto	
		Depósitos residuales	APNC-re	2	Bajo	
		Depósitos aluviales	APNC-al	2	Bajo	
		Depósitos proluviales	APNC-pl	2	Bajo	
		Depósitos deluviales	APNC-dl	3	Medio	
		Depósitos biogénicos	APNC-bi	3	Medio	
	Fisurado kárstico	Formación Ayabacas	AFK-ay	1	Muy bajo	
	Fisurado sedimentario	Formación Punacancha II	AFS-pu-II	4	Alto	
		Formación Soncco-II	AFS-so-II	4	Alto	
		Formación Kayra	AFS-ky	4	Alto	
		Formación Huancané	AFS-hn	2	Bajo	
	Volcánico-sedimentario	Formación Pachatusan	AVS-pa	3	Medio	
Acuitardo	No consolidado	Depósitos coluviales	ATNC-cl	3	Medio	
		Depósitos antropogénicos	ATNC-ant	4	Alto	
		Formación San Sebastián	ATNC-sa	3	Medio	
	Sedimentario	Formación Chinchero	ATS-cc	4	Alto	
		Formación Punacancha I	ATS-pu-I	4	Alto	
		Formación Soncco-I	ATS-so-I	4	Alto	
		Formación Chilca	ATS-chi	4	Alto	
		Formación Quilque	ATS-qu	5	Muy alto	
		Formación Puquin	ATS-pu	5	Muy alto	
		Formación Maras	ATS-ma	5	Muy alto	
		Formación Paucarbamba	ATS-pb	3	Medio	
		Volcánico	Formación Rumicolca	ATV-ru	2	Bajo
		Intrusivo	Dioritas	ATI-di	2	Bajo
	Otros	Erosión en cárcava	Cva	1	Muy bajo	
Lagunas y cuerpo de agua		Lg/ca	1	Muy bajo		

### Cobertura vegetal (CV)

La presencia de cobertura vegetal ayuda en algunos casos en la disminución de los procesos o evolución de los movimientos en masa; además, contribuye en el control de la erosión de laderas, con excepción en terrenos con pendientes superiores a 45°. El tipo, la densidad, la capacidad de interceptación y el área de protección de cobertura vegetal constituyen factores de resistencia o favorecimiento de los procesos morfodinámicos como la erosión y los movimientos en masa (Sánchez *et al.*, 2002).

La utilización de un área para un determinado uso, ya sea agrícola, de reserva forestal, ganadería, industrial extractivo o urbano modifica o conserva las condiciones naturales de estabilidad, influye en la aceleración de los procesos erosivos y amplía el radio de acción de los fenómenos de movimientos en masa (Vílchez *et al.*, 2013).

La valoración de este parámetro se ha realizado de acuerdo a la disposición de cada subunidad del mapa de cobertura vegetal (mapa 6) a la ocurrencia de movimientos en masa. En el cuadro 9.6, se presenta la valoración asignada.

**Cuadro 9.6**  
**Valoración de las unidades de cobertura vegetal**

Unidades de cobertura vegetal		Grado	Calificación
Áreas de bosque denso	Abde	Muy bajo	1
Áreas de bosque disperso	Abdi	Bajo	2
Matorrales	Ma	Medio	3
Pastizales	Pa	Alto	4
Tierras de cultivo	Tcu	Alto	4
Andenes	An	Medio	3
Bofedales	Bo	Muy bajo	1
Sin cobertura vegetal	Scv	Muy alto	5
Área urbana	Au	Medio	3
Lagunas, oconales y cuerpos de agua	Lag	Muy bajo	1

### 9.1.2 Mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa

El mapa fue resultado de la integración de variables o factores analizados mediante el uso del software ArcGis 10.4, que emplea la siguiente fórmula:

$$SMM = \frac{SP(0.35) + SL(0.30) + SG(0.17) + SH(0.10) + SCV(0.08)}{5}$$

En donde:

- SMM : Susceptibilidad a los movimientos en masa
- SL : Susceptibilidad del parámetro litología
- SP : Susceptibilidad del parámetro pendiente
- SG : Susceptibilidad del parámetro geomorfología
- SH : Susceptibilidad del parámetro hidrogeología
- SCV : Susceptibilidad del parámetro cobertura vegetal y uso del suelo

### 9.1.3 Grados de susceptibilidad a los movimientos en masa

Los resultados del análisis de la susceptibilidad a los movimientos en masa se categorizaron en cinco grados (mapa 8) que se describe a continuación:

#### Muy baja susceptibilidad

Las áreas de muy baja susceptibilidad a los movimientos en masa (ocupa el 4 % del área total de estudio); se presentan generalmente en terrenos con superficies planas a algo onduladas y dentro del rango de pendiente inferior a 5°;

además, litológicamente están conformadas por depósitos residuales, fluviales, aluviales y secuencias lávicas andesíticas; también, se incluye altiplanicies, terrazas, bofedales y llanuras de inundación fluvial.

Los movimientos en masa, en este rango de susceptibilidad, son inexistentes o muy raros, ya que las características intrínsecas de los terrenos hacen difícil su ocurrencia; sin embargo, podrían ser afectadas por procesos que ocurren en sus franjas marginales, como obstrucciones o cierre del valle originado por flujos, deslizamientos u otro movimiento en masa.

En el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa (mapa 8), se muestran las áreas de muy baja susceptibilidad en color verde claro; se ubican principalmente a los costados del río Huatanay y sus quebradas afluentes.

Para áreas caracterizadas como susceptibilidad muy baja, se recomienda evaluar los procesos geohidrológicos circundantes (inundación y erosión fluvial), principalmente en las áreas de escorrentía, generación de flujos de detritos u otros movimientos en masa en sus áreas marginales.

#### Baja susceptibilidad

Las condiciones intrínsecas del terreno no son propensas a generar movimientos en masa (ocupa el 15 % del área total de estudio). En algunos sectores, estas áreas presentan una morfología plano-ondulada con rango de pendiente suave a moderadas (menor a 15°) y unidades geomorfológicas de lomadas; se tienen depósitos de materiales superficiales consolidados y no consolidados; el substrato está constituido por rocas conformadas por dioritas y calizas.

En este rango de susceptibilidad, se tiene que tener en cuenta que podría ser afectado por flujos (huaicos), derrumbes, deslizamientos y otros tipos de movimientos en masa que se generan en áreas de susceptibilidad media a alta.

En el mapa 8, las áreas de susceptibilidad baja están representadas con el color verde limón.

En las áreas categorizadas de bajas susceptibilidad, se recomienda permitir el desarrollo de infraestructura siempre y cuando se incorporen las recomendaciones del estudio de diseño para hacer viable cualquier proyecto o adaptarse a las condiciones del terreno.

#### **Media susceptibilidad**

Corresponde a áreas donde presenta algunas condiciones favorables para la generación de movimientos en masa (ocupa el 24 % del área total de estudio). Incluyen unidades geomorfológicas de colinas y piedemonte. La pendiente de los terrenos varía principalmente entre moderada a fuerte (5° y 25°).

En el mapa 8, se señalan en color amarillo las áreas que ocupan el grado de moderada o media susceptibilidad. Se ubica en los sectores de los cerros Unayocpata, Quillirsamopo, entre otros.

Se recomienda, permitir el desarrollo de infraestructura urbana e industrial, siempre y cuando se realicen estudios técnicos especializados detallados con el fin de conocer las propiedades de los terrenos para tomar decisiones respecto a la viabilidad de proyectos.

#### **Alta susceptibilidad**

Ocupa el 28 % del área total de estudio. Pertenece a las áreas donde confluye la mayoría de los factores condicionantes para generar movimientos en masa cuando se modifican sus taludes o los factores condicionantes (precipitaciones pluviales, sismos, entre otros) superan su nivel normal.

Estas áreas se encuentran ocupando principalmente laderas de montañas y colinas con pendiente fuerte a muy fuerte (entre 15° y 45°); además, presenta depósitos de material superficial inconsolidado que cubre el macizo rocoso de las diferentes formaciones geológicas.

Las áreas de alta susceptibilidad a los movimientos en masa son poco estables; corresponde a áreas donde se podrían generar deslizamientos, derrumbes, caídas de rocas, flujos, reptación, movimientos complejos y procesos de erosión de laderas; la susceptibilidad de esta zona aumenta por la pérdida de la cobertura vegetal cuando se realiza la tala de bosques para aprovechamiento del suelo, como terrenos de cultivo y otros usos.

Están representados en el mapa de susceptibilidad los movimientos en masa (mapa 8) en color anaranjado.

Dentro de las áreas de alta susceptibilidad a los movimientos en masa, se debe restringir el desarrollo de infraestructura urbana o de instalaciones para una alta concentración de población. Además, se deben de realizar estudios geotécnicos de detalle.

#### **Muy alta susceptibilidad**

Se concentran principalmente donde ocurrieron movimientos en masa en el pasado o reactivaciones recientes de los antiguos al modificar sus taludes, ya sea como deslizamientos, derrumbes o movimientos complejos (ocupa aproximadamente el 28 % del área total de estudio).

Estas áreas presentan generalmente pendientes muy fuertes y muy escarpadas (mayor a 25°); así mismo, presentan sustrato de rocas intrusivas (granodiorita) y sedimentarias (conglomerados, areniscas y arcillitas) muy fracturadas y meteorizadas a suelos de tipo arcillo-limoso, areno-limoso. Dentro de estas áreas, se generaron o dieron inicio a la mayor cantidad de procesos de movimientos en masa (deslizamientos, caídas, flujos y movimientos complejos) y los procesos de erosión de laderas (cárcavas y surcos).

Para una fácil identificación, las áreas de muy alta susceptibilidad a los movimientos en masa están representadas en el mapa (mapa 8) con color rojo.

En áreas de muy alta susceptibilidad, se debe prohibir el desarrollo de toda infraestructura sin el conocimiento geológico detallado previo. Son necesarios realizar estudios geológicos-geotécnicos al detalle para el desarrollo y construcción de infraestructura de cualquier tipo o habilitación urbana.

## **9.2 SUSCEPTIBILIDAD A LAS INUNDACIONES Y EROSIÓN FLUVIAL**

La susceptibilidad está referida a la mayor o menor predisposición de que un evento suceda sobre determinado espacio geográfico; representa un enfoque basado en un análisis heurístico-cualitativo, donde prima el conocimiento experto e histórico del lugar que se evalúa (Zavala *et al.*, 2014). Basado en una visión retrospectiva de los eventos acontecidos en el área de estudio y partiendo del conocimiento de las características geomorfológicas e hidrológicas del valle principal y tributarios, se llega a zonificar en áreas de mayor o menor predisposición a estos procesos.

Por tanto, la susceptibilidad a inundación es la probabilidad de inundación de un área en base a las condiciones locales

del terreno donde la geomorfología es una de las variables fundamentales. La llanura de inundación teóricamente controla el flujo de agua y la actual configuración de las formas del terreno (terrazas y cauce) y la distribución de sedimentos fluviales (albardones, terrazas bajas), las que provocarán inundaciones en el futuro. Este análisis geomorfológico de formas del terreno se complementa con información de registros históricos de antiguas inundaciones y la información topográfica (pendiente del terreno).

Además, se aplica el término de “susceptibilidad a las inundaciones” a los terrenos propensos a sufrir anegamiento, encharcamiento o inundación, como producto del desborde de ríos. Sin embargo, una particularidad de la cuenca es la presencia de amplias áreas con superficies plano-onduladas o plano-depresionadas en la divisoria de aguas continentales. Esta característica permite las condiciones de anegamiento con

lluvias pluviales en áreas con pobre drenaje como son las zonas altioplánicas con presencia de bofedales.

### 9.2.1 Método de análisis y elección de variables

El análisis de la susceptibilidad a las inundaciones se basa principalmente en la caracterización geomorfológica, apoyada en la interpretación de fotografías aéreas antiguas, imágenes de satélite y trabajo en campo. Además, en función a la escala de trabajo se consideran dos variables: rangos de pendiente y unidades geomorfológicas.

Las variables usadas, su forma de obtención y los pesos asignados a cada factor se presentan en el cuadro 9.7. Asimismo, en forma independiente se asignaron diferentes pesos a las unidades diferenciadas (cuadros 9.8 y 9.9). Esto permitió zonificar el área en cuatro rangos de susceptibilidad como son: alta, media, baja y muy baja o nula (mapa 9).

**Cuadro 9.7**

**Ponderación de variables en el análisis de la susceptibilidad a las inundaciones**

Variables	Descripción	Obtención	Peso (%)
Pendiente	Rangos de pendientes de los terrenos, expresado en grados (0°-90°).	Modelo digital de elevaciones con grilla de 5 metros proporcionado por el Centro Guamán Poma de Ayala de Cusco.	70
Geomorfología	Unidades geomorfológicas de acuerdo a su amplitud de relieve, altura relativa, pendiente y asociación morfogenética.	Interpretación de fotografías aéreas antiguas, imágenes satelitales y control de campo a escala 1:10 000.	30

**Cuadro 9.8**

**Valoración del tipo de pendiente**

Rango de pendiente	Clase	Comentarios	Valor	Grado de Susceptibilidad
<1°	Llano	Áreas muy susceptibles a inundaciones.	4	
1°-5°	Suave	Áreas medianamente susceptibles a inundaciones.	3	
5°-15°	Moderada	Áreas donde no se presentan inundaciones fluviales.	2	
15°-25°	Fuerte		1	
25°-45°	Muy Fuerte		1	
>45°	Muy escarpado		1	

**Cuadro 9.9**  
**Valoración de las unidades geomorfológicas a la inundación**

Geoforma	Unidad	Subunidad	Valor	Grado de Susceptibilidad	
De carácter tectónico degradacional y erosional	Montañas	Montaña en roca volcano-sedimentaria	RM-rvs	1	
		Montaña en roca sedimentaria	RM-rs	1	
		Montaña estructural en roca sedimentaria	RME-rs	1	
	Colinas y lomadas	Colina en roca sedimentaria	RC-rs	1	
		Colina estructural en roca sedimentaria	RCE-rs	1	
		Lomada en roca intrusiva	RL-ri	1	
		Lomada en roca sedimentaria	RL-rs	1	
	Relieve Kárstico	R-k	1		
	Planicies	Altiplanicie sedimentaria	AP-s	2	
	Volcánicas	Domo volcánico	Do-v	1	
De carácter depositacional o agradacional	Piedemonte	Vertiente glacial o de gelifración	V-gl	1	
		Vertiente glacio-fluvial	V-gfl	3	
		Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	V-cd	1	
		Vertiente o piedemonte aluvio-lacustre	P-al	2	
	Planicies	Terraza aluvial	T-al	3	
Geoformas particulares	Bofedales	Bo	3		
	Laguna y cuerpos de agua	Lg/ca	4		
	Depósito antrópico	Dan	1		
Procesos de movimientos en masa	Caída		1		
	Deslizamiento		1		
	Flujo		2		
	Reptación		1		
Otros peligros geológicos/geohidrológicos	Erosión de laderas		2		
	Llanura de inundación fluvial		4		
	Hundimiento		3		

La inundación y erosión fluvial, además de influir otros factores netamente geomorfológicos y dinámicos, ocurren usualmente en terrenos de suave pendiente (< 1° y entre 1° y 5°); de ahí que estos terrenos se consideren de alta susceptibilidad a las inundaciones.

#### 9.2.2 Grados de susceptibilidad a inundación y erosión fluvial

El mapa de susceptibilidad a las inundaciones se elaboró utilizando el software ArcGis 9.3, en donde se empleó la siguiente formula:

$$SI = \frac{SGI (0,70) + SPI (0,30)}{2}$$

En donde:

- SI : Susceptibilidad a la inundación fluvial  
 SGI : Susceptibilidad del parámetro geomorfología a la inundación fluvial  
 SPI : Susceptibilidad del parámetro pendiente a la inundación fluvial

La información resultante para el análisis de la susceptibilidad a inundación y erosión fluvial que se presenta en el mapa (mapa 9) es indicativa y constituye un referente para identificar áreas en las cuales se requieren análisis más detallados que permitan caracterizar de forma más precisa la dinámica de las inundaciones.

Las características de los diferentes rangos o grados de susceptibilidad a la inundación fluvial y erosión fluvial se describen y detallan en el cuadro 9.10.

**Cuadro 9.10**  
**Grados de susceptibilidad a las inundaciones en el área de estudio**

<b>Grado</b>	<b>Características de los terrenos</b>
<b>Alto</b>	Terrenos que corresponden a las llanuras de inundación de pendiente suave; podría inundarse por desborde del río Huatanay y sus afluentes o por colmatación de sus cauces. Generalmente la pendiente es menor a 1°.
<b>Moderado</b>	Pueden ocurrir inundaciones a causa de excepcionales por acumulación de agua en áreas mal drenadas o con poca capacidad de infiltración. La pendiente varía entre 1° y 5°.
<b>Bajo</b>	Terrenos bajos adyacentes a terrazas, vertientes de suave inclinación y mal drenados que podrían ser inundados con lluvias excepcionales. Pendiente entre 5° y 15°.
<b>Muy baja o nula</b>	Corresponde a vertiente de montañas y colinas; superficies con pendiente mayores a 15°.





# CAPÍTULO X

## ÁREAS CRÍTICAS

### 10.1 GENERALIDADES

Las áreas críticas se refieren a lugares o áreas expuestas a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa, peligros geohidrológicos y otros peligros geológicos (peligro potencial de generar desastres) que pueden afectar poblaciones u obras de ingeniería.

Además, en las áreas consideradas como críticas los peligros son recurrentes y están relacionadas a intensas precipitaciones como su factor detonante.

Se recomienda considerar las áreas identificadas como críticas, en los planes o políticas sobre gestión y prevención de desastres originados por fenómenos naturales.

La información fue elaborada en base a informes técnicos, artículos periodísticos, relatos orales de los pobladores y principalmente observaciones realizadas en trabajos de campo.

### 10.2 PUNTOS CRÍTICOS IDENTIFICADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Como parte de los estudios realizados en la ciudad de Cusco, se han identificado 26 puntos críticos, de los cuales la mayor cantidad de ellos se ubican en el distrito de San Sebastián, luego en San Jerónimo, Cusco, Santiago y Wanchaq (figura 10.1).

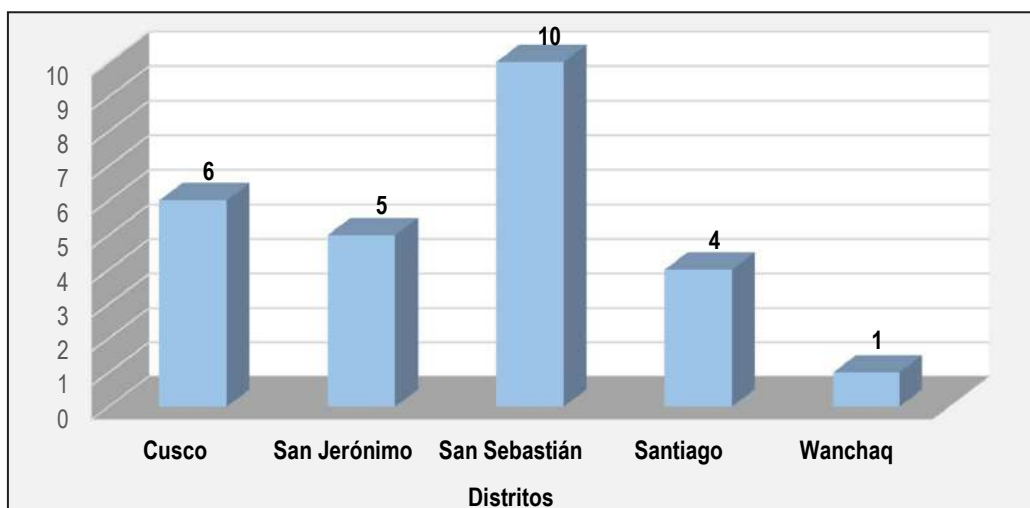


Figura 10.1 Distribución de puntos críticos por distritos pertenecientes a la ciudad del Cusco.

En los cuadros 10.1 al 10.4, se presentan resúmenes de los puntos críticos por distritos pertenecientes a la ciudad del Cusco, en las que se señala las siguientes características:

- En la primera columna, se señala el código de la zona crítica plasmado en el mapa 10 para facilitar su identificación y ubicación.
- En la segunda columna, se menciona los nombres de los sectores o áreas consideradas críticas y las coordenadas (Datum: WGS84, Proyección: UTM Zona 18 Sur).
- En la tercera columna, se describe el o los peligros.
- La cuarta columna describe un breve comentario geodinámico del área involucrada.

- En la quinta columna, se describe en forma general los elementos expuestos y/o daños ocasionados.
- Finalmente, en la quinta columna se proponen algunas recomendaciones y observaciones generales.
- También, se incluye fotografías representativas para cada zona crítica.

Cuadro 10.1

## Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de San Jerónimo

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
1	Villa Mirador (margen izquierda de la quebrada Llampahuayjo)  190715/8500313	Cárcavas - derrumbes - flujo de detritos (huaicos)	En la margen izquierda de la quebrada Llampahuayjo, al norte y noreste del sector Villa Mirador, se observa tres sectores con procesos de erosión en cárcava donde ocurren derrumbes y se generan flujos de detritos. Estos procesos se generan sobre rocas deleznales compuestas por cantos rodados soportados en matriz de gravas, arenas y limos, que se encuentran en contacto con las secuencias sedimentarias de la Formación Kayra.	Los flujos que se generen en las áreas donde se observa proceso de erosión en cárcava afectarán las viviendas ubicadas en las desembocaduras del cauce de las cárcavas (fotografía 10.1).	Apertura de canales para el pase libre de flujos. Reforestar con plantas nativas las áreas afectadas por cárcavas. Construir diques transversales en los cauces de cárcavas para reducir la erosión. Área no apta para expansión urbana.
2	Quebrada Huacotomayo - SA Andenes de Puskar  189479/8500821	Inundación y erosión fluvial	Comparando la fotografía aérea de 1962 con la imagen satelital captada por PeruSat-1 en el 2018, se observa que el cauce de la quebrada Huacotomayo fue modificado; antes, este cruzaba por los sectores Collana y Wiracocha; sin embargo, en la actualidad, cruza por el norte de los sectores indicados (figura 10.2).	En caso que se desborde el cauce de la quebrada Huacotomayo, las áreas afectadas serían las viviendas asentadas en los sectores Collana, Wiracocha y áreas aledañas a la SA Andenes de Puskar.	Limpieza permanente del cauce de quebrada. Vigilancia de las defensas ribereñas, principalmente en periodo lluvioso. Monitoreo del caudal de agua. Implementar sistemas de alerta temprana y elaborar un plan de contingencia ante inundación y flujos de detritos (huaicos).
3	Noreste de Huayllapampa (margen derecha de la quebrada Huacotomayo)  189630/8502266	Derrumbes - flujos de lodo - cárcavas	Al noreste de Huayllapampa, en la ladera ubicada en la margen derecha de la quebrada Huacotomato, se está desarrollando trabajos de corte en talud que llega hasta los 45° de pendiente para urbanizar el área. El corte de talud desestabilizará el área y podría generar derrumbes y flujos de lodo.	La ocurrencia de derrumbes y flujo podría afectar a las viviendas que se construyan en el área y a las viviendas ubicadas ladera abajo (fotografía 10.2).	Área no apta para expansión urbana. Forestar con plantas nativas la zona. Prohibir la tala de árboles.

Continuación...

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
4	Mamatunya (Quebrada Huanacahuire) 188365/8498133	Inundación y erosión fluvial	Llanura inundable con indicios de erosión fluvial hacia su margen derecha; la terraza fluvial se encuentra a una altura de 1 metro aproximadamente (fotografía 10.3). La generación de flujos de detritos en la cuenca alta puede afectar esta zona.	Pueden ser afectadas viviendas construidas dentro del valle muy cerca del cauce de la quebrada. Afecta talud inferior de trocha carrozable en la margen derecha. También puede afectar cultivos y pastizales.	Limpieza, profundización y protección de márgenes de la quebrada. No construir viviendas cerca al cauce de la quebrada.
5	Jusccapampa - Rosal del Valle Sur - Petroperú (ladrilleras) 186791/8500338	Flujos de lodo - detritos (huaicos)- cárcavas	Erosión en cárcavas intensa en la cabecera de la quebrada de disposición dendrítica, que cortan secuencias sedimentarias de la Formación San Sebastián. Se observan algunos derrumbes hacia la cara libre de las cárcavas. Los materiales caídos hacia el cauce de la cárcava pueden ser acarreados como flujos ante la presencia de fuertes lluvias (fotografía 10.4). El ancho del cauce de la quebrada principal cerca de su confluencia en el río Huatanay es de 2.9 m de ancho por 1.9 m de alto (fotografía 10.5).	Viviendas de material rústico construidas en el cauce de las cárcavas pueden ser afectadas por flujos de detritos que discurren por estas. Los flujos también pueden afectar viviendas y la planta de Petroperú construidas cerca del cauce de la quebrada, así como la vía de Evitamiento y la línea férrea.	Construcción de diques transversales en el cauce de la quebrada y sus cárcavas tributarias. No construir viviendas dentro del cauce del río y las cárcavas. Reubicar las viviendas construidas dentro de los cauces de quebradas y cárcavas.

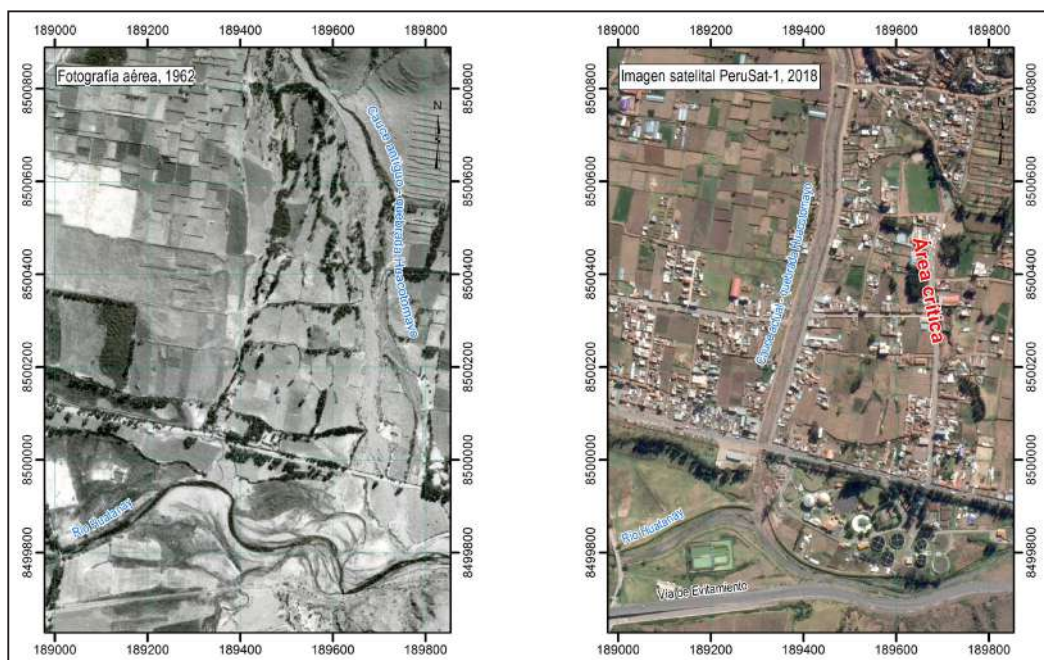


Figura 10.2 Modificación del cauce de la quebrada Huacotomayo en los años 1962 y 2018; también se observa las variaciones morfológicas del río Huatanay.



**Fotografía 10.1** Viviendas ubicadas en las desembocaduras del cauce de las cárcavas que podría ser afectada por flujos.



**Fotografía 10.2** Ladera de muy fuerte pendiente, deforestada y delimitada en lotes para construcción de viviendas donde pueden generarse derrumbes y flujos de lodo; además, se observa corte de talud escalonado. Se ubica en la margen derecha de la quebrada Huacotomayo.



**Fotografía 10.3** Vista aguas arriba de la quebrada Huanacahuire en el sector de Mamatunya, las viviendas se han asentado muy cerca al cauce de la quebrada.



**Fotografía 10.4** Confluencia de dos cárcavas por las cuales discurren flujos de lodo que pueden afectar viviendas localizadas aguas abajo.



**Fotografía 10.5** Vista aguas arriba de la quebrada S/N donde se puede apreciar la línea férrea, las instalaciones de Petroperú. También es posible observar el cauce angosto de la quebrada.

**Cuadro 10.2**

**Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de San Sebastián**

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
6	Quebrada Thuniyoc; cerro Pícol (sectores Santa María, Huaynapicol y Larapa)  186433/8503021	Cárcavas – derrumbes - deslizamientos - flujo de detritos (huaicos)	En la quebrada Thuniyoc, aflora rocas de la Formación Kayra compuesta por intercalaciones de areniscas feldespáticas y arcillitas rojas; estas rocas se encuentran alteradas, deformadas, falladas, fracturadas y diaclasadas producto de la tectónica regional (Delgado, 2011); además, presenta laderas de pendiente muy escapada (mayor a 45°) y escarpas de activación de deslizamiento que varía de 7.5 m y 12 m (fotografía 10.6). Son factores que condicionan el proceso de erosión en cárcava donde ocurren movimientos en masa de tipo derrumbes, deslizamientos, caída de rocas y flujos de detritos.	En un escenario extremo por la ocurrencia de un deslizamiento seguido de flujo, las áreas afectadas serían las viviendas de los sectores de Santa María, Huaynapicol y Larapa (fotografía 10.7).	Elaborar un plan de contingencia ante flujos de detritos. Implementar sistemas de alerta temprana. Impermeabilizar la zona afectada por escarpas de deslizamiento. Forestar las laderas afectadas por la erosión en cárcava. Construir dique transversales o disipadores de energía en el cauce de la quebrada. Limpieza periódica de las pozas de sedimentación existentes.

Continuación...

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
7	Villa Los Próceres y sector Modelo (río Pumamarca)  184747/8502070	Inundación y erosión fluvial	La superficie de la zona presenta terrenos inclinados con pendiente suave y el cauce del río es ligeramente meandriforme con ocurrencias de erosión fluvial antiguas que en la actualidad han sido controladas con trabajos de defensas ribereñas. Además, se observa que el cauce de la quebrada cruza por debajo de la avenida de la Cultura y es susceptible a obstruirse y provocar inundaciones.	Las inundaciones podrían afectar algunas las viviendas de Villa Los Próceres, sector Modelo, avenida de la Cultura y calles aledañas (figura 10.3).	Limpieza permanente del cauce de río. Vigilancia de las defensas ribereñas, principalmente en periodo lluvioso. Monitoreo del caudal de agua. Implementar sistemas de alerta temprana y plan de emergencia ante inundaciones.
8	Calles prolongación San Miguel y Carrizales (APV Santa Rosa)  183851/8502221	Cárcavas - flujo de lodo - derrumbes	En la zona, se observa dos cárcavas que cortan secuencias de la Formación San Sebastián, cuyos cauces han sido ocupados por viviendas y las calle San Miguel y Carrizales (fotografías 10.8 y 10.9). Los tramos del cauce de la cárcava que cruzan la zona urbanizada han sido limitados a canales revestidos y cubiertos de concreto. Derrumbes en la cara libre de las cárcavas.	La ocurrencia de flujos de gran volumen puede sobrepasar la capacidad de carga de los canales a los que han sido reducidos los cauces de las cárcavas. Viviendas construidas en el borde de cárcavas pueden ser afectadas por derrumbes.	Limpieza de canales ubicados dentro de las cárcavas. Realizar el aumento de sección de los canales revestidos de concreto. No construir viviendas cerca de los bordes de las cárcavas. Realizar trabajos de capacitación en prevención y gestión de riesgo de desastres con la población.
9	Calle Prolongación José Carlos Mariátegui  183033/8502687	Cárcavas - derrumbes - flujos de lodo	Cárcava profunda socavó secuencias de la Formación San Sebastián; en sus vertientes, se ha realizado la construcción de viviendas; el cauce de la quebrada ha sido canalizado por la calle de la Prolongación José Carlos Mariátegui. Derrumbes en ambas márgenes de cárcava, desde taludes subverticales (fotografía 10.10). Flujos de lodo pueden discurrir por la quebrada cuyo cauce fue convertido en canal vía.	Derrumbes por ensanchamiento de la cárcava pueden afectar viviendas ubicadas debajo y por encima de su zona de arranque. Generación de flujos de lodo pueden afectar viviendas localizadas dentro del cauce de la cárcava	Realizar trabajos de forestación de las laderas de la cárcava. Colocar diques transversales en tramos de la cárcava donde sea posible realizarlo. Evitar la construcción de viviendas cerca de los taludes verticales de la cárcava. Evitar la construcción de viviendas por encima de la cárcava. Realizar trabajos de capacitación en prevención y gestión de riesgo de desastres con la población.

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
10	Al este de Los Próceres (cabecera de quebrada s/n)  182530/8503840	Derrumbes - cárcavas - flujos de detritos (huaicos)	Cabecera de quebrada afectada por derrumbes hacia su cara libre. Compromete secuencias de la Formación Chincheros en la cabecera de la cuenca y la Formación San Sebastián en la cuenca baja. Se han realizado terrazas en las vertientes de la quebrada para habilitación urbana (fotografía 10.11). Se arroja desmonte y basura en las márgenes de la quebrada. Nuevos cárcavamientos y surcos cortan las vertientes de la quebrada. Material suelo acumulado por los derrumbes ocurridos en la quebrada, así como el desmonte y basura pueden ser acarreados como flujos de detritos que pueden afectar viviendas aguas abajo (fotografía 10.12).	Las nuevas viviendas construidas de material rustico y sus ocupantes pueden ser afectados por nuevos derrumbes que afecten las vertientes de la quebrada. La ocurrencia de flujos de detritos de gran magnitud puede afectar un centro comercial y las viviendas ubicadas aguas abajo en el tramo encauzado de la quebrada.	Realizar trabajos de reforestación de la ladera. Prohibir la construcción de viviendas en la cabecera quebrada. Prohibir el arrojado de desmonte y basura en la quebrada. Realizar trabajos permanentes de limpieza y encauzamiento de la quebrada. Realizar trabajos de capacitación en prevención y gestión de riesgo de desastres con la población.
11	Quebrada Timpoc  185871/8500547	Flujos de lodo - cárcavas	Presencia de cárcavas profundas en la cabecera de la quebrada Timpoc que compromete secuencias de la Formación San Sebastián; por estas se pueden generar y canalizar flujos de lodo. El cono de deyección de la quebrada ha sido urbanizado en su totalidad, incluso el tramo del cauce que cruza la quebrada (avenida Huanacahui) ha sido canalizada y cubierta con concreto (fotografías 10.13); la dirección de esta canalización no sigue un diseño natural, ya que se han realizado dos cambios bruscos de dirección en ángulos de 90°. La canalización tiene un ancho de 19 m y 0.90 m de alto.	Grandes volúmenes agua, así como flujos de lodo de gran magnitud que discurren por esta quebrada pueden producir desbordes que afectarían las viviendas asentadas en el cono deyección.	Limpieza y mantenimiento de tramo encauzado y cubierto de la quebrada Timpoc. Considerar darle una configuración de canalización recta a la quebrada, que no haga quiebres bruscos en su dirección. Realizar trabajos de capacitación en prevención y gestión de riesgo de desastres con la población.

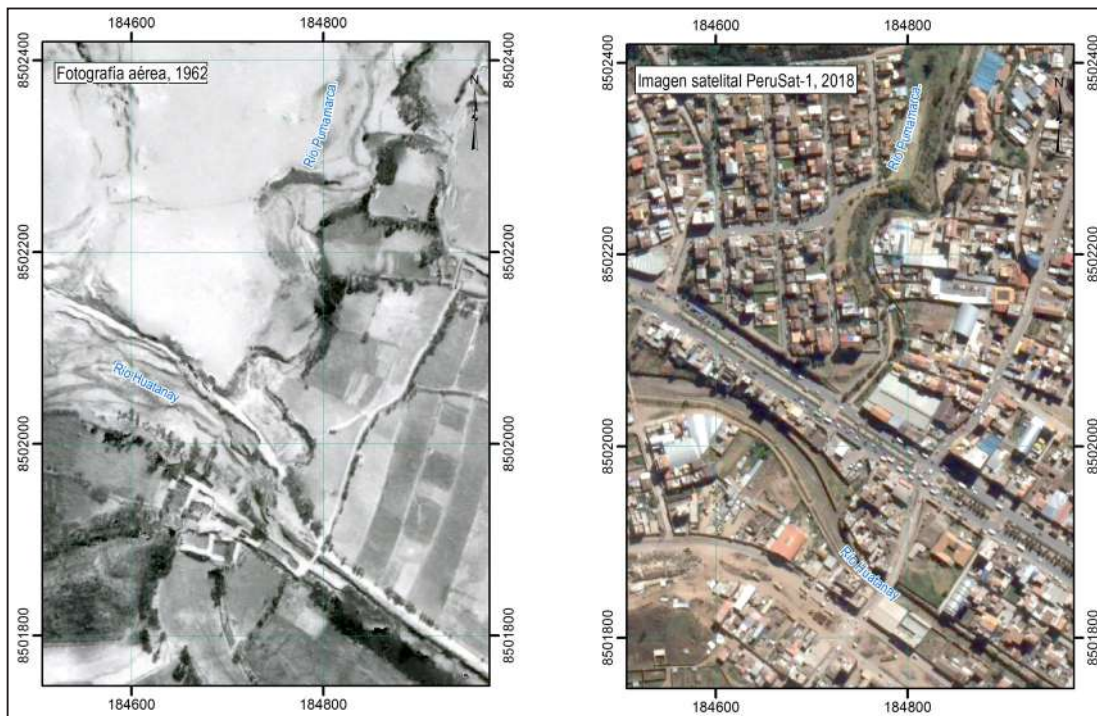


Continuación...

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
12	APV Monterrey y APV El Chaparral  184674/8500565	Flujos de lodo - cárcavas	Cárcavas que cortan secuencias sedimentarias de la Formación San Sebastián. Las cárcavas vienen siendo rellenadas con desmonte para ser ofertadas como lotes de vivienda. Se observan derrumbes en las márgenes de la cárcava de la A.P.V El Chaparral de entre 5 a 10 m de longitud. Con lluvias intensas, se pueden generar flujos de lodo que se encauzan por las cárcavas cuyos cauces han sido convertidos a calle (fotografías 10.14 y 10.15).	Viviendas construidas o que se construyan sobre los rellenos de desmonte (A.P.V. Monterrey) pueden sufrir asentamientos que afecten sus estructuras y comprometan su habitabilidad. Los flujos de lodo pueden afectar viviendas y calles construidas dentro del cauce de la cárcava.	Prohibir la habilitación urbana de cárcavas rellenadas. Reforestar las laderas superiores de la cárcava.
13	Cerro Taucaray - Quebrada La Rinconada  184081/8499549	Deslizamiento - derrumbe - cárcava - flujo de detritos (huaicos)	Ladera del cerro Taucaray ubicado en la margen izquierda de la quebrada La Rinconada se presenta cortada por surcos y cárcavas. Derrumbes activos en la cara libre de las cárcavas aportan material suelto que es acarreado posteriormente como flujo de detritos que se encausan por la quebrada La Rinconada (fotografía 10.16). Se han realizado rellenos en el cauce de la cárcava con desmonte y basura, los cuales presentan la formación de grietas y asentamientos (fotografía 10.17).	La ladera del cerro Taucaray está siendo ocupada por viviendas, lo que obliga a realizar cortes en las laderas con su consecuente desestabilización. Las viviendas construidas en esta zona están expuestas a la ocurrencia de derrumbes por ensanchamiento de las cárcavas o el cauce de la quebrada La Rinconada. Vivienda construida sobre relleno en la cárcava se encuentra inhabitable con sus paredes agrietadas.	Controlar, reducir y prohibir la ocupación de laderas de fuertes pendientes con la construcción de viviendas. Realizar trabajos de capacitación en prevención y gestión de riesgo de desastres con la población

Continuación...

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
14	Sector Virgen de Belén 183510/8500901	Flujos de lodo - cárcavas	Confluencia de dos cárcavas que corta secuencias de la Formación San Sebastián forman un curso por el cual discurren flujos de agua que pueden presentar flujos de lodo (fotografía 10.18). La quebrada es canalizada por una alcantarilla de concreto en el sector de Virgen de Belén. En el cauce de las cárcavas superiores se han construido viviendas (fotografías 10.19 y 10.20), también en los taludes de las cárcavas y por encima de los bordes de cárcavas. Se pueden producir derrumbes hacia la cara libre de la cárcava.	Flujos de lodo pueden afectar viviendas construidas dentro del cauce de las quebradas.	Reforestar la ladera superior. Limpieza de cauces de cárcavas Construcción de diques transversales en los cauces de cárcavas.
15	Av. Sacsayhuamán 182095/8500864	Cárcavas - deslizamiento rotacional	Dos cárcavas rellenas con desmante para construir la avenida Sacsayhuaman. En este punto, se viene produciendo la formación de un deslizamiento, que se manifiesta con asentamientos en la plataforma de carretera que compromete material de relleno y secuencias sedimentarias de la Formación San Sebastián. La pista pavimentada con concreto presenta grietas con aberturas de 5-10 cm, asentamiento del orden de 1 m; la plataforma se presenta ondulada, alcantarilla y rejilla de fierro deformadas (fotografías 10.21 y 10.22).	Plataforma de la avenida Sacsayhuaman destruida. Asentamientos pueden afectar viviendas y edificios cercanos a la zona del deslizamiento.	Monitoreo del deslizamiento. Realizar estudios geofísicos para determinar el plano de falla del deslizamiento, el material comprometido y el nivel freático, con lo cual se den las mejores alternativas de solución al problema.



**Figura 10.3** Modificación realizadas a los cauces de los ríos Pumamarca y Huatanay, vista en la comparación de fotografía aérea de 1962 y la imagen satelital del 2018; también se observa los elementos expuestos.



**Fotografía 10.6** Escarpas de activación de deslizamiento que varían de 7.5 y 12 m en el cerro Pícol.



**Fotografía 10.7** Viviendas de los sectores de Santa María, Huaynapicol y Larapa que podrían ser afectadas en caso de ocurrencia de flujos de detritos por deslizamiento.



**Fotografía 10.8** Cárcava encauzada por la calle San Miguel con un canal revestido de concreto de sección angosta.



**Fotografía 10.9** Cárcava encauzada por la calle Carrizales por un canal revestido de concreto y cubierto por la vereda



**Fotografía 10.10** Derrumbe ocurrido en la margen derecha de cárcava que afectó paredes de ladrillo y concreto de vivienda construida al pie de las márgenes.



**Fotografía 10.11** Cabecera de quebrada S/N, donde se puede observar las terrazas realizadas en las vertientes para poder construir viviendas; también se observa el desmonte y basura arrojada en la quebrada.



**Fotografía 10.12** Vista aguas arriba de la quebrada S/N, tomada desde la avenida Cultura Prolongación; se puede ver los trabajos de encauzamiento realizados con muros de concreto.



**Fotografía 10.13** Vista de parte del tramo encauzado, cubierto y desviado de la quebrada Timpoq.



**Fotografía 10.14** Vista de aguas abajo de cárcava ocupada por viviendas de la A.P.V. El Chaparral; se observan pequeños derrumbes en la parte alta de la cárcava.



**Fotografía 10.15** Cárcava en la A.P.V. Monterrey relleno con desmonte que viene siendo ofertada como lotes para vivienda.



**Fotografía 10.16** Ladera del cerro Taucaray en la margen izquierda de la quebrada La Rinconada cortada por cárcavas y ocupada por nuevas viviendas que para ser construidas se realizan cortes en la ladera que desestabilizan el terreno.





**Fotografía 10.17** Asentamiento en rellenos de desmonte y basura colocados en una de las cárcavas; se observa los agrietamientos del terreno y en las paredes de la vivienda.



**Fotografía 10.18** Vista aguas abajo de curso de quebrada reducido, con viviendas construidas muy cerca.



**Fotografía 10.19** Vista aguas arriba donde se puede apreciar la ocupación total del cauce de una cárcava con viviendas de material noble.



**Fotografía 10.20** Toma aguas abajo de cárcava que viene siendo ocupada progresivamente por viviendas de material noble.



**Fotografía 10.21** Vistas de agrietamientos en la plataforma de carretera.



**Fotografía 10.22** Se observa múltiples agrietamientos, asentamientos y endulzamientos en la plataforma de carretera.

Cuadro 10.3

## Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de Cusco

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
16	APV Villa, APV Los Licenciados, Los Incas (Quebrada Shihuilla) 181098/8503318	Deslizamiento - cárcavas - derrumbe - inundación y erosión fluvial - flujos de detritos (huaicos)	Deslizamiento activo ubicado en la margen izquierda de la quebrada Shihuilla a unos 300 m de la zona poblada, ubicada aguas abajo; compromete secuencias de la Formación San Sebastián (fotografía 10.23). Carcavamiento profundo; se han realizado trabajos de reforestación de las laderas. Zona de derrumbes en acantilado de inclinación vertical a subvertical, que compromete secuencias de la Formación San Sebastián (areniscas, limolitas, arcillitas). El material caído se acumula al pie del talud superior. Se han colocado muros contención de gaviones en el pie del acantilado, también se ha cubierto el acantilado con geomembranas para controlar las caídas (fotografías 10.24 y 10.25). Erosión fluvial en ambas márgenes de la quebrada (fotografía 10.26). El cauce de la quebrada Shihuilla se reduce cuando ingresa a la zona poblada por los trabajos de encauzamiento que se le han realizado, al parecer desde tiempos de los Incas. Por la quebrada pueden discurrir flujos.	Un desplazamiento violento del cuerpo del deslizamiento puede represar la quebrada Shihuilla, lo cual genera un embalse y posterior formación de flujo de detritos por rotura del dique de embalse; estos procesos pueden comprometer la seguridad física de viviendas y personas ubicadas aguas abajo. Nuevos derrumbes pueden afectar vivienda construidas al pie de acantilados, así como a sus ocupantes. Viviendas construidas por detrás del borde del acantilado y en áreas de menor inclinación del acantilado pueden ser afectadas por asentamientos de terreno. Erosión fluvial produce la pérdida de terrenos y afecta muros de encauzamiento.	Realizar el monitoreo constante del deslizamiento. Sellado de grietas abiertas en el deslizamiento. Ampliar los trabajos de reforestación de las laderas. Construcción de diques transversales en el curso de cárcavas. Limpieza del Cauce de la quebrada, evitar el arrojado de basura y desmonte. Reparación y levantamiento de muros de encauzamiento. Es conveniente que no existan viviendas asentadas cerca del cauce de la quebrada. Realizar trabajos de capacitación en prevención y gestión de riesgo de desastres con la población.

Continuación...

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
17	Ríos Saphy, Chacán y Qeshuaray 176663/8504594	Flujos de detritos (huaicos) - derrumbes - deslizamientos - inundaciones	El río Saphy se origina por la unión de los ríos Qeshuaray y Chacán; el mismo que desemboca al río Huatanay por debajo del centro histórico de la ciudad del Cusco (fotografía 10.27). En los taludes de los 3 ríos se observa múltiples ocurrencias de derrumbes y deslizamientos (antiguos y activos) que generan flujos de detrito y lodo en algunos casos (fotografía 10.28). En la margen derecha del río Chacán, al norte del sector Huayttanccapampa, se observa un deslizamiento rotacional activo sobre depósitos sedimentarios de la Formación Maras (fotografía 10.29). Además, según las conclusiones de Albinez y Ancco (2018) en la quebrada Chakán, resalta que se identificó 72 eventos, de los cuales 55 corresponden a deslizamientos (77.46 %), 14 caídas (19.72 %) y 3 flujos (2.82 %).	Los flujos podrían afectar el centro histórico de la ciudad del Cusco tal como se demuestra en la simulación desarrolladas por Oviedo (2009).	Elaborar un plan de contingencia ante flujos de detritos. Implementar sistemas de alerta temprana. Forestar las laderas afectadas por la erosión en cárcava y derrumbes. Limpieza periódica del cauce del río Saphy. Monitoreo del deslizamiento ubicado en la margen derecha del río Marán con equipos de estación.
18	Ríos Saphy, Chacán y Qeshuaray 176663/8504594	Derrumbes - flujos de lodo	Deslizamiento rotacional activo en el sector de la Asociación Provivienda Camino Real se desarrolló sobre depósitos antropogénicos (fotografía 10.30). El factor detonante principal fue la saturación del suelo (fotografía 10.31) con agua proveniente de los manantiales ubicados en el talud superior del deslizamiento producto de las precipitaciones pluviales.	Afecta las viviendas ubicadas en el lado derecho del deslizamiento (fotografía 10.32). Podría afectar las vías de acceso ubicadas a pocos metros de la cabeza de deslizamiento.	Captar las aguas de todos los manantiales existentes en el área y drenarlas a la quebrada. Construir canales de drenaje para captar las aguas pluviales. Revisar el sistema de alcantarillado que cruza por el cuerpo del deslizamiento. Reconstruir viviendas afectadas.

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
19	Quebrada Ayahuayco (Av. Ayahuayco) 176357/8504308	Derrumbes - flujos de lodo	Quebrada con laderas de pendiente muy fuerte a escarpada (mayor a 25°) compuesta de limolitas, limoarcillitas y conglomerados semiconsolidados de la Formación San Sebastián; son los factores principales que condicionan la ocurrencia de derrumbes (fotografía 10.33). En la quebrada también se podría generar flujos de lodo.	Según los medios de comunicación, en el 2011 a causa de un derrumbe, fallecieron 5 personas y hubo 9 heridos (fotografía 10.34). En la actualidad, la quebrada por las condiciones geológicas que presenta sigue siendo inestable y podría afectar las viviendas asentadas en el pie de las laderas y en la cresta (fotografía 10.35). Los flujos de lodo que se generen podrían afectar el canal de aguas pluviales y la avenida Ayahuayco.	Reubicar las viviendas asentadas en las laderas y quebradas donde la pendiente del mayor o igual a 45°. Construir sistemas de captación de aguas pluviales. Reforestar las laderas con plantas nativas. Estabilizar los taludes. Limpieza permanente de los canales de aguas pluviales para evitar obstrucción y desborde. Implementar sistemas de alerta temprana.
20	Quebrada Soltero Huayco (El Calvario) 175708/8503664	Derrumbes - flujos de detritos (huaicos) - caída de rocas	Las laderas de la quebrada están compuestas por la intercalación de rocas muy fracturadas de diferente competencia perteneciente a las formaciones Puquín, Quilque, Chila y Kayra (arcillitas, microconglomerados y areniscas) afectadas por procesos de erosión en cárcava y surco (fotografía 10.36); además, la pendiente es muy fuerte (varía entre 25° y 45°) con sectores escarpados (mayor a 45°); son los factores principales que condicionan las ocurrencias de derrumbes, caída de rocas y flujos de detritos. En las laderas de la quebrada, se observa múltiples ocurrencias de derrumbes recientes y antiguos.	Los derrumbes podrían afectar a las viviendas asentadas en las laderas y en el fondo de la quebrada (fotografía 10.37); también, podría afectar los vehículos que circulan por la carretera de la avenida Antonio Lorena (fotografía 10.38). Los flujos también podrían afectar a las viviendas asentadas en el borde del cauce de la quebrada y la avenida Antonio Lorena.	Reubicar las viviendas del fondo de la quebrada y de las laderas inestables. Prohibir la construcción de viviendas en laderas inestables. Reforestar las laderas con plantas nativas de poco peso. Continuar con la construcción de muros de contención para estabilizar el talud de la carretera. Apertura canal para pase de flujos de detritos (huaicos). Implementar sistemas de alerta temprana.

Continuación...

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
21	Quebrada Sipaspujio (Infernillo, Sipasmayo, etc.) 175669/8503022	Derrumbes - flujos de detritos (huaicos)	Ambas laderas de la quebrada están compuestas por la intercalación de rocas muy fracturadas de diferente competencia pertenecientes a las formaciones Puquín, Quilque, Chila (intercalación de arcillitas, areniscas y microconglomerados); además, la pendiente es muy fuerte (varía entre 25° y 45°) con sectores escarpados (mayor a 45°); son los factores principales que condicionan las ocurrencias de derrumbes, caída de rocas y flujos de detritos (fotografía 10.39). En las laderas de la quebrada y sus afluentes, se observa múltiples ocurrencias de derrumbes recientes y antiguos (figura 10.4). Según versión de un representante de la Municipalidad de Cusco, en el 2010, el canal construido en el cauce de la quebrada se colmató y causó inundación.	Los derrumbes podrían afectar a las viviendas asentadas en las laderas y en el fondo de la quebrada (fotografía 10.40). También podría afectar la plataforma de carretera de la avenida Antonio Lorena donde se observa agrietamiento y desplazamiento en el talud inferior (fotografía 10.41). Los flujos de detritos (huaicos) podrían afectar las viviendas asentadas en el cauce y en la desembocadura de la quebrada Sipaspujio.	Estabilizar las laderas. Prohibir la construcción de viviendas en laderas inestables. Reforestar las laderas con plantas nativas de poco peso. Aperturar canal para pase de flujos de detritos (huaicos) en la quebrada Sipaspujio. En la quebrada Infernillo, afluente de la quebrada Sipaspujio; eliminar obstáculos (fotografía 10.42) y aperturar canal para el pase libre de flujos. Implementar sistemas de alerta temprana.



Figura 10.4 Imagen satelital de la Quebrada Sipaspujio donde se observa múltiples ocurrencias de movimientos en masa y viviendas asentadas en las laderas y en el fondo de la quebrada. Fuente: Google Earth Pro.



**Fotografía 10.23** Deslizamiento activo y procesos de erosión en cárcava en la margen izquierda de la quebrada Shihuila.



**Fotografía 10.24** Acantilado vertical en la margen izquierda de la quebrada Shihuila; se observan viviendas construidas en el borde del acantilado.





**Fotografía 10.25** Acantilado vertical a subvertical en la margen izquierda de la quebrada Shihuilla; se observan viviendas construidas por encima del borde del acantilado y en el pie.



**Fotografía 10.26** Procesos de erosión fluvial en ambas márgenes de la quebrada Shihuilla que podría afectar las viviendas.



**Fotografía 10.27** Cauce del río Huatanay que pasa por debajo del centro histórico de la ciudad del Cusco.



**Fotografía 10.28** Flujos de detrito y lodo que se generan producto de derrumbes detonados en temporada de lluvias.



**Fotografía 10.29** Deslizamiento rotacional activo sobre depósitos sedimentarios de la Formación Maras; se ubica en la margen derecha del río Chacán, norte del sector Huayttanccapampa.



**Fotografía 10.30** Escarpa de deslizamiento rotacional activo ubicado en la Asociación Provienda Camino Real.



**Fotografía 10.31** Saturación del suelo en el cuerpo del deslizamiento ubicado en la Asociación Provienda Camino Real. También, se observa buzón de sistema de alcantarillado que cruza el cuerpo del deslizamiento.



**Fotografía 10.32** Vivienda afectada en el lado derecho del deslizamiento; se observa fisuras en las paredes.



**Fotografía 10.33** Laderas inestables ubicadas en la quebrada Ayahuayco.



**Fotografía 10.34** Evidencia de derrumbes donde fallecieron personas en el 2011.



Fotografía 10.35 Viviendas asentadas en el pie y en la cresta de ladera inestable.



Fotografía 10.36 Parte alta de la quebrada Soltero Huayco afectada por procesos de erosión en cárcava y surcos.



**Fotografía 10.37** Viviendas asentadas en las laderas y en el fondo de la quebrada.

Foto: Google.



**Fotografía 10.38** Caída de rocas y derrumbe en talud de la carretera de la avenida Antonio Lorena. También, se observa muros de contención construidos en base a gaviones y talud cubierto con geomalla.



Fotografía 10.39 Vestigios de ocurrencias de derrumbe en ambas laderas de la quebrada Sipaspujo.



Fotografía 10.40 Viviendas asentadas en ladera de la quebrada Sipaspujo.





**Fotografía 10.41** Talud inferior de la carretera de la avenida Antonio Lorena donde se observa escarpa de deslizamiento.



**Fotografía 10.42** Quebrada Infiernillo, con obstáculo en su cauce para el libre pase de flujos.

Cuadro 10.4

## Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de Santiago

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
22	Quebrada Saqramayo 176094/8502742	Flujo de detritos (huaicos) - derrumbes	Geológicamente, la quebrada se desarrolla sobre rocas sedimentarias, areniscas fracturadas y arcillitas con yeso pertenecientes a la Formación Puquín, arcillitas deleznales de color verde, amarillentas, microconglomerados y arenisca perteneciente a la formación Quilque, arcillitas deleznales con yesos y areniscas pertenecientes a la formación Chilca (Castillo & Ojeda, 2019). Los peligros presentes corresponden a derrumbes recientes y deslizamientos antiguos; en la quebrada, también se podría generar flujos de detritos o huaicos. Para estabilizar parte de las laderas de la quebrada existen trabajos de forestación y obras con gaviones (fotografía 10.43)	Los derrumbes podrían afectar a las viviendas asentadas en las laderas de la quebrada. Los flujos de detritos (huaicos) podrían afectar las viviendas asentadas en el cauce y en la desembocadura de la quebrada (fotografía 10.44). En la plataforma de la carretera construida sobre depósitos antropógenos, se observa agrietamientos (fotografía 10.45).	Estabilidad las laderas. Prohibir la construcción de viviendas en laderas inestables. Forestar las laderas con plantas nativas de poco peso. Apertura canal para pase de flujos de detritos (huaicos). Implementar sistemas de alerta ante flujos. Monitoreo permanente con equipos de alta precisión (GPS Diferencial) de los taludes de la carretera que cruza la quebrada Saqramayo.
23	Quebrada imachachuayniyoc 176372/8502298	Flujo de detritos (huaicos) - derrumbes	Geológicamente, la quebrada se desarrolla sobre rocas sedimentarias, areniscas fracturadas y arcillitas de la Formación Kayra. En las laderas de las quebradas, se observa ocurrencia de derrumbes recientes y antiguos cuyos depósitos podrían generar flujos de detritos o huaicos; también, se observa material de desmonte en el cauce de la quebrada (fotografía 10.46).	Los derrumbes podrían afectar a las viviendas asentadas en las laderas de la quebrada. Los flujos de detritos (huaicos) podrían afectar las viviendas asentadas en el cauce y en la desembocadura de la quebrada Ccorimachachuayniyoc (fotografía 10.47).	Estabilidad las laderas. Prohibir la construcción de viviendas en laderas inestables. Forestar las laderas con plantas nativas de poco peso. Aperturar canal para pase de flujos de detritos (huaicos). Implementar sistemas de alerta temprana. Monitoreo permanente.
24	Av. J. M. Arguedas (sector Tinco) 177559/8501470	Cárcavas - derrumbes	El proceso de cárcava se desarrolla sobre rocas sedimentarias intensamente fracturadas compuestos de areniscas intercalas con niveles finos de arenisca fina perteneciente a la Formación Kayra (fotografía 10.48). Dentro de la cárcava ocurren pequeños derrumbes discontinuos y escarpas irregulares.	La continuidad de la erosión en cárcava afectará las viviendas construidas en sus bordes.	Reubicar las viviendas construidas en los bordes de la cárcava (fotografía 10.49). Impermeabilizar los taludes de la cárcava. Construir sistema de drenaje.

Continuación...

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
25	Huamancharpa (ríos Cachona y Huatanay) 175685/8498357	Deslizamiento - flujo de detritos (huaicos) - inundación	<p>El deslizamiento de Huamancharpa se localiza a 2 km al sur de la ciudad de Cusco en la margen izquierda del río Cachona (Huancaro). El evento se reactivó el 22 de enero de 1982 a las 6:00 a.m. Tiene una escarpa semi circular y superficie de rotura planar (fotografía 10.50); ancho promedio de 400 m y un desnivel entre la corona a la punta de 290 m y pendiente promedio menor a 45°. Litológicamente, está compuesto por secuencias de areniscas y arcillitas con estratos que se inclinan a favor de la ladera.</p> <p>La reactivación de 1982 represó temporalmente el río Huancaro; luego se embalsó en forma naturalmente sin generar flujos de detritos violentos que afecten a la población cusqueña. El detonante del evento fue las precipitaciones pluviales que saturaron los terrenos.</p> <p>En el 2003, el deslizamiento volvió a reactivarse y a represar temporalmente el río Huancaro.</p> <p>En la actualidad, se considera que el deslizamiento de Huamancharpa continúa activo. Además, en la masa desplazada se observa procesos de erosión en cárcava y ocurrencias de derrumbes (fotografía 10.51).</p>	<p>En caso de represamiento del río con mucho volumen de material y posterior desembalse violento, podría afectar seriamente a las viviendas localizadas aguas abajo del río.</p>	<p>Monitoreo del deslizamiento constantemente con equipos de alta precisión (GPS Diferencial). Limpieza periódica del cauce del río; de esta manera, se podrá prevenir la formación de embalses que puedan generar desbordes.</p> <p>Realizar el estudio costo-beneficio de la construcción de una galería de desagüe para evacuar agua y evitar la formación de embalses; de producirse un represamiento por el material desplazado del deslizamiento de Huamancharpa, esta galería debe ser construida en la ladera del frente del deslizamiento (margen derecha), cuya entrada debe localizarse aguas arriba del deslizamiento y la salida aguas abajo, a buena distancia del deslizamiento.</p> <p>Implementar sistemas de alerta y monitoreo que le permita a la población estar informada de la actividad del deslizamiento.</p> <p>Implementar planes de emergencia y rutas de evacuación hacia zonas seguras.</p>

Cuadro 10.5

## Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de Wanchaq

Código en mapa	Paraje o sector / Coordenadas UTM	Peligro geológico	Comentario geodinámico	Elementos expuestos y/o daños	Recomendaciones generales
26	Aeropuerto Alejandro Velasco Astete (margen izquierdo del río Huatanay)	Inundación fluvial y erosión fluvial.	En el sector, tal como se muestra en la comparación entre la fotografía aérea de 1962 y la imagen satelital de PeruSat-1 del 2018, el cauce del río Huatanay fue modificado (figura 10.5). La pendiente del terreno se encuentra ligeramente inclinada al este, con pendiente suave que varía entre 1° a 5°. Actualmente, el río Huatanay se encuentra canalizado en base a muros compuestos por gaviones que podrían ser erosionados con el paso de los años; además, el río al rebasar su capacidad podría recuperar su cauce antiguo y generar inundaciones.	En caso de ocurrir la inundación fluvial, afectaría las instalaciones del Aeropuerto Alejandro Velasco Astete y vivienda ubicadas en la margen izquierda del río Huatanay.	Elaborar un plan de contingencia ante inundación fluvial. Implementar sistemas de alerta temprana. Realizar trabajo de limpieza y descolmatación periódica del río Huatanay.



Fotografía 10.43 Vista aguas arriba de la quebrada Saqramayo con trabajos de estabilización.



**Fotografía 10.44** Viviendas asentadas en la ladera y el cauce de la quebrada.



**Fotografía 10.45** Grietas en la plataforma de la carretera que cruza la quebrada Saqramayo construida sobre depósito antropógeno.



**Fotografía 10.46** Depósito de desmonte en la quebrada Ccorimachachuayniyoc donde podría generarse flujos.

Fuente: Google.



**Fotografía 10.47** Cauce de la quebrada Ccorimachachuayniyoc.

Fuente: Google.



**Fotografía 10.48** Proceso de erosión en cárcava en desarrollo ubicado en el sector de Tinco.



**Fotografía 10.49** Viviendas asentadas en los bordes de la erosión en cárcava en el sector de Tinco.

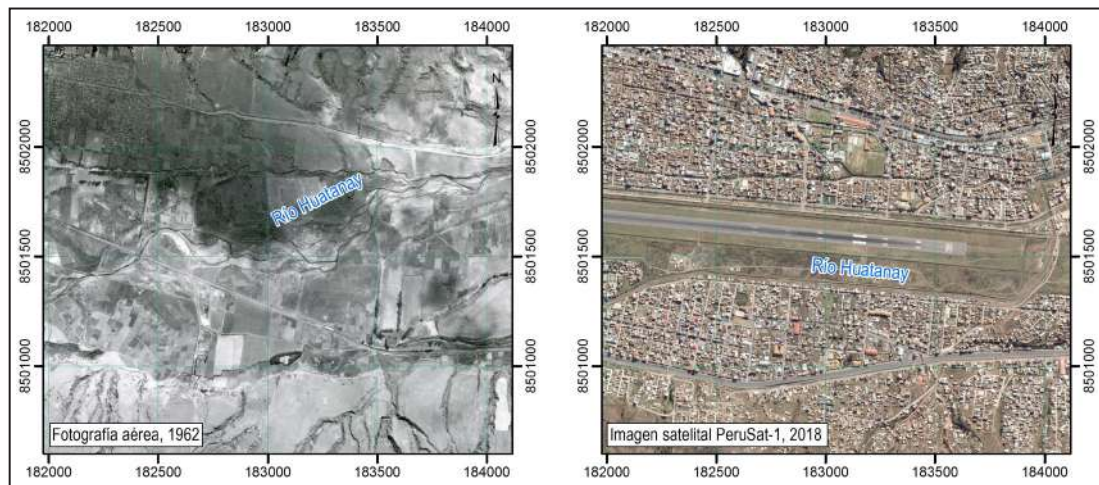


**Fotografía 10.50** Escarpa principal del deslizamiento Humancharpa donde se observa la superficie de rotura planar.



**Fotografía 10.51** Depósito de deslizamiento Huamancharpa afectado por erosión en cárcava y derrumbes.





**Figura 10.5** Modificación del cauce del río Huatanay para la construcción del aeropuerto vista en la fotografía aérea de 1962 y en la imagen satelital de PeruSat-1 del 2018.



# CAPÍTULO XI

## ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE PROBLEMAS DE MOVIMIENTOS EN MASA

### 11.1 GENERALIDADES

Los factores que influyen en la inestabilidad de las laderas se pueden clasificar como naturales y antrópicos; entonces, se puede decir que la estabilidad de las laderas está condicionada por muchos factores intrínsecos y extrínsecos, los cuales, al ser modificados o alterados, influyen directamente en la seguridad de las laderas. Es por ello que se requiere medidas correctivas y/o preventivas.

Este capítulo fue desarrollado principalmente con información publicada en el Estudio de riesgos Geológicos del Perú, Franja N° 1 (Ingemmet, 2000), así como de otras referencias bibliográficas.

El objetivo de este capítulo es facilitar propuestas generales de solución para el área de estudio, con la finalidad de minimizar las ocurrencias de deslizamientos, derrumbes, caídas de rocas, flujos, procesos de erosiones de laderas, entre otros, y también para evitar la generación de nuevas ocurrencias.

### 11.2 MEDIDAS PREVENTIVAS, CORRECTIVAS Y DE MITIGACIÓN

#### 11.2.1 Medidas correctivas para deslizamientos, derrumbes y caídas de rocas

Se pueden realizar en: 1) taludes en construcción; 2) laderas que tienen pendientes fuertes y es necesaria su estabilización; 3) para estabilizar fenómenos de rotura, sobre todo aquellos que pueden trabajarse a nivel de construcción. Para definir la solución ideal, es necesario valorar diferentes parámetros tanto de tipo constructivo y económico.

##### A) Corrección por modificación de la geometría del talud

Cuando un talud es inestable, se puede modificar su geometría con la finalidad de obtener una nueva disposición que resulte estable. Esta modificación busca lograr al menos uno de los dos efectos siguientes:

- Disminuir las fuerzas que tienden al movimiento de la masa.
- Aumentar la resistencia al corte del terreno mediante el incremento de las tensiones normales en zonas convenientes de la superficie de rotura.

Lo primero se consigue reduciendo el volumen de la parte superior del deslizamiento y lo segundo incrementando el volumen en el pie del mismo.

Las acciones que pueden realizarse sobre la geometría de un talud para mejorar su estabilidad son las siguientes:

**Eliminar la masa inestable o potencialmente inestable.** Esta es una solución drástica que se aplica en casos extremos, comprobando que la nueva configuración no es inestable.

**Eliminar el material de la parte superior (descabezamiento) de la masa potencialmente deslizante.** En esta área, el peso del material contribuye más al deslizamiento y presenta una menor resistencia, dado que la parte superior de la superficie de deslizamiento presenta una máxima inclinación. Por ello, la eliminación de escasas cantidades de material produce aumentos importantes del factor de seguridad.

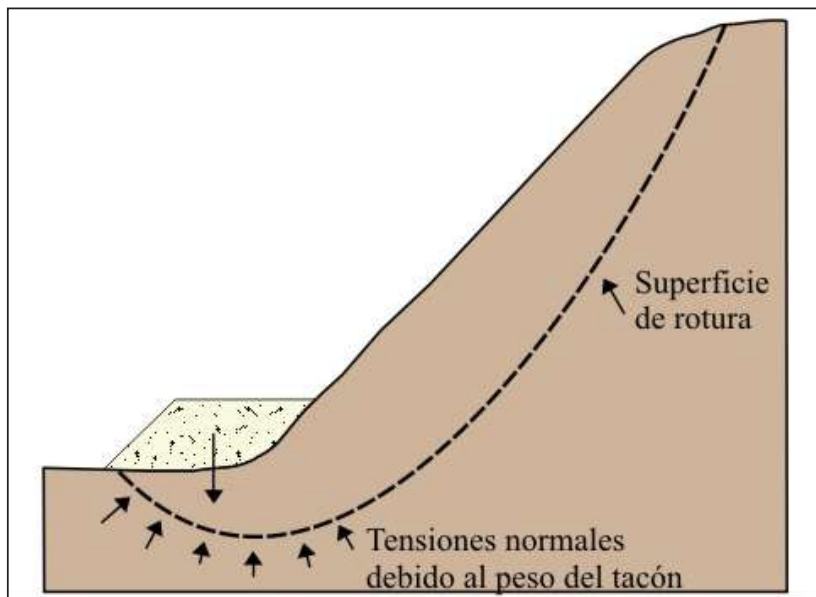
**Construcción de escolleras en el pie del talud.** Puede efectuarse en combinación con el descabezamiento del talud o como medida independiente (figuras 11.1 y 11.2).

El peso de la escollera en el pie del talud se traduce en un aumento de las tensiones normales en la parte baja de la superficie del deslizamiento, lo que aumenta su resistencia. Este aumento depende del ángulo de rozamiento interno en la parte inferior de la superficie del deslizamiento. Si es elevado, el deslizamiento puede producirse por el pie y es más ventajoso construir la escollera encima del pie del talud, lo que puede estabilizar grandes masas deslizantes mediante pesos relativamente pequeños de escollera. Si el ángulo de rozamiento interno es bajo, el deslizamiento suele ocurrir por la base y es también posible colocar el relleno frente al pie del

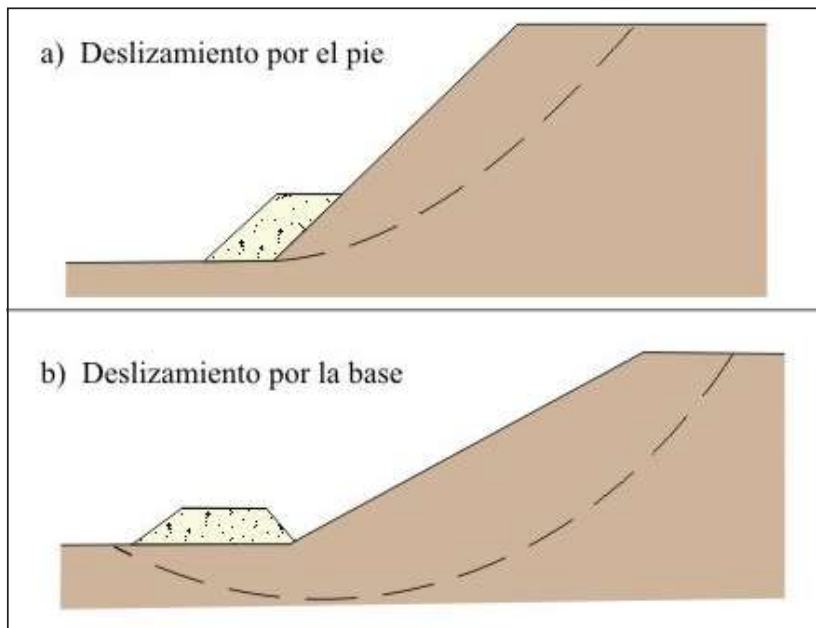
talud. En cualquier caso, el peso propio de la escollera supone un aumento del momento estabilizador frente a la rotura. Por último, cuando la línea de rotura se ve forzada a atravesar la propia escollera, esta se comporta además como un elemento resistente propiamente dicho.

Algo que debe tomarse en cuenta constantemente es que la base del relleno debe ser siempre drenante, pues en caso

contrario su efecto estabilizador puede verse disminuido, especialmente si el relleno se apoya sobre material arcilloso. Puede ser necesario colocar un material con funciones de filtro entre el relleno drenante y el material del talud; para ello puede recurrirse al empleo de membranas geotextiles.



**Figura 11.1** Efecto de una escollera sobre la resistencia del terreno.  
Tomado de Ingemmet, 2000.



**Figura 11.2** Colocación de escollera.  
Tomado de Ingemmet, 2000.

**Tratamiento de taludes con escalonamiento (figura 11.3).**

Es una medida que puede emplearse tanto cuando un talud está comprometido por un deslizamiento o antes de que este se produzca. Su uso es aconsejable porque facilita el proceso constructivo y las operaciones del talud, retiene las caídas de fragmentos de roca —indeseables en todos los casos— y si se coloca en ellos zanjas de drenaje entonces se evacuará las

aguas de escorrentía, lo cual disminuye su efecto erosivo y el aumento de las presiones intersticiales.

Este escalonamiento se suele disponer en suelos y en taludes de roca, sobre todo cuando es fácilmente meteorizable y cuando es importante evitar las caídas de fragmentos de roca, como es el caso de los taludes ubicados junto a vías de transporte.

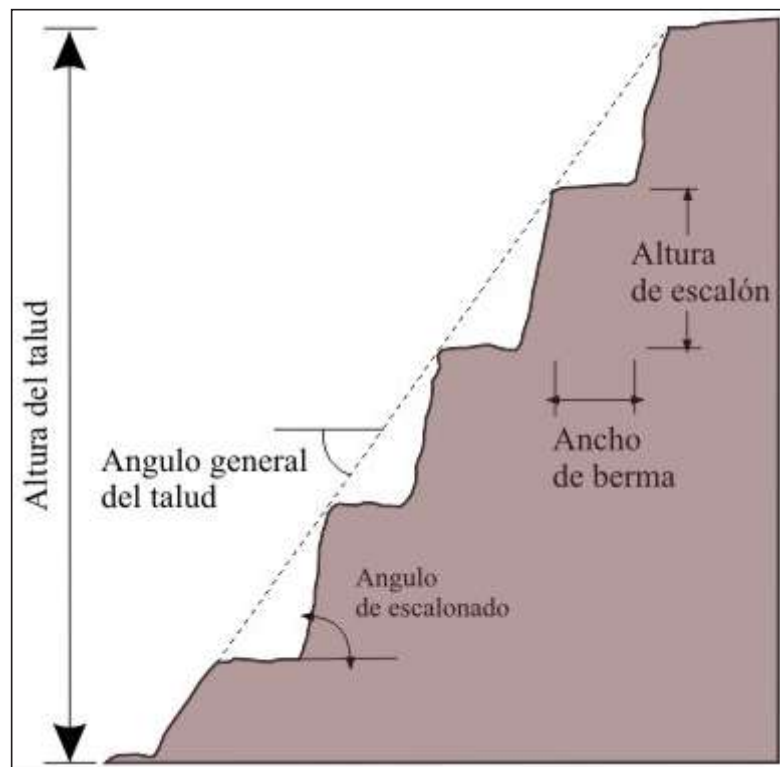


Figura 11.3 Esquema de un talud con bermas intermedias.

Tomado de Ingemmet, 2000.

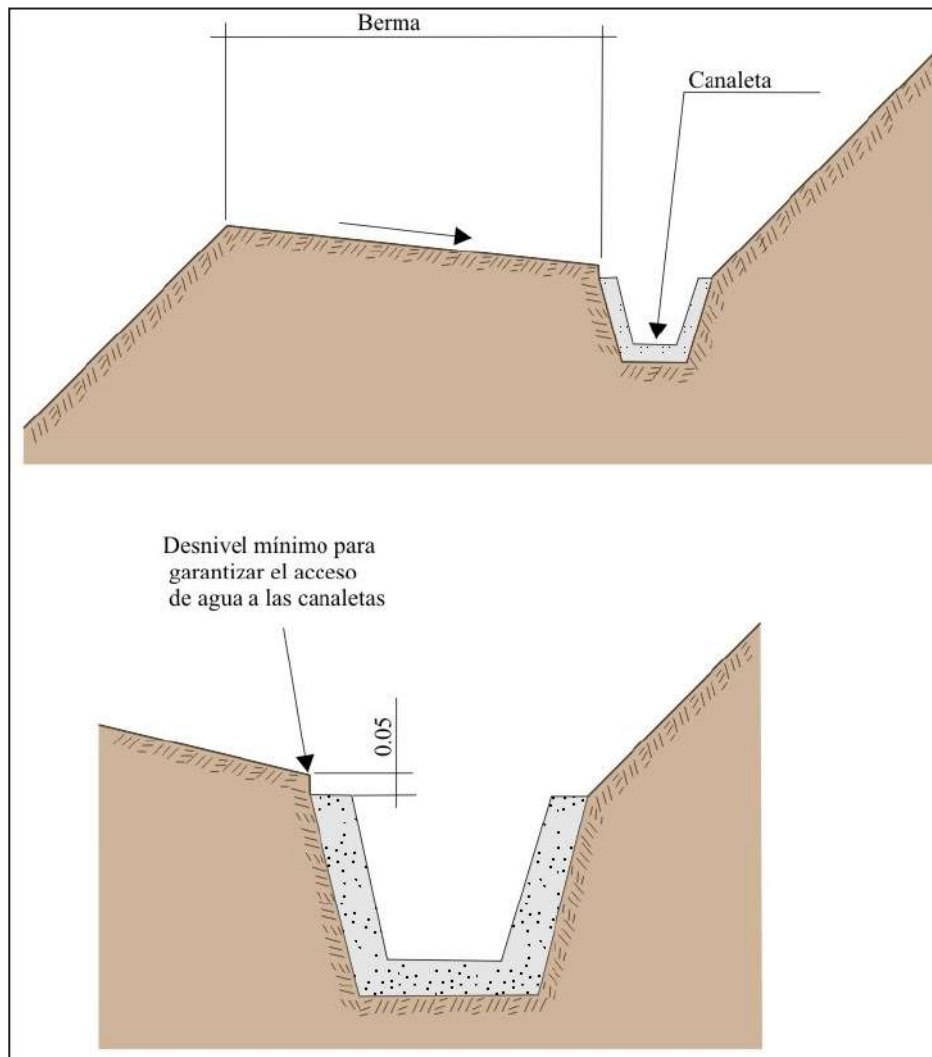
**B) Corrección por drenaje**

Este tipo de corrección se efectúa con el objeto de reducir las presiones intersticiales que actúan sobre la superficie de deslizamiento (sea potencial o existente), para aumentar su resistencia y disminuir el peso total, y por tanto las fuerzas desestabilizadoras.

Las medidas de drenaje son de 2 tipos:

**Drenaje superficial.** Su fin es recoger las aguas superficiales o aquellas recogidas por los drenajes profundos y evacuarlas lejos del talud, lo que evita su infiltración (figura 11.4).

Las aguas de escorrentía se evacúan por medio de zanjas de drenaje, impermeabilizadas o no y aproximadamente paralelas al talud. Estas deben situarse a poca distancia de la cresta del talud y detrás de la misma, de manera que eviten la llegada del agua a las grietas de tensión que podrían existir o no. El cálculo de la sección debe hacerse con los métodos hidrológicos.



**Figura 11.4** Detalle de una canaleta de drenaje superficial.

Tomado de Ingemmet, 2000.

Es importante el mantenimiento periódico de las zanjas, antes y durante la época de las precipitaciones pluviales.

**Drenaje profundo.** La finalidad es deprimir el nivel freático con las consiguientes disminuciones de las presiones intersticiales. Para su uso es necesario conocer previamente las características hidrogeológicas del terreno (figura 11.5).

Se clasifican en los siguientes grupos:

**b.1) Drenes horizontales.** Se perforan desde la superficie del talud, llamados también drenes californianos. Consisten en taladros de pequeño diámetro, aproximadamente horizontales entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ , que parten de la superficie del talud y que están generalmente contenidos en una sección transversal del mismo (figuras 11.5 y 11.6).

Sus ventajas son:

- Su instalación es rápida y sencilla.
- El drenaje se realiza por gravedad.
- Requieren poco mantenimiento.
- Es un sistema flexible que puede readaptarse a la geología del área.

Sus desventajas son:

- Su área de influencia es limitada y menor que en el caso de otros métodos de drenaje profundo.
- La seguridad del talud hasta su instalación puede ser precaria.

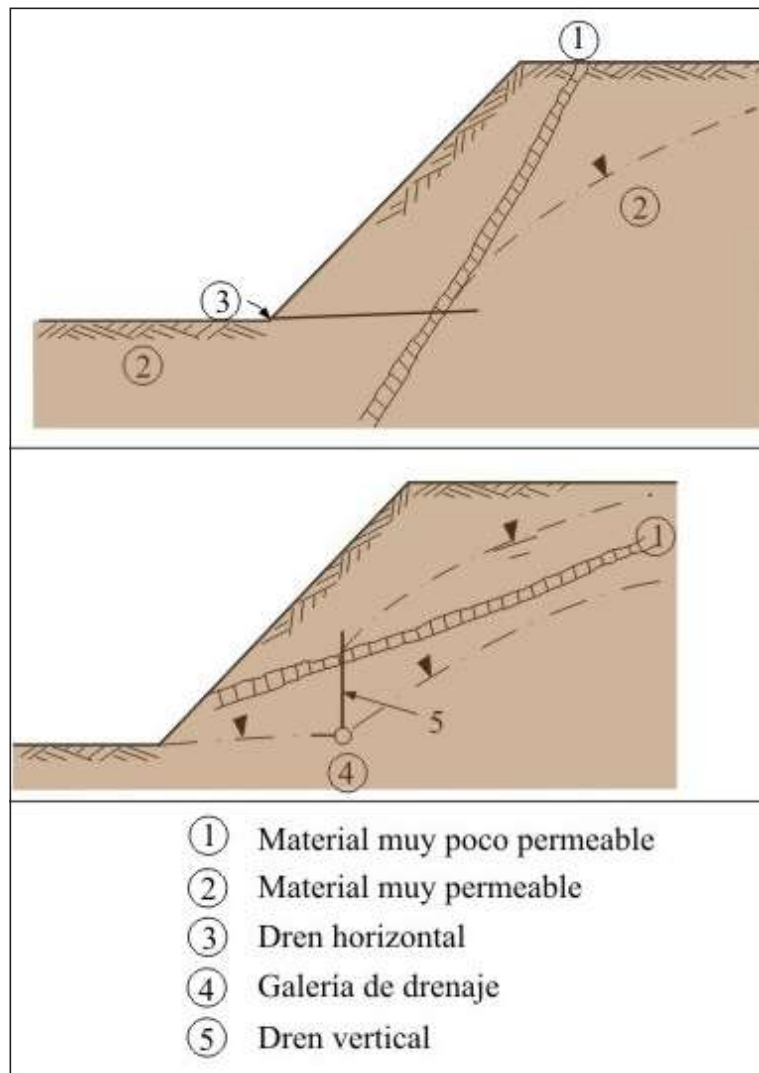


Figura 11.5 Disposición de sistema de drenaje en taludes no homogéneos. Tomado de Ingemmet, 2000.

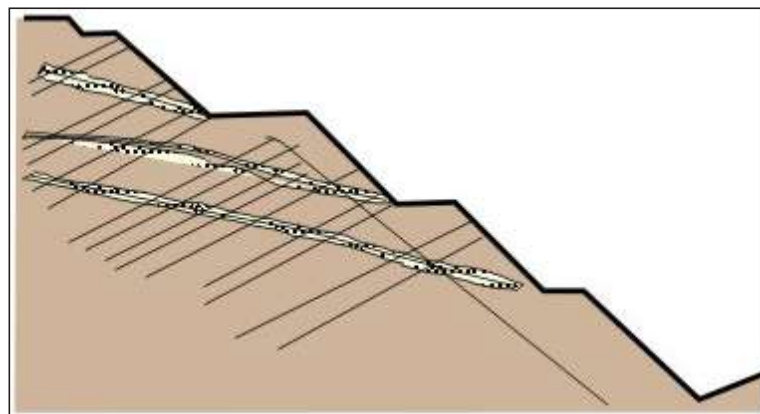


Figura 11.6 Esquema de drenaje de un talud por medio de drenes californianos. Tomado de Ingemmet, 2000.

**b.2) Galerías de drenaje.** Se ubica generalmente paralela al talud y a bastante profundidad.

Son galerías excavadas en el terreno a una distancia considerable de la superficie. Constituye un sistema bastante efectivo pero muy caro, por lo que su uso solo es recomendable en situaciones críticas y en taludes de gran altura. Para aumentar su radio de acción es necesario instalar drenes perforados desde la galería, lo cual aumenta así su radio de acción y la efectividad del sistema de drenaje (figuras 11.7 y 11.8).

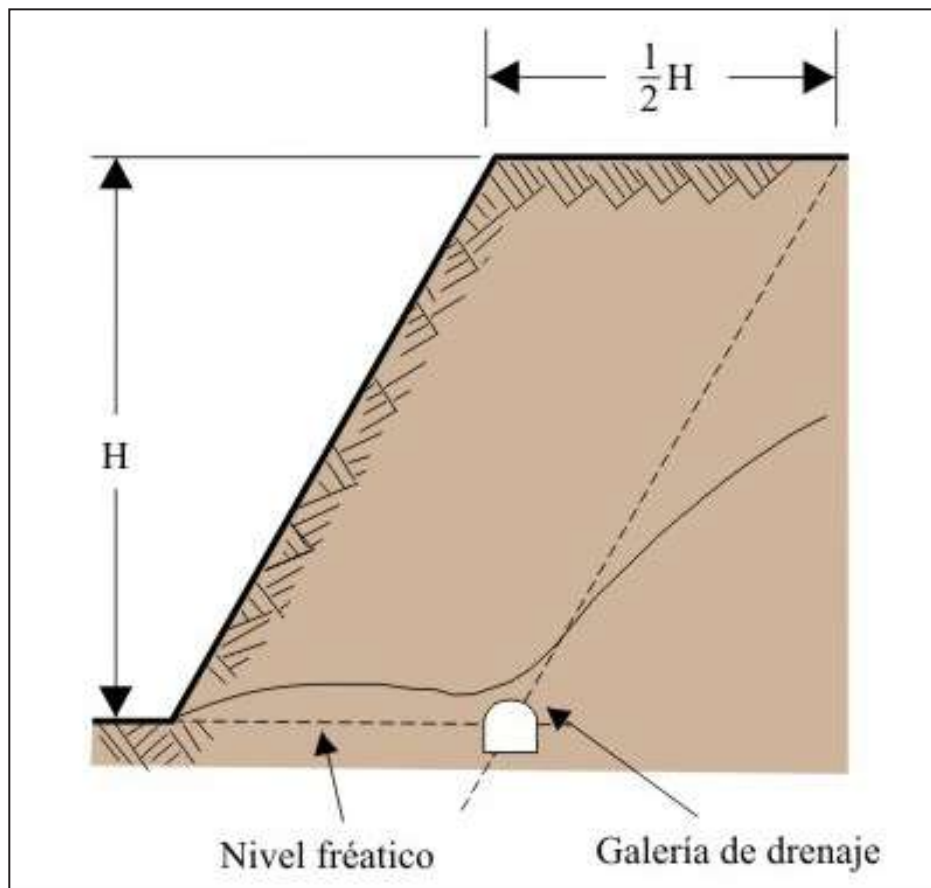
Dentro de sus ventajas se cuentan las siguientes:

- Tienen mayor capacidad drenante debido a su gran sección transversal.

- Son apropiadas para operaciones a largo plazo dado que el drenaje se realiza por gravedad.
- Sirven para determinar la calidad del terreno.
- No afectan a la superficie del terreno.
- Son apropiadas para zonas de climas fríos debido a que se ubican a gran profundidad.

Sus desventajas son:

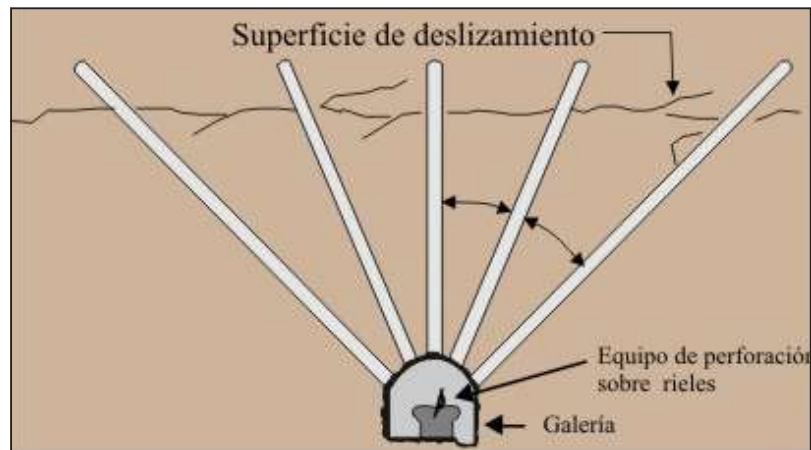
- El alto costo que demanda
- Requieren de estudios hidrogeológico detallados del área.



**Figura 11.7** Posición óptima de una galería de drenaje.

Tomado de Ingemmet, 2000.





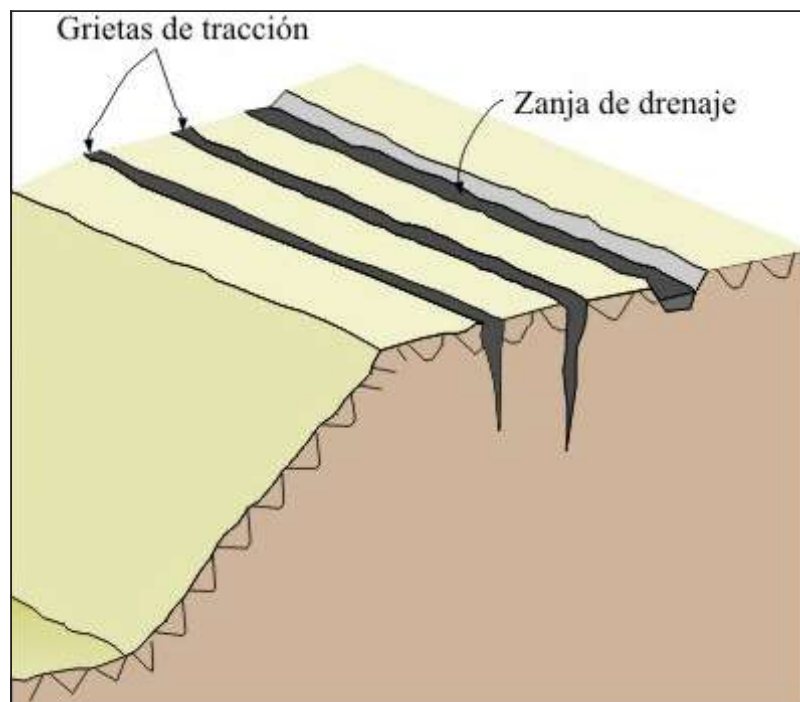
**Figura 11.8** Drenaje de la superficie de deslizamiento desde una galería de drenaje. Tomado de Ingemmet, 2000.

**b.3) Zanjas con relleno drenante.** Se construye en la superficie del talud o al pie de él. Consisten en zanjas rellenas de material drenante, excavadas en el talud o más allá del pie del mismo y cuya acción drenante se limita a profundidades pequeñas (figura 11.9).

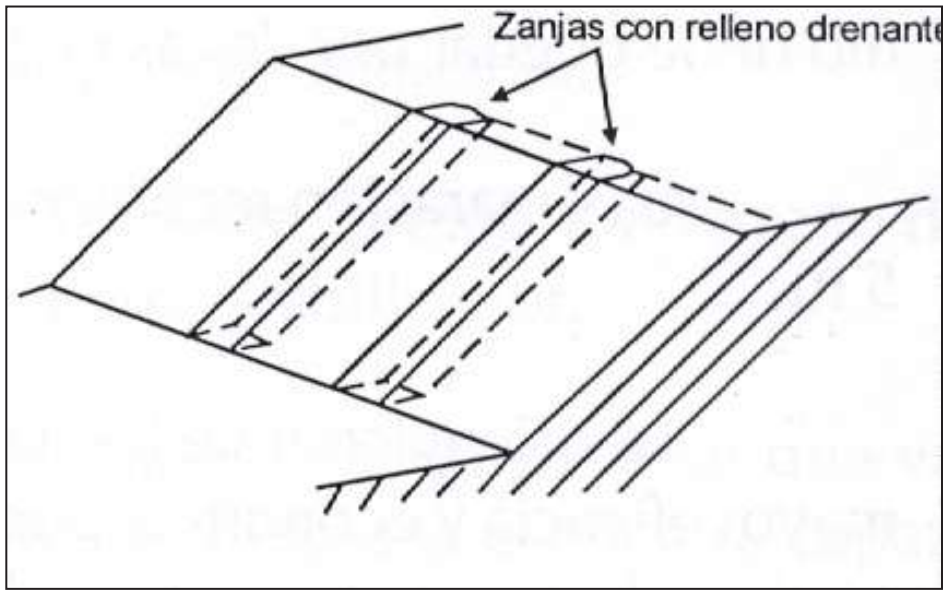
Pueden ser de dos tipos:

**Zanjas de talud:** Son las que siguen la línea de máxima pendiente del talud y son aplicables cuando los deslizamientos están situados a poca profundidad (figura 11.10).

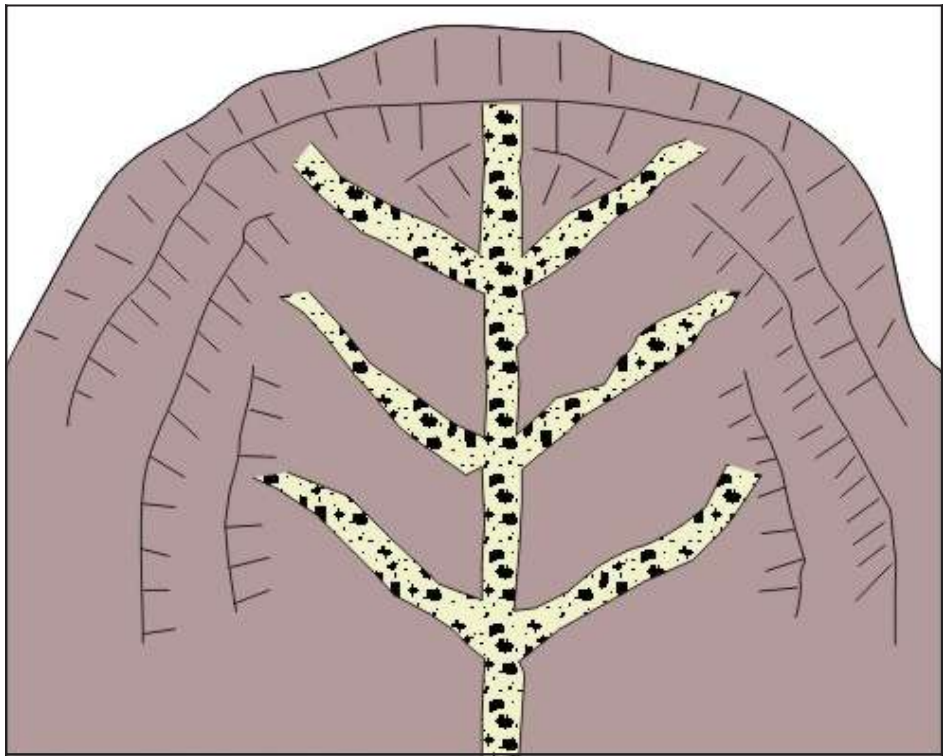
**Zanjas horizontales:** Son paralelas al talud y se sitúan próximos al hombro del talud. Son útiles los drenes en forma de «espina de pescado» (figura 11.11), que combinan una zanja drenante según la línea de máxima pendiente con zanjas secundarias (espinas) ligeramente inclinadas que convergen en la espina central. Su construcción y mantenimiento en zonas críticas debe tener buena vigilancia.



**Figura 11.9** Disposición de zanjas de drenaje en un talud. Tomado de Ingemmet, 2000.



**Figura 11.10** Zanjas de talud.  
Tomado de Ingemmet, 2000.



**Figura 11.11** Drenaje tipo espina de pescado.  
Tomado de Ingemmet, 2000.

**C) Corrección por elementos resistentes**

**c.1) Anclajes.** Los anclajes son armaduras metálicas, alojadas en taladros perforados desde el talud y cementadas (figura 11.12), que se emplean como medida estabilizadora de taludes

tanto en roca como en terreno suelto. La longitud de los anclajes varía entre 10 y 100 m y el diámetro de la perforación entre 75 y 125 mm.

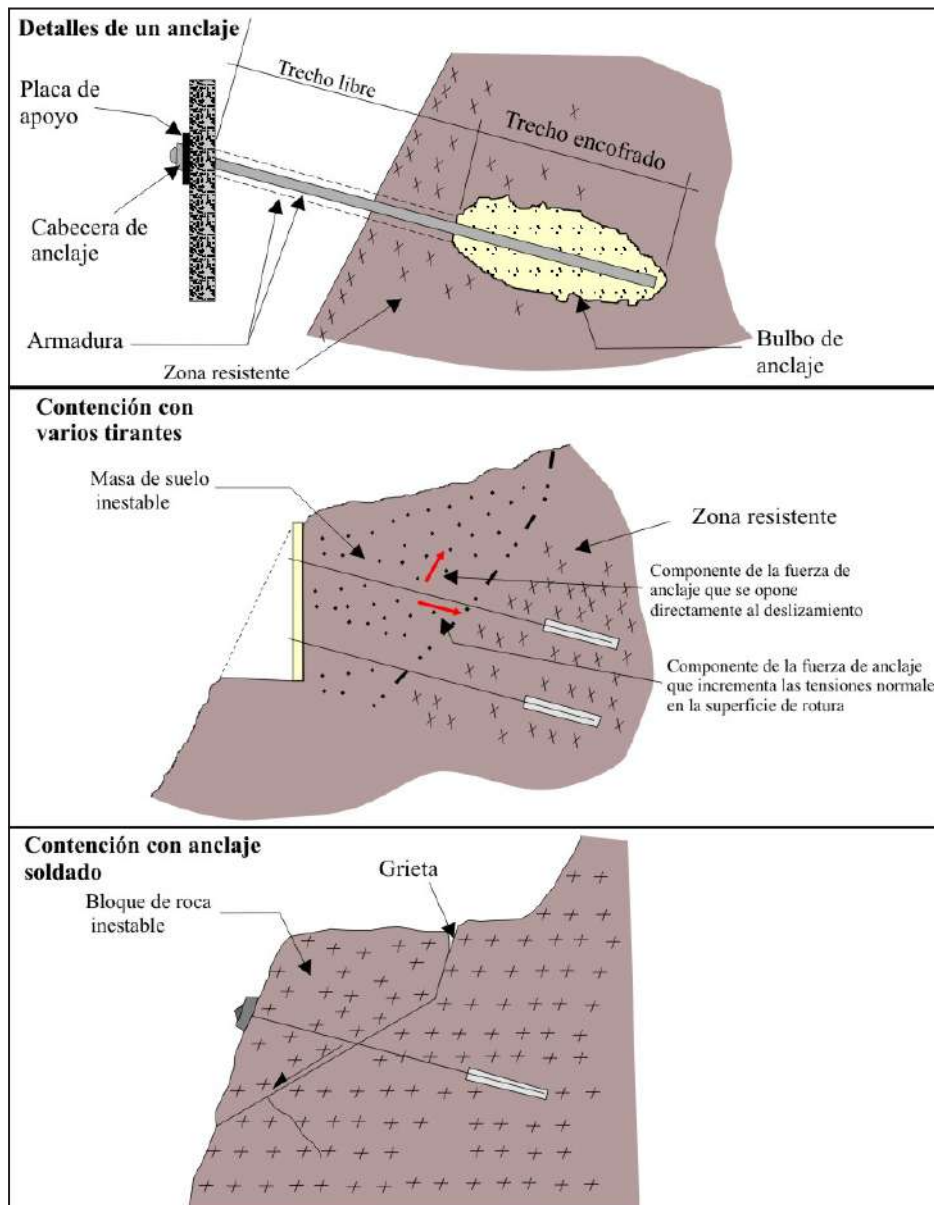


Figura 11.12 Detalles de un anclaje y ejemplos de aplicación. Tomado de Ingemmet, 2000.

Son elementos que trabajan a tracción y que favorecen la estabilidad del talud de dos formas:

- Proporcionan una fuerza contraria al movimiento de la masa deslizante.
- Producen un incremento de las tensiones normales en la superficie de rotura existente o potencial, lo que provoca un aumento de la resistencia al deslizamiento en dicha superficie.

En un anclaje se distinguen 3 partes fundamentales:

- Zona de anclaje: Es la parte solidaria al terreno, encargada de transferir los esfuerzos al mismo.
- Zona libre: Es la parte en donde la armadura se encuentra independizada del terreno que la rodea, de forma que pueda deformarse con total libertad al ponerse en tensión.
- Cabeza: Es la zona de unión de la armadura con la placa de apoyo.

Cuando se proyecta instalar anclajes en un talud es necesario poseer información detallada sobre las características geológicas y resistentes del terreno.

La elección del tipo de anclaje (activo, pasivo o mixto; bulones o cables) debe regirse de acuerdo a criterios técnicos.

Es importante tener en cuenta la situación de la zona de anclaje que debe estar incluida en terreno estable o, lo que es lo mismo, toda su longitud debe quedar detrás de la posible superficie de rotura.

Además, se recomienda entre anclajes una separación por razones constructivas de 2 y 5 m. La orientación de los anclajes en planta y alzado debe establecerse buscando la mayor eficacia y economía; por razones constructivas, es recomendable que descendan a partir de la cabeza con una inclinación del orden de 10° o 15°. La dirección más económica depende

de diversos factores, entre ellos la posición de la roca que se desea estabilizar.

**c.2) Muros.** Los muros se emplean frecuentemente como elementos resistentes en taludes (figura 11.13). En ocasiones, se emplean para estabilizar deslizamientos existentes o potenciales al introducir un elemento de contención al pie (figura 11.14). Esta forma de actuar puede tener varios inconvenientes:

En primer lugar, la construcción del muro exige cierta excavación en el pie del talud, lo cual favorece la inestabilidad hasta que el muro esté completamente instalado.

Por otra parte, el muro no puede ser capaz de evitar posibles deslizamientos por encima o por debajo del mismo.

Una contención solo puede sostener una longitud determinada de deslizamiento, ya que en caso contrario el deslizamiento sobrepasa al muro.

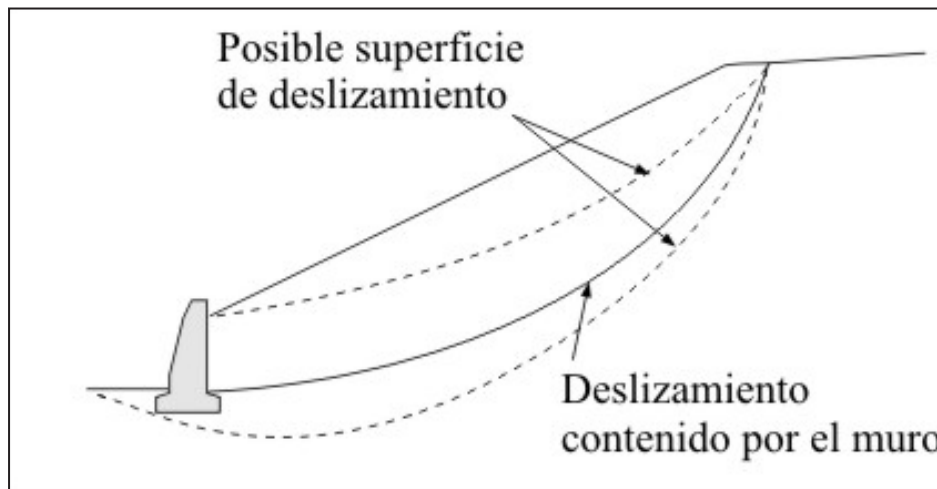
Cuando quieran sujetarse deslizamientos más largos, debe recurrirse a un sistema de muros o a otros de los procedimientos expuestos.

Por todo ello, en taludes con signos evidentes de inestabilidad puede ser más apropiado realizar el muro con objeto de retener un relleno estabilizador.

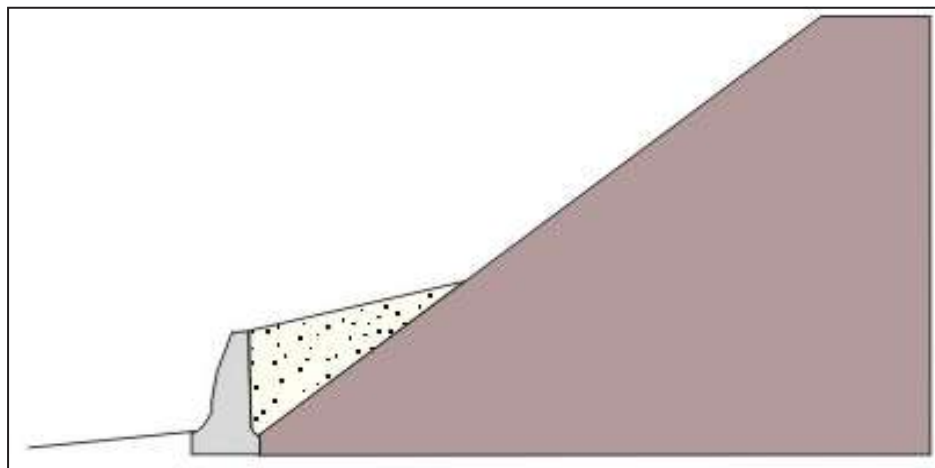
En desmontes y terraplenes en los que la falta de espacio impone taludes casi verticales, el empleo de muros resulta casi obligado. Este es un caso frecuente en la construcción de vías de transporte.

En ocasiones, como en el caso de un desmonte en una ladera, puede resultar más económica la construcción de un muro frente al coste de sobre excavación requerido si aquel no se realiza.

La construcción de un muro es generalmente una operación cara. A pesar de ello, los muros se emplean con frecuencia, pues en muchos casos son la única solución viable.



**Figura 11.13** Contención de un deslizamiento mediante un muro.  
Tomado de Ingemmet, 2000.



**Figura 11.14** Relleno estabilizador sostenido por el muro.  
Tomado de Ingemmet, 2000.

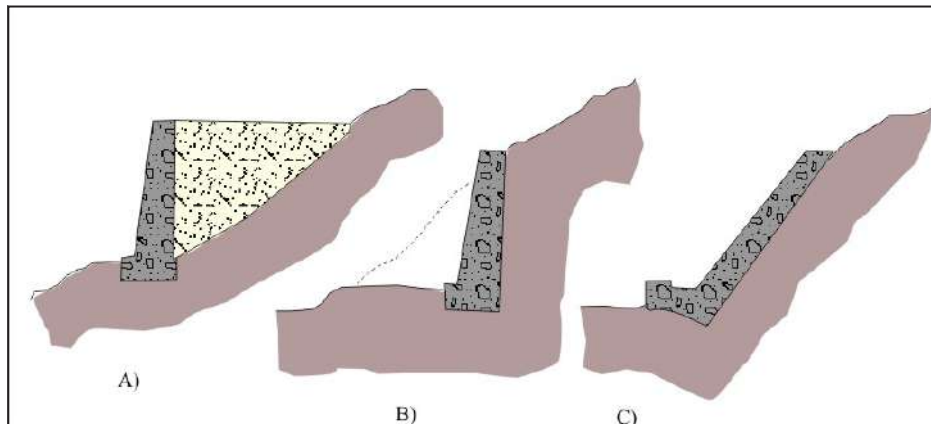
Los muros se pueden clasificar en 3 grupos (figura 11.15):

- **Muros de sostenimiento:** Se construyen separados del terreno natural y se rellenan posteriormente.
- **Muros de contención:** Generalmente van excavados y se construyen para contener un terreno que sería probablemente inestable sin la acción del muro.
- **Muros de revestimiento:** Su misión consiste esencialmente en proteger el terreno de la erosión y meteorización además de proporcionar un peso estabilizador.

Cuando se proyecta un muro deberán determinarse las cargas a las que va a estar sometido y su distribución, lo que permitirá planificar una estructura capaz de resistirlas.

Las comprobaciones que deben efectuarse en un caso típico son las siguientes:

- Estabilidad general del sistema muro-terreno al deslizamiento; la estabilidad general del muro incluye la estabilidad al vuelco y al deslizamiento.
- Resistencia del terreno del cimiento
- Ausencia de tracciones en la base del muro
- Resistencia estructural: Se ha de comprobar que las tensiones máximas en el muro no sobrepasen los valores admisibles.
- Se debe tener en cuenta la construcción de muros rígidos en zonas con procesos de deslizamiento; los muros pueden colapsar, siendo necesario conocer la profundidad de la superficie del deslizamiento mediante estudios geotécnicos detallados.

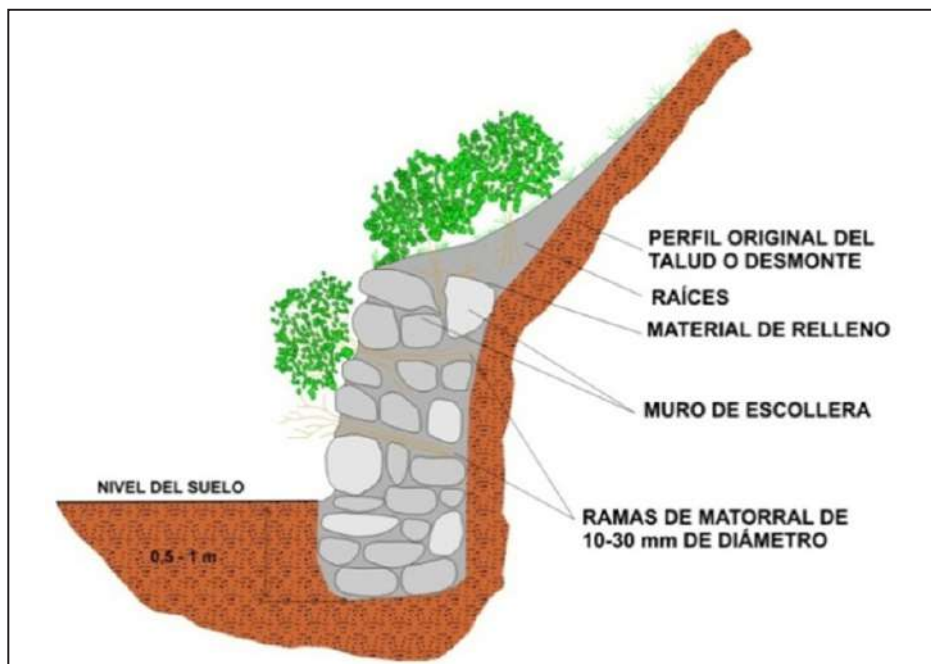


**Figura 11.15** Tipos de muros: a) muro de sostenimiento; b) muro de contención; c) muro de revestimiento. Tomado de Ingemmet, 2000.

#### Tipos de muros:

**Muros de gravedad:** Son los muros más antiguos, y conforman elementos pasivos en los que el peso propio es la acción estabilizadora fundamental (figuras 11.16, 11.17 y 11.18).

Se construyen de hormigón en masa, pero también existen de ladrillo o mampostería y se emplean para prevenir o detener deslizamientos de pequeño tamaño. Sus grandes ventajas son su facilidad constructiva y el bajo costo.



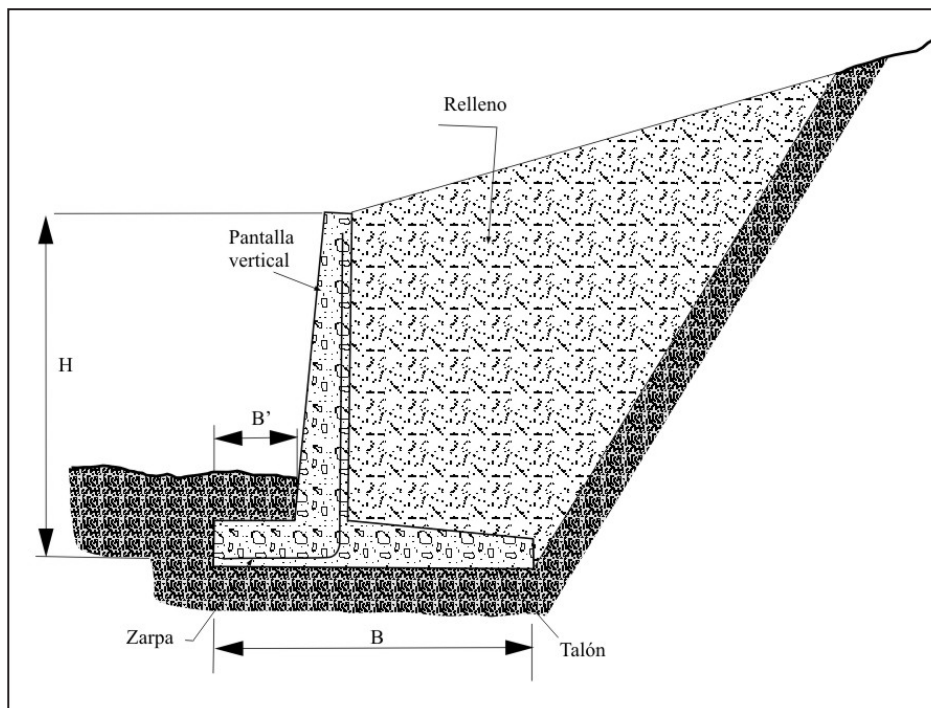
**Figura 11.16** Muros de gravedad de piedra seca.



**Muros aligerados.** Son muros de hormigón armado y existen 2 tipos fundamentales:

**a) Muros en L.** Son aquellos en los que la pantalla vertical actúa como viga en voladizo y contrarrestan el momento volcador del empuje del terreno principalmente con el momento estabilizador de las tierras situadas sobre el talón (figuras 11.19 y 11.20).

La relación  $H/B$  está comprendida generalmente entre 1.5 y 2 y la longitud de zarpa  $B'$  suele ser un tercio de  $B$ . La presión sobre el cimiento es menor que en los muros de gravedad, por lo que son adecuados para cimentaciones malas. Los esfuerzos sobre cada una de las partes del muro (pantalla vertical, talón y zarpa) se calculan suponiendo que se comportan como vigas en voladizo.



**Figura 11.19** Muros en L.  
Tomado de Ingemmet, 2000.



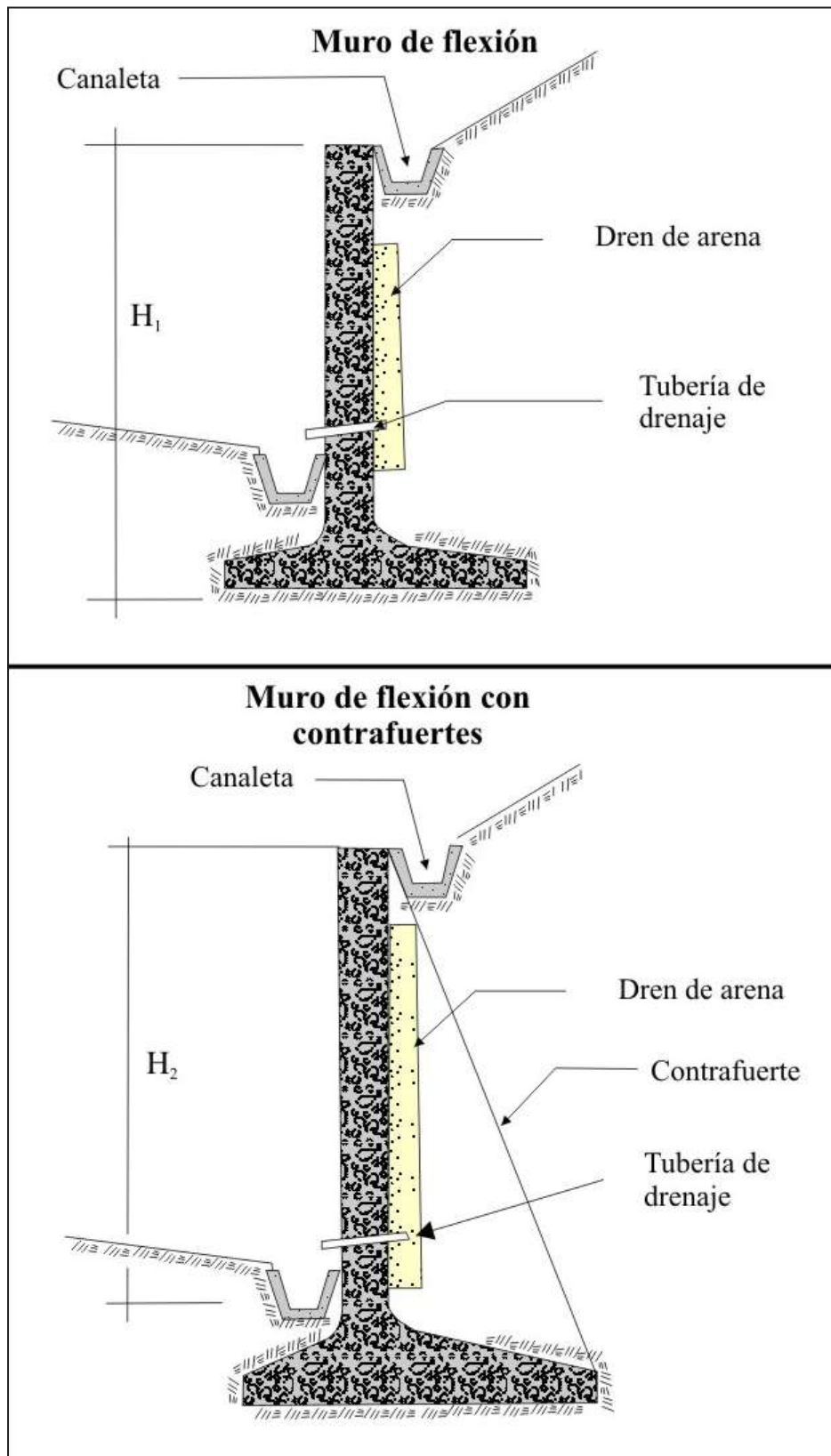


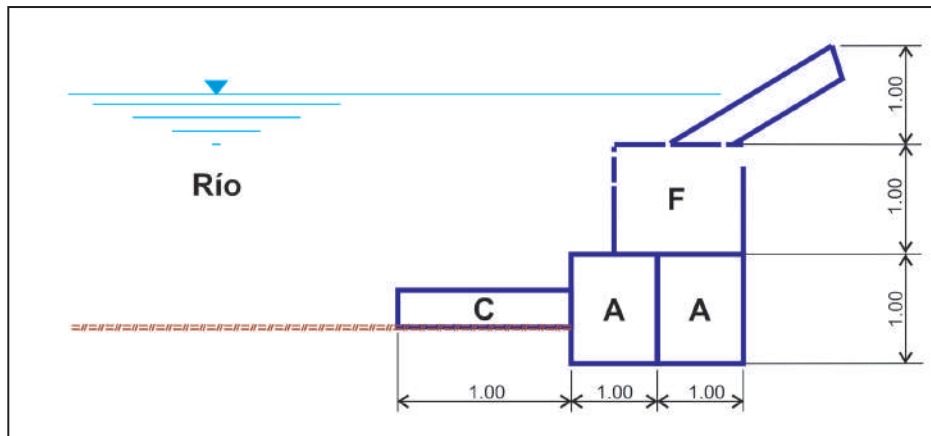
Figura 11.20 Muros de concreto armado tipo flexión.  
Tomado de Ingemmet, 2000.

**b) Muros de gaviones.** Los gaviones son elementos con forma de prisma rectangular que consisten en un relleno granular constituido por fragmentos de roca no degradable (caliza, andesita, granitos, etc.), retenido por una malla de alambre metálico galvanizado (figura 11.21).

Los muros de gaviones trabajan fundamentalmente por gravedad. Generalmente, se colocan en alturas bajas, aunque algunas veces se colocan en alturas medianas (hasta 25 m de alto y 10 m de ancho) y funcionan satisfactoriamente. La relación entre la altura del muro y el ancho de la base del mismo es muy variable, y suele estar comprendida entre 1.7 a 2.4.

Las ventajas que presenta son:

- Instalación rápida y sencilla  
Son estructuras flexibles que admiten asentamientos diferenciales del terreno.
- No tienen problemas de drenaje, ya que son muy permeables.
- Los empujes sobre el muro y su estabilidad al vuelco y deslizamiento se calculan de igual forma que en el caso de un muro de gravedad.



**Figura 11.21** Sección transversal en base a gaviones diseñados para defensa ribereña en el río.

Tomado de Ingemmet, 2000.

### c.3) Pilotes

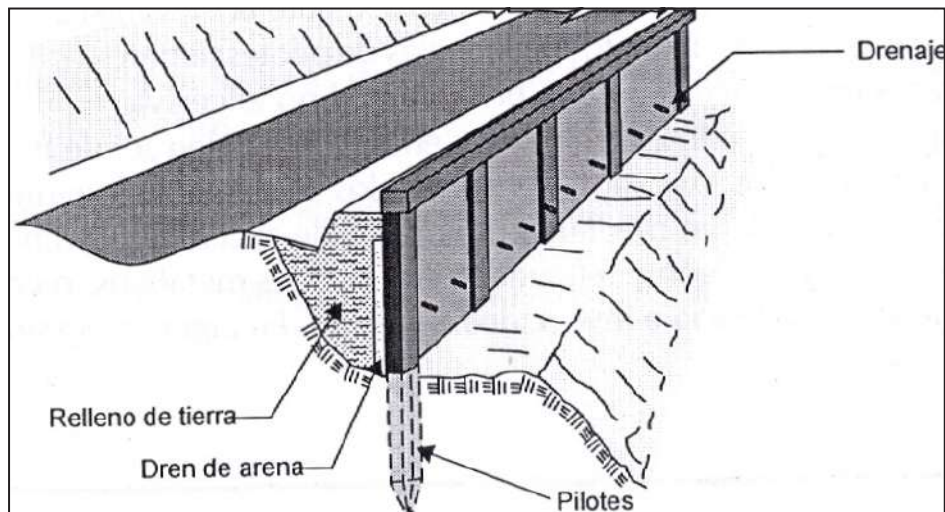
Las pantallas de pilotes (figura 11.22) consisten en alineaciones de estos elementos, siendo el espacio entre 2 adyacentes lo suficientemente pequeño como para conseguir un sostenimiento relativamente continuo.

Su empleo en taludes tiene 2 aspectos fundamentales:

- Como sostenimiento de taludes excavados, tiene la gran ventaja de que pueden instalarse antes de la excavación.

- Como medida estabilizadora de deslizamientos existentes o potenciales, se instalan cerca del pie del talud y —frente a los muros de contención— requieren muy poca excavación y no afectan significativamente el talud durante su construcción.

Los pilotes presentan el inconveniente de tener un costo elevado. En la estabilización de taludes, se emplean generalmente pilotes perforados o de extracción. Los pilotes hincados o de desplazamiento se emplean únicamente para estabilizar los deslizamientos superficiales.



**Figura 11.22** Ejemplo de muros con pilotes.  
Tomado de Ingemmet, 2000.

Los pilotes se oponen al deslizamiento mediante la transmisión de esfuerzos a las capas inferiores estables. Por lo tanto, las pantallas de pilotes tienen su principal aplicación en aquellos casos en que existe, a una profundidad no excesiva, un estrato de material estable y competente. Los pilotes empleados en taludes suelen ser de hormigón armado. Cuando los esfuerzos a los que van a ser sometidos son de gran magnitud, se puede aumentar su capacidad portante mediante el empleo de secciones combinadas: cilindros metálicos rellenos de hormigón y reforzados con perfiles metálicos, o con grupos de cables y barras de alta resistencia e inyectados a presión. En algunas ocasiones se emplean pilotes pretensados. El diámetro de los pilotes que se emplean en taludes varía entre 40 y 120 cm.

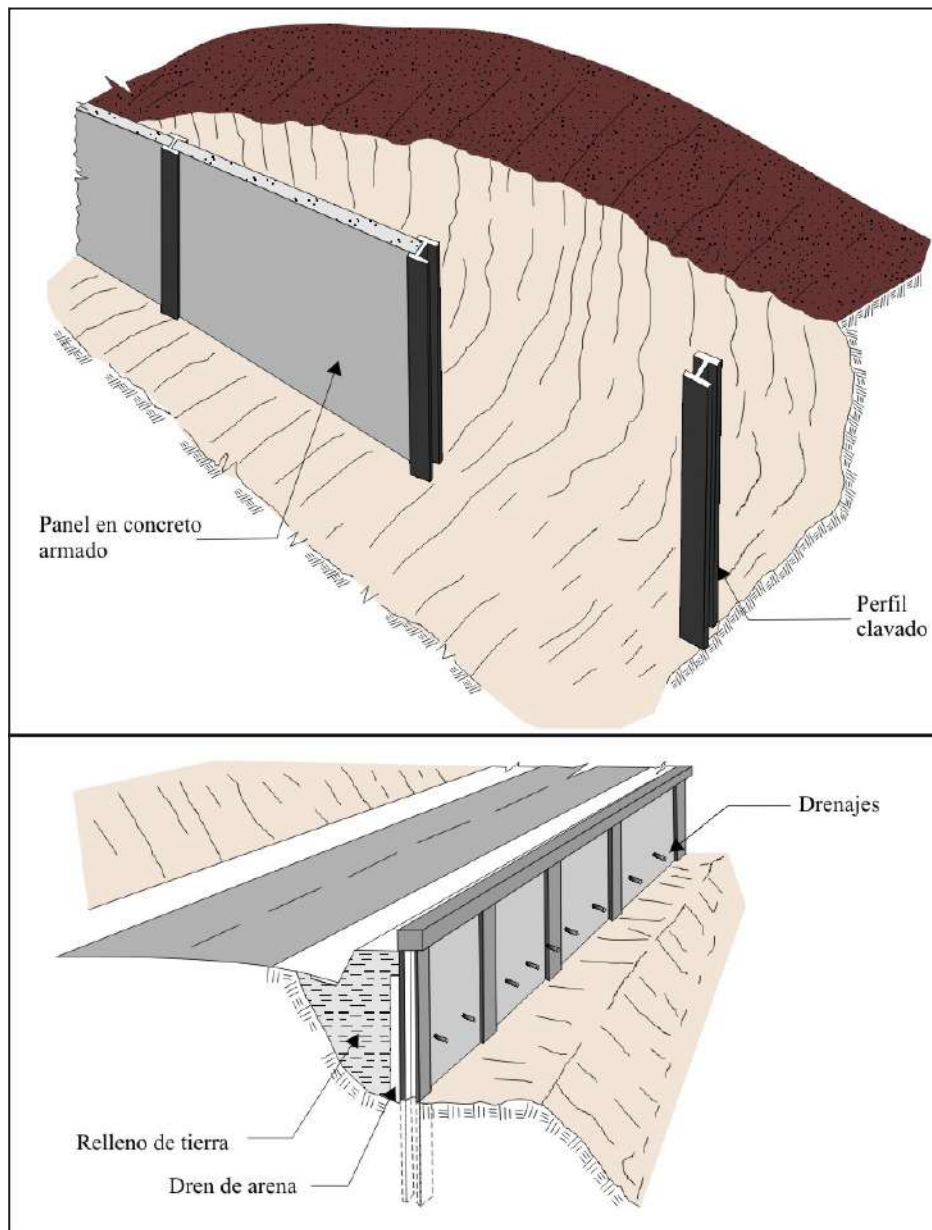
#### **c.4) Muros pantalla**

Son muros enterrados de hormigón armado, hormigonados in situ. Su acción estabilizadora ante los deslizamientos existentes o potenciales es muy similar a la de las pantallas de pilotes (figura 11.23). A diferencia de estas, los muros pantalla constituyen elementos continuos.

Como medida estabilizadora de taludes tiene su máxima aplicación frente a las pantallas de pilotes cuando el material inestable y el sustrato son de fácil excavación.

Para construir un muro pantalla, se excava una trinchera sin entibación, cuyas paredes se mantienen estables gracias a la utilización de lodos bentoníticos con los que se rellenan las zanjas a medida que se extrae el detritus de la excavación. Colocados los tubos junta o tubos de encofrado, cuya misión es conseguir una buena junta de hormigonado, e instalada la armadura, se procede al hormigonado a través de un conducto que llega hasta el fondo de la zanja. El hormigón va relleno la excavación y, al mismo tiempo, desplaza al lodo.

El tamaño del muro depende de las características de la maquinaria y puede alcanzar una profundidad hasta de 40 m. Existen fundamentalmente 2 técnicas para la ejecución de la excavación: la excavación con cuchara bivalva y la perforación con circulación inversa.



**Figura 11.23** Ejemplo de muros de pantalla.  
Tomado de Ingemmet, 2000.

#### D) Correcciones superficiales

Las medidas de corrección superficiales se aplican en la superficie de un talud de manera que afectan solo a las capas más superficiales del terreno y tienen fundamentalmente los siguientes fines:

- Evitar o reducir la erosión y meteorización de la superficie del talud
- Eliminar los problemas derivados de los desprendimientos de rocas en los taludes donde estos predominan

- Aumentar la seguridad del talud frente a pequeñas roturas superficiales
- Evitar accidentes personales

Los principales métodos empleados son:

##### d.1) Mallas de alambre metálico

Se cubre con ellas la superficie del talud con la finalidad de evitar la caída de fragmentos de roca, lo cual es siempre peligroso,

especialmente en vías de transporte o cuando hay personal trabajando en el pie del talud.

Las mallas de fierro galvanizado retienen los fragmentos sueltos de rocas y conducen los trozos desprendidos hacia una zanja en el pie del talud. Son apropiados cuando el tamaño de roca a caer se encuentra entre 0.60 y 1.00 m.

La malla se puede fijar al talud de varias maneras: siempre en la parte superior del talud o en bermas intermedias. Como sistemas de fijación pueden emplearse bulones o postes introducidos en bloques de hormigón que pueden a su vez ir anclados o simplemente un peso muerto en la parte superior del talud. Durante la instalación se prepara una longitud de malla suficiente para cubrir el talud, con una longitud adicional que es necesaria para la fijación de la malla.

La malla se transporta en rollos hasta el talud, se fija en su parte superior y se desenrolla dejándola caer simplemente, fijándola en la superficie del talud; en la parte final de la malla, se suele dejar un metro por encima de la zanja de acumulación de piedras.

#### **d.2) Sembrado en taludes**

Mantener una cobertura vegetal en un talud produce indudables efectos beneficiosos, entre los cuales destacan los siguientes:

- Las plantaciones evitan la erosión superficial tanto hídrica como eólica, que puede ocasionar la ruina del talud en el largo plazo.
- La absorción de agua por las raíces de las plantas produce un drenaje de las capas superficiales del terreno.
- Las raíces de las plantas aumentan la resistencia al esfuerzo cortante en la zona del suelo que ocupan.

Para sembrar en taludes se emplean hierbas, arbustos y árboles, y se privilegian especies capaces de adaptarse a las condiciones a las que van a estar sometidos (climas, tipo de suelo, presencia de agua, etc.); suelen convenir especies de raíces profundas y de alto grado de transpiración, lo que indica un mayor consumo de agua. Generalmente, la colonización vegetal de un talud se hace por etapas; se comienza por la hierba y termina por los árboles.

Los suelos arenosos y areno-arcillosos son ventajosos para un rápido crecimiento de la hierba. Las arcillas duras son inadecuadas a menos que se añadan aditivos o se are el terreno.

Cuando la proporción de limo más arcilla es superior al 20 % se puede esperar un crecimiento satisfactorio, pero si es inferior al 5 % el establecimiento y mantenimiento de la hierba resultará complicado.

#### **11.2.2 Medidas correctivas para zonas de flujos y cárcavas**

Las erosiones en cárcavas generan abundantes materiales sueltos que son llevados a los cauces de las quebradas. Muchos de estos cauces tienen suficiente material como para la generación de flujos.

Para el control físico del avance de cárcavas, se propone un conjunto de medidas, principalmente de orden artesanal, entre las que destacan:

- El desarrollo de programas de control y manejo de cárcavas sobre la base de diques o trinchos transversales construidos con materiales propios de la región como troncos, ramas, etc. (figuras 11.24, 11.25, 11.26 y 11.27)
- Zanjas de infiltración articuladas de acuerdo a las condiciones climáticas de la región
- Permitir el crecimiento de la cobertura vegetal nativa a lo largo de la cárcava y en las zonas circundantes a ella (figuras 11.24 y 11.28) y de esta manera asegurar su estabilidad, así como la disipación de la energía de las corrientes concentradas en los lechos de las cárcavas (figura 11.29)
- Realizar trabajos de reforestación de laderas con fines de estabilización. En la selección de árboles debe contemplarse las características de las raíces, las exigencias en tipo de suelos y el tamaño que alcanzarán versus la pendiente y profundidad de los suelos. También se recomienda que las plantaciones se ubiquen al lado superior de las zanjas de infiltración con el objetivo de captar el agua y controlar la erosión.
- Evitar el sobrepastoreo, ya que deteriora y destruye la cobertura vegetal. Se debe realizar un manejo de las zonas de pastos mediante el repoblamiento de pastos nativos, empleando sistemas de pastoreo rotativo y sostenible, y finalmente evitar la quema de pajonales.
- Zanjas de infiltración articuladas de acuerdo a las condiciones climáticas de las cuencas.

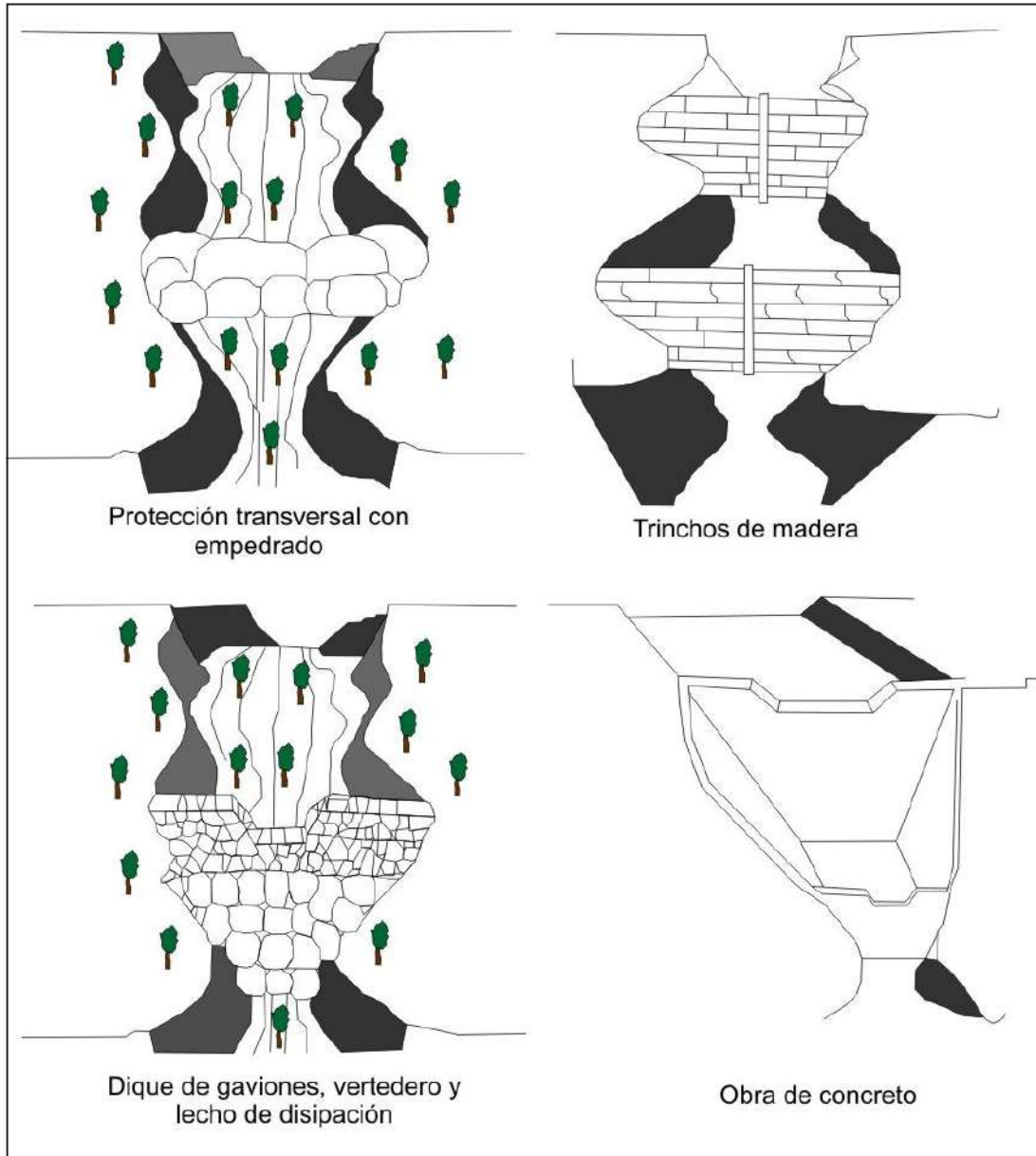
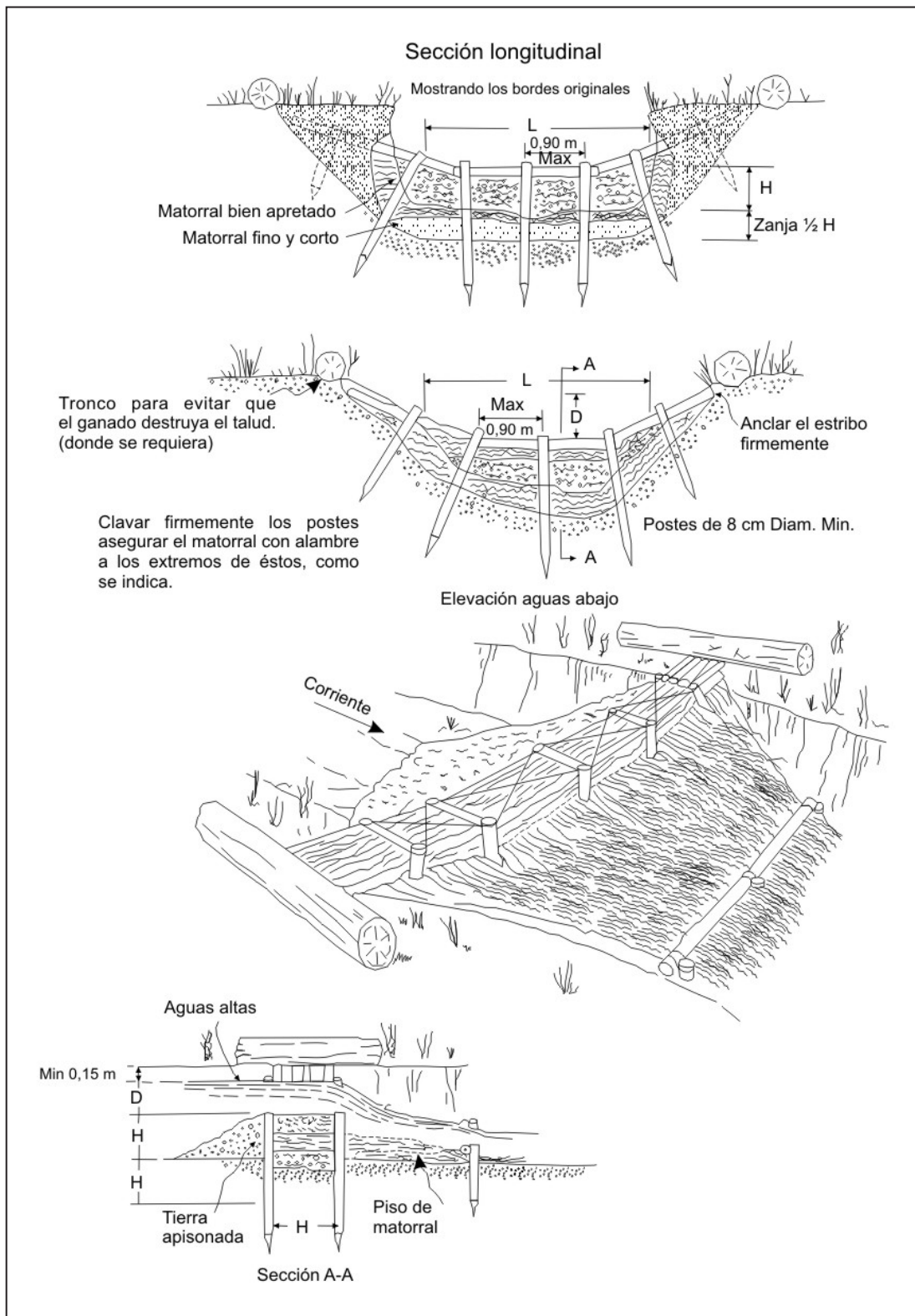


Figura 11.24 Obras hidráulicas transversales para el control de la erosión en cárcavas.



**Figura 11.25** Trincho de matorral tipo doble hilera de postes.

Adaptado de Valderrama *et al.*, 1964.

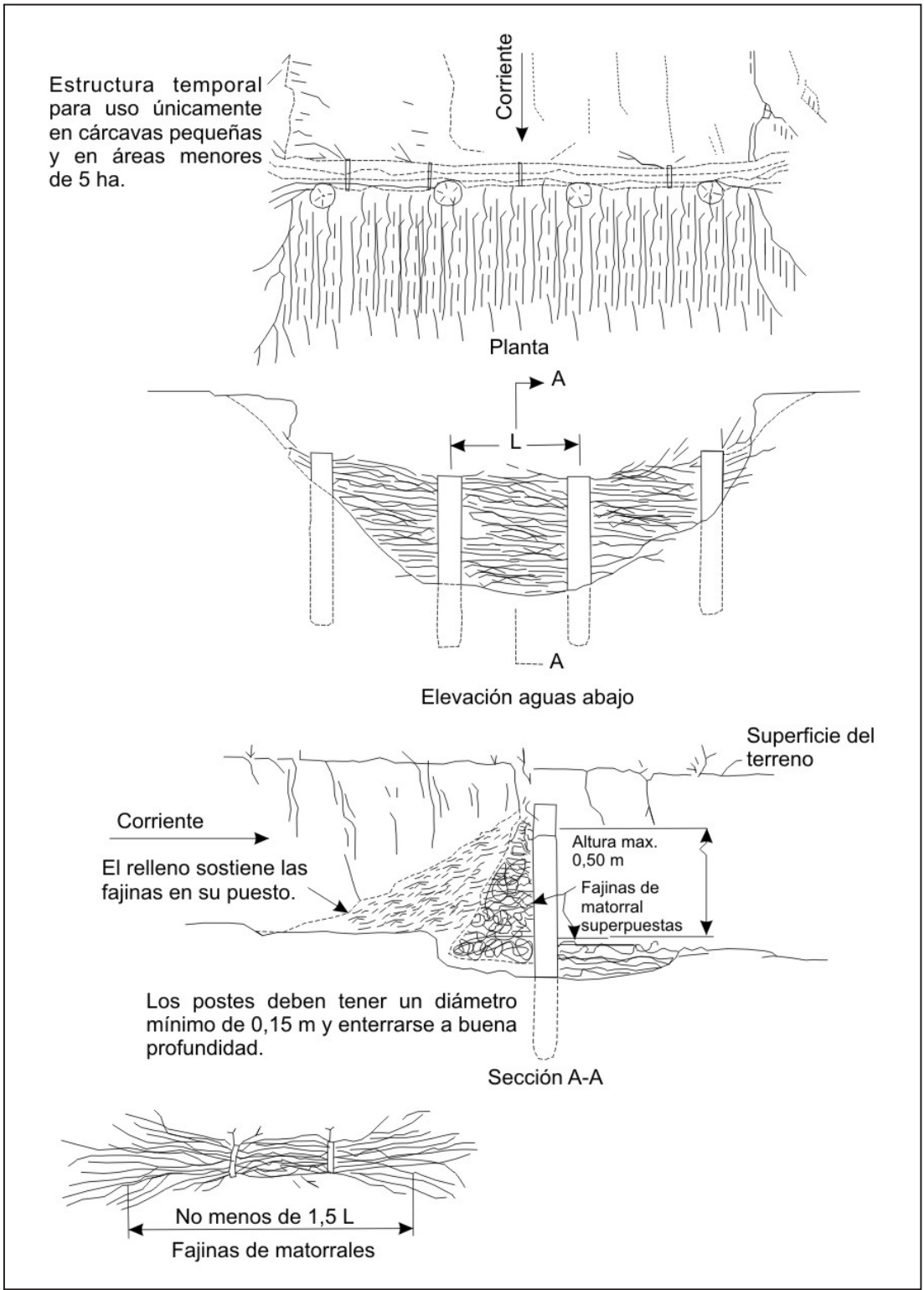


Figura 11.26 Trincho de matorral tipo una hilera de postes.

Adaptado de Valderrama *et al.*, 1964.



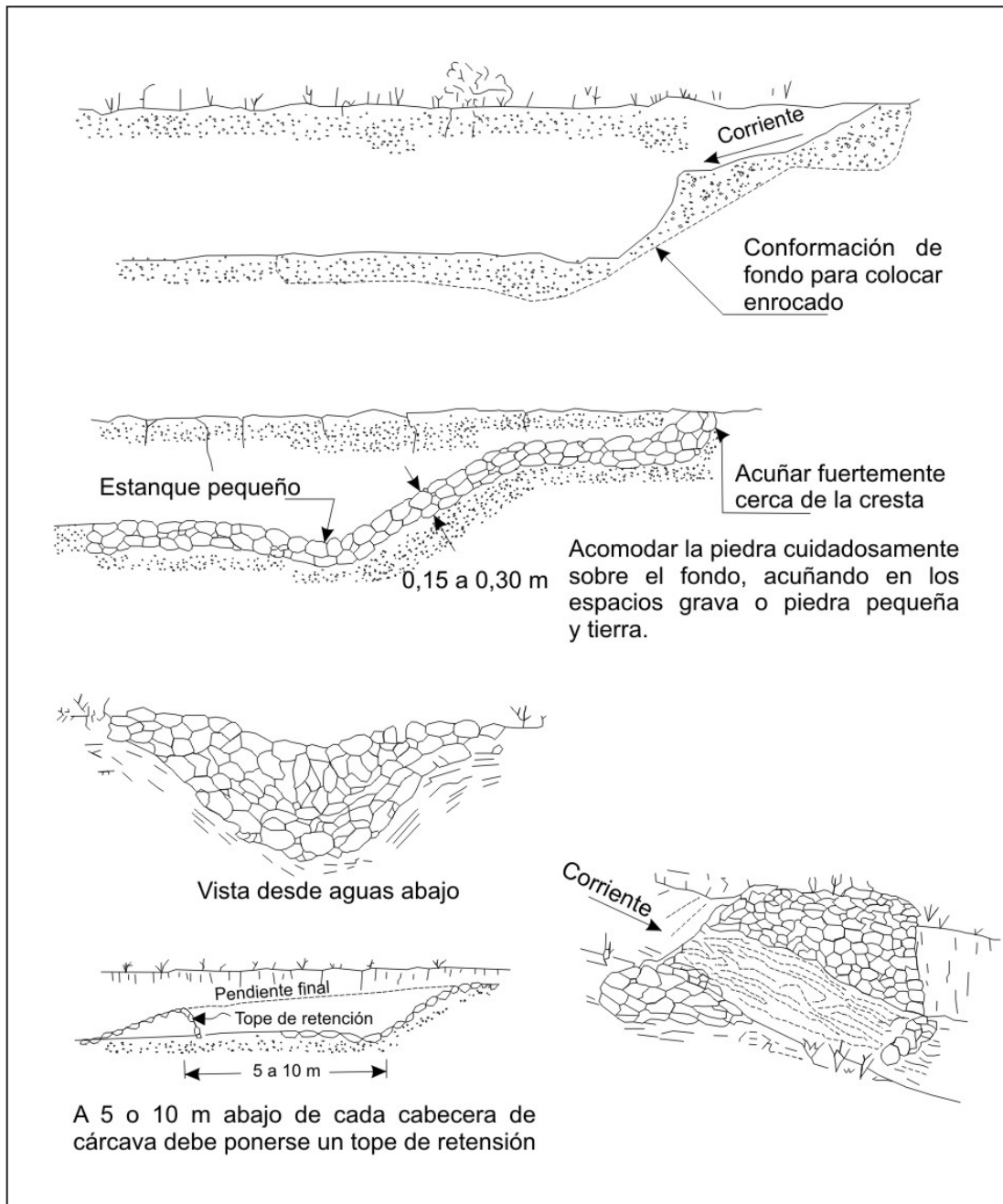


Figura 11.27 Trincho de piedra para cabecera de cárcava en zona de mina.

Adaptado de Valderrama *et al.*, 1964.

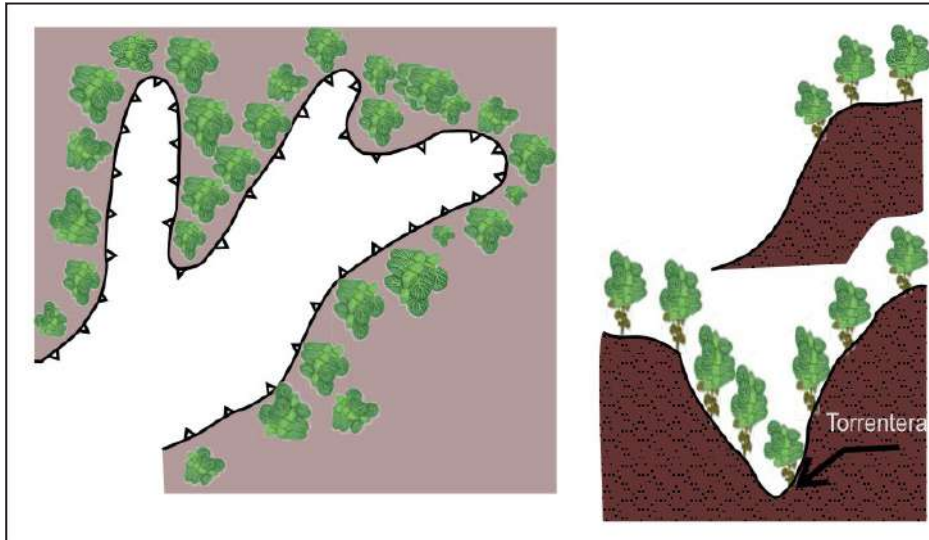


Figura 11.28 Vista en planta y en perfil de los procesos de forestación en cabeceras y márgenes de las áreas inestables.

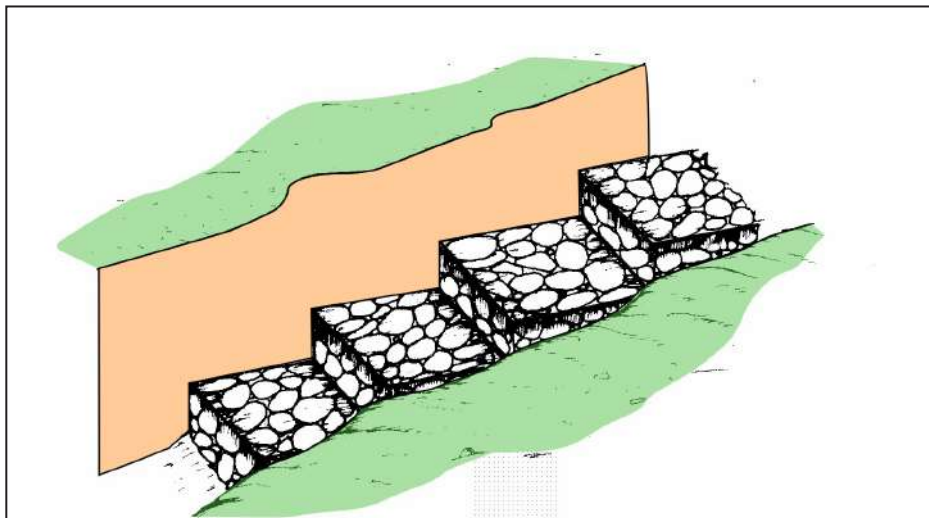


Figura 11.29 Protección del lecho de la quebrada con muros escalonados (andenes), utilizando bloques de roca o concreto armado.

### 11.2.3 Otras medidas de prevención para deslizamientos y cárcavas

El proceso de deslizamientos y cárcavas ocurre esencialmente de forma natural, pero también por la actividad antrópica (agrícola, deforestación) mal desarrollada que acelera el proceso; asimismo, por el socavamiento del río al pie de deslizamientos, la utilización de canales sin revestir, etc. Algunas medidas que se proponen para el manejo de estas zonas son:

- Manejo agrícola: evitar riegos en exceso; estos deben ser cortos y frecuentes, de modo que limiten la infiltración y la retención en la capa superficial del suelo en contacto con los cultivos.
- Los canales deben ser revestidos para minimizar la infiltración y saturación de los terrenos.

- El sistema de cultivo debe ser por surcos en contorno y conectados al sistema de drenaje para una evacuación rápida del agua.
- No debe construirse reservorios de agua sin revestimiento, ya que esto favorece a la infiltración y saturación del terreno.
- La remoción de la tierra, para realizar el cultivo, debe ser superficial, pues una remoción más profunda realizada con maquinaria puede favorecer la infiltración y saturación del terreno.
- En las cuencas altas, se debe favorecer el cultivo de plantas que requieran poca agua y proporcionen una buena cobertura del terreno para evitar el impacto directo de la lluvia sobre el terreno.
- El desarrollo de vegetación natural (pastos, malezas, arbustos, árboles) contribuye a atenuar el proceso de incisión rápida de las masas deslizantes; no obstante, este seguirá produciéndose en forma lenta hasta alcanzar el equilibrio natural entre el suelo y la vegetación nativa.
- Los tramos de carretera que cruzan cauces de quebradas, en donde se producen flujos de detritos (huaico) o de lodo, deben de ser protegidos por medio de gaviones para evitar los efectos de los flujos y el socavamiento producido por avenidas en las quebradas. Los gaviones deben ser contruidos teniendo en cuenta los caudales máximos de las quebradas y deben ser cimentados a una profundidad de 1 m como mínimo.
- Realizar prácticas de conservación y regeneración de la cobertura vegetal natural conformada por pastos, malezas y arbustos
- Realizar trabajos de reforestación de laderas con fines de estabilización; en la selección de árboles a utilizarse debe contemplarse las características de las raíces, las exigencias en tipo de suelos y portes que alcanzarán versus la pendiente y profundidad de los suelos. Se recomienda que las plantaciones forestales se ubiquen al lado de las zanjas de infiltración a curvas de nivel con el objeto de captar el agua y controlar la erosión.
- Evitar el sobre pastoreo que produzca deterioro y destrucción de la cobertura vegetal. Se debe realizar un manejo de las

zonas de pasturas mediante el repoblamiento de pasturas nativas, empleando sistemas de pastoreo rotativo y evitando la quema de pajonales.

#### 11.2.4 Medidas correctivas para lechos fluviales secos

En el área de estudio, se observaron lechos fluviales y quebradas secas, que corresponden a quebradas de régimen periódico-excepcional, subcuencas con presencia de flujos de detritos (huaicos) ocasionales a excepcionales, que pueden alcanzar grandes extensiones, con pendientes bajas, los cuales pueden transportar grandes volúmenes de sedimentos gruesos y finos. Con el propósito de propiciar la fijación de los sedimentos en tránsito y de minimizar el transporte fluvial, es preciso aplicar en los casos que sea posible, las medidas que se proponen a continuación:

- Encauzamiento del canal principal de los lechos fluviales secos, con remoción selectiva de los materiales gruesos, que pueden ser utilizados en los enrocados y/o espigones para controlar las corrientes (figura 11.30)
- Propiciar la formación y desarrollo de bosques ribereños con especies nativas para estabilizar los lechos
- La construcción de obras e infraestructuras que crucen estos cauces secos deben construirse con diseños que tengan en cuenta las máximas crecidas registradas, que permitan el libre paso de huaicos, y evitar obstrucciones y represamientos con posteriores desembalses más violentos.
- Realizar la construcción de presas de sedimentación escalonada para controlar las fuerzas de arrastre de las corrientes de cursos de quebradas que acarrear grandes cantidades de sedimentos durante periodos de lluvia excepcional, cuya finalidad es reducir el transporte de sedimentos gruesos (figura 11.31).
- Evitar en lo posible la utilización del lecho fluvial como terreno de cultivo que permita el libre discurrir de los flujos hídricos.
- Encauzamiento y limpieza de lechos fluviales secos que se activan durante periodos de lluvia excepcional, que permitan el libre discurrir de crecidas violentas provenientes de las microcuencas media y alta.

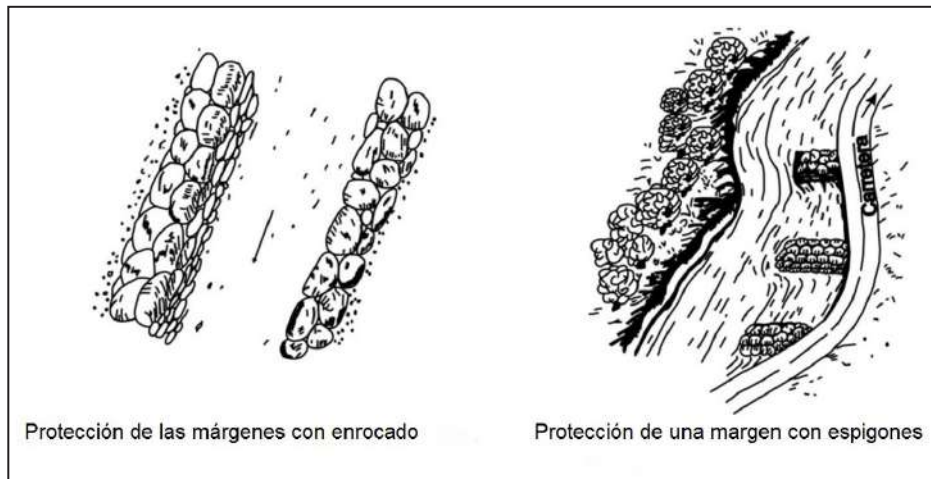


Figura 11.30 Protección de márgenes con enrocado, espigones y siembra de bosques ribereños.

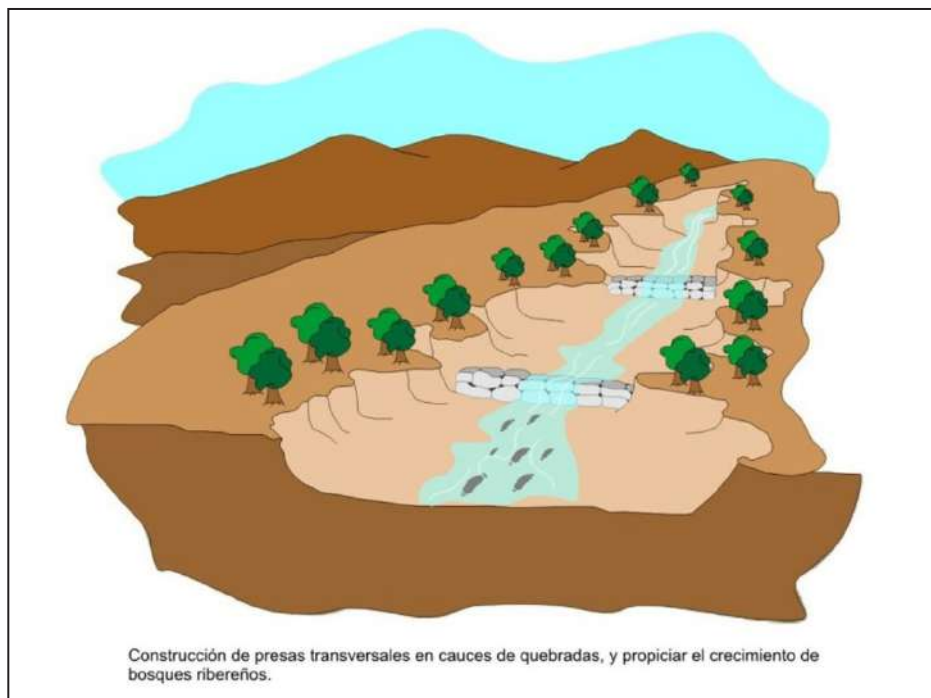


Figura 11.31 Presas transversales a cursos de quebradas.

### 11.2.5 Medidas preventivas y/o correctivas para inundaciones y flujos rápidos

Las medidas de protección para este tipo de peligros pueden ser:

#### a) Permanentes

- Tratamiento de la cuenca para disminuir el flujo de aguas, por ejemplo, la construcción de andenes; por su forma escalonada, impiden que el agua corra pendiente debajo de manera violenta y retienen suelos cargados de nutrientes aprovechables para fines agrícolas. Asimismo, se debe proteger la cobertura vegetal, ya que mediante el resembrado de gramíneas y árboles se protege los suelos de la erosión devolviéndoles su capacidad de retención del agua.
- Construcción de obras de ingeniería como presas, reservorios de regulación y construcción de canales que permitan mantener ciertas áreas libres de inundaciones.
- Efectuar obras de regulación para asegurar el uso económico de las llanuras anegadizas, estudios sencillos que se realicen en estas áreas permitirán determinar los niveles máximos alcanzados en pasadas inundaciones y delimitar las zonas amenazadas por este fenómeno.

#### b) De emergencia

- Construcción de defensas o refugios y mejoramiento de las existentes.
- Limpieza de canales y acequias.
- Acciones para combatir la inundación o el flujo rápido.
- Evacuación de personas y propiedades de las zonas amenazadas.
- Reprogramación de actividades para reducir las pérdidas e interrupciones ocasionadas por las inundaciones y flujos rápidos.

#### c) Sistemas de protección contra inundaciones

Deben consistir en:

- Una línea principal de defensa que proteja toda la zona
- Líneas locales de defensa que protejan diversas partes de la zona, si queda destruida la línea principal de defensa.

Las estructuras de las líneas de defensa de protección contra las inundaciones deben consistir en:

- Diques de defensa (malecones) o terraplenes, erigidos para proteger el terreno situado detrás. Deberá preverse un margen bastante amplio de altura para el caso de que las condiciones de cimentación sean deficientes con el fin de compensar un exceso de asiento del terraplén.

- Muros de encauzamiento de avenidas, muelles y terraplenes contruidos para proteger los asentamientos humanos.
- Compuertas de seguridad para crecidas y un sistema de canales para que el agua de la inundación se encauce hacia los embalses provisionales.
- Un sistema de canales, pozos y alcantarillado, con su equipo correspondiente, que influya en el de la capa acuífera subterránea (napa freática).
- Capacidad de bombeo suficiente para evacuar el agua de drenaje en el interior del sistema de diques de defensa.
- Carreteras y otras vías de comunicación para el acceso al sistema de defensa, que permita el tránsito de personas y equipos durante las operaciones de defensa o para los trabajos de mantenimiento.
- Sistemas de comunicación por internet, teléfono y radio.
- Instalaciones hidrométricas y de otra índole para observar y comunicar la aproximación y desplazamiento de olas de inundaciones y fluctuaciones de la capa acuífera subterránea.

En los periodos en que no surjan situaciones de emergencia, deberán mantenerse en buen estado la zona de evacuación de crecidas y el sistema de defensa contra inundaciones, lo que concluye:

- Reparación de los terraplenes, el mantenimiento de la capacidad de los cursos de agua mediante el dragado y limpieza, y la conservación de las esclusas compuertas y otros equipos.
- Mantenimiento de las estaciones hidrométricas y la prestación de un servicio diario de información sobre el nivel de las aguas que afecte a la situación hidrológica de la zona protegida.
- Mantenimiento de las instalaciones de almacenamiento de los materiales y equipos a utilizarse en una emergencia.
- Tener un cuidado especial para evitar la abertura de brechas en los sistemas de defensa existentes durante la construcción de nuevas obras de infraestructura o asentamientos poblacionales.

### 11.2.6 Sistemas de alarmas

Consisten en la instalación de diversos sistemas o instrumentos, en superficie o en profundidad, con la finalidad de detectar movimiento o medir determinados parámetros relacionados con los movimientos (figuras 11.32 y 11.33).



Figura 11.32 Sensores utilizados para el monitoreo de flujos de detritos (Soil and Water Conservation Bureau SWCB).



Figura 11.33 Estación de monitoreo de flujo de detritos (Soil and Water Conservation Bureau SWCB).

Adaptado de Valderrama *et al.*, 1964.

## CONCLUSIONES

1. La población urbana asentada dentro del área de estudio, según el Censo Nacional del 2017, es de 429 352 habitantes, de los cuales 111 930 pertenecen al distrito de Cusco, 110 817 a San Sebastián, 92 729 a Santiago, 58 541 a Wanchaq y 55 335 a San Jerónimo.
2. Litoestratigráficamente, el área está compuesta principalmente por secuencias sedimentarias de las formaciones Paucarbamba, Kayra, Soncco, Punacancha, Puquín, Chilca, Huancané, Quilque, Ayabacas y Maras. Ocupando áreas muy reducidas, se encuentran las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Pachatusan, las rocas volcánicas de la Formación Rumicolca y las rocas intrusivas de composición diorítica. Además, los depósitos inconsolidados está compuesto por depósitos residuales, fluviales, aluviales, proluviales, deluviales, coluviales glaciares, biogénicos y antropógenos.
3. En cuanto al análisis de las condiciones geotécnicas relacionadas a la calidad de los macizos y según las clasificaciones geomecánicas aplicadas (RMR y GSI), el área de estudio presenta una zonificación de calidades que van desde muy malas a muy buenas, donde predominan los macizos con una valoración de (25-45) y de calidad regular-mala, debido a que son rocas sedimentarias compuestas de areniscas y arcillitas principalmente. Los macizos que presentan mejor calidad en el área están relacionados a afloramientos de calizas macizas y rocas volcánicas.
4. Además, las formaciones han sido clasificadas de acuerdo a sus parámetros hidrogeológicos de porosidad, permeabilidad, de acuerdo a su capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas en 4 grandes grupos: porosos no consolidados, fisurados sedimentarios, fisurados kársticos y volcánico-sedimentarios. A los acuitardos, se les ha agrupado en no consolidados, sedimentarios, volcánicos-sedimentarios e intrusivos.
5. Producto del estudio, a nivel general, se han identificado 478 ocurrencias de peligros geológicos por movimientos en masa y otros peligros geológicos, tanto en los trabajos de campo (167 ocurrencias) como en gabinete (311 ocurrencias), de los cuales, el 38.9 % corresponde a erosión en cárcava, 23.4 % a derrumbes, 13.2 % a rotacional, 7.3 % a reptación de suelos, 4.2 % a flujos de detritos, 3.8 % a flujos de lodo, 3.1 % a erosión en surco, 2.5 % a deslizamiento traslacional, 1.3 % a hundimientos, 1.0 % a inundación fluvial, 0.6 % a caída de rocas y 0.6 % a erosión fluvial. Así mismo, el 50.8 % corresponde a eventos activos, el 25.5 % a antiguos y el 23.6 % a latentes.
6. La mayor cantidad de ocurrencias de movimientos en masa y otros peligros geológicos se identificaron en el área que corresponde al distrito de San Sebastián; le siguen los distritos de San Jerónimo, Cusco, Santiago y finalmente Wanchaq. En estos distritos, a excepción de Wanchaq; predomina la ocurrencia de erosión en cárcava.
7. En el análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa, se consideró 5 categorías, las cuales se mencionan su distribución espacial:
  - Muy baja susceptibilidad: ocupa aproximadamente el 4 % del área total de estudio; corresponde a terrenos llanos con pendientes inferiores a 1°. Se relacionan a depósitos residuales, fluviales, aluviales y secuencias lávicas andesíticas; también, se incluye, altiplanicies, terrazas, bofedales y llanuras de inundación fluvial.
  - Baja susceptibilidad: ocupa el 15 % de superficie; en este rango de susceptibilidad, presenta una morfología plano-ondulada con rango de pendiente suave a moderadas (menor a 15°) y unidades geomorfológicas de lomadas.
  - Moderada susceptibilidad: ocupa el 24 % de área; geomorfológicamente, se encuentran distribuidas en colinas y piedemonte en la pendiente de los terrenos que varía principalmente entre moderada a fuerte (5° y 25°).
  - Áreas de alta susceptibilidad: ocupa un área aproximada del 28 %; se encuentra ocupando principalmente laderas de montañas y colinas con pendiente fuerte a muy fuerte (entre 15° y 45°) y corresponde a áreas donde se podrían generar deslizamientos, derrumbes, caídas de rocas, flujos, reptación, movimientos complejos.
  - Las áreas de muy alta susceptibilidad se ubica en pendientes muy fuertes y muy escarpadas (mayor a 25°); así mismo,

presenta sustrato de rocas intrusivas (granodiorita) y sedimentarias (conglomerados, areniscas y arcillitas) muy fracturadas y meteorizadas a suelos de tipo arcillo-limoso, areno-limoso. Dentro de estas áreas, se generaron o dieron inicio a la mayor cantidad de procesos de movimientos en masa (deslizamientos, caídas, flujos y movimientos complejos) y los procesos de erosión de laderas (cárcavas y surcos).

8. La información resultante para el análisis de la susceptibilidad a inundación y erosión fluvial es indicativa y constituye un referente para identificar áreas en las cuales se requieren análisis hidráulicos detallados.
9. Se han identificado 26 puntos críticos, de los cuales la mayor cantidad se ubica en el distrito de San Sebastián (10 puntos); luego, en San Jerónimo (5 puntos), Cusco (6 puntos), Santiago (4 puntos) y Wanchaq (1 punto).



## RECOMENDACIONES

1. Es necesario que las autoridades locales de la ciudad del Cusco consideren el presente trabajo de investigación sobre peligros geológicos por movimientos en masa, en los planes gestión del riesgo de desastres, tanto en la etapa prospectiva y correctiva, y en sus planes de ordenamiento territorial.
2. Las recomendaciones planteadas en el Capítulo XII son de carácter orientativo. Se deben realizar estudios detallados y especializados para cada zona crítica.
3. Es fundamental que las autoridades regionales y los representantes de los gobiernos locales difundan los resultados de este trabajo entre la población con el fin de contribuir con la creación de una cultura de prevención de desastres.
4. Se recomienda considerar los puntos identificados como críticos en los planes o políticas sobre prevención y reducción del riesgo de desastres originados por fenómenos naturales.
5. Considerar en los planes del sistema de alerta temprana, los sectores del río Saphy en el distrito de Cusco, Huatanay en el distrito de Santiago, quebrada Thuniyoc en el distrito de San Sebastián y la quebrada Huacotomayo en el distrito de San Jerónimo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, V. & Mendoza, D. (2002) - *Aproximación a un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa en el eje cafetero, Colombia* (en línea). Tesis Ingeniero Civil, Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Cali, 214 p. <https://www.osso.org.co/docu/tesis/2002/aproximacion/tesisdividocfinal.pdf>
- Albinez, L. & Ancco, K. (2018) - *Caracterización de zonas susceptibles por movimientos en masa en la quebrada Chakán, Cusco*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/3241>
- Apaza, D. (1997) - Las aguas subterráneas del valle del cusco, una alternativa para el abastecimiento de agua potable a la ciudad. En: Congreso Peruano de Geología, 9, Lima, 1997. *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial, p. 623-627.
- Ayala, F.J. (2003) - Una reflexión sobre los *mapas de susceptibilidad* a los movimientos de ladera, su naturaleza, funciones, problemática y límites. En: Ayala, F.J. & Corominas, J., eds. *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente, 4, p. 7-20.
- Benavente, C.; Delgado, F.; Taipe, E.; Audin, L & Pari, W. (2013) - Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 55, 261 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/296>
- Bieniawski, Z.T. (1989) - *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. New York: John Wiley & Sons, 251 p.
- Cabrera, J. (1988) - *Néotectonique et sismotectonique dans la Cordillère andine au niveau du changement de géométrie de la subduction: la région de Cusco (Pérou)*. Thèse Docteur 3ème cycle, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, Paris, 275 p.
- Candia, F. & Carlotto, V. (1985) - *Estudio geológico de la zona Huambutío-Lamay*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, 86 p.
- Carlotto, V.; Cárdenas, J. & Carlier, G. (2011) - Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1:50,000. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 138, 261 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/99>
- Carlotto, V.; Cárdenas, J.; Reitsma, M. & Rodriguez, R. (2010) - Las edades de la Formación Ene y del Grupo Mitu: propuesta de cambios en la cartografía regional: Abancay-Cusco-Sicuani. En: Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco 2010. *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 830-833.
- Carlotto, V.; Gil, W.; Cárdenas, J. & Chávez, R. (1996) - Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. Hojas: 27-r y 27-s. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 65, 245 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/187>
- Carlotto, V.; Jaillard, E. & Mascle, G. (1992) - Relación entre sedimentación, paleogeografía y tectónica en la región de Cusco (sur del Perú) entre el Jurásico superior - Paleoceno. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (83): 1-20.
- Castillo, Y.A.; Ojeda, H.L. (2019) - *Evaluación del nivel de peligrosidad originado por movimientos en masa en la quebrada Saqramayo distrito Santiago- Cusco*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/4129>
- Condori, E. (2016) - *Evaluación hidrogeológica de la microcuenca Mariño - Apurímac*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, 189 p. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/3487>

- Córdova, E. (1986) – *Un bassin intramontagneux andin péruvien. Les couches rouges du bassin de Cuzco (Maestrichtien-Paléocène)*. Docteur du 3ème cycle, Université de Pau et des Pays de L'Adour, Laboratoire de Géodynamique des Bassins Sédimentaires, Pau, 272 p.
- Cruden, D.M. (1991) – A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 43: 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996) - Landslide types and processes. En: Turner, A.K. & Schuster, R.L., eds. *Landslides: investigation and mitigation*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, p. 36-75.
- Cusco. Municipalidad Provincial (2013) - *Plan de Desarrollo Urbano Cusco al 2023*: Tomo I. (consulta: mayo, 2019). Disponible en: <http://www.cusco.gob.pe/wp-content/uploads/2015/05/generalidades.pdf>.
- Delgado, G. (2011) - *Evaluación ingeniero - geológica del cerro Picol, distrito San Jerónimo - región Cusco*, informe inédito. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 38 p., Informe Técnico A6583. <http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/1846>
- Dueñas, E. (1907) - Aspecto minero del departamento de Cuzco. *Boletín Cuerpo Ingenieros de Minas Perú*, 53: 1-194.
- Duque, G. (2020) - *Manual de geología para ingenieros*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 431 p. (Consulta 18 de agosto 2016). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3145>
- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (2009) - *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ginebra: Naciones Unidas, UNISDR, 38 p. [https://www.unisdr.org/files/7817\\_UNISDRTerminologySpanish.pdf](https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf)
- Ferrer, M. & González de Vallejo, L.I. (1999) - *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, 132 p.
- Gabelman, J.W. (1967) - Estructura y origen de El Rodadero, Cuzco, Peru. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (40): 55-71.
- Galdos, J.; & Carrasco, S. (2002) - *Mapa geológico del cuadrángulo de Tambobamba. Escala 1:50 000. Hoja 28-r-I*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2126>
- González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. (2002) - *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación, 715 p.
- Goodman, R.E. (1989) - *Introduction to rock mechanics*. 2. ed. New York: John Wiley, 562 p.
- Gregory, H.E. (1914) - The Rodadero (Cuzco, Peru): a fault plane of unusual aspect. *American Journal of Sciences*, 37(220): 289-298. <https://doi.org/10.2475/ajs.s4-37.220.289>
- Gregory, H.E. (1916) – A geological reconnaissance of the Cuzco valley, Peru. *American Journal of Sciences*, 41(241): 1-100. <https://doi.org/10.2475/ajs.s4-41.241.1>
- Hoek, E. (1994) - Strength of Rock and Rock Masses. *ISRM News Journal*, 2(2): 4-16. [https://www.isrm.net/fotos/gca/1332169399isrm\\_newsjournal\\_-\\_1994,\\_volume\\_2,\\_number\\_2\\_web.pdf](https://www.isrm.net/fotos/gca/1332169399isrm_newsjournal_-_1994,_volume_2,_number_2_web.pdf)
- Hoek, E. & Bray, J. (1981) - *Rocks slope engineering*. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 358 p.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1997) - Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8): 1165-1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hoek, E. & Diederichs, M.S. (2006) - Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2): 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2000) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 1. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 23, 330 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/312>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017) - *Censos Nacionales 2017: XII de Población; VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Sistema de consulta de base de datos* (en línea). Lima: INEI. <http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018) – *Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2017*: Cusco (en línea). Lima: INEI, tomo 1. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1559/](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1559/)
- International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1981) - Suggested methods for determining

- hardness and abrasiveness of rocks. En: Brown, E.T. *Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Oxford; New York: ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests.
- International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1978) - Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91472-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91472-9)
- Marocco, R. (1978) - Estudio geológico de la Cordillera de Vilcabamba. *Instituto de Geología y Minería, Boletín, Serie D: Estudios Especiales*, 4, 157 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/321>
- Martín-Serrano, A.; Salazar, A.; Nozal, F. & Suárez, A. (2005) - *Mapa geomorfológico de España a escala 1:50.000: Guía para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 128 p.
- Meinzer, O.E (1923) – The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 489, 321 p. <https://doi.org/10.3133/wsp489>
- Oviedo, M. (2009) - *Geología, geodinámica y simulación de flujos Flo 2D en la quebrada de Saphy – Cusco*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 115 p.
- Pedraza, J. (1996) - *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid: Ed. Rueda, 414 p.
- Peña, F.; Carlotto, V. & Luna, C. (2004) - Hidrogeología del valle del Huatanay (Cusco): proyectos de captación de aguas subterráneas. En: Congreso Peruano de Geología, 12, Lima, 2004, *Resúmenes extendidos*, Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 363-366.
- Price, N.J. (1966) - *Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock*. Oxford: Pergamon Press, vol. 1, 176 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-05410-2>
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007) - *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 432 p., Publicación Geológica Multinacional, 4. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2830>
- Romana M. & Serón, J. (2004) - Formatos normalizados para la toma de datos de campo a usar en las clasificaciones geomecánicas RMR (Bieniawski), Q (Barton) y SMR. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, 128: 18-22.
- Robinson, E.S. (1990) - *Geología física básica*. México : Limusa, 699 p.
- Slob, S. (2010) - *Automated Rock mass characterization using 3-D terrestrial laser scanning*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, 210 p. [https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers\\_2010/phd/slob.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2010/phd/slob.pdf)
- Struckmeier, W.F. & Margat, J. (1995) - *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend*. Hannover: International Association of Hydrogeologists, 193 p. International Contributions to Hydrogeology, 17.
- Suárez, J. (1998) - *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda, 548 p. <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- The Geological Society, Engineering Group Working Party (1977) - The description of rock masses for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 10: 355-388. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1977.010.04.01>
- Valderrama, L.; Montenegro, E. & Galindo, J. (1964) - *Reconocimiento forestal del departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 86 p.
- Varnes, D.J. (1978) - Slope movement types and processes. En: Schuster, R.L. & Krizek, R.J., eds., *Landslides: analysis and control*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 176, p. 11-33.
- Vilchez, M.; Luque, G. & Rosado, M. (2013) - Riesgo geológico en la Región Piura. INGEMMET, *Boletín, Serie C: Geodinámica e Ing. Geológica*, 52, 282 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/294>
- Vilchez, M.; Sosa, N.; Pari, W. & Peña, F. (2020) - Peligro geológico en la región Cusco. INGEMMET, *Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 74, 202 p, 9 mapas. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2564>

- Villota, H. (2005) - *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras*. 2. ed. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 210 p.
- Zavala, B. & Rosado, M. (2011) - Riesgo geológico en la región Cajamarca. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 44, 404 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/300>
- Zavala, B.; Vilchez, M.; Rosado, M; Pari, W. & Peña, F. (2014) - Estudio geoambiental en la cuenca del río Colca. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 57, 236 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/293>

## **ANEXOS**

### **Anexo I. Fichas de registro de clasificación geomecánica por método RMR**

Los anexos están disponibles en formato digital desde el Repositorio Institucional del Ingemmet en la siguiente dirección  
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/3136>





## RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES

### Mapas

<b>Mapa 1</b>	Litológico.
<b>Mapa 2</b>	Zonificación geomecánica de macizo rocoso.
<b>Mapa 3</b>	Pendientes del terreno.
<b>Mapa 4</b>	Geomorfológico.
<b>Mapa 5</b>	Hidrogeológico.
<b>Mapa 6</b>	Cobertura vegetal.
<b>Mapa 7</b>	Inventario y procesos de movimientos en masa.
<b>Mapa 8</b>	Susceptibilidad a movimientos en masa.
<b>Mapa 9</b>	Susceptibilidad a inundación fluvial y erosión fluvial.
<b>Mapa 10</b>	Zonas críticas.

### Figuras

<b>Figura 2.1</b>	Mapa de ubicación.
<b>Figura 2.2</b>	Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de Cusco.
<b>Figura 2.3</b>	Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de San Jerónimo.
<b>Figura 2.4</b>	Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de San Sebastián.
<b>Figura 2.5</b>	Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de Santiago.
<b>Figura 2.6</b>	Crecimiento de poblacional urbana entre 1972 y 2017 en el distrito de Santiago.
<b>Figura 2.7</b>	Distribución porcentual de materiales de construcción predominante en las paredes en el área urbana de la ciudad del Cusco.
<b>Figura 2.8</b>	Materiales de construcción predominante en las paredes en el área urbana de la ciudad del Cusco.
<b>Figura 2.9</b>	Promedio de temperatura normal para Cusco.
<b>Figura 3.1</b>	Columna litológica de la subunidad unidad V-2.
<b>Figura 3.2</b>	Columna litológica de la unidad.
<b>Figura 3.3</b>	Columna litológica de la unidad V-4.
<b>Figura 3.4</b>	Columna litológica de la unidad V-5
<b>Figura 3.5</b>	Columna litológica de la unidad V-8.
<b>Figura 3.6</b>	Columna litológica de la unidad V-9.
<b>Figura 3.7</b>	Columna litológica generalizada de las unidades litológicas y formaciones geológicas.
<b>Figura 4.1</b>	Mapa de ubicación de las estaciones geomecánicas realizadas.

- Figura 4.2** Metodología empleada (Scaline) y toma de datos en formatos de registros adecuados a las normas sugeridas por Working Party of the Geological Society (1977) y la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).
- Figura 4.3** Gráfico de correlación de la resistencia a la compresión simple propuesta por Schmidt.
- Figura 4.4** Histograma de resistencias generales.
- Figura 4.5** Representación gráfica de las características de las discontinuidades que se tomaron en cada estación geomecánica.
- Figura 4.6** Representación gráfica de las orientaciones obtenidas en una estación geomecánica.
- Figura 4.7** Representación estereográfica equiarial de dispersión de datos estructurales de las discontinuidades (Juntas) que utilizan el programa Dips v.6.0 de la compañía Rocscience.
- Figura 4.8** Diagrama de rosetas de las discontinuidades que utilizan el programa Dips v.6.0 de la compañía Rocscience.
- Figura 4.9** Histograma de las discontinuidades.
- Figura 4.10** Izquierda: Histograma de persistencias. Derecha: tabla de reconocimiento de la descripción de las persistencias.
- Figura 4.11** Histograma de abertura en discontinuidades.
- Figura 4.12** Izquierda: Histograma de la rugosidad. Derecha: tabla de reconocimiento de la descripción de la rugosidad.
- Figura 4.13** Histograma que muestra la variación del RQD.
- Figura 4.14** Estimación del GSI, basado en observaciones geológicas.
- Figura 4.15** a) valor GSI estimado para la subunidad de conglomerados, areniscas y arcillitas; b), c) y d) se observa la estructura del macizo completamente desintegrada, fácilmente disgregable y fuertemente meteorizado.
- Figura 4.16** a) valor GSI estimado para la subunidad de dioritas; b) macizo fuertemente fracturado y meteorizado.
- Figura 4.17** a) valor GSI estimado para la subunidad de limolitas, limoarcillitas y arenas; b) y c) se observa un macizo desintegrado, sin fracturaciones visibles y muy meteorizado.
- Figura 4.18** a) valor GSI estimado para la subunidad de arcillitas y areniscas; b) formado por un macizo desintegrado sin discontinuidades visibles, gran contenido de material fino y fuertemente meteorizado; c) macizo fracturado y perturbado, con numerosas discontinuidades e igualmente muy meteorizado.
- Figura 4.19** a) orientación de las discontinuidades en la subunidad de arcillitas y areniscas; b) macizo con resistencia baja, fuertemente fracturado y afectado por la falla Tambomachay; c) macizo muy fracturado, RQD malo, juntas medianamente separadas, continuidad media, moderadamente meteorizada; d) macizo muy fracturado, RQD malo, continuidad media-baja muy meteorizada.
- Figura 4.20** a) valor de GSI estimado para la subunidad de yesos; b) macizo desintegrado sin discontinuidades visibles, gran contenido de material fino y fuertemente meteorizado.
- Figura 4.21** a) orientación de las discontinuidades encontradas en el macizo rocoso; b) macizo de resistencia baja con RQD malo, juntas próximas, continuidad baja y muy meteorizado.
- Figura 4.22** a) valores de GSI estimados para la subunidad de areniscas, arcillitas y conglomerados; b) Estación N° 08 presenta macizo desintegrado sin discontinuidades visibles, gran contenido de material fino y fuertemente meteorizado; c) Estación N° 12 formado por macizo de estructura fracturada y perturbada, con numerosas discontinuidades y fuertemente meteorizado.
- Figura 4.23** a) orientación de las discontinuidades formadas principalmente por 3 familias; b) macizo de resistencia baja, fracturamiento malo, persistencia media; c) macizo plegado y fracturado de calidad regular, de continuidad promedio media; d) macizo de fracturamiento medio, poco persistente, discontinuidades onduladas lisas.

- Figura 4.24** a) y b) macizo de resistencia media, grado de fracturación muy bueno; las juntas se encuentran muy separadas y de continuidad baja; c) orientación de las discontinuidades que forman 3 familias.
- Figura 4.25** a) y b) macizo de resistencia media, grado de fracturación buena, las juntas se encuentran medianamente separadas y de continuidad baja; c) orientación de las discontinuidades encontradas.
- Figura 4.26** Presenta una estructura intacta o masiva, con escasas discontinuidades ampliamente separadas. La condición de superficie es buena, muy resistente y levemente meteorizadas.
- Figura 6.1** Inventario de fuentes de agua subterránea en época de estío (setiembre – octubre 2018).
- Figura 6.2** Perfil esquemático de la galería filtrante de Salkantay, capta aguas subterráneas en los acuíferos fisurados sedimentarios de la Formación Kayra, condicionado por el cambio de litología y la falla Tambomachay.
- Figura 6.3** Mapa de caudales de descarga de agua subterránea.
- Figura 6.4** Porcentaje de ocupación de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio.
- Figura 6.5** En color celeste se muestra la distribución espacial de acuíferos porosos no consolidados en la ciudad del Cusco.
- Figura 6.6** Distribución espacial de acuíferos fisurados sedimentarios (verde claro), acuíferos fisurados kársticos (verde oscuro) y acuífero volcánico sedimentario (violeta).
- Figura 6.7** Sistema ideal de fracturas debido a deformación frágil en un material poroso y permeable. (Fuente: Condori, 2016).
- Figura 6.8** Distribución espacial de acuitardos, en marrón claro los acuitardos sedimentarios y no consolidados (coluviales) y en marrón oscuro los acuitardos volcánicos e intrusivos.
- Figura 7.1** Vista de la unidad bosque denso (Abde) en imagen satelital Perusat-1 del 2018.
- Figura 7.2** Vista de la imagen satelital Perusat-1 2018 (imagen de la izquierda) y su combinación de bandas 432 (imagen de la derecha) para la delimitación de la unidad de matorrales (Ma).
- Figura 7.3** Vista de la imagen satelital Perusat-1 2018 (imagen de la izquierda) y su procesamiento digital en bandas 432 (imagen de la derecha) para la delimitación de la unidad de cultivos (Tcu).
- Figura 7.4** Vista de la unidad de cobertura vegetal: Bofedales (Bo), en imagen satelital Perusat-1 del 2018.
- Figura 7.5** Vista de la imagen satelital Perusat-1 2018 (imagen de la izquierda) y su combinación de bandas 432 (imagen de la derecha) para la delimitación de la unidad de lagunas, oconales y cuerpos de agua (Lag).
- Figura 8.1** Esquema de la caída de rocas.
- Figura 8.2** Esquema de un deslizamiento rotacional mostrando los rasgos morfológicos característicos.
- Figura 8.3** Esquemas de deslizamientos traslacionales.
- Figura 8.4** Esquema de flujos canalizados y no canalizados, según Cruden y Varnes (1996).
- Figura 8.5** Esquemas de reptación y soliflucción, según Corominas Dulcet y García Yagué, 1997.
- Figura 8.6** Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área de estudio.
- Figura 8.7** Porcentaje, según la edad de los movimientos en masa y otros peligros que ocurrieron en el área de estudio.
- Figura 8.8** Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de Cusco.
- Figura 8.9** Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de San Jerónimo.
- Figura 8.10** Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de San Sebastián.

<b>Figura 8.11</b>	Estadística de ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos en el área del distrito de Santiago.
<b>Figura 10.1</b>	Distribución de puntos críticos por distritos pertenecientes a la ciudad del Cusco.
<b>Figura 10.2</b>	Modificación del cauce de la quebrada Huacotomayo en los años 1962 y 2018; también se observa las variaciones morfológicas del río Huatanay.
<b>Figura 10.3</b>	Modificación realizadas a los cauces de los ríos Pumamarca y Huatanay, vista en la comparación de fotografía aérea de 1962 y la imagen satelital del 2018; también se observa los elementos expuestos.
<b>Figura 10.4</b>	Imagen satelital de la Quebrada Sipaspujio donde se observa múltiples ocurrencias de movimientos en masa y viviendas asentadas en las laderas y en el fondo de la quebrada. Fuente: Google Earth Pro.
<b>Figura 10.5</b>	Modificación del cauce del río Huatanay para la construcción del aeropuerto vista en la fotografía aérea de 1962 y en la imagen satelital de PeruSat-1 del 2018.
<b>Figura 11.1</b>	Efecto de una escollera sobre la resistencia del terreno.
<b>Figura 11.2</b>	Colocación de escollera.
<b>Figura 11.3</b>	Esquema de un talud con bermas intermedias.
<b>Figura 11.4</b>	Detalle de una canaleta de drenaje superficial.
<b>Figura 11.5</b>	Disposición de sistema de drenaje en taludes no homogéneos.
<b>Figura 11.6</b>	Esquema de drenaje de un talud por medio de drenes californianos.
<b>Figura 11.7</b>	Posición óptima de una galería de drenaje.
<b>Figura 11.8</b>	Drenaje de la superficie de deslizamiento desde una galería de drenaje.
<b>Figura 11.9</b>	Disposición de zanjas de drenaje en un talud.
<b>Figura 11.10</b>	Zanjas de talud.
<b>Figura 11.11</b>	Drenaje tipo espina de pescado.
<b>Figura 11.12</b>	Detalles de un anclaje y ejemplos de aplicación.
<b>Figura 11.13</b>	Contención de un deslizamiento mediante un muro.
<b>Figura 11.14</b>	Relleno estabilizador sostenido por el muro.
<b>Figura 11.15</b>	Tipos de muros: a) Muro de sostenimiento b) Muro de contención c) Muro de revestimiento.
<b>Figura 11.16</b>	Muros de gravedad de piedra seca.
<b>Figura 11.17</b>	Muros de gravedad de concreto ciclópeo.
<b>Figura 11.18</b>	Muros de espesor máximo.
<b>Figura 11.19</b>	Muros en L.
<b>Figura 11.20</b>	Muros de concreto armado tipo flexión.
<b>Figura 11.21</b>	Sección transversal en base a gaviones diseñados para defensa ribereña en el río.
<b>Figura 11.22</b>	Ejemplo de muros con pilotes.
<b>Figura 11.23</b>	Ejemplo de muros de pantalla.
<b>Figura 11.24</b>	Obras hidráulicas transversales para el control de la erosión en cárcavas.
<b>Figura 11.25</b>	Trincho de matorral tipo doble hilera de postes.
<b>Figura 11.26</b>	Trincho de matorral tipo una hilera de postes.
<b>Figura 11.27</b>	Trincho de piedra para cabecera de cárcava en zona de mina.
<b>Figura 11.28</b>	Vista en planta y en perfil de los procesos de forestación en cabeceras y márgenes de las áreas inestables.

<b>Figura 11.29</b>	Protección del lecho de la quebrada con muros escalonados (andenes), utilizando bloques de roca o concreto armado.
<b>Figura 11.30</b>	Protección de márgenes con enrocado, espigones y siembra de bosques ribereños.
<b>Figura 11.31</b>	Presas transversales a cursos de quebradas.
<b>Figura 11.32</b>	Sensores utilizados para el monitoreo de flujos de detritos (Soil and Water Conservation Bureau SWCB).
<b>Figura 11.33</b>	Estación de monitoreo de flujo de detritos (Soil and Water Conservation Bureau SWCB).

### **Cuadros**

<b>Cuadro 4.1</b>	Criterio para el ensayo de resistencia con el martillo de Schmidt (ISRM, 1981)
<b>Cuadro 4.2</b>	Criterio para la descripción del espaciado de discontinuidades
<b>Cuadro 4.3</b>	Criterio para la descripción de la persistencia de las discontinuidades
<b>Cuadro 4.4</b>	Criterio para la descripción de la abertura en discontinuidades
<b>Cuadro 4.5</b>	Criterio para la descripción de la rugosidad en las superficies de las discontinuidades
<b>Cuadro 4.6</b>	Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el tipo RQD
<b>Cuadro 4.7</b>	Parámetros de clasificación geomecánica RMR
<b>Cuadro 4.8</b>	Resumen de porcentajes correspondientes a cada litología y su calidad de roca evaluada
<b>Cuadro 5.1</b>	Porcentaje de ocupación de área de las subunidades geomorfológicas
<b>Cuadro 6.1</b>	Inventario de fuentes de agua subterránea encontradas en el valle del Cusco
<b>Cuadro 6.2</b>	Inventario de fuentes de agua subterránea y parámetros físico-químicos
<b>Cuadro 6.3</b>	Inventario de galerías filtrantes de la ciudad del Cusco. Modificado de Peña <i>et al.</i> , 2010
<b>Cuadro 6.4</b>	Clasificación de la descarga según Meinzer (1923)
<b>Cuadro 6.5</b>	Caracterización hidrogeológica según la litología de las formaciones geológicas
<b>Cuadro 7.1</b>	Unidades de cobertura vegetal
<b>Cuadro 8.1</b>	Tipos de movimientos en masa
<b>Cuadro 8.2</b>	Cronología de principales peligros geológicos por movimiento en masa y otros ocurridos en el área de estudio
<b>Cuadro 9.1</b>	Variables y porcentajes
<b>Cuadro 9.2</b>	Valoración de las unidades litológicas
<b>Cuadro 9.3</b>	Valoración del tipo de pendiente
<b>Cuadro 9.4</b>	Valoración de las unidades geomorfológicas
<b>Cuadro 9.5</b>	Valoración de las unidades hidrogeológicas
<b>Cuadro 9.6</b>	Valoración de las unidades de cobertura vegetal
<b>Cuadro 9.7</b>	Ponderación de variables en el análisis de la susceptibilidad a las inundaciones
<b>Cuadro 9.8</b>	Valoración del tipo de pendiente
<b>Cuadro 9.9</b>	Valoración de las unidades geomorfológicas a la inundación
<b>Cuadro 9.10</b>	Grados de susceptibilidad a las inundaciones en el área de estudio
<b>Cuadro 10.1</b>	Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de San Jerónimo

<b>Cuadro 10.2</b>	Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de San Sebastián
<b>Cuadro 10.3</b>	Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de Cusco
<b>Cuadro 10.4</b>	Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de Santiago
<b>Cuadro 10.5</b>	Puntos críticos a peligros geológicos por procesos de movimientos en masa y otros en el distrito de Wanchaq

### Fotografías

<b>Fotografía 3.1</b>	Meteorización intensa que dio origen a material residual en el sector de Pumamarca.
<b>Fotografía 3.2</b>	Depósitos fluviales transportados y depositados al centro y márgenes del río. Quebrada Saphy, en la parte noroeste de la ciudad del Cusco.
<b>Fotografía 3.3</b>	Ejemplo de la distribución de fragmentos de roca y matriz fina en un depósito aluvial. Distrito de San Jerónimo.
<b>Fotografía 3.4</b>	Depósito proluvial en la margen del río Huacotomayo. Distrito de San Jerónimo.
<b>Fotografía 3.5</b>	Depósito coluvial en la quebrada del río Saphy, hacia el norte a pocos minutos de la plaza de armas de la ciudad.
<b>Fotografía 3.6</b>	Depósitos glaciares en las montañas del Pachatusan, donde se destaca el depósito de tipo morrena. Sector noreste de la ciudad.
<b>Fotografía 3.7</b>	Afloramiento de roca volcánica de la Formación Rumicolca (NPQ-ru) ubicado en el sector de Huaccoto, distrito de San Jerónimo.
<b>Fotografía 6.1</b>	(a) Bocatoma de la galería filtrante de Salkantay, (b) vista del caudal al interior de la galería filtrante de Saylla y (c) vista al interior de una galería filtrante Oropesa.
<b>Fotografía 6.2</b>	Calizas kárstificadas de la Formación Ayabacas con canales incas, depósitos residuales en la parte superior.
<b>Fotografía 7.1</b>	Vista de la unidad de bosque disperso (Abdi) formado principalmente por árboles de eucalipto de diferente altura.
<b>Fotografía 7.2</b>	Área de pastizales (Pa) que se extienden y cubre la mayor parte del área de estudio.
<b>Fotografía 7.3</b>	Vista de un área sin cobertura vegetal (Scv) producto de los proceso de erosión de ladera (cárcava) que ocurre en la cabecera de la quebrada Thuniyoc; cerro Pícol.
<b>Fotografía 7.4</b>	Vista panorámica del área urbana.
<b>Fotografía 10.1</b>	Viviendas ubicadas en las desembocaduras del cauce de las cárcavas que podría ser afectada por flujos.
<b>Fotografía 10.2</b>	Ladera de muy fuerte pendiente, deforestada y delimitada en lotes para construcción de viviendas donde pueden generarse derrumbes y flujos de lodo; además, se observa corte de talud escalonado. Se ubica en la margen derecha de la quebrada Huacotomayo.
<b>Fotografía 10.3</b>	Vista aguas arriba de la quebrada Huanacahuire en el sector de Mamatunya, las viviendas se han asentado muy cerca al cauce de la quebrada.
<b>Fotografía 10.4</b>	Confluencia de dos cárcavas por las cuales discurren flujos de lodo que pueden afectar viviendas localizadas aguas abajo.
<b>Fotografía 10.5</b>	Vista aguas arriba de la quebrada S/N donde se puede apreciar la línea férrea, las instalaciones de Petroperú. También es posible observar el cauce angosto de la quebrada.

<b>Fotografía 10.6</b>	Escarpas de activación de deslizamiento que varía de 7.5 y 12 metros en el cerro Pícol.
<b>Fotografía 10.7</b>	Viviendas de los sectores de Santa María, Huaynapicol y Larapa que podrían ser afectadas en caso de ocurrencia de flujos de detritos por deslizamiento.
<b>Fotografía 10.8</b>	Cárcava encauzada por la calle San Miguel con un canal revestido de concreto de sección angosta.
<b>Fotografía 10.9</b>	Cárcava encauzada por la calle Carrizales por un canal revestido de concreto y cubierto por la vereda.
<b>Fotografía 10.10</b>	Derrumbe ocurrido en la margen derecha de cárcava que afecto paredes de ladrillo y concreto de vivienda construida al pie de las márgenes.
<b>Fotografía 10.11</b>	Cabecera de quebrada S/N, donde se puede observar las terrazas realizadas en las vertientes para poder construir viviendas; también se observa el desmonte y basura arrojada en la quebrada.
<b>Fotografía 10.12</b>	Vista aguas arriba de la quebrada S/N, tomada desde la avenida Cultura Prolongación, se puede ver los trabajos de encauzamiento realizadas con muros de concreto.
<b>Fotografía 10.13</b>	Foto 10 Vista de parte del tramo encauzad, cubierto y desviado de la quebrada Timpoc.
<b>Fotografía 10.14</b>	Vista de aguas abajo de cárcava ocupada por viviendas de la A.P.V. El Chaparral, se observan pequeños derrumbes en la parte alta de la cárcava.
<b>Fotografía 10.15</b>	Cárcava en la A.P.V. Monterrey relleno con desmonte que viene siendo ofertada como lotes para vivienda.
<b>Fotografía 10.16</b>	Ladera del cerro Taucaray en la margen izquierda de la quebrada La Rinconada cortada por cárcavas y ocupada por nuevas viviendas que para ser construidas se realizan cortes en la ladera que desestabilizan el terreno.
<b>Fotografía 10.17</b>	Asentamiento en rellenos de desmonte y basura colocados en una de las cárcavas; se observa los agrietamientos del terreno y en las paredes de la vivienda.
<b>Fotografía 10.18</b>	Vista aguas abajo de curso de quebrada reducido, con viviendas construidas muy cerca.
<b>Fotografía 10.19</b>	Vista aguas arriba donde puede apreciar la ocupación total del cauce de una cárcava con viviendas de material noble.
<b>Fotografía 10.20</b>	Toma aguas abajo de cárcava que viene siendo ocupada progresivamente por viviendas de material noble.
<b>Fotografía 10.21</b>	Vistas de agrietamientos en la plataforma de carretera.
<b>Fotografía 10.22</b>	Se observa múltiples agrietamientos, asentamientos y endulzamientos en la plataforma de carretera.
<b>Fotografía 10.23</b>	Deslizamiento activo y procesos de erosión en cárcava en la margen izquierda de la quebrada Shihuila.
<b>Fotografía 10.24</b>	Acantilado vertical en la margen izquierda de la quebrada Shihuila; se observan viviendas construidas en el borde del acantilado.
<b>Fotografía 10.25</b>	Acantilado vertical a subvertical en la margen izquierda de la quebrada Shihuila; se observan viviendas construidas por encima del borde del acantilado y en el pie.
<b>Fotografía 10.26</b>	Procesos de erosión fluvial en ambas márgenes de la quebrada Shihuilla que podría afectar las viviendas.
<b>Fotografía 10.27</b>	Cauce del río Huatanay que pasa por debajo del centro histórico de la ciudad del Cusco.
<b>Fotografía 10.28</b>	Flujos de detrito y lodo que se generan producto derrumbes detonados en temporada de lluvias.
<b>Fotografía 10.29</b>	Deslizamiento rotacional activo sobre depósitos sedimentarios de la Formación Maras, se ubica en la margen derecha del río Chacán, norte del sector Huayttanccapampa.
<b>Fotografía 10.30</b>	Escarpa de deslizamiento rotacional activo ubicado en la Asociación Provienda Camino Real.
<b>Fotografía 10.31</b>	Saturación del suelo en el cuerpo del deslizamiento ubicado en la Asociación Provienda Camino Real. También, se observa buzón de sistema de alcantarillado que cruza el cuerpo del deslizamiento.

- Fotografía 10.32** Vivienda afectada en el lado derecho del deslizamiento, se observa fisuras en las paredes.
- Fotografía 10.33** Laderas inestables ubicadas en la quebrada Ayahuayco.
- Fotografía 10.34** Evidencia de derrumbes donde fallecieron personas en el 2011.
- Fotografía 10.35** Viviendas asentadas en el pie y en la cresta de ladera inestable.
- Fotografía 10.36** Parte alta de la quebrada Soltero Huayco afectada por procesos de erosión en cárcava y surcos.
- Fotografía 10.37** Viviendas asentadas en las laderas y en el fondo de la quebrada. Foto: Google.
- Fotografía 10.38** Caída de rocas y derrumbe en talud de la carretera de la avenida Antonio Lorena. También, se observa muros de contención construido en base a gaviones y talud cubierto con geomalla.
- Fotografía 10.39** Vestigios de ocurrencias de derrumbe en ambas laderas de la quebrada Sipaspujio.
- Fotografía 10.40** Viviendas asentadas en ladera de la quebrada Sipaspujio.
- Fotografía 10.41** Talud inferior de la carretera de la avenida Antonio Lorena donde se observa escarpa de deslizamiento.
- Fotografía 10.42** Quebrada Infiernillo, con obstáculo en su cauce para el libre pase de flujos.
- Fotografía 10.43** Vista aguas arriba de la quebrada Saqramayo con trabajos de estabilización.
- Fotografía 10.44** Viviendas asentadas en la ladera y el cauce de la quebrada.
- Fotografía 10.45** Grietas en la plataforma de la carretera que cruza la quebrada Saqramayo construida sobre depósito antropógeno.
- Fotografía 10.46** Depósito de desmonte en la quebrada Ccorimachachuayniyoc donde podría generarse flujos. Fuente: Google.
- Fotografía 10.47** Cauce de la quebrada Ccorimachachuayniyoc. Fuente: Google.
- Fotografía 10.48** Proceso de erosión en cárcava en desarrollo ubicado en el sector de Tinco.
- Fotografía 10.49** Viviendas asentadas en los bordes de la erosión en cárcava en el sector de Tinco.
- Fotografía 10.50** Escarpa principal del deslizamiento Humancharpa donde se observa la superficie de rotura planar.
- Fotografía 10.51** Depósito de deslizamiento Huamancharpa afectado por erosión en cárcava y derrumbes.







Av. Canadá 1470 - San Borja, Lima 41, Perú

Teléfono: 051 - 1- 618 9800

Fax: 051-1-225-3063 | 051-1-225-4540

[www.gob.pe/ingemmet](http://www.gob.pe/ingemmet)

[comunicacion@ingemmet.gob.pe](mailto:comunicacion@ingemmet.gob.pe)