

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**CONCEPTO DE MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA REDUCIR  
EL RIESGO DE DESASTRE POR HUAICOS EN ICA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

**Iván Carlos Vilcahuamán Brenis**

**ASESOR: Iris Violeta Dominguez Talavera**

Lima, marzo de 2015

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación presenta un concepto de medidas de prevención para reducir el riesgo de desastre por huaicos en la ciudad de Ica debido a la quebrada Cansas, departamento de Ica, República del Perú, mediante el estudio de la fenomenología del flujo de escombros.

La metodología de trabajo ha sido la recopilación de información bibliográfica, por medios físicos y digitales, y dos visitas a la quebrada Cansas, en donde se obtuvo fotografías y filmaciones del lugar.

Se investiga la naturaleza del flujo de escombros en base al trabajo de varios investigadores como Takahashi, Bagnold, Savage, Hutter e Iverson. Se aborda la física detrás del flujo de escombros, se identifican los parámetros característicos que lo gobiernan, se estudia la reología del flujo y la relación que tiene con otros tipos de flujos.

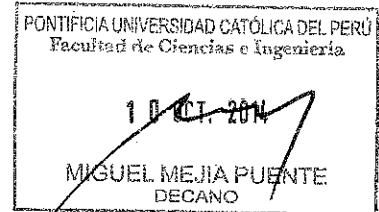
Después, se procede a caracterizar la quebrada Cansas mediante su hidrología, mecánica de suelos e impacto por actividades humanas y se estudia la relación que tiene el flujo de escombros en la quebrada con el Fenómeno El Niño 1997-1998, con énfasis en el día 29 de enero de 1998, y la destrucción ocasionada.

Luego, se presenta la información recopilada en las dos visitas realizadas a la quebrada Cansas y al río Ica y se expone brevemente las condiciones en las que se encuentran las medidas estructurales adoptadas.

Finalmente, se presenta el concepto de medidas de prevención que toma en cuenta el comportamiento del flujo, las condiciones locales de la quebrada, y los factores sociales, económicos y culturales. Para esta última parte, se recurre también al enfoque ecosistémico, a la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH), a la ciencia de restauración de ríos y a aspectos reológicos. Por último, se presentan las conclusiones del trabajo de investigación

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Concepto de medidas de prevención para reducir el riesgo de desastre por huaicos en Ica"  
Área : Recursos Hídricos  
Asesora : Dra. Iris Domínguez Talavera  
Alumno : IVÁN CARLOS VILCAHUAMÁN BRENIS  
Código : 2008.0287.7.412  
Tema N° : 5 5  
Fecha : Lima, 3 de octubre de 2014



JUSTIFICACIÓN

La cuenca hidrográfica del río Ica comprende quebradas de pendiente pronunciada, torrenteras de suelo aluvial que descargan en el río desde su margen izquierda. Entre ellas se encuentra la quebrada Cansas, conocida también como quebrada Cansas/Chanchajalla. Huaicos que escurren de quebradas como Cansas son conocidos por las pérdidas y los daños que causan en Ica.

El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) del año hidrológico 1997-1998, considerado como uno de los Mega-Niños en la historia del Perú, significó precipitaciones extraordinarias e inundaciones en el país. En Ica, lluvias fuera de serie produjeron escurrimientos cargados de sedimentos en quebradas que descargan en el río que cruza la ciudad de Ica. El día 29 de enero de 1998, un huaico de la quebrada Cansas alcanzó la ciudad, dejándola cubierta de lodo y escombros. La Corporación Andina de Fomento (CAF) estima que el daño total sufrido en el país ascendió a US\$ 3500 millones<sup>1</sup>. En Ica, los daños causados fueron de US\$ 272 millones (a precios de agosto del año 2008)<sup>2</sup>.

OBJETIVO

El objetivo del presente proyecto de tesis de investigación consiste en presentar un concepto de medidas de prevención para reducir el riesgo de desastre por huaicos de la quebrada Cansas. Las medidas estarán basadas en el estudio del flujo de escombros, la caracterización física y la situación actual de la quebrada Cansas, así como en el análisis de casos que presentan condiciones similares.

<sup>1</sup> En: "Agro, infraestructura y bienes privados requieren seguros ante El Niño", nota del diario El Comercio, 27 de junio de 2012.

<sup>2</sup> En: "Control de desbordes e inundaciones en la cuenca del río Ica y quebradas tributarias", presentación del Ing. J.M. Pineda Morán, Gerente General del Proyecto Especial Tambo Ccaracocha (PETACC), 10 de marzo de 2011 en Ica, en el marco del proyecto "¿Escasez de agua? Retos para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Ica", proyecto de DGI-PUCP.

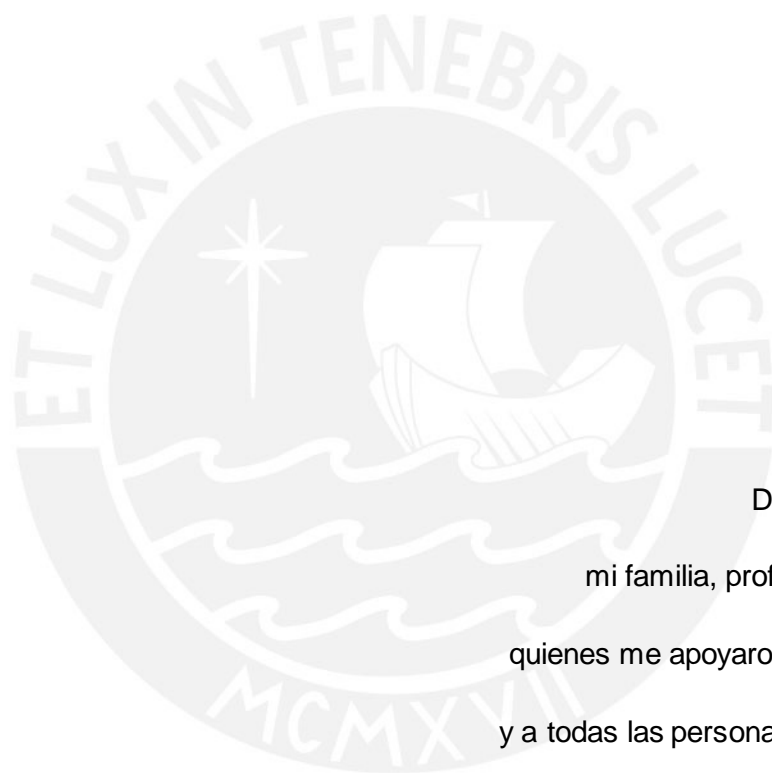
### METODOLOGÍA

Para desarrollar el tema de tesis, el estudiante considerará lo siguiente:

1. Se revisará bibliografía, luego se presentará el estado del arte de la ciencia del flujo de escombros.
2. Se visitará la zona de estudio para recoger información de la quebrada Cansas.
3. Se caracterizará la quebrada Cansas, en particular, en relación a El Niño en enero de 1998.
4. Se presentará una recopilación de medidas asumidas en Cansas para reducir los impactos por huaicos, así como medidas aplicadas en otros lugares de condiciones similares.
5. Se presentará un concepto de medidas para reducir el riesgo de desastres por huaicos de Cansas en Ica.
6. Se elaborará la memoria descriptiva con una extensión máxima de 100 páginas.

*Máximo: 100 páginas*





Dedico esta tesis a  
mi familia, profesores y amigos,  
quienes me apoyaron en este trabajo,  
y a todas las personas que se dedican  
a construir un mundo mejor  
mediante la investigación

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi completa gratitud con mis padres por darme siempre lo mejor, y con mi hermano y hermana por ser una motivación para mí. Asimismo, agradezco a mi asesora, la Dra. Iris Domínguez, por sus consejos y su confianza en esta investigación.



## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1: TEMA DE INVESTIGACIÓN.....                              | 1  |
| 1.1. Introducción.....  | 1  |
| 1.2. Justificación.....   | 2  |
| 1.3. Objetivos.....   | 2  |
| 1.4. Alcances.....  | 3  |
| 1.5. Hipótesis.....   | 3  |
| CAPÍTULO 2: MODELADO MATEMÁTICO DEL FLUJO DE ESCOMBROS.....         | 4  |
| 2.1. Particularidades del flujo de escombros.....                   | 4  |
| 2.1.1. Deslizamiento de la masa de suelo.....                       | 4  |
| 2.1.2. Fenomenología del flujo de escombros.....                    | 5  |
| 2.1.3. Distribución de granos sólidos.....                          | 7  |
| 2.1.4. Comportamiento del flujo.....                                | 10 |
| 2.2. Reología del flujo de escombros.....                           | 13 |
| 2.2.1. Fluidos Newtonianos y no Newtonianos.....                    | 13 |
| 2.2.2. Modelamiento numérico.....                                   | 16 |
| 2.2.3. Esfuerzos cortantes y ecuación reológica cuadrática.....     | 18 |
| 2.3. Aspectos que propician la falla de un talud.....               | 21 |
| 2.3.1. Factores hidrológicos.....                                   | 21 |
| 2.3.2. Factores geotécnicos.....                                    | 22 |
| 2.4. Relación del flujo de escombros con otros tipos de flujos..... | 25 |
| 2.4.1. Números característicos.....                                 | 25 |
| 2.4.2. Interpretación física.....                                   | 27 |
| CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA QUEBRADA CANSAS.....              | 31 |

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Cuenca del río Ica.....  | 31 |
| 3.1.1. Ubicación y características.....                                 | 31 |
| 3.1.2. Hidrología.....  | 31 |
| 3.1.3. Mecánica de suelos.....  | 33 |
| 3.1.4. Geología.....  | 34 |
| 3.2. Quebrada Cansas.....   | 34 |
| 3.2.1. Ubicación y características.....                                 | 34 |
| 3.2.2. Hidrología.....  | 35 |
| 3.2.3. Mecánica de suelos.....  | 35 |
| 3.2.4. Geología.....  | 36 |
| 3.3. Intervención humana en el río Ica y la quebrada Cansas.....        | 36 |
| 3.4. Amenaza de huaicos debido a precipitaciones extraordinarias.....   | 37 |
| CAPÍTULO 4: INFLUENCIA DEL FENÓMENO EL NIÑO.....                        | 40 |
| 4.1. El clima y mar peruano.....  | 40 |
| 4.2. Anomalías meteorológicas debido al Fenómeno El Niño 1997-1998..... | 40 |
| 4.2.1. Influencia en la costa.....                                      | 40 |
| 4.2.2. Influencia en la sierra.....                                     | 41 |
| 4.3. Efectos en el régimen normal del río Ica.....                      | 42 |
| 4.4. Daños provocados por el Fenómeno El Niño 1997-1998 en Ica.....     | 43 |
| CAPÍTULO 5: MEDIDAS EXISTENTES.....                                     | 46 |
| 5.1. Construcción de obras de ingeniería.....                           | 46 |
| 5.1.1. Construcción de diques en la quebrada Cansas.....                | 46 |
| 5.1.2. Encauzamiento del río Ica.....                                   | 51 |
| 5.2. Identificación de las vulnerabilidades de la zona.....             | 64 |



|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 6: CONCEPTO DE MEDIDAS DE PREVENCIÓN.....                            | 66 |
| 6.1. Marco bajo el cual se presenta el concepto de medidas de prevención..... | 66 |
| 6.1.1. El enfoque ecosistémico y la GIRH.....                                 | 67 |
| 6.1.2. La ciencia de la restauración de ríos.....                             | 68 |
| 6.1.3. Aspectos reológicos del flujo.....                                     | 71 |
| 6.2. Presentación del concepto de medidas de prevención.....                  | 72 |
| 6.2.1. Revegetación de la quebrada Cansas.....                                | 72 |
| 6.2.2. Control demográfico y de las actividades en la quebrada Cansas.....    | 74 |
| 6.2.3. Tiempos de respuesta ante la ocurrencia de huaicos.....                | 76 |
| 6.2.4. Registro de datos hidrológicos y geotécnicos.....                      | 80 |
| 6.2.5. Creación de un sistema de Pago por Servicios Ambientales.....          | 81 |
| 6.2.6. Construcción de presas de control de avenidas tradicionales.....       | 84 |
| CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....   | 86 |
| BIBLIOGRAFÍA.....   | 89 |
| ANEXOS.....   | 92 |
| MAPAS.....  | 93 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 5-1. Entrada a la quebrada Cansas (vista lateral izquierda).....           | 47 |
| Cuadro 5-2. Entrada a la quebrada Cansas (vista lateral derecha).....             | 48 |
| Cuadro 5-3. Vista frontal del dique E.....  | 48 |
| Cuadro 5-4. Huecos en la cara frontal del dique E.....                            | 49 |
| Cuadro 5-5. Interior del dique E (vista hacia aguas arriba).....                  | 50 |
| Cuadro 5-6. Vista frontal del dique B.....  | 50 |
| Cuadro 5-7. Interior del dique B (vista hacia aguas arriba).....                  | 51 |
| Cuadro 5-8. Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Socorro..... | 52 |
| Cuadro 5-9. Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Socorro.....  | 54 |
| Cuadro 5-10. Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Puno.....   | 55 |
| Cuadro 5-11. Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Puno.....    | 57 |
| Cuadro 5-12. Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Grau.....   | 58 |
| Cuadro 5-13. Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Grau.....    | 60 |
| Cuadro 5-14. Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Cutervo.... | 61 |
| Cuadro 5-15. Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Cutervo....  | 63 |
| Cuadro 6-1. Plantas en la quebrada Cansas.....                                    | 73 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Fig. 2-1. Conversión de energía.....  | 10 |
| Fig. 2-2. Posición inicial y final del material respecto a su centro de masa.....   | 10 |
| Fig. 2-3. Variación de la velocidad del fluido con la distancia a una placa plana.....                                    | 13 |
| Fig. 2-4. Relación entre el esfuerzo de corte y el ratio de corte.....  | 15 |
| Fig. 2-5. Características de mezclas no Newtonianas.....  | 17 |
| Fig. 2-6. Esquema del perfil y de los parámetros geométricos a usarse.....  | 22 |
| Fig. 2-7. Variación cualitativa del flujo de escombros a otros tipos de flujos.....                                       | 29 |
| Fig. 3-1. Caudales máximos anuales del río Ica.....   | 33 |
| Fig. 3-2. Área de la cuenca de recepción y de la cuenca húmeda.....   | 37 |
| Fig. 4-1. Precipitación acumulada (mm) en la Sierra Sur. Sept. 1982 -<br>Mayo 1983.....                                   | 41 |
| Fig. 4-2. Precipitación acumulada (mm) en la Sierra Sur. Sept. 1997 -<br>Mayo 1998.....                                   | 42 |
| Fig. 4-3 Descarga promedio mensual del río Ica en m <sup>3</sup> /s durante<br>El Niño 1982-1983 y El Niño 1997-1998..... | 43 |
| Fig. 6-1. Desmonte arrojado en la parte baja de la quebrada Cansas.....   | 74 |
| Fig. 6-2. Tiempo de respuesta frente a la ocurrencia de huaicos.....  | 79 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2-1. Ángulos de talud donde se inició el flujo de escombros.....                         | 22 |
| Tabla 3-1. Resumen de datos meteorológicos en la cuenca del río Ica.....                       | 32 |
| Tabla 3-2. Variación de la pendiente en la quebrada Cansas.....                                | 34 |
| Tabla 5-1. Relación de diques visitados.....   | 47 |
| Tabla 6-1. Conductividad hidráulica del suelo en la quebrada Cansas.....                       | 76 |
| Tabla 6-2. Viscosidad dinámica del agua.....   | 77 |
| Tabla 6-3. Valores típicos de las propiedades básicas de mezclas de<br>flujo de escombros..... | 78 |



## CAPÍTULO 1: TEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

El Hombre siempre ha intentado comprender la naturaleza, debido a la permanente interacción que tiene con ella. Los fenómenos naturales son fuente de fascinación, pero también generan desastres, los cuales son mayores cuando tenemos una combinación de factores humanos (ubicación de centros poblados en el trayecto de los huaicos).

Los desastres que generan la mayor cantidad de pérdidas son causados por fenómenos geológico-climáticos, como por ejemplo la falla del suelo, la cual puede presentarse como deslizamiento, licuación, expansión y hundimiento. Los deslizamientos son causados por factores naturales (luego de lluvias torrenciales y/o sismos), o por la actividad del Hombre (Kuroiwa 2002: 280-297).

El flujo en el que se concentra el presente estudio se denomina flujo de escombros y es conocido como huaico. Su estudio es de vital importancia, ya que de él se pueden inferir el comportamiento de otros tipos de flujos, como los flujos de lodo, de tierra y avalancha de rocas.

Los huaicos arrastran consigo una mezcla de material (suelo, bolones, rocas y escombros) a lo largo de su recorrido y tienen una gran capacidad destructiva. Los daños causados por estos flujos están bien documentados en la historia de la ciudad de Ica y en especial en la quebrada Cansas, sobre todo durante el Fenómeno El Niño 1997-1998.

La caracterización de la quebrada Cansas, cuyo inicio se ubica en las coordenadas 14°01'26" de latitud Sur y 75°39'12" de longitud Oeste, establece un marco preliminar para entender cómo se desarrollan los huaicos. Factores como el clima desértico, el suelo, las rocas de gran tamaño y el asentamiento de poblados en una zona de riesgo por huaicos también son incluidos dentro de este estudio.

Las medidas adoptadas hasta la fecha no han podido englobar la mayoría de los aspectos del problema. El encauzamiento del río Ica, a su paso por la ciudad del mismo nombre, con gaviones y muros de concreto, y la construcción de diques con enrocados cubiertos por una capa de cemento en la quebrada Cansas no pueden ser las únicas medidas para reducir el riesgo de desastre por huaicos, dado que se encuentran deterioradas. Por todo lo anterior, el concepto de medidas de prevención en este trabajo de investigación intentará cubrir ese vacío.

## 1.2. Justificación

La ciudad de Ica ha sufrido a lo largo de su historia sismos severos, acompañado de fenómenos de licuefacción de suelos, desbordes del río causados por las avenidas, los cuales suelen presentarse con el fenómeno de El Niño, y flujos de escombros originados en las quebradas que descargan en el área urbana (Bendezú y Mallqui: 63-69). Una de esas quebradas es la quebrada Cansas.

Históricamente, la quebrada Cansas se ha visto afectada por eventos hidrometeorológicos. De hecho, esta quebrada tuvo un papel fundamental en la inundación del año 1998. Debido a que los AA.HH. se encuentran cerca a la quebrada Cansas y al río Ica, son vulnerables frente a inundaciones, al igual que la ciudad de Ica (MEF 2010: 40).

A pesar que se han adoptado medidas para reducir el impacto de los huaicos que discurren por la quebrada Cansas, éstas se encuentran deterioradas, lo que reduce su eficiencia para proteger a la ciudad en el próximo evento. Por ejemplo, los diques construidos perpendiculares al cauce están resquebrados y colmatados.

Debido a esta situación, surge la necesidad de estudiar el flujo de escombros y presentar un concepto de medidas para reducir el riesgo de desastre por huaicos que consideren aspectos dejados de lado, como los factores humanos. Con ello, se puede planificar medidas para reducir el riesgo de desastre por el flujo de escombros que consideren el problema de manera integral y sostenible.

## 1.3. Objetivos

El objetivo general de la investigación es presentar un estudio preliminar sobre la naturaleza de los huaicos en la quebrada Cansas en forma de conceptos, los cuales puedan ser tomados como punto de partida para realizar investigaciones más profundas del fenómeno.

Los objetivos específicos son:

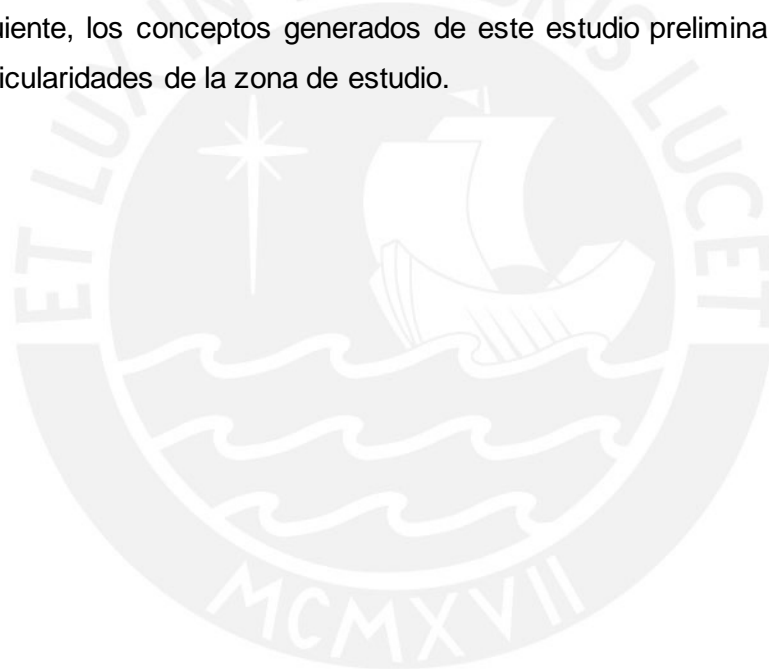
- Presentar el estado del arte del flujo de escombros.
- Caracterizar la situación actual de la quebrada Cansas en la cuenca hidrográfica del río Ica.

#### 1.4. Alcances

El presente trabajo de investigación comprende el estudio teórico de la naturaleza del flujo de escombros y los factores que influyen en su comportamiento por medio de recopilación de información bibliográfica y de campo (fotos y videos) de la quebrada Cansas. Se presentan conceptos importantes del fenómeno como un primer acercamiento al análisis del problema de huaicos en la ciudad de Ica y sus alrededores.

#### 1.5. Hipótesis

La investigación de los flujos de escombros realizada por investigadores de varios países permite estudiar el comportamiento de los huaicos en la quebrada Cansas si se identifican los parámetros importantes para este caso. Por consiguiente, los conceptos generados de este estudio preliminar son ajustados a las particularidades de la zona de estudio.





## CAPÍTULO 2: MODELADO MATEMÁTICO DEL FLUJO DE ESCOMBROS

### 2.1. Particularidades del flujo de escombros

Los flujos de escombros son iniciados por intensas lluvias, rápidos descongelamientos, actividad volcánica y por acciones del ser humano. El volumen y las propiedades de la matriz fluida gobiernan la hidráulica del flujo, su cese y las distancias recorridas. Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, tamaño de los granos y contenido de arcilla. Los flujos de escombros son mezclas de bolones y escombros donde la colisión de partículas lubricadas es el mecanismo dominante para la disipación de energía. Los flujos granulares (flujos no cohesivos sin un fluido lubricante) constituyen una subclase de flujo de escombros. (Julien y León: 1, 2).

El flujo de escombros puede movilizarse mediante tres mecanismos, los cuales pueden ocurrir de manera simultánea y sinérgica: falla de Coulomb, licuefacción de la masa de suelo y generación de temperatura granular. A diferencia de otros tipos de flujos, en el flujo de escombros parte (si no es toda) de la masa de suelo estará bajo el fenómeno de licuefacción, algo que no es posible que ocurra en flujos granulares secos, por ejemplo.

#### 2.1.1. Deslizamiento de la masa de suelo

El estudio de la movilización de una masa de suelo que se convierte en flujo de escombros requiere plantear hipótesis que tomen en cuenta las propiedades más importantes de la falla y que además permitan el manejo de un modelo reducido. Las hipótesis y los modelos relacionados a ese estudio son recogidos de Iverson et al (1997) y son las siguientes:

*-Hipótesis basada en un talud infinito de un suelo homogéneo e isotrópico.* Permiten construir modelos de una dimensión (el largo y el ancho de la masa de suelo a movilizarse es mucho mayor que su espesor), lo que permite realizar el cálculo de los esfuerzos mediante la estática. También se asume que la masa de suelo tiene o tendrá suficiente contenido de agua para saturar todos los poros.

*-Hipótesis basada en el modelo de Bingham.* Sostiene que la falla del suelo con determinada cantidad de agua sólo puede ocurrir a una profundidad tal que exceda al esfuerzo máximo que soporta el suelo (falla de Coulomb). No considera los efectos de los cambios dinámicos que puedan modificar la respuesta del suelo.



-*Hipótesis basada en el modelo de Takahashi.* Se trata de un talud en la que el suelo se encuentra completamente saturado y se tiene una corriente de agua superficial. Este último criterio fue añadido para tener la posibilidad que la falla pueda ocurrir con cualquier ángulo de inclinación del talud. Aún así, el ángulo de inclinación se restringe a  $\phi/2$  para la mayoría de los suelos, donde  $\phi$  es el ángulo de fricción interna del suelo. Por tanto, este modelo es aplicable a taludes con poca inclinación y en donde las inundaciones impongan una sobrecarga de agua de forma abrupta. Aquí, no se toma en cuenta la posibilidad que ocurra licuefacción.

-*Hipótesis basada en la mecánica de suelos.* El flujo de escombros está conformado por dos fases (sólida y líquida) en donde la presión del fluido excede niveles hidrostáticos. Lo último ocurre debido a que el flujo de agua en el interior del suelo es suficiente como para provocar la licuefacción del suelo una vez que la falla de Coulomb ocurre y la cohesión se pierde. Otra explicación propone que la movilización ocurre sólo en suelos sueltos con una densidad aparente menor que la densidad crítica. Comúnmente, se considera un estado no drenado del suelo, pero tal condición no se da en la realidad, ya que, a diferencia de los ensayos de laboratorio, el suelo no se encuentra rodeado de un contenedor. Lo que importa realmente es comparar la escala de tiempo de drenado versus la contracción del suelo. Si la porosidad se reduce a una velocidad tal que no le da tiempo a la presión de poros para equilibrarse, la presión de poros puede incrementarse a un nivel capaz de provocar la licuefacción del suelo (Iverson et al 1997: 95-99).

### 2.1.2. Fenomenología del flujo de escombros

a) *Dilatancia:* Nombrado así por Reynolds en el año 1889, es un comportamiento que ocurre cuando a un arreglo de partículas esféricas e idénticas se le somete a una carga que produce deformaciones cortantes. Las partículas tenderán a pasar una sobre la otra y disminuirán la densidad aparente del conjunto. El fenómeno está presente también en los sistemas granulares cuando se les somete a esfuerzos cortantes a gran velocidad, pero se debe a energía disipada en el sistema por las colisiones entre partículas. Si las partículas pueden interactuar lo suficiente como para generar choques, se genera presión dispersiva. Este es el caso del flujo granular estudiado por Bagnold. Por el contrario, si la interacción entre las partículas granulares es restringida o no la hay, el flujo se comportará como uno newtoniano (Hutter et al 1996: 7).

b) *Fricción interna y cohesión*: El flujo de escombros presenta una naturaleza dual (sólida y líquida). La naturaleza únicamente sólida se presenta en los estados inicial y final del flujo, con el llamado mecanismo de falla Mohr-Coulomb y la deposición del material el cual permanece en licuefacción por mucho tiempo. La estabilidad del material en un talud depende de la fricción entre los granos, el cual puede ser estudiado mediante el ángulo de fricción, el esfuerzo efectivo normal actuante y la cohesión del material fino (Hutter et al 1996: 7). La resistencia a la falla del suelo queda expresada por la siguiente ecuación:

$$|\tau| = c + \sigma \cdot \tan\phi \dots(2-1)$$

Donde:  $\tau$  es el esfuerzo cortante,  $c$  es la cohesión,  $\sigma$  es el esfuerzo normal y  $\phi$  es el ángulo de fricción del suelo. El ángulo  $\phi$  está en un rango de 20° a 45° durante la falla.

c) *Fluidización*: Los flujos granulares tienden a comportarse como flujos no newtonianos cuando están en movimiento, debido a que las deformaciones por cortante tienden a aumentar la presión dispersiva, ocasionando que las partículas “fluyan”. Cuando están mezclados con agua, la viscosidad del fluido actúa como lubricante. Se puede decir, entonces, que la combinación de deformaciones por cortante y la presencia de agua en los flujos de escombros produce una sinergia por la cual el material mixto fluye (Hutter et al 1996: 8).

d) *Segregación de partículas*: Es la tendencia de juntarse o acumularse partículas con características similares, como la densidad, tamaño, etc., ante la acción de una perturbación (agitación o deformación). En el caso del flujo de escombros, aun teniendo una distribución uniforme de partículas, las de mayor tamaño tienden a ocupar una posición en la superficie y a la cabeza (ola) del flujo. Para explicar el fenómeno, hay que pensar en un modelo de flujo granular. Una explicación cuantitativa fue propuesta por Savage y Lun en el año de 1988, mediante el empleo de un modelo estadístico llamado “mecanismo de tamizado de fluctuación aleatoria”. La idea es la siguiente: la probabilidad de encontrar un agujero dentro de la matriz del flujo granular por el cual una partícula de pequeño tamaño pueda pasar es mayor que la postulación contraria. En 1987, Iverson y Denlinger propusieron otra explicación basándose en dos mecanismos: modelo de esfuerzos dispersivos debido a la colisión de partículas, y cortes de las partículas en la mezcla. En el primer mecanismo, el perfil de la velocidad se asume convexa hacia arriba, mientras que el cortante y los esfuerzos dispersivos son

proporcionales al cuadrado del gradiente de la velocidad. Entonces, el cortante es mayor en las capas inferiores del flujo y, por tanto, las colisiones también. Como las colisiones son más frecuentes, las partículas de mayor tamaño serán las que recibirán mayor cantidad de golpes, haciendo que “suban” hacia la superficie o al exterior (al frente del flujo). Por otro lado, en el segundo mecanismo, se usa un modelo donde la mezcla es “cortada”. Las partículas recibirán energía rotacional debido a la interacción (fricción) durante los choques, siendo mayor en las partículas de mayor tamaño, lo que las “arrojará” hacia afuera y, con el tiempo, se irán acumulando en la superficie. Cabe recalcar que ninguna teoría hasta la fecha ha sido capaz de explicar satisfactoriamente este fenómeno. (Hutter et al 1996: 8-9).

e) *Temperatura granular*: Cuando la deformación del material de un talud llega a ser muy grande, es necesario tomar en cuenta al fenómeno conocido como temperatura granular. El término proviene de la Segunda Ley de la Termodinámica, la cual dice que a altas temperaturas, la densidad de un gas ideal se reduce y, por tanto, lo hace más fluido. Asimismo, no ocurre pérdida de energía. En el caso del flujo de escombros, el término indica que a mayor temperatura granular, la densidad de la mezcla se reduce, por tanto, la fluidez del material mixto mejora. La temperatura granular, a diferencia de los gases, no es literalmente una “temperatura”, sino que mide el nivel de agitación de los granos sólidos. A mayor agitación, la densidad aparente del flujo de escombros y la trabazón entre los granos se reduce. Los granos, entonces, se mueven con mayor facilidad uno por encima de otro. La forma en que la temperatura granular se mantiene en el flujo de escombros es mediante la conversión de energía traslacional a energía de fluctuación de granular. La disipación de energía ocurre por la interacción de los granos (choques inelásticos) y por el flujo de agua dentro de los poros. La energía potencial del material va convirtiéndose en energía traslacional conforme la superficie de falla va deslizándose cuesta abajo. En tanto, esta última se va transformando en energía de fluctuación granular a medida que los granos van chocando a lo largo de la superficie irregular de falla (Iverson et al 1997: 92-94).

### **2.1.3. Distribución de granos sólidos**

El flujo de escombros se caracteriza por contener una gran distribución de tamaño de granos, el cual puede variar desde las arcillas hasta los bolones. De hecho, puede incluir rocas de gran tamaño, razón por la cual es difícil poner un límite cuando se realiza un análisis granulométrico de la mezcla. En general, la

mayoría de flujos de escombros están compuestos por arena, grava y granos de mayor tamaño, mientras que las partículas del tamaño de los limos o las arcillas constituyen menos del 10% de la masa. Lo anterior demuestra que asumir un tamaño único de grano a la hora de caracterizar el flujo de escombros en los modelos, representa una simplificación bastante limitada de la realidad. Sin embargo, esta simplificación es necesaria para tener nociones básicas de la influencia del comportamiento del flujo de escombros bajo distintos tipos de suelo (Iverson 1997: 250).

Durante el flujo de escombros, diferenciar la parte sólida y la parte líquida de la mezcla no es fácil, ya que parte de los granos sólidos pueden ser arrastrados junto con el agua. Para ello, es necesario el uso de dos conceptos: la fracción efectiva de sólidos y la fracción efectiva de fluido. La primera se define como el volumen de granos que tienen un comportamiento sólido en el flujo de escombros, mientras que la segunda, el volumen de granos que junto con el agua tienen un comportamiento fluido en el flujo de escombros (Iverson 1997: 253).

La importancia de distinguir a los granos que se comportan de una u otra forma se debe a la necesidad de estimar el tipo de flujo que se tendrá por el deslizamiento de un talud (se verá en el ítem 2.4.). La distinción se hace considerando dos variables: la escala de tamaño y tiempo.

Para la primera, se define la variable  $\delta$  como el tamaño de un grano y un límite superior arbitrario  $\delta'$ . En un flujo, todos los granos con tamaño  $\delta < \delta'$ , se considerarán como parte del fluido, mientras que los restantes, se comportarán como sólidos. Debido a la relatividad al momento de asumir  $\delta'$ , por sí solo, esta condición no es suficiente para distinguir a los granos que se comportan como sólidos o como fluido en el flujo.

Ahora, para la segunda, se define la variable  $t_D$  como el tiempo en que un grano se asienta en un medio acuoso para condiciones estáticas, y  $t$  como la duración del flujo de escombros (puede variar de 10 a  $10^4$  segundos). En un flujo, todos los granos con  $t_D < t$  se comportarán como sólidos, mientras que los restantes, se considerarán como parte del fluido. Para estimar  $t_D$ , se dividirá la mitad del espesor del flujo de escombros  $h/2$  entre la velocidad con la que el grano se asienta  $v$  (puede ser obtenido de la Ley de Stokes o cualquier otra ecuación que tome en cuenta la inercia del grano). Entonces, se tiene  $t_D = \frac{(h/2)}{v}$ .

Cuando  $\frac{h}{2 \cdot t_D \cdot v} < 1$ , la duración del flujo de escombros es mayor que el tiempo que les toma a los granos asentarse (los granos se comportarán como sólidos). La mitad del espesor del flujo de escombros varía de 0.01 m, para flujos pequeños, a 10m, para flujos grandes. Con ello, se tiene que granos con  $v < 0.001$  m/s se considerarán como parte del fluido. Lo anterior cumple para granos con diámetros menores a 0.05 mm, por lo que puede tomarse como límite entre el comportamiento sólido y fluido a las arenas limosas, cuyo tamaño es aproximadamente 0.0625 mm. La restricción también se aplica para los granos con Número de Reynolds  $\ll 1$ , en donde las fuerzas viscosas controlan el movimiento. Como guía, puede asumirse que granos con tamaños mayores que los limos actuarán como sólidos, mientras que granos con tamaños menores pueden asumirse como parte del fluido (Iverson 1997: 254).

Es importante indicar que la viscosidad dinámica del agua  $\mu_w$  se ve afectada por la presencia de partículas de grano fino. Dicha relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 1 + 2.5 \cdot v_{finos} \dots (2-2)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad efectiva del agua,  $\mu_w$  es la viscosidad del agua y  $v_{finos}$  es el volumen de finos presente en la mezcla.

La fórmula anterior fue propuesta por Einstein en el año 1906 y es aplicable para esferas químicamente inertes en suspensión cuya fracción de volumen de finos en el fluido ( $v_{finos}$ ) sea menor a 0.1 y tenga un Número de Reynolds  $\ll 1$  (Iverson 1997: 255). Empíricamente, la fórmula toma la forma siguiente:

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 1 + 2.5 \cdot v_{finos} + 10.05 \cdot v_{finos}^2 + 0.00273 \cdot \exp(16.6 \cdot v_{finos}) \dots (2-3)$$

La fórmula anterior toma en cuenta el efecto del aumento de las concentraciones de finos en el fluido. No es aplicable si  $v_{finos} > 0.4$ , si la geometría de los granos es muy diferente a la esférica, y si las fuerzas de Van der Waals o las electrostáticas entre las arcillas y las partículas coloidales son importantes (Iverson 1997: 255).

#### 2.1.4. Comportamiento del flujo



El movimiento del flujo de escombros engloba una gran cantidad de energía que actúa desde el deslizamiento del talud y hasta la deposición del material. Conforme la energía se disipa, se va obteniendo un nivel de entropía mayor. La conversión de energía puede representarse de la siguiente manera:

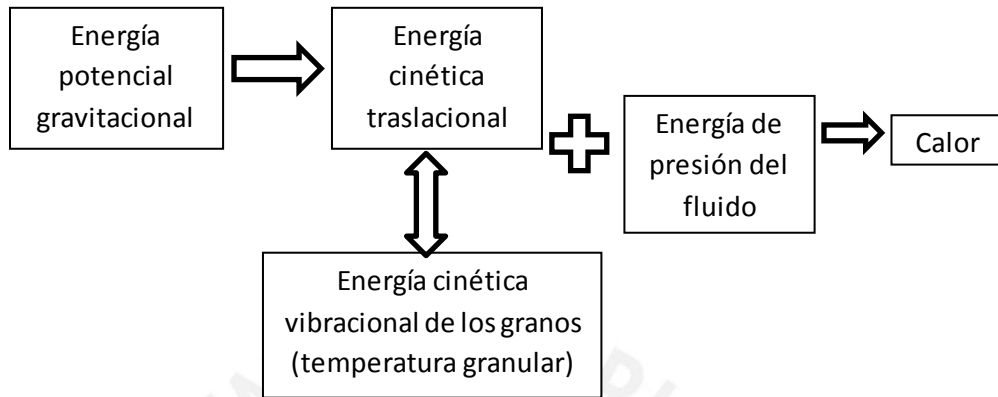


Fig. 2-1. *Conversión de energía.*  
(Referencia: adaptado de Iverson 1997)

Las flechas de un solo sentido indican procesos irreversibles de conversión de energía, mientras que la doble flecha indica reversibilidad. El movimiento del flujo será más eficiente si se produce menos procesos irreversibles.

La eficiencia neta será un indicador de la distancia que viaja el flujo de escombros desde el lugar de la falla hasta el lugar de deposición. En la siguiente figura se muestra los puntos inicial y final del centro de masa del material desplazado.

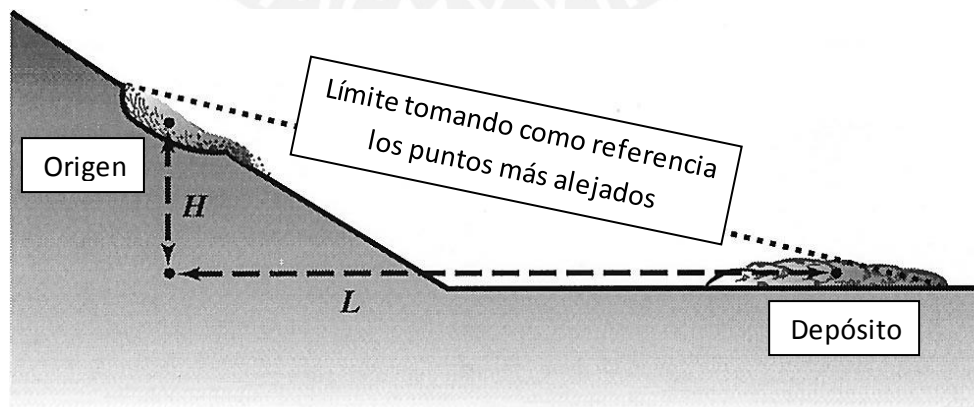


Fig. 2-2. *Posición inicial y final del material respecto a su centro de masa.*  
(Referencia: adaptado de Iverson 1997).

La energía total disipada del flujo por metro de descenso es 10 J/Kg, el cual puede elevar la temperatura de la mezcla en sólo 0.005 °C. En consecuencia, mediciones de la temperatura del flujo de escombros en campo provee información imprecisa sobre la disipación de energía. Convencionalmente, se asume un comportamiento mecánico e isotérmico del sistema (Iverson 1997: 248). El balance entre la energía potencial total perdida durante el movimiento ( $M \cdot g \cdot H$ , donde  $M$  es la masa del flujo de escombros) y la energía total convertida por procesos irreversibles debido a fuerzas resistentes ( $M \cdot g \cdot R \cdot L$ , donde  $R$  es el coeficiente de resistencia neta adimensional) conducirá a la siguiente relación:

$$\frac{1}{R} = \frac{L}{H} \dots (2-4)$$

En la ecuación anterior, la eficiencia es el término izquierdo. La relación entre la distancia recorrida por el flujo y la altura a la que ocurrió la falla da una aproximación de la eficiencia neta del flujo.

La evidencia experimental indica que:

- Para masas más o menos iguales, la eficiencia neta de un flujo de escombros (saturado) es mucho mayor que el de un flujo de sedimentos seco.

- Grandes flujos de escombros parecen tener mayores eficiencias netas que los pequeños.

- La eficiencia neta depende de la geometría y las condiciones de borde del recorrido que hace el flujo de escombros, los cuales determinan el nivel de erosión, la sedimentación y la canalización del flujo (Iverson 1997: 248).

A pesar que el volumen del flujo de escombros no figure en la Ecuación 04, sí afecta la eficiencia neta (valores estimados de eficiencia neta de flujos de escombros se muestran en el Anexo 01). Además, de acuerdo con Remaître et al (2005), existe una fuerte relación entre la distancia recorrida y el volumen del lugar de origen. De hecho, la distancia recorrida aumenta con el volumen de material desplazado.

Los flujos de escombros engloban el transporte de grandes materiales clásticos y de escombros caracterizados por olas frontales de impacto destructivo y el cese del flujo en taludes empinados. Los flujos de escombros son mucho menos fluidos que los torrentes de lodo. La matriz fluida es esencialmente no cohesiva y su

viscosidad es pequeña. El fluido intersticial no inhibe significativamente el contacto entre partículas, permitiendo colisiones frecuentes e impacto entre los clastos sólidos (Julien y León: 11).

La mayoría de flujos de escombros caen a lo largo de un talud formando varias olas inestables y no uniformes, y son capaces de llevar consigo bolones de más de 10 m de diámetro. Asimismo, se puede identificar tres partes del flujo: la cabeza, el cuerpo y la cola. La cabeza lleva consigo mucho material granular aparentemente seco y es la parte del flujo con mayor espesor. Por otro lado, el cuerpo es denso y consiste de suelo licuefactado. Por último, la cola es delgada y acuosa. Experimentalmente, las olas tienden a fusionarse con otras más pequeñas, aumentando su amplitud, lo que las vuelve inestables (Iverson 1997: 257).

En la cabeza, la presión de poros en la base del flujo es casi nula, mientras que en el cuerpo, es la suficiente como para mantener a la masa de suelo licuefactado. Las olas en la cabeza generalmente traen consigo el material más pesado: grandes concentraciones de suelo grueso, árboles derribados, partes de puentes, automóviles destrozados, etc. La acumulación de los granos gruesos puede darse por dos motivos: pueden ser incluidos en el flujo conforme este avanza, o ya pueden estar dentro del flujo desde el principio y son transportados a la cabeza de las olas. La presión de poros y la temperatura granular intervienen sinérgicamente. Como el suelo está licuefactado en la base del flujo, las partículas colisionan más fácilmente y elevan la temperatura granular. También es posible que la alta presión de poros se dé por consolidación del sedimento, volviendo inestable al flujo (Iverson, 1997: 259).

La deposición es la etapa final del flujo de escombros. Debido a las conversiones irreversibles de energía, la energía cinética llega a ser cero, por lo que el flujo se detiene. Por otro lado, conforme la temperatura granular tiende a cero, el perímetro de la deposición se va conformando por escombros, formando barreras que carecen de altas presiones de poros. Estas barreras detienen, a su vez, el cuerpo del flujo compuesto de agua y granos finos que sí retienen altas presiones de poros. Además, si aún se tienen olas de escombros con suficiente cantidad de movimiento para sobrepasar las barreras formadas en la cabeza, ellos pueden depositarse en forma vertical produciéndose un “congelamiento” del material. Observaciones experimentales indican que este congelamiento se da de abajo para arriba. También puede darse la acumulación de depósitos de eventos anteriores (Iverson 1997:260).



Por otro lado, la presión de poros en el centro del depósito puede conservarse por un largo tiempo, manteniendo al sedimento licuefactado. El drenaje es predominantemente vertical para depósitos de flujos de escombros con longitudes y anchos mucho mayores que sus espesores. Conforme la presión de poros decae, se produce la consolidación el suelo, la cual marca la transición del estado fluido al estado sólido del material (Iverson 1997:260). El tiempo de difusión de la presión de poros está expresado por la siguiente ecuación:

$$t_{dif} = \frac{h^2 \cdot \mu}{k \cdot E} \dots (2-5)$$

En la ecuación anterior,  $h$  es el espesor del depósito,  $\mu$  es la viscosidad dinámica efectiva del agua con suspensión de granos finos,  $k$  es la conductividad hidráulica y  $E$  es el módulo de rigidez del material compuesto (recíproco del módulo de compresibilidad).

## 2.2. Reología del flujo de escombros

La reología es el estudio de la deformación y flujo de la materia. Desde la perspectiva de la mecánica de fluidos, los materiales pueden ser clasificados como fluidos Newtonianos y no Newtonianos. Para diferenciarlos, es necesario presentar primero algunos conceptos.

### 2.2.1. Fluidos Newtonianos y no Newtonianos

En un fluido en movimiento, los esfuerzos de corte son desarrollados cuando las partículas del fluido se mueven con respecto a otra. El modelo usado es el siguiente:

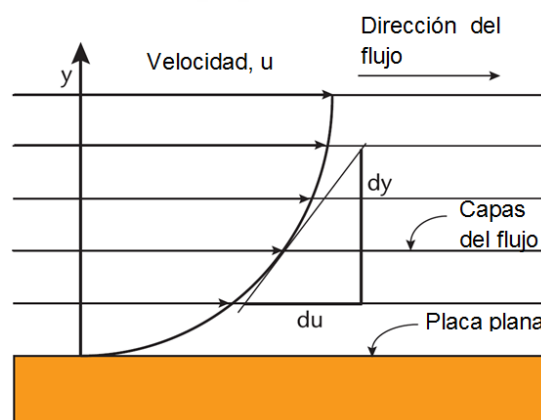


Fig. 2-3. Variación de la velocidad del fluido con la distancia a una placa plana.  
(Referencia: adaptado de WMD 2009)

De la Fig. 2-3 se observa que para sucesivas capas de flujo ubicadas encima de una placa plana, la velocidad  $u$  del fluido variará de capa a capa conforme la distancia  $y$  (distancia de una capa genérica a la placa plana) se incremente. La ley de viscosidad de Newton relaciona el esfuerzo cortante  $\tau$  con el gradiente de velocidad, también conocido como ratio de deformación por cortante, o simplemente ratio de corte ( $du/dy$ ), usando una constante de proporcionalidad conocida como la viscosidad dinámica  $\mu$  del fluido (WMD 2009: 1). Dicha relación se muestra a continuación:

$$\tau = \mu \cdot du/dy \dots (2-6)$$

Los fluidos que no obedecen la ley de viscosidad de Newton son conocidos como no Newtonianos.

Por su parte, Jewel y Fourie (2002) también dicen que la viscosidad (dándole el símbolo  $\eta$ ) de un fluido queda definida como el ratio entre el esfuerzo cortante  $\tau$  y el ratio de corte  $\dot{\gamma}$ , como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \dots (2-7)$$

Los fluidos Newtonianos inelásticos exhiben una relación lineal entre el esfuerzo de corte aplicado y el ratio de corte. El flujo se inicia tan pronto como el esfuerzo de corte es aplicado. La relación lineal entre el esfuerzo de corte y el ratio de corte indica una viscosidad constante, como se muestra en la Curva A de la Fig. 2-4. En cambio, los flujos no Newtonianos poseen un esfuerzo cortante inicial o esfuerzo fluencia  $\tau_o$ . Dicha relación se ve en la Curva B de la Fig. 2-4. A partir de aquí, cualquier esfuerzo cortante mayor que  $\tau_o$  iniciará el flujo y la deformación irreversible del material. Para esfuerzos aplicados menores a  $\tau_o$ , la red de partículas de la suspensión se deforma elásticamente, lo que significa que al retirarse el esfuerzo cortante, las deformaciones desaparecen y el material vuelve a su estado de deformaciones original (Jewel y Fourie 2002: 28).

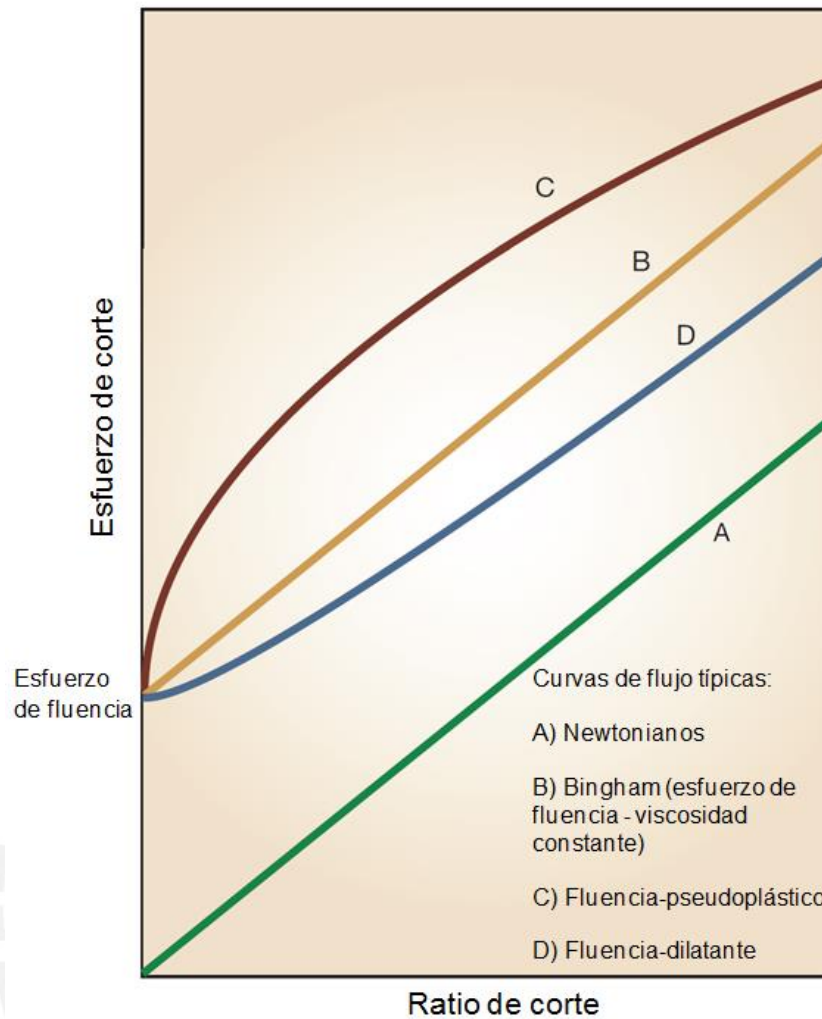


Fig. 2-4. *Relación entre el esfuerzo de corte y el ratio de corte.*

(Referencia: adaptado de Jewel y Fourie 2002)

Una vez que el esfuerzo de fluencia  $\tau_o$  es excedido, la suspensión exhibe un comportamiento líquido viscoso donde la viscosidad es usualmente una función decreciente del ratio de corte. Se tiene entonces las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\gamma} = 0, \tau < \tau_o \dots (2-8)$$

$$\tau = \tau_o + \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}, \tau > \tau_o \dots (2-9)$$

La Curva B de la Fig. 2-4. inicia con  $\tau_o$  seguido por una relación lineal entre el esfuerzo de corte y el ratio de corte. Este comportamiento es conocido como un comportamiento de Bingham. La pendiente de esa línea representa a la viscosidad plástica de Bingham. En la Curva C de la Fig. 2-4 se observa que, además de comenzar con  $\tau_o$ , la viscosidad del material varía con el ratio de corte. Así,

conforme el ratio de corte aumenta, los materiales pseudoplásticos exhiben una reducción de la viscosidad. En cambio, materiales dilatantes exhiben un incremento de la viscosidad con el incremento del ratio de corte, como es el caso de la Curva D de la Fig. 2-4 (Jewel y Fourie 2002: 28).

Los parámetros reológicos de los sedimentos del área de origen parecen influenciar las distancias recorridas por el flujo de escombros así como el espesor del depósito. Sin embargo, pequeños volúmenes de falla requieren un mecanismo adicional para generar largas distancias de recorrido. Materiales con esfuerzos de fluencia pequeños representan a flujos de escombros con mayores distancias recorridas, pero con espesores de depósito pequeños. Por tanto, incrementos en el esfuerzo de fluencia resultan en menores distancias recorridas y espesores de depósitos finales más grandes (Remaître et al 2005: 485, 487).

### 2.2.2. Modelamiento numérico

Como ya se mencionó, el comportamiento plástico de Bingham está caracterizado por su cortante inicial o esfuerzo de fluencia  $\tau_o$ . Esto significa que el material no fluirá a no ser que un esfuerzo mayor que el de fluencia sea aplicado. La pendiente de la curva del flujo lineal es llamada el coeficiente de rigidez  $\eta$  (para flujos Newtonianos, es la viscosidad). El comportamiento plástico de Bingham es descrita por la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_o + \eta \cdot \frac{du}{dy} \dots (2-10)$$

Mezclas semilíquidas con diferentes características reológicas pueden ser a veces aproximadas al modelo plástico de Bingham dentro de un limitado rango de ratios de corte. Si la mezcla se comporta como un fluido Newtoniano, puede ser tratado como si fuera agua, pero con densidad y viscosidad particular a la mezcla. La viscosidad aparente  $\mu_a$  es la viscosidad a un ratio de corte dado asumiendo un comportamiento Newtoniano. La viscosidad aparente sólo aproxima el coeficiente de rigidez para altos ratios de corte (WMD 2009: 2). El gráfico usado por WMD (2009) para relacionar los esfuerzos de corte con los ratios de corte es el siguiente y es prácticamente igual que el propuesto por Jewel y Fourie (2002).

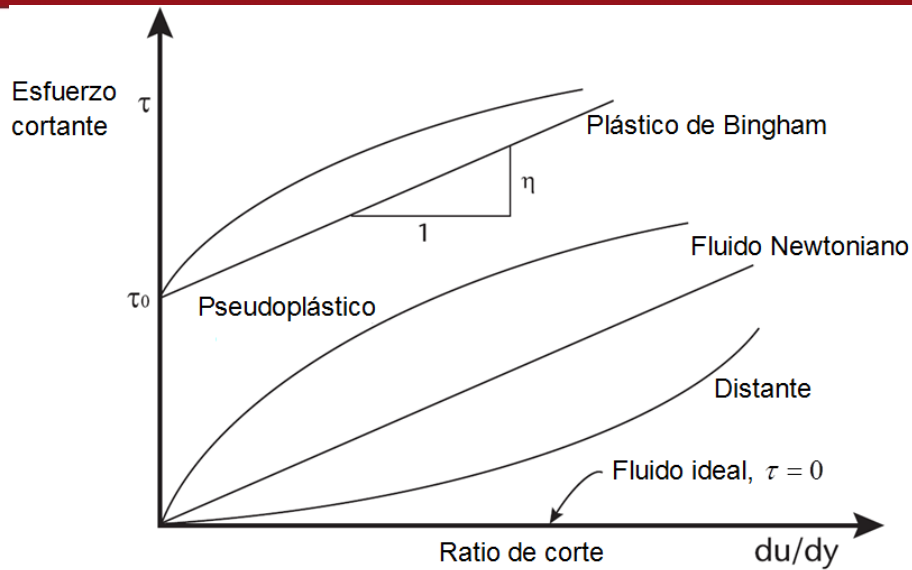


Fig. 2-5. Características de mezclas no Newtonianas.

(Referencia: adaptado de WMD 2009)

Por un lado, el flujo de escombros es considerado como un fluido de una fase y de densidad constante. Por otro lado, es considerado como una mezcla de dos fases, con densidad variable, y compuesto por un material granular inmerso en un fluido intersticial (que ocupa los espacios vacíos del grano y entre granos sólidos). El modelo de la mezcla de dos fases es usado para el modelamiento de flujos de escombros granulares o que poseen un contenido bajo de arcilla (Remaître et al 2005: 479).

El comportamiento del flujo de escombros es usualmente descrito usando modelos numéricos con datos de entrada empíricos. La calibración del modelo debe ser llevado a cabo en base a eventos bien documentados de flujos de escombros. Los modelos numéricos resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Dichas ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots(2-11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_d} \right) g \frac{\partial D}{\partial x} + \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_d} \right) g S + \frac{1}{\rho_d} - \frac{\partial \tau}{\partial y} \dots(2-12)$$

En las dos ecuaciones anteriores,  $x$  representa al eje de coordenadas en el sentido de la corriente,  $y$  representa al eje de coordenadas en la dirección normal hacia arriba,  $u$  y  $v$  denotan las correspondientes velocidades del flujo,  $D$  es el

espesor del flujo,  $\rho_d$  y  $\rho_a$  son las densidades de los sólidos dentro de la composición acuosa y de la matriz fluida respectivamente,  $S$  es la pendiente del talud,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\tau$  es el esfuerzo cortante en análisis del tensor de esfuerzos.

El modelo requiere de varios parámetros de entrada como el perfil longitudinal, el volumen del material a desplazarse, la geometría del círculo de falla y las propiedades del sedimento transportado. También se incluyen en el perfil de la trayectoria las presas de control de avenida, si es que las hubiera. Para determinar el comportamiento del material que compone al flujo de escombros en base a su reología, es necesario tener en cuenta que en la composición están presentes partículas de varios tamaños incluyendo grandes bolones. El comportamiento de los granos finos del flujo de escombros está gobernado principalmente por la matriz lodosa más que por los granos gruesos del flujo de escombros. Simples relaciones constitutivas no son capaces de capturar las complejas interacciones grano-grano o agua-grano que controlan a estos flujos (Remaître et al 2005: 481).

### 2.2.3. Esfuerzos cortantes y ecuación reológica cuadrática

De acuerdo con Julien y León, los flujos de sedimentos hiperconcentrados se clasifican como inundaciones de lodo, flujos de lodo y flujos de escombros. Los tres se diferencian por la reología de la mezcla agua-sedimento. Las hiperconcentraciones también pueden ser descritas por cuatro tipos de esfuerzos de corte: el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo viscoso, el esfuerzo de corte turbulento de un fluido con bajas concentraciones de sedimentos y los esfuerzos dispersivos debido al choque de grandes partículas de sedimentos.

Las inundaciones de lodo son flujos donde el esfuerzo de corte turbulento predomina. Los flujos de lodo son flujos donde predominan los esfuerzos de fluencia y viscoso. Finalmente, los flujos de escombros corresponden a flujos donde el esfuerzo dispersivo es el que gobierna el movimiento (Julien y León: 1).

El análisis reológico incluye los cuatro tipos de esfuerzos de corte. La naturaleza no Newtoniana de los flujos de sedimentos hiperconcentrados da como resultado varios procesos físicos: el esfuerzo cohesivo de fluencia  $\tau_c$ , el cual representa la naturaleza cohesiva de las partículas finas de sedimento; el esfuerzo cortante de Mohr-Coulomb  $\tau_{mc}$ , el cual representa la viscosidad del fluido-partícula; el esfuerzo de corte turbulento  $\tau_t$ ; y finalmente, el esfuerzo dispersivo  $\tau_d$ , que



representa la colisión de las fracciones más grandes. El esfuerzo cortante total del fluido de un flujo de sedimento hiperconcentrado se obtiene sumando los cinco componentes del esfuerzo de corte (Julien y León: 2).

$$\tau = \tau_{mc} + \tau_c + \tau_v + \tau_t + \tau_d \dots (2-13)$$

Escrito en términos de ratios de corte o gradiente de velocidad ( $du/dy$ ), se puede obtener la ecuación reológica cuadrática. La ecuación reológica cuadrática describe la continuidad del flujo en un rango de concentración de sedimentos para los esfuerzos cortantes mencionados. Dicha ecuación se muestra a continuación:

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} + \zeta \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \dots (2-14)$$

$$\text{Donde: } \tau_y = \tau_{mc} + \tau_c \text{ y } \zeta = \rho_m l_m^2 + a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2$$

Los factores anteriores representan lo siguiente:  $\eta$  es la viscosidad dinámica de la mezcla;  $\tau_y$  es el esfuerzo de fluencia;  $\tau_{mc} = p_s \tan \phi$ , donde  $p_s$  es la presión intergranular y  $\phi$  es el ángulo de reposo del material;  $\zeta$  es el coeficiente de esfuerzo cortante inercial el cual depende de  $\rho_m$  que viene a ser la densidad de la masa de la mezcla y de  $\rho_s$  que es la densidad de la masa del sedimento;  $l_m$  es la longitud de mezcla de Prandtl;  $d_s$  el tamaño del sedimento;  $\lambda$  la concentración lineal; y  $a_i$  es el coeficiente de impacto. Como una primera aproximación, se puede usar  $l_m \cong Kh$ , donde  $h$  es la profundidad del flujo y  $K = 0.4$ , siendo este último la constante de von Karman. El coeficiente  $a_i$  es muy variable. Bagnold y Takahashi han propuesto  $a_i \cong 0.01$  (Julien y León: 3). Bagnold define la concentración lineal del sedimento  $\lambda$  como::

$$\frac{1}{\lambda} = \left( \frac{C_m}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \dots (2-15)$$

Donde  $C_v$  es la concentración volumétrica de sedimento y  $C_m$  es la concentración máxima de partículas de sedimento (Julien y León: 3):

La ocurrencia de flujos de escombros granulares descrita como la relación de esfuerzos dispersivos sólo requiere que el flujo cumpla, al mismo tiempo, con las

siguientes tres condiciones: altas concentraciones de sedimentos (mayores a 50%), altos gradientes de velocidad (excediendo  $100 \text{ s}^{-1}$ ) y grandes partículas de sedimentos (tamaño de las partículas más grandes que el 5% del espesor del flujo) (Julien y León: 3).

Julien y Lan en "On the rheology of hyperconcentrations", 1991, han propuesto la siguiente versión adimensional de la ecuación reológica cuadrática:

$$\tau^* = 1 + (1 + T_d^*) a_i D_v^* \dots (2-16)$$

La ecuación se explica de la manera siguiente:

a) Exceso de esfuerzo de corte adimensional:  $\tau^* = \frac{\tau - \tau_y}{\eta \frac{du}{dy}}$ . Cuando  $\tau^* = 1$ , la

mezcla se comporta como un plástico de Bingham.

b) Índice dispersivo-viscoso adimensional:  $D_v^* = \frac{\rho_s \lambda^2 d_s^2}{\eta} \left( \frac{du}{dy} \right)$ . Cuando  $D_v^*$  es

grande, el flujo será dispersivo; cuando  $D_v^*$  es pequeño, el flujo será viscoso.

c) Índice turbulento-dispersivo adimensional:  $T_d^* = \frac{\rho_m l_m^2}{a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2}$ . Cuando  $T_d^*$  es

grande, el flujo será turbulento; cuando  $T_d^*$  es pequeño, será dispersivo

De acuerdo con los experimentos de Julien y Lan, se puede decir lo siguiente:

i) Los torrentes de lodo ocurrirán cuando el esfuerzo de corte turbulento sea dominante, es decir  $D_v^* > 400$  y  $T_d^* > 1$ .

ii) Los flujos de lodo ocurrirán cuando los esfuerzos de fluencia y viscosos sean dominantes, es decir  $D_v^* < 30$ .

ii) Los flujos de escombros o flujos granulares se espera que ocurran cuando el esfuerzo dispersivo sea dominante, es decir  $D_v^* > 400$  y  $T_d^* < 1$  (Julien y León: 5).



## 2.3. Aspectos que propician la falla de un talud

### 2.3.1. Factores hidrológicos

La presencia de agua y una alta presión de poros son fundamentales a la hora de producirse la falla de un talud que originará un flujo de escombros. La licuefacción del suelo ocurre cuando la presión de poros es positiva (expansión del volumen). Esta presión de poros ocurre por infiltración del agua dentro de un talud, lo cual puede ocurrir por dos mecanismos: infiltración directa por las capas superficiales o por efectos del flujo de agua subterránea. Si el suelo debajo del talud tiene una permeabilidad menor que el suelo en la parte superior, puede ocurrir un empozamiento de agua, lo que lo saturará. Asimismo, de encontrarse cerca el nivel freático, este se elevará. Por otro lado, las discontinuidades naturales de un talud (por ejemplo, los macroporos generados por las raíces y por los nidos de pájaros, y las fracturas en las rocas) modifican la forma en cómo el agua se infiltra dentro de un talud (Iverson et al 1997: 100-101).

Resumiendo, la falla de un talud que origina un flujo de escombros se diferencia de cualquier talud que simplemente cae, debido a que el primero contiene una gran cantidad de agua que logra saturar (o lleva a una condición cercana a la saturación) el talud antes de la falla. Sin embargo, surge la pregunta de cómo es que un talud puede mantenerse estable hasta alcanzar un estado de saturación completa (o cercana). En la Tabla 2-1 se muestran ángulos de taludes donde se han originado flujos de escombros debido a factores hidrológicos.

Para poder responder esa interrogante, se plantean dos tipos de mecanismos de estabilidad: uno es que la cohesión por sí sola logre mantener el equilibrio en el talud, aun teniendo saturado (o parcialmente saturado) al suelo; y otro es que haya partes del talud que mantengan un nivel de humedad inferior al nivel de saturación, lo que aportaría una resistencia local al deslizamiento. Una vez iniciada la falla, la compresión del suelo haría que el agua presente en las zonas no saturadas llegaran a un nivel de saturación para así lograr el estado del flujo de escombros (Iverson et al 1997: 100-103).

Tabla 2-1. *Ángulos de talud donde se inició el flujo de escombros.*

(Referencia: adaptado de Iverson et al 1997)

| Referencia         | Ubicación                                 | Ángulo del talud (°) |
|--------------------|---|----------------------|
| Temple & Rapp 1972 | Tanzania                                  | 28-44                |
| O’Loughlin 1972    | Suroeste de la Columbia Británica, Canadá | 24-48                |
| Lumb 1975          | Hong Kong                                 | 25-45                |
| Campbell 1975      | Sur de California, EE.UU.                 | 27-56                |
| Selby 1976         | Nueva Zelanda                             | 32-34                |
| Statham 1976       | Gales                                     | 27-37                |
| Pomeroy 1980       | Pensilvania, EE.UU.                       | 20-40                |
| Heller 1981        | Noroeste de Washington, EE.UU.            | 20-40                |
| Ellen et al 1998   | Norte de California, EE.UU.               | 20-50                |
| Pierson et al 1992 | Hawaii, EE.UU.                            | 30-60                |

### 2.3.2. Factores geotécnicos

Para entender los conceptos básicos detrás del flujo de escombros, se hace uso de un ejemplo simple que toma en cuenta la falla de Coulomb, la licuefacción de suelos, la temperatura granular y el cambio de volumen del suelo del modelo idealizado del talud infinito (ver ítem 2.1.1.).

Se puede definir las condiciones de falla de Coulomb mediante el uso del factor de seguridad ( $FS$  en adelante). El esquema y las ecuaciones usadas para evaluar la estabilidad de un talud presentado en Iverson et al (1997) son las siguientes:

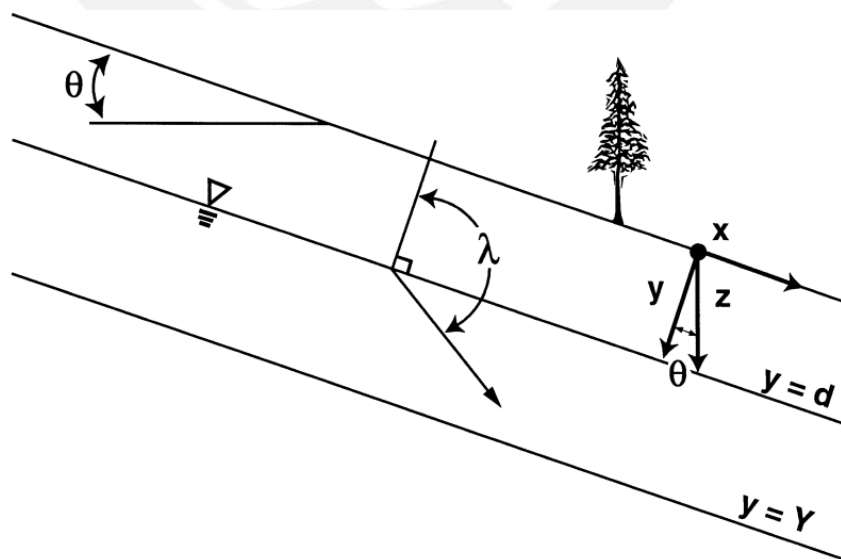


Fig. 2-6. *Esquema del perfil y de los parámetros geométricos a usarse.*

(Referencia: adaptado de Iverson et al 1997)

En la Fig. 2-6, el ángulo  $\lambda$  representa al ángulo del gradiente hidráulico  $i$ .  
Se tiene entonces que:

$$\lambda = \text{Sen}^{-1}(\text{Sen}\theta/i) \dots(2-17)$$

Respecto a  $FS$ , la ecuación queda planteada de la siguiente forma:

$$FS = T_f + T_w + T_c \dots(2-18)$$

Cada uno de los componentes dentro de la ecuación del  $FS$  se explica a continuación:

$$T_f = \frac{\text{Tan}\phi}{\text{Tan}\theta} \dots(2-19)$$

a)  $T_f$ : es la relación entre la resistencia proporcionada por la fuerza de fricción y la fuerza gravitacional desestabilizante,  $\phi$  es el ángulo de fricción interna del suelo y  $\theta$  es el ángulo de inclinación del talud.

$$T_w = \frac{\left[ \frac{d}{Y} - 1 \right] \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \text{Tan}\phi}{\gamma_t \cdot \text{Sen}\theta} \dots(2-20)$$

b)  $T_w$ : es relación entre la resistencia modificada por el agua subterránea y la fuerza gravitacional desestabilizante,  $d$  es la profundidad del nivel freático (donde la presión de poros es cero),  $Y$  es la profundidad de falla del talud,  $p$  es la presión de poros,  $y$  es profundidad de evaluación, y  $\gamma_t$  es el peso unitario promedio del suelo saturado y no saturado.

$$T_c = \frac{c}{\gamma_t \cdot Y \cdot \text{Sen}\theta} \dots(2-21)$$

c)  $T_c$ : es relación entre la resistencia proporcionada por la cohesión y la fuerza gravitacional desestabilizante y  $c$  es la cohesión del suelo.

De todo lo anterior, se observa que:

-Para valores de  $FS > 1$ , el talud permanece estable (la falla inicia recién con  $FS = 1$ ).

- $T_f$  indica que su aporte en la falla del talud sólo depende del ángulo  $\theta$ . Por tanto, los lugares potenciales donde puedan ocurrir flujos de escombros son los que presentan un ángulo de talud cercano a su ángulo de reposo.

- $T_w$  indica que bajo condiciones saturadas ( $d = 0$ ), un talud puede fallar con un ángulo  $\theta$  menor que el de reposo. Lo anterior es evidencia de la influencia que tiene la presión de poros en la estabilidad de taludes.

- $T_c$  indica que mientras exista cohesión en el sistema de suelo, la falla sólo se dará a cierta profundidad  $Y$ .

-El término que más influye el  $FS$  es  $T_w$ . Mientras  $d$  sea menor que  $Y$ , y al ser  $\frac{\partial p}{\partial y}$  positivo, el valor de  $T_w$  será negativo. Por tanto, reduce el valor del  $FS$ , haciendo más probable la falla (Iverson et al 1997: 103-105).

Sin embargo, los esfuerzos principales ( $\sigma'_1, \sigma'_3$ ) no suelen encontrarse bajo el sistema de coordenadas propuesto (paralelo y normal al talud). Para conocer la dirección en la cual se encuentran estos esfuerzos, hay que recurrir al Círculo de Mohr. El esfuerzo principal mayor  $\sigma'_1$  se encuentra rotado un ángulo  $\pi/4 - \theta/2$  en sentido antihorario a partir de la dirección normal al talud y excede al valor del esfuerzo normal. El esfuerzo vertical (en la dirección  $z$ ) es mayor que el esfuerzo promedio  $\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 = \gamma_t \cdot z - p \cdot z$ , mientras que el esfuerzo de falla paralelo al talud es menor que el esfuerzo promedio. La licuefacción se dará, entonces, para una presión de poros que supere al valor del esfuerzo de falla paralelo al talud, es decir, un valor menor al del esfuerzo promedio (Iverson et al 1997: 105). El esquema del Círculo de Mohr está incluido como Anexo 02.

Tomando en cuenta lo anterior, la licuefacción por presión de poros puede ser presentada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \sigma'_{falla}}{\partial z} = \gamma_t \cdot \cos^2 \theta \dots (2-22)$$

Donde  $\sigma'_{falla}$  es el esfuerzo efectivo paralelo a la superficie de falla.

La relación anterior muestra que el gradiente vertical de presión de poros que produce licuefacción decrece a medida que la inclinación del talud aumenta. Esto muestra que taludes empinados son sensibles al fenómeno de la licuefacción de suelos durante la falla, siempre y cuando puedan mantenerse estables conforme van fallando (Iverson et al 1997: 108).

El análisis anterior ha sido realizado sin considerar la cohesión. Sin embargo,  $FS$  depende de ese valor cuando la licuefacción ha hecho que  $T_f + T_w = 0$ , dejando a  $T_c$  como el único factor que aporta al equilibrio. Dicha situación puede ser determinante para taludes que basan su estabilidad en las raíces de los árboles, los cuales, sí llegan a formar cohesión que aporta resistencia (Iverson et al 1997: 109).

## 2.4. Relación del flujo de escombros con otros tipos de flujos

### 2.4.1. Números característicos

El estudio del flujo de escombros se tiene que hacer, tanto a nivel teórico como de laboratorio, con modelos que simplifiquen muchos de sus aspectos. Esta necesidad se da por la dificultad de modelar matemáticamente (y computacionalmente) todos los aspectos del flujo de escombros, en lo que se refiere a modelos teóricos. También sucede lo mismo con los estudios de laboratorio en el que, debido a la infraestructura con la que se pueda llegar a tener, la escala de los experimentos tiene que ser reducida. En parte, lo anterior explicaría por qué diferentes autores, con distintos modelos y distintos experimentos llevados a cabo, se aproximan al problema desde diferentes perspectivas (Iverson 1997: 260-261).

Los parámetros característicos del flujo de escombros se han obtenido al considerar 13 variables, los cuales se presentan en la siguiente ecuación:

$$\Sigma = f(\dot{\gamma}, \delta, \rho_s, \rho_f, g, \mu, k, T, E, \nu_s, \nu_f, \phi, e) \dots (2-23)$$

La ecuación anterior contiene a las siguientes variables (de izquierda a derecha): velocidad de deformación por corte, diámetro del grano característico, densidad de los constituyentes sólidos del flujo, densidad de los constituyentes fluidos del flujo, aceleración de la gravedad, viscosidad dinámica del fluido con

partículas finas en suspensión, permeabilidad hidráulica, temperatura granular, módulo de rigidez de la mezcla compuesta, fracción de volumen de los granos sólidos, fracción de volumen del fluido en los poros, ángulo de fricción de la mezcla, y el coeficiente de restitución de los granos sólidos (definido como la conservación de la energía cinética luego de que dos partículas choquen entre sí).

Los primeros nueve parámetros están en función de alguna dimensión (masa, longitud, tiempo), mientras que los cuatro últimos son adimensionales. Recurriendo al Teorema  $\pi$  de Buckingham (1915), se puede formar una ecuación con 6 parámetros adimensionales (Iverson 1997: 260-261). La función queda expresada de la manera siguiente:

$$\frac{\Sigma}{\dot{\gamma}^2 \cdot \delta^2 \cdot \rho_s} = f\left(\frac{\dot{\gamma}^2 \cdot \delta}{g}, \frac{\dot{\gamma} \cdot \delta^2 \cdot \rho_s}{\mu}, \frac{\rho_s}{\rho_f}, \frac{T}{\dot{\gamma}^2 \cdot \delta^2}, \frac{k}{\delta^2}, \frac{E}{\dot{\gamma}^2 \cdot \delta^2 \cdot \rho_s}\right) \dots(2-24)$$

La ecuación anterior muestra a seis relaciones adimensionales dentro de la función (parte derecha de la ecuación): el primero se conoce como el Número de Savage (1984); el segundo es una variación del Número de Bagnold (1954); el tercero es la relación entre la densidad de los constituyentes sólidos y la densidad de los constituyentes fluidos; el cuarto es la temperatura granular dividido entre el cuadrado de la velocidad característica de deformación por corte; el quinto es la permeabilidad dividida entre el diámetro de la partícula; y el sexto es el módulo de rigidez de la mezcla compuesta dividido entre el esfuerzo característico.

Finalmente, tomando en cuenta los efectos de los esfuerzos cortantes debido a la interacción los sólidos, el fluido y sólido-fluido, se pueden obtener los siguientes números característicos del flujo de escombros:

$$N_{sav} = \frac{\dot{\gamma}^2 \cdot \rho_s \cdot \delta}{N \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot \tan \phi} \dots(2-25)$$

$$N_{Bag} = \frac{v_s}{1 - v_s} \cdot \frac{\rho_s \cdot \delta^2 \cdot \dot{\gamma}}{\mu} \dots(2-26)$$

$$N_{masa} = \frac{v_s}{1 - v_s} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f} \dots(2-27)$$

$$N_{Dar} = \frac{\mu}{v_s \cdot \rho_s \cdot \dot{\gamma} \cdot k} \dots(2-28)$$



$$N_{Rey} = \frac{N_{Bag}}{N_{mass}} \dots (2-29)$$

$$N_{fric} = \frac{N_{Bag}}{N_{Sav}} \dots (2-30)$$

A partir de los números anteriores, se identifica que, para un flujo estable de una mezcla uniforme de granos idénticos y agua, los mecanismos por los que se transmite la cantidad de movimiento son: colisión inercial de granos, fricción de contacto de los granos, cortante viscoso, fluctuación inercial (turbulenta) de la velocidad del fluido, e interacciones sólido-fluido.

#### 2.4.2. Interpretación física

En la sección anterior se presentaron los números característicos del flujo de escombros. Aquí se interpreta, a rasgos generales, esos números, enfocándose en tres de ellos: el Número de Savage, el Número de Bagnold y el Número de Darcy.

-Número de Savage ( $N_{sav}$ ): se define como la relación entre el esfuerzo cortante inercial de los sólidos (esfuerzo transmitido por las colisiones entre los granos) y el esfuerzo cortante cuasiestático de los sólidos (esfuerzo asociado al deslizamiento por la falla de Coulomb y al contacto sostenido entre los granos). Este último, se incrementa con la profundidad y decrece con el aumento de la presión de poros.

-Número de Bagnold ( $N_{Bag}$ ): se define como la relación entre el esfuerzo cortante inercial de los sólidos y el esfuerzo cortante cuasiestático del fluido (esfuerzo asociado a la Ley de Viscosidad de Newton).

-Número de Darcy ( $N_{Dar}$ ): se define como la relación entre el esfuerzo generado por la interacción de los sólidos y el fluido (generados a partir del desplazamiento relativo entre los constituyentes sólidos y fluidos), y el esfuerzo cortante inercial de los sólidos.

-Número de masa ( $N_{masa}$ ): se define como la relación entre los esfuerzos cortantes inerciales de los sólidos y el fluido. Describe la relación que hay entre las inercias de los sólidos y el fluido.

-Número de Reynolds ( $N_{Re,y}$ ): obtenido a partir de la relación entre el Número de Bagnold y el Número de masa.

-Número de fricción ( $N_{fric}$ ): obtenido a partir de la relación entre el Número de Bagnold y el Número de Savage. Describe la relación que existe entre el esfuerzo cortante cuasiestático de los sólidos y el esfuerzo cortante cuasiestático del fluido, es decir, describe la relación de esfuerzos generados independientemente (Iverson 1997: 262-263).

De acuerdo con Savage y Hutter, la evidencia experimental indica que los esfuerzos ocasionados por la colisión dominan a los esfuerzos de fricción de los granos en flujos granulares secos para valores de  $N_{sav} > 1$ . Asimismo, los experimentos llevados a cabo por Bagnold con mezclas de granos, con flotabilidad neutra (cuando se mantienen en suspensión en el agua), y fluido, es decir, cuando  $N_{sav} \rightarrow \infty$ , demuestran que los esfuerzos debido a las colisiones entre los granos eran mucho mayores para valores de  $N_{Bag} > 200$  (Iverson 1997: 263).

No se dispone, al parecer, de registros experimentales con valores de transición para  $N_{masa}$ , mas eso no indica que no sea relevante, ya que la inercia de los granos deja de ser importante a medida que su densidad o concentración disminuyen. Por otro lado, se dispone de una gran cantidad de información experimental del  $N_{Re,y}$ . Comúnmente, un flujo de agua comienza a comportarse diferente a un flujo ideal (Stokesiano) para valores de  $N_{Re,y} > 1$  (Iverson 1997: 263).

En cuanto al  $N_{fric}$  y  $N_{Dar}$ , hay poca información. Están, sin embargo, los experimentos realizados por Iverson y LaHusen para  $1000 < N_{Dar} < 6000$ , en los que se encontró fuertes interacciones del sólido-fluido. Se dice, entonces, que la mayoría de flujos de escombros debería tener un valor de  $N_{Dar}$  entre el rango mencionado (Iverson 1997: 263).

Experimentos y estimaciones de flujos pasados (ver Anexo 03) demuestran que:

-Para flujos rápidos en taludes empinados, es de esperarse valores altos de esfuerzos cortantes que, a su vez, dan valores altos de  $N_{Sav}$  y  $N_{Bag}$ . La transmisión



de esfuerzos se da más por colisiones que por fricción de los sólidos y la viscosidad del agua.

-Para flujos más grandes con caídas mayores, es de esperarse valores menores de esfuerzos cortantes. Los valores de  $N_{Sav}$  y  $N_{Bag}$  son pequeños, lo que indica que se transmiten mayores esfuerzos por la fricción de los sólidos y la viscosidad del agua que por las colisiones de los sólidos.

-Valores grandes de  $N_{fricc}$  indican que los esfuerzos transmitidos por fricción son representativos, mientras que los transmitidos por la viscosidad del fluido son despreciables.

-Valores de  $N_{Re}$  pequeños y de  $N_{Dar}$  grandes indican que los efectos de la viscosidad, asociados a la interacción sólido-fluido, son importantes (Iverson 1997: 263-264).

Las características del flujo, la cantidad o tipo de suelo en la mezcla y la forma de transmisión de la cantidad de movimiento cambian conforme los números característicos varían. Incluso en el comportamiento real de un flujo de escombros pueden tenerse cambios locales de estos números, debido a que en el frente del flujo, por ejemplo, la ola transporta una mayor concentración de suelo grueso. Por tanto, el flujo de escombros se ubicará en un lugar intermedio respecto a otros tipos de flujos, como avalanchas de rocas, flujo de lodos, flujo de tierra, etc. La siguiente figura muestra cualitativamente la naturaleza del flujo de escombros.

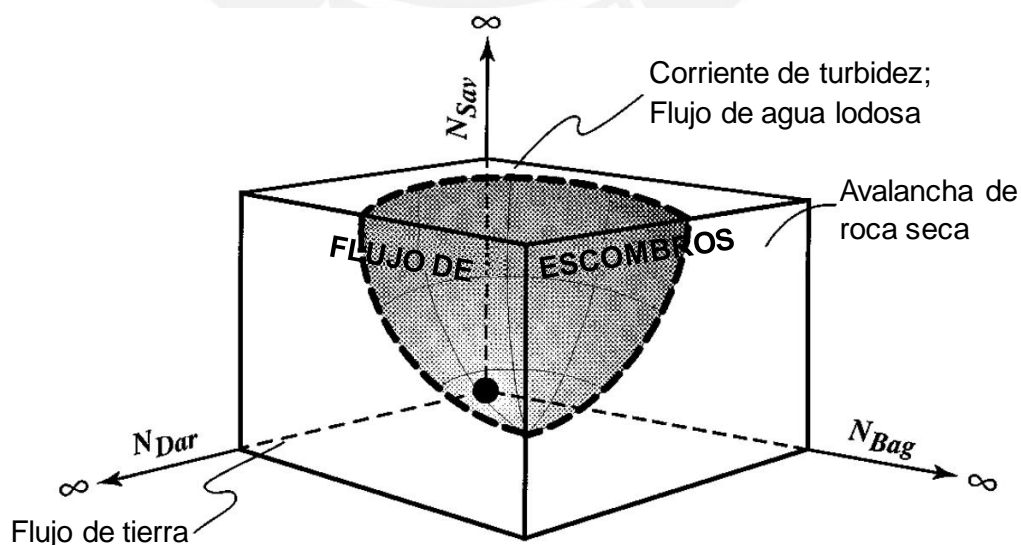


Fig. 2-7. Variación cualitativa del flujo de escombros a otros tipos de flujos.

(Referencia: adaptado de Iverson 1997)

En la figura anterior, no se tienen definidos los límites por los cuales el flujo de escombros realiza la transición a otro tipo de flujos. Para ello, se requiere de mayor cantidad de experimentos y de información que no está disponible.



## CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LA QUEBRADA CANSAS

### 3.1. Cuenca del río Ica

#### 3.1.1. Ubicación y características

La cuenca del río Ica comprende a las provincias de Ica, departamento de Ica, y Castrovirreyna, departamento de Huancavelica. Geográficamente, se ubica entre los paralelos 13°28' y 14°53' de latitud sur y los meridianos 74°58' y 75°54' de longitud oeste de Greenwich. Asimismo, la cuenca abarca elevaciones desde el nivel del mar hasta los 4503 m.s.n.m. (Petacc 2001: 3).

La cuenca limita al norte con la cuenca del río Pisco; al sur, con el Océano Pacífico; al noreste, con la cuenca del río Pampas; al este, con la cuenca del río Grande; y al oeste, con la cuenca del río Seco (Petacc 2001: 3). En el Mapa 01 se muestra la red hidrográfica de la cuenca de Ica [todos los mapas presentados en este trabajo de investigación fueron generados por el autor de la tesis utilizando archivos *shapfiles* y procesados con el *software* ArcGis 10.2].

No hay consenso respecto al área de la cuenca en las diferentes investigaciones. Por ejemplo, de acuerdo con el Ingemmet, la extensión es de 7188.5 km<sup>2</sup> (2010); por otro lado, Chavarri da una extensión de 7711 km<sup>2</sup> a la cuenca (2002) al igual que el Petacc (2001); mientras que el Inrena indica una extensión de 8310 km<sup>2</sup> (1996).

Con respecto a la población, el área urbana de la cuenca se extiende por 2000 ha y está conformado por trece centros poblados. Además, en la parte alta de la cuenca, zona rural, existen 400 pequeños poblados, cada uno con una población de 70 o más habitantes (Petacc 2001: 3). En el Mapa 01 se muestra la distribución de los centros poblados en la cuenca del río Ica.

#### 3.1.2. Hidrología

El relieve topográfico en la parte alta de la cuenca es accidentado, con fuerte pendiente, y propicia la ocurrencia de torrentes. El lecho de deyección, por el contrario, está conformado por una planicie de muy poca pendiente (Petacc 2001: 33).

En la parte alta, la cuenca del río Ica tiene forma alargada, fondo profundo y pendiente fuerte. La fisiografía es accidentada, lo cual hace que el cauce sea torrencioso. Hay poca retención de humedad debido a la escasa vegetación. Las

avenidas se presentan de manera violenta de forma discontinua entre varios eventos. En la parte media de la cuenca, la pendiente es menor y la velocidad del agua disminuye, por lo que ocurre la deposición de material rocoso y gravas. En la parte baja, la pendiente disminuye a 1.5% antes de la ciudad de Ica y a 0.3% desde la ciudad de Ica hasta el Océano Pacífico. El cauce es inestable debido a procesos de erosión, por lo que ocurre deposición de sedimentos, especialmente arenas. La capacidad hidráulica no supera los 300 m<sup>3</sup>/s, por lo que son frecuentes los desbordes e inundaciones en este tramo del río (Petacc 2001: 9).

La temperatura desciende a medida que se sube por la cuenca. Lo inverso sucede con la precipitación. La precipitación se da de enero a marzo, mientras que en el resto del año las precipitaciones son casi nulas. Un resumen de los datos meteorológicos mencionados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-1. *Resumen de datos meteorológicos en la cuenca del río Ica.*  
(Referencia: adaptado de Inrena 1996)

| Estación                                  | Altitud<br>(m.s.n.m.) | Precipitación<br>media anual<br>(mm) | Temp. Media (°C) |        |       | Humedad<br>relativa media<br>anual (%) |
|---|-----------------------|--------------------------------------|------------------|--------|-------|--|
|   |                       |                                      | Máxima           | Mínima | Media |  |
| Ica                                       | 398                   | 3.9                                  | 15               | 30.5   | 22.8  | 70                                     |
| Ica<br>(Asociación<br>de<br>Agricultores) | 410                   | 2.8                                  | 14.3             | 31     | 21.6  | 67                                     |
| Ocucaje                                   | 420                   | 0.3                                  | 10.7             | 32.4   | 22.3  | 71                                     |
| Humaní                                    | 800                   | 14.8                                 | 13.8             | 28     | 21    | 70                                     |
| Acora                                     | 1800                  | 196.7                                | 9.5              | 24.1   | 17    | 63                                     |
| Mullichipana                              | 1800                  | 79.6                                 | -                | -      | -     | -                                      |
| Chocorvos                                 | 2500                  | 181.4                                | -                | -      | -     | -                                      |

El sistema hidrográfico de la cuenca del río Ica se origina a partir de varias lagunas ubicadas en la parte alta. La más importante de ellas es la laguna de Pariona. Además, la cuenca recibe descargas provenientes de la derivación trasandina del sistema Choclococha. Durante el recorrido, el río Ica va recibiendo aportes de varios afluentes, como la quebrada Cansas (Inrena 1996: 457-458).

En el siguiente gráfico, se muestra el registro de descargas máximas extremas anuales del río Ica durante el periodo 1922-1998.

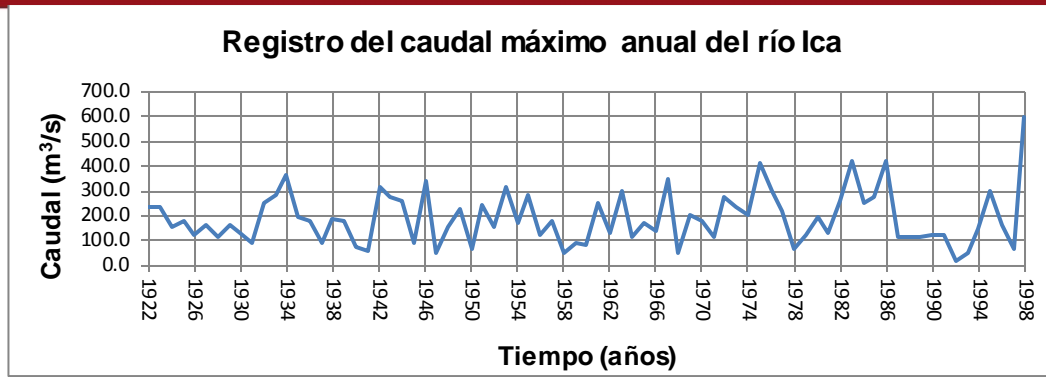


Fig. 3-1. Caudales máximos anuales del río Ica.

(Referencia: adaptado de Mitma, Alva 2005)

Se observa un pico de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  en el año 1998, valor que duplica la capacidad hidráulica del río Ica. En consecuencia, se tuvo desbordes del río Ica en febrero del año 1998. Las razones de este comportamiento se ven en el Capítulo 4.

### 3.1.3. Mecánica de suelos

Durante las avenidas, el río Ica recibe los flujos de la quebrada Cansas y de otras más. Estos flujos transportan gran cantidad de sólidos. Por ello, la velocidad del río va disminuyendo conforme aumenta la cantidad de sólidos que arrastra. Una vez que se llega a una velocidad muy pequeña, se produce la deposición del material. A este estado se le conoce como corriente o solución saturada. Cualquier material adicional que se agregue al caudal del río Ica, sedimentará (Petacc 2001: 42).

Para clasificar los suelos en la ciudad de Ica, este se ha dividido en tres zonas, de acuerdo con Mitma y Alva (2005):

-Zona A: el suelo superficial (un metro) está conformado por terrenos de cultivo de naturaleza limosa de color beige claro, semicompactado y poco húmedo. Debajo se encuentran depósitos de suelos limosos arenosos (25 a 40 % de arena) y suelos arcillosos con bajo contenido de arenas (menor a 15 %).

-Zona B: el suelo está conformado por depósitos de arenas pobremente graduadas (SP) de grano fino a medio y redondeadas, con mediano a poco contenido de finos no plásticos, y de baja humedad.

-Zona C: el suelo superficial está conformado por arenas finas pobremente graduadas (SP) de color beis amarillento, de poco densas a sueltas, con escasa humedad. Debajo se encuentra suelo limoso.

En el Anexo 04 se muestra el mapa de suelos de la ciudad de Ica.

### 3.1.4. Geología

Se tiene material aluvial cuyo espesor es del orden de los 300 m, asentado sobre un basamento impermeable conformado por formaciones rocosas sedimentarias e intrusivas. Estos depósitos consisten en gravas y arenas del Cuaternario Aluvial. También existen afloramientos de rocas volcánicas (Petacc 2001: 47).

## 3.2. Quebrada Cansas

### 3.2.1. Ubicación y características

La quebrada Cansas está ubicada en la margen izquierda del valle de Ica, al este del río Ica, a 4.5 km de la ciudad del mismo nombre. Está comprendida entre las elevaciones 414 m.s.n.m. (en la desembocadura al río Ica) y 2500 m.s.n.m. (en su parte más alta). Tiene un área de 243 km<sup>2</sup>, considerando a la quebrada Rompe Trapo, la cual aporta agua a la quebrada Cansas, de acuerdo con el Petacc (2001). Sin embargo, si se considera sólo a la quebrada Cansas, tiene un área de 176 km<sup>2</sup> de acuerdo con el Inrena (1996). La longitud del cauce principal es de 60 km y tiene una pendiente de 3.5%, mientras que la longitud y el perímetro de la cuenca son respectivamente 36.5 y 69 km. La delimitación de la quebrada Cansas se muestra en el Mapa 02.

En la siguiente tabla se presenta información sobre la variación de la pendiente y del uso del suelo a lo largo de la quebrada

Tabla 3-2. *Variación de la pendiente en la quebrada Cansas.*

(Referencia: adaptado de Petacc 2001)

| Tramo (km) | Pendiente (%) | Uso principal del suelo          |
|------------|---------------|----------------------------------|
| 0 - 1.9    | 0.7 - 10      | Planicie agrícola                |
| 1.9 - 4    | 1 - 20        | Planicie agrícola                |
| 4 - 9      | 2 - 40        | Cono de deyección eriazo         |
| >9         | 4 - 30        | Cuenca encañonada rocosa sin uso |



### 3.2.2. Hidrología

El cauce permanece seco gran parte del año. Sin embargo, cuando ocurren las crecidas y huaicos, se produce erosión y transporte de material sólido proveniente de la parte alta (Petacc 2001: 40). Las precipitaciones en la quebrada son escasas, ya que su régimen hidrológico es estacional (Petacc 2001:34). No existen estaciones hidrológicas ni meteorológicas en la quebrada Cansas de acuerdo con el portal web del Senamhi.

### 3.2.3. Mecánica de suelos

Los procesos de erosión del fondo son fuertes, pero, aun así, se observa acumulación de gravas arenosas con limo (Petacc 2001: 48). El transporte de material es por suspensión. Por ello, el suelo presente en la quebrada Cansas suele ser, en rasgos generales, arenas gruesas con diámetros menores a 5 mm ( $D_{50}=1$  a 2 mm). De acuerdo con Petacc (2001), si se estudia los aspectos por tramo, se encuentra lo siguiente:

- ⊙ En el tramo superior (a partir del km 9), se encuentran suelos gravosos (grandes cantidades de grava y arena), con cantos y bolonería. Se utiliza como cantera de materiales pétreos.

- ⊙ El tramo intermedio (entre el km 4.5 y el km 9) funciona como un cono de deyección. En el lecho del cono, el suelo es arena gravosa cubierta de piedras. En la zona alta, el suelo está conformado por gravas arenosas con cantos y bolones en un 40% y con diámetros de hasta 2 m. Por otro lado, la zona baja está sujeta a una intensa actividad extractiva. Se consume el material arenoso retirando, previamente, la superficie de piedras. Sin embargo, dejar expuesto el material fino aumenta la cantidad de sedimentos que los flujos pueden llevar consigo en épocas de avenidas. También se pueden encontrar rocas de gran diámetro

- ⊙ En el tramo inferior, el cual comprende desde el km 4.5 hasta la desembocadura en el río Ica, el ancho del cauce es estrecho con una pendiente que varía entre 0.025% y 0.7%. Se encuentran mayormente suelos arenosos limpios, ya que la velocidad sigue siendo lo suficientemente alta como para arrastrar ese material y erosionar el lecho.

La conductividad hidráulica de los suelos varía de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  cm/s. Por ello, la infiltración del agua de lluvia es rápida, formando acuíferos. La napa freática se ubica a una profundidad de 40 m, en el km 4, y a 10 m, en el encuentro con el río

Ica (Petacc 2001: 48). El estudio de suelos para “Obras Quebrada Cansas” realizado por el Petacc en el año 2001 se encuentra como Anexo 05.

### **3.2.4. Geología**

Con respecto a la geología de la quebrada Cansas, en la parte alta, se encuentran afloramientos de rocas intrusivas del tipo monzonitas y gran cantidad de gabros grises claros a grises oscuros, los cuales se usan como material de enrocado y se extraen mediante voladuras. Un poco más arriba, hay rocas volcánicas andesíticas de color gris oscuro negruzco, y, mucho más arriba, se puede encontrar rocas intrusivas del tipo monzonitas y dioritas grises claros, muy resistentes (Petacc 2001: 35). En el Anexo 06 se muestra la geomorfología del tramo final de la quebrada Cansas y la zona urbana de Ica. En él se aprecia que el suelo está conformado por depósitos de torrenteras y formaciones aluviales, revelando una historia geológica de huaicos que van transformando la superficie.

### **3.3. Intervención humana en el río Ica y la quebrada Cansas**

Las zonas urbanas más propensas a sufrir daños ya sea por desbordes del río Ica como por los flujos que aportan las quebradas son: Ica, La Tinguiña, Chanchajalla y San José de los Molinos. Sin embargo, el riesgo ha sido incrementado por la desorganizada expansión urbana. El cauce natural del río Ica y la planicie de inundación, por ejemplo, han sido reducidos a la mitad, debido a la expansión demográfica y a intereses agrícolas. Tanto ha sido el desorden, que se ha llegado a construir viviendas sobre el muro de encauzamiento del río (entre el puente Grau y Cutervo). Asimismo, las bocatomas y puentes construidos en el río Ica modifican el comportamiento natural del río, ocasionando una reducción de su capacidad hidráulica para caudales mayores a 300 m<sup>3</sup>/s (Petacc 2001: 36).

En la quebrada Cansas, ocurre algo similar. La ocupación territorial, producto de la expansión urbana de los distritos de La Tinguiña y Chanchajalla, ha obligado a realizar obras para la protección de sus habitantes, como el encauzamiento de la quebrada y la construcción de estructuras de cruce. Debido a que las estructuras construidas no tienen suficiente resistencia contra el impacto de los huaicos y que además se produce desborde de los flujos contenidos durante los eventos extremos, da lugar a que ocurran daños tanto en las áreas urbanas como rurales (Petacc 2001:36). Mientras tanto, en la parte alta de la quebrada, no hay presencia de asentamientos humanos ni de actividades agrícolas, aunque la zona sólo se utiliza como cantera (Petacc 2001: 43).

### 3.4. Amenaza de huaicos debido a precipitaciones extraordinarias

Las precipitaciones representativas para las descargas del río Ica son las que ocurren sobre los 2500 m.s.n.m. y durante los meses de diciembre a marzo. Sin embargo, el Fenómeno El Niño incrementa la importancia de las precipitaciones por debajo de los 2500 m.s.n.m. al aumentar la superficie de la cuenca húmeda (Petacc 2001: 36).

El área de la cuenca de recepción engloba a la parte alta y a una estrecha franja a la derecha de la cuenca (ver figura 1-3), este último se debe a que las formaciones montañosas se encuentran a ese lado. La cuenca húmeda engloba básicamente a la parte alta de la cuenca del río Ica. Lo anterior se observa en la siguiente figura:

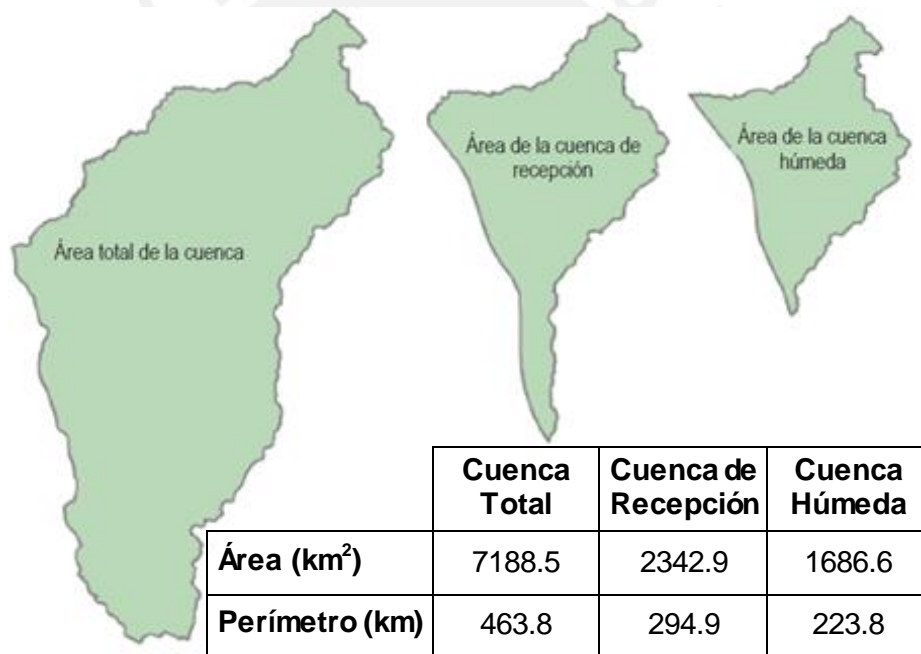


Fig. 3-2. Área de la cuenca de recepción y de la cuenca húmeda.

(Referencia: adaptado de Peña et al 2010)

Los eventos extremos ocasionan que la quebrada Cansas, normalmente seca, aporte caudales elevados. Debido a las características de la quebrada, esos caudales arrastran mucho material sólido consigo. Luego, al llegar al río Ica, su comportamiento hidráulico cambia (Petacc 2001: 36). Bajo esta situación, se dan los fenómenos conocidos como huaicos. El comportamiento es distinto a los flujos

de agua con poca concentración de sólidos y tiene que ser estudiado desde la perspectiva de un flujo de escombros.

La intensidad de las lluvias, el caudal que se genera y la pendiente del terreno son algunos de los factores que rigen el transporte de material sólido (Petacc 2001: 34). El transporte de los sólidos por suspensión se logra con velocidades entre 0.6 a 1.1 m/s, para el río Ica, y 1.1 a 1.6 m/s para la quebrada Cansas (Petacc 2001: 42). Para un mejor estudio de las condiciones por las que el flujo de escombros recorre la quebrada Cansas, el Petacc (2001) ha dividido en tramos al cauce (tomando como referencia el km 0 a la confluencia de la quebrada Cansas con el río Ica):

-Tramo 1 (del km 0 al km 1.9): el cauce tiene una profundidad de 3 m y un ancho del lecho de 18 m. La erosión se da a los lados del cauce (taludes), por lo que puede considerarse que el fondo se mantiene estable. También se tiene la presencia de diques construidos perpendicularmente al cauce para contener los flujos que se originan en la quebrada en épocas de avenidas. Estos diques se encuentran distanciados cada 40 m en promedio. El material transportado tiene un diámetro  $D_{50}=1.5$  mm.

-Tramo 2 (del km 1.9 al km 4): el cauce tiene una profundidad que varía de 2.5 m (zona baja) a 4 m (zona alta) y un ancho del lecho de 26 a 32 m. Esta zona es usada como cantera debido a la acumulación de material. La velocidad del flujo es mayor que en el Tramo 1, variando de 4.5 a 6 m/s. El material transportado tiene un diámetro  $D_{50}=2$  mm, hasta el km 2.6, y  $D_{50}=30$  mm, en el resto del tramo. Los flujos también arrastran consigo un 5% de piedra con un diámetro entre 50 a 100 mm.

-Tramo 3 (del km 4 al km 9): representa a un cono de deyección de 100 m de ancho en la parte inferior (en el km 4) y 2 km de ancho en la parte superior (en el km 9). No hay un cauce único, siendo necesario pensar en un conjunto de cauces menores de dimensiones pequeñas. Se puede encontrar canto rodado y grava, con un diámetro  $D_{50}=50$  mm, así como un 5% de piedra con un diámetro entre 0.3 a 0.6 m, y gravas y piedras de hasta 100 mm de diámetro.

-Tramo 4 (a partir del km 9): representa al tramo más largo de la quebrada Cansas, encontrándose entre las elevaciones 600 m.s.n.m. y 2500 m.s.n.m. La topografía es encañonada, con acantilados profundos, estando las laderas

parcialmente cubiertas con abundante arena de origen eólico y por meteorización de la roca madre.

La confluencia de la quebrada Cansas con el río Ica es prácticamente perpendicular, llegando a ese punto con material arenoso grueso. El río se desborda y llega a la ciudad de Ica por la Avenida 7 (margen izquierda). En el evento de 1998, el margen derecho también se inundó (Petacc 2001: 38).

La problemática de la quebrada Cansas se describe de la siguiente manera:

-Primer tramo (del km 0 al km 0.8): el recorrido de la quebrada está formada por dos curvas muy pronunciadas y el encuentro con el río Ica es por medio de una alcantarilla de 30 m<sup>3</sup>/s de capacidad máxima. Evidentemente, el régimen de la quebrada Cansas supera la capacidad de la alcantarilla, inunda tierras agrícolas y rompe el encauzamiento del río Ica.

-Segundo tramo (del km 0.8 al km 2.57): en esta zona, la quebrada tiene suficiente capacidad hidráulica para contener los flujos, pero la presencia de las obras de cruce de los canales de riego de La Achirana y La Máquina lo obstruyen y limitan. También se da socavación de los márgenes y del lecho.

-Tercer tramo (del km 2.57 al km 4.5): la sección del cauce varía mucho con la variación de la pendiente. Por ello, la capacidad hidráulica varía entre 250 y 300 m<sup>3</sup>/s.

-Cuarto tramo (a partir del km 4.5): el cauce se divide en dos prácticamente paralelos: uno correspondiente a la quebrada Cansas y otro es producto de una desviación del cauce de la quebrada Lomas Larga para evitar que pase por La Tinguña. Las aguas discurren de forma discontinua, dentro de un cono de deyección. La velocidad del agua es alta, lo que produce erosión. El problema con este esquema de recorrido es que las aguas pueden llegar a las zonas agrícolas ubicadas al noroeste y/o a la población de La Tinguña.

Todos los tramos de estudio mencionados se muestran en el Mapa 03.



## CAPÍTULO 4: INFLUENCIA DEL FENÓMENO EL NIÑO

### 4.1. El clima y mar peruano

El Perú se ubica en una región geográfica especial respecto al Océano Pacífico, lo que lo hace muy vulnerable a eventos climáticos que son influenciados por condiciones oceanográficas (como el Fenómeno El Niño y la Corriente de Humboldt) y atmosféricas (como la Cordillera de los Andes).

### 4.2. Anomalías meteorológicas debido al Fenómeno El Niño 1997-1998

#### 4.2.1. Influencia en la costa

De acuerdo con CAF (2000), a diferencia de la sierra y la selva, en la costa se tuvieron las mayores anomalías meteorológicas relacionadas con la temperatura, la presión atmosférica y las precipitaciones.

a) Temperatura: la temperatura mínima del aire comenzó a presentar anomalías desde mayo de 1997. La primavera se retrasó hasta noviembre, por lo que las anomalías se incrementaron en los meses de verano de 1998, alcanzando valores de  $+8^{\circ}\text{C}$  (desde Trujillo hasta el norte chico de Lima) y de  $+4^{\circ}\text{C}$  en el sur.

b) Presión atmosférica: comenzó a presentar anomalías negativas a partir de julio de 1997, produciéndose los valores máximos de agosto a setiembre. En febrero y marzo de 1998, los valores tendieron a disminuir. Debido a la baja de presión y a la humedad presente en la atmósfera, se produjo una alta sensación de bochorno durante el verano de 1998.

c) Precipitaciones: superaron entre 50 y 100 % los niveles promedios normales en enero de 1998. En febrero, las anomalías más grandes se localizaron en el norte (Piura, Chiclayo, Chimbote, Huarney), mientras que en el centro y sur no fueron importantes. En marzo, las precipitaciones se acumularon hacia el norte (Tumbes, Piura, Lambayeque).

Con relación a los factores oceanográficos, la temperatura superficial del mar frente a las costas peruanas estuvo por encima de su valor normal, observándose dos máximos: el primero entre los meses de julio y agosto de 1997, y el segundo desde inicios de diciembre y durante todo el verano de 1998, siendo los valores durante el verano mayores que los del invierno (CAF 2000: 28).



#### 4.2.2. Influencia en la sierra

Las precipitaciones durante el Fenómeno El Niño 1997-1998 comenzaron en setiembre de 1997. El régimen pluviométrico en el sur migró desde la Alta Bolivia al oeste, produciéndose un incremento en las precipitaciones en las partes altas del departamento de Ica (CAF 2000: 27-28).

Las siguientes figuras permiten comparar la distribución de la precipitación acumulada en la sierra sur del país durante el Fenómeno El Niño 1982-1983 y 1997-1998, siendo ésta última de mayor intensidad.

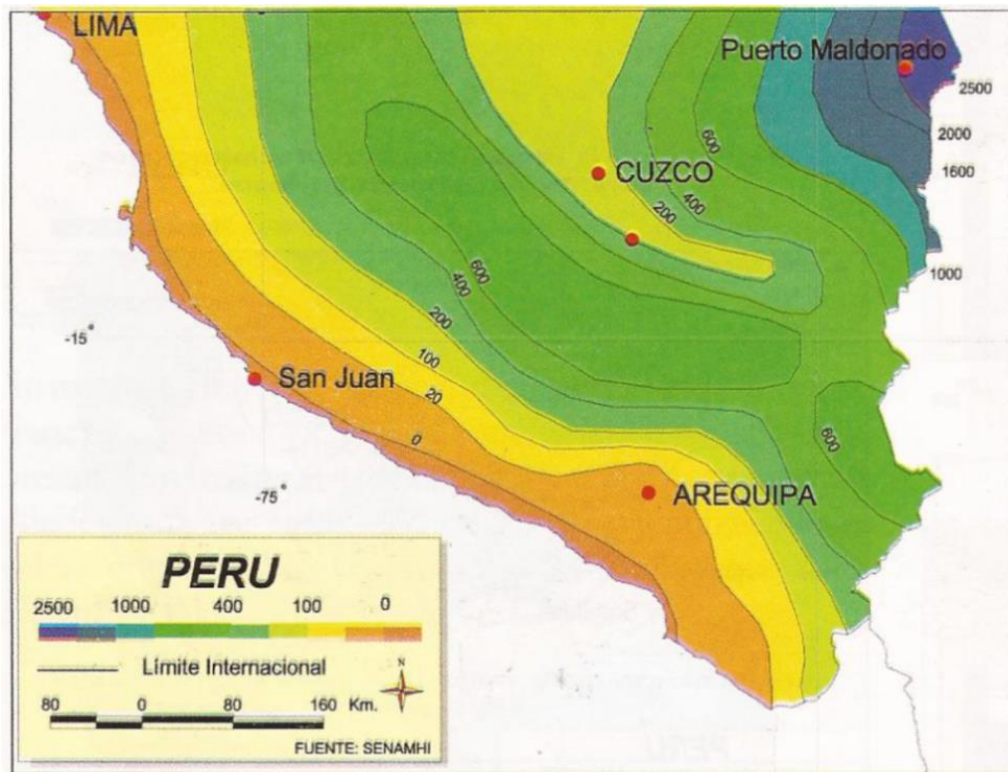


Fig. 4-1. Precipitación acumulada (mm) en la Sierra Sur. Sept. 1982 - Mayo 1983.

(Referencia: CAF 2000)

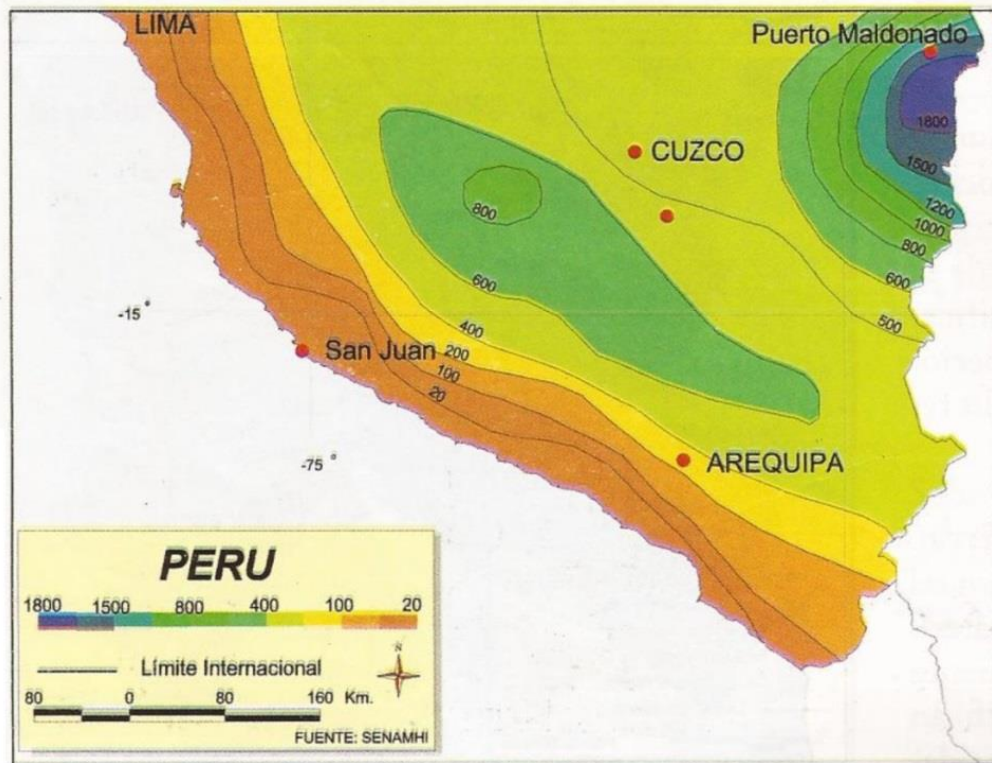


Fig. 4-2. *Precipitación acumulada (mm) en la Sierra Sur. Sept. 1997 - Mayo 1998.*  
 (Referencia: CAF 2000)

Los datos de precipitación acumulada de los años hidrológicos mencionados para la quebrada Cansas se muestran en el Mapa 04 y 05.

Como se observa en las figuras anteriores, las precipitaciones de mayor importancia tuvieron lugar en la sierra central. Las zonas altas de Ica también se vieron sometidas a un régimen de lluvias mayor que el de El Niño 1982-1983.

#### 4.3. Efectos en el régimen normal del río Ica

En la cuenca del río Ica se produjeron dos crecidas extraordinarias en enero de 1998, superando ampliamente los caudales históricos del río Ica. Durante enero de 1998, el caudal medio superó en 700 % la media normal. Como consecuencia, se produjeron desbordes en la ciudad de Ica y huaicos en la parte alta de la cuenca (CAF 2000: 39).

En el siguiente gráfico se muestra el registro de la descarga promedio mensual normal del río Ica durante los fenómenos El Niño 1982-1983 y 1997-1998.

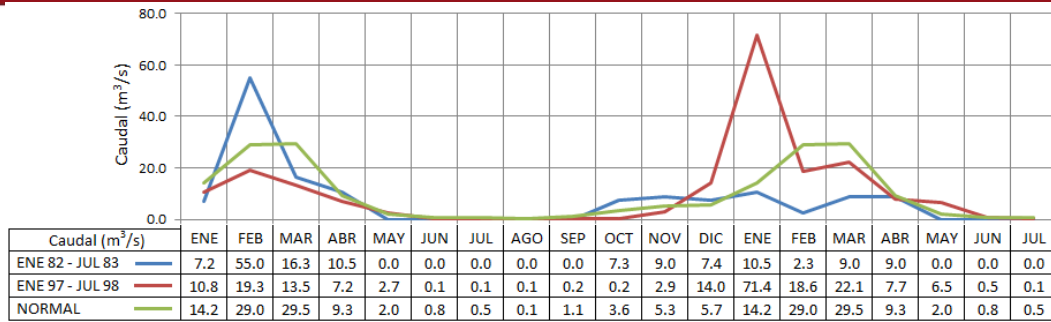


Fig. 4-3 Descarga promedio mensual del río Ica en m<sup>3</sup>/s durante El Niño 1982-1983 y El Niño 1997-1998.

(Referencia: adaptado de CAF 2000)

Se observa de la figura anterior que El Niño 1982-1983 y 1997-1998 son eventos completamente opuestos, es decir: el primer evento fue de grandes precipitaciones en el verano del año 1982, y de sequía en el verano del año 1983; por otro lado, el segundo evento fue de sequía en el verano de 1997, y de grandes precipitaciones en el año 1998.

En la costa sur, desde Ica hasta Tacna, los ríos aumentaron su caudal durante enero y febrero de 1998. Los ríos Ica, Ocoña y Camaná se vieron en una situación opuesta al de El Niño 1982-1983, en el que sus caudales se vieron drásticamente reducidos con relación a los niveles promedios normales. La razón de ello es que en el periodo hidrológico precedente se produjo la sequía de la sierra sur, lugar donde nacen esas cuencas (CAF 2000: 39).

#### 4.4. Daños provocados por el Fenómeno El Niño 1997-1998 en Ica

El 29 de enero de 1998 ocurrió una lluvia torrencial que duró tres horas. Luego de eso, una serie de huaicos arrasaron con el pueblo de San José de los Molinos y Cansas, destruyeron los asentamientos localizados a lo largo del cauce de la quebrada Cansas y causaron daños en Chanchajalla y La Tinguña. Una vez que llegó al río Ica, se formó una crecida extraordinaria estimada en 600 m<sup>3</sup>/s, produciéndose luego el desborde e inundación de la ciudad por ambas márgenes (CAF 2000: 166).

Los daños en la ciudad de Ica y sus alrededores fueron los siguientes:

- Daños en la infraestructura eléctrica, tanto de las subestaciones como de las redes de distribución primaria y secundaria.

-Destrucción de las áreas agrícolas aledañas a los ríos. En el departamento de Ica se tenía un área agrícola total de 2961 ha antes del desastre. Luego de El Niño 1997-1998, el área perdida fue de 652 ha (22% del total), mientras que el área afectada fue de 2309 ha (78% del total).

-Daños en la infraestructura de riego y drenaje (por ejemplo, sistema Choclococha)

-Desbordes a los lados del cauce del río Ica, inundando la ciudad y los asentamientos humanos.

-Colmatación de las redes de alcantarillado de la ciudad de Ica al producirse la inundación.

-Interrupción de la carretera Panamericana Sur (Daños en la infraestructura vial debido a caída de huaicos).

-Destrucción de varios tramos en las carreteras Huac-Huas-Llauta-Palpa, Palpa-Ocaña-Laramate, Changuillo-Coyungo, y CP en Pampas de Nazca.

-Destrucción de los pueblos de San José de Los Molinos y Cansas, afectación de los pueblos de Trapiche y Yesera, con menores efectos en Chanchajalla y La Tinguíña.

-Daños en cuatro puestos, dos centros y un hospital de salud. Destrucción del centro de Salud Los Molinos.

-Ausencia de frío en la costa durante los meses de julio y agosto, lo que impidió que brotaran las yemas florales de los olivos, lo que a su vez favoreció el incremento de plagas, causando pérdidas del 90% de los cultivos.

-Brotos de enfermedades diarreicas agudas (cólera) por al aumento de la temperatura y a la falta de disponibilidad de agua potable.

-Infecciones respiratorias agudas, alcanzando un número máximo de afectados en enero de 1998.

-Incremento de enfermedades de la piel. La población de Ica permaneció en contacto con agua mezclada con el desagüe por varios días, presentándose muchos casos de dermatitis hasta tres semanas después de ocurrido el evento



-Enfermedades oculares (conjuntivitis), debido a la presencia de polvo contaminado y la posterior remoción de escombros, lo que dejó en suspensión polvo proveniente de los huacos mezclado con aguas servidas (CAF 2000: 69, 114, 119, 149-152).

El evento cubrió más del 80% de la ciudad de Ica, destruyendo las construcciones de adobe y estera ubicados en los asentamientos humanos. Las casas de material noble y los centros comerciales vieron afectadas su infraestructura, debido a la inundación. La ciudad no estaba preparada para actuar ante esa emergencia y tampoco contaba con un sistema de drenaje, por lo que tomó más de un mes en evacuar las aguas de la ciudad. El número de afectados, tanto en la zona urbana como rural, se estimaron en 150 000 familias, y ya que muchos habían perdido sus casas, comenzaron a invadir terrenos urbanos y parcelas agrícolas (CAF 2000: 166).



## CAPÍTULO 5: MEDIDAS EXISTENTES

### 5.1. Construcción de obras de ingeniería

#### 5.1.1. Construcción de diques en la quebrada Cansas

Entre los meses de enero y marzo del 2003, la Dirección Regional de Agricultura de Ica, a través del “Programa de Encausamiento de Ríos y Protección de Estructuras de Captación” (Perpec), construyó tres enrocados escalonados en la Quebrada de Cansas: el Dique N°1, N° 2 y N° 3. Se emplearon 50 000 m<sup>3</sup> de enrocados. Estas obras se ubicaron entre las cotas 830 y 865 m.s.n.m. y sus dimensiones fueron las siguientes: 265, 155 y 67 m de longitud respectivamente, 35 a 40 m de ancho en la base, 13 m de ancho en la corona y una altura máxima de 8 m. El fin de estas estructuras fue interceptar los huaicos al inicio del cono aluvial (Gobierno Regional de Ica 2009: 75).

En el año 2006, se construyeron cuatro diques más: uno, con una longitud de 125 m, ubicado a 400 metros aguas arriba del Dique N° 1, y los otros tres, con longitudes de 623.7, 633.7 y 663 m respectivamente, ubicados a 400, 740 y 1040 m aguas abajo del Dique N° 3. Se construyeron para disipar la energía de los huaicos que periódicamente discurren por la quebrada Cansas en los meses de verano; disminuir la velocidad del escurrimiento y caudal instantáneo neto de los huaicos; evitar que los huaicos y el desborde del río Ica ocurrieran al mismo tiempo, retardando la llegada de los primeros al valle; y habilitar pozas de decantación de sedimentos gruesos y la formación de terrazas de sedimentación (Gobierno Regional de Ica 2009: 75).

Tiempo después, la ONG Huarango-Ica comenzó con forestar las zonas entre diques. Mientras tanto, en la llanura aluvial de la quebrada, se realizó el encauzamiento del curso principal de la quebrada Cansas (Gobierno Regional de Ica 2009: 75).

Como parte del trabajo de investigación, se realizaron dos visitas a la quebrada Cansas: el día 26 de octubre de 2013 y el día 22 de febrero de 2015. La relación de diques visitados y el nombre asignado por el autor se muestran en la siguiente tabla:



Tabla 5-1. *Relación de diques visitados.*

(Referencia: elaboración propia)

| Coordenadas              | Denominación | Año 2013               | Año 2015               |
|--------------------------|--------------|------------------------|------------------------|
| 14°01'03"S<br>75°37'14"W | Dique E      | Primer dique visitado  | Quinto dique visitado  |
| 14°01'02"S<br>75°36'56"W | Dique D      | Segundo dique visitado | Cuarto dique visitado  |
| 14°01'00"S<br>75°36'44"W | Dique C      | Tercer dique visitado  | Tercer dique visitado  |
| 14°01'05"S<br>75°36'31"W | Dique B      | Cuarto dique visitado  | Segundo dique visitado |
| 14°01'03"S<br>75°36'16"W | Dique A      | No se visitó           | Primer dique visitado  |

Los diques están nombrados y ordenados conforme se recorre la quebrada Cansas, siendo el dique E el más exterior (de menor cota) y el dique A el más interno (de mayor cota). La ubicación de los diques se muestra en el Mapa 06.

Como producto del viaje, se recopiló información fotográfica y filmográfica del estado en el que se encuentran los diques construidos a lo largo de la quebrada para contener los flujos. Algunas de las fotografías se muestran a continuación:

Cuadro 5-1. *Entrada a la quebrada Cansas (vista lateral izquierda).*

(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°01'26" de latitud Sur y 75°39'11" de longitud Oeste.    |  |
| 26 de octubre de 2013.  | 22 de febrero de 2015  |
|  |  |

Cuadro 5-2. *Entrada a la quebrada Cansas (vista lateral derecha).*



(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°01'26" de latitud Sur y 75°39'11" de longitud oeste   |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
|  |  |

Como se observa en las fotografías de los Cuadros 5-1 y 5-2, no se ha hecho mantenimiento de los muros que indican la entrada a la Quebrada en el periodo comprendido entre 2013 y 2015. La placa, en mal estado, indica que la inauguración (y, se presume, única vez que se hizo algún trabajo en ese lugar) reza el mes de agosto de 2006.

Cuadro 5-3. *Vista frontal del dique E.*

(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°01'03" de latitud Sur y 75°37'14" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015.   |
|  |  |

En el cuadro anterior se observa que los diques están contruidos con rocas de gran tamaño y están recubiertos por una capa de cemento. En las dos visitas realizadas, se observó que esta capa en la base del dique está ligeramente plegada hacia arriba, lo que supone que ocurrió infiltración de agua de adentro hacia afuera en el fondo del dique en algún momento, lo que provocó erosión. El mismo estado se observó en la parte lateral izquierda del dique E. En la visita del año 2015 se encontró otro problema: presencia de huecos en la cara frontal del dique E.

Cuadro 5-4. *Huecos en la cara frontal del dique E.*

(Referencia: elaboración propia)





Como se muestra en las fotos del cuadro anterior, uno de los huecos medía unos 3 cm. Nótese el desprendimiento del material cementante de la roca.

El interior del dique E contiene suelo fino y piedras de gran tamaño. Se encontró seco en la primera visita, mientras que en la segunda visita se notó presencia de humedad debajo del suelo agrietado. La vegetación es ligera.



Cuadro 5-5. Interior del dique E (vista hacia aguas arriba).



(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°01'03" de latitud Sur y 75°37'13" de longitud Oeste   |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
|  |  |

El dique B se encuentra en malas condiciones y empeora conforme pasa el tiempo. La evolución de su deterioro se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 5-6. Vista frontal del dique B.



(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°01'05" de latitud Sur y 75°36'31" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
|  |  |

Se nota cómo la base ha sido desestabilizada por procesos de erosión hidráulica, ya que se encontró cauces húmedos producidos por flujo de agua. Asimismo, el dique B se encuentra fisurado. Se puede decir, entonces, que conforme se avanza al interior de la quebrada Cansas, el estado de los diques empeora.

Cuadro 5-7. Interior del dique B (vista hacia aguas arriba).

(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°01'07" de latitud Sur y 75°36'30" de longitud Oeste   |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
|  |  |

En el interior del dique B se tiene abundante vegetación. Es posible que una mayor cantidad de agua y un tipo de sedimento favorable para la vegetación, a partir de este punto de la quebrada, hayan contribuido a desarrollar este panorama. Sin embargo, el nivel de la colmatación ha llegado prácticamente al mismo nivel de la banqueta superior del dique.

Cabe señalar que a lo largo del trayecto entre dique y dique, se encuentra erosionado el “cauce” por donde pasan los flujos, presentándose cortes longitudinales que permiten estimar su espesor (de dos a tres metros). Asimismo, se encuentran repartidos a lo largo y ancho de la quebrada gran cantidad de piedras y rocas de gran tamaño (con alturas mayores a tres metros, y anchos mayores a seis metros). Puede afirmarse que los diques logran contener suelo y piedras de mediano tamaño, pero no son impermeables (procesos de erosión en la base de los diques por infiltración de agua) y no disipan energía (las rocas de gran tamaño siguen su trayecto aguas abajo).

### 5.1.2. Encauzamiento del río Ica

Los días 26 y 27 de octubre de 2013 y 22 de febrero de 2015 se realizaron visitas a la ciudad de Ica, pudiéndose recopilar información fotográfica y filmográfica del estado en que se encuentra el encauzamiento del río Ica (a la altura de los puentes Socorro, Puno, Grau y Cutervo). La ubicación de los tramos del río visitados se muestra en el Mapa 06.

El río Ica se encuentra encauzado a los costados en el tramo urbano, pero el método usado no es único. A lo largo de su recorrido a través de la ciudad de Ica, se encuentran muros de concreto rectos, inclinados y escalonados, gaviones escalonados, y empedrados cubiertos con cemento. Asimismo, los muros se encuentran dañados estructuralmente, presentando rajaduras por ser usados como cimentaciones para viviendas de albañilería, y desgaste por la quema de basura en sus superficies. Por otro lado, el lecho está conformado por bolones, gravas, arenas y basura. El lecho también presenta modificaciones por el tránsito de vehículos pesados, observándose huellas de llantas, y se tiene la presencia de cúmulos de desmonte. Los siguientes cuadros muestran al río Ica sin y con agua correspondiendo a las épocas seca y de precipitación (octubre y febrero), aunque hay que enfatizar que no se tratan del mismo año.

Cuadro 5-8. *Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Socorro.*  
(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°03'20" de latitud Sur y 75°43'36" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|  |  |
| Centro  |  |





Margen derecha



Margen izquierda: el encauzamiento está conformado por un muro vertical de concreto. En el año 2013 el lecho presentaba abundante cantidad de basura. En el año 2015 existe flujo de agua con basura alrededor y se han generado nuevas construcciones cerca al talud.

Centro: en el año 2013 se pudo observar que el suelo del lecho del río estaba conformado por material arenoso, con presencia de desmonte. Además, presentaba variación de la sección transversal y alteración del lecho del río por circulación de vehículos por medio de una habilitación informal de una vía de bajada al río en la parte izquierda. En el año 2015 hay flujo de agua.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un muro escalonado de concreto. En el año 2013 el lecho presentaba moderada cantidad de basura. En el año 2015 no hay flujo de agua y están presentes desperdicios.

Cuadro 5-9. *Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Socorro.*

(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°03'20" de latitud Sur y 75°43'36" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|    |    |
| Centro  |  |
|  |  |
| Margen derecha  |  |
|  |  |





Margen izquierda: el encauzamiento está conformado por un muro inclinado de concreto. En el año 2013 el lecho presentaba abundante cantidad de basura. En el año 2015 no hay flujo de agua, sólo humedad, y están presentes desperdicios.

Zona central: en el año 2013 se pudo observar que el suelo del lecho del río estaba conformado por material gravoso con presencia de bolonería. Además, había acumulación de basura. En el año 2015 hay flujo de agua, pero es turbulento en el lado derecho.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un muro de gaviones. En el año 2013 el muro presentaba vegetación en la base y se observó que el lecho contenía gran cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua, la vegetación parece haber crecido y todavía hay presencia de desperdicios.

Cuadro 5-10. *Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Puno.*

(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°03'32" de latitud Sur y 75°43'31" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|  |  |
| Centro  |  |



Margen derecha



Margen izquierda: el encauzamiento está conformado por un muro vertical de concreto en mal estado con escasa vegetación en la base. En el año 2013 el lecho estaba con abundante cantidad de basura. En el año 2015 hay flujo de agua, presencia de desperdicios alrededor y la vegetación ha crecido.

Zona central: en el año 2013 se observó que el suelo del lecho del río estaba conformado por material arenoso con poca presencia de bolonería. Además, se tenía la presencia de escasa basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un empedrado inclinado erosionado. En el año 2013 se observó que el lecho contenía moderada cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua, moderada cantidad de basura en el talud y la vegetación a crecido.



Cuadro 5-11. *Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Puno.*

(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°03'32" de latitud Sur y 75°43'31" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|    |    |
| Centro  |  |
|  |  |
| Margen derecha  |  |
|  |  |



Margen izquierda: el encauzamiento está compuesto por un empedrado cubierto con cemento. En el año 2013 se observó que el lecho contenía abundante cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua, el empedrado se ha erosionado y aún hay basura en el talud.

Zona central: en el año 2013 se observó que el suelo del lecho del río estaba conformado por gravas y arenas, y se tenía la presencia de poca cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un muro vertical de concreto con escasa vegetación en la base. En el año 2013 se observó que el lecho contenía abundante cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua y poca cantidad de basura.

Cuadro 5-12. *Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Grau.*  
(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°03'43" de latitud Sur y 75°43'26" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|  |  |
| Centro  |  |



Margen derecha

Margen izquierda: el encauzamiento está conformado por un muro vertical de concreto. En el año 2013 se observó que había escasa vegetación en la base del muro y el lecho contenía abundante cantidad de basura. En el año 2015 hay poco flujo de agua, todavía hay presencia de basura.







Zona central: en el año 2013 se observó que el suelo del lecho del río estaba conformado por gravas y arenas, y que había presencia de poca cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua, con basura alrededor.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un muro vertical de concreto con rajaduras y gaviones. En el año 2013 había escasa vegetación en la base del muro, se tenía la presencia de viviendas de albañilería construidas encima del muro; muro de gaviones con moderada vegetación en sus paredes, quema de basura en la base de los muros y el lecho contenía moderada cantidad de basura. En el año 2015 se observa que se ha pintado una especie de regla graduada en la pared del muro de concreto. Además, se tiene flujo de agua, aún hay basura cerca al muro de gaviones y la quema de basura se ha detenido.



Cuadro 5-13. *Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Grau.*

(Referencia: elaboración propia)


|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°03'43" de latitud Sur y 75°43'26" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|    |    |
| Centro  |  |
|  |  |
| Margen derecha  |  |
|  |  |

Margen izquierda: el encauzamiento está conformado por un muro vertical de concreto, el cual presenta rajaduras. En el año 2013 se observó que había escasa vegetación en la base del muro, presencia de viviendas de material noble construidas encima del muro y moderada cantidad de basura en el lecho. En el año 2015 se tiene flujo de agua y desperdicios flotando en el río.

Zona central: en el año 2013 se observó que el suelo del lecho del río estaba conformado por gravas y arenas, y presencia de poca cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un muro vertical de concreto con evidencias de quema de basura (manchas negras). En el año 2013 se observó que había escasa vegetación en la base del muro y presencia de moderada cantidad de basura en el lecho. En el año 2015 no se tiene flujo de agua y la cantidad de desperdicios se ha incrementado ligeramente.

Cuadro 5-14. *Río Ica con dirección aguas arriba visto desde el Puente Cutervo.*  
(Referencia: propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°04'13" de latitud Sur y 75°43'14" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|  |  |
| Centro  |  |





Margen derecha



Margen izquierda: el encauzamiento está conformado por un muro inclinado de concreto en mal estado (resquebrajamiento). En el año 2013 se observó que había abundante vegetación en la base del muro y que el lecho contenía abundante cantidad de basura. En el año 2015 se tiene que el muro se encuentra muy deteriorado (se han desprendido pequeñas partes de él) y no se tiene flujo de agua.







Zona central: en el año 2013 se observó que el suelo del lecho del río estaba conformado por material arenoso con poca bolonería, había poca cantidad de basura y moderada presencia de vegetación. En el año 2015 se tiene flujo de agua.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un muro de concreto. En el 2013 se observó que había gran cantidad de vegetación en la base del muro y que el lecho contenía moderada cantidad de basura. En el año 2015 no se tiene flujo de agua. Más bien, se observa la acumulación de bolonería y basura, lo que ha reducido la sección natural del río.



Cuadro 5-15. *Río Ica con dirección aguas abajo visto desde el Puente Cutervo.*

(Referencia: elaboración propia)

|   |  |
|---|--|
| Coordenadas geográficas: 14°04'13" de latitud Sur y 75°43'14" de longitud Oeste     |  |
| 26 de octubre de 2013   | 22 de febrero de 2015  |
| Margen izquierda  |  |
|    |    |
| Centro  |  |
|  |  |
| Margen derecha  |  |
|  |  |

Margen izquierda: el encauzamiento está conformado por un muro de gaviones. En el año 2013 se observó que en la base del muro había mucha vegetación y que el lecho contenía gran cantidad de basura. En el año 2015 no se tiene flujo de agua y la cantidad de basura ha aumentado.

Zona central: en el año 2013 se observó que el suelo del lecho del río estaba conformado por material arenoso, gravoso y moderada cantidad de bolonería. Asimismo, se tenía la presencia de moderada cantidad de basura. En el año 2015 se tiene flujo de agua con ligera turbulencia y transportando residuos. El cauce es muy angosto, lo que hace que en este tramo la velocidad del flujo del río sea mayor.

Margen derecha: el encauzamiento está conformado por un muro inclinado de concreto en pésimo estado. En el 2013 se observó que había gran cantidad de vegetación en la base, viviendas de material noble construidas encima del muro y que el lecho contenía gran cantidad de basura. En el año 2015 se observa que han aumentado los pisos de las edificaciones construidas encima del muro, a la vez que la cantidad de basura se ha incrementado. No se tiene flujo de agua por la acumulación de suelo y desperdicios.

## 5.2. Identificación de las vulnerabilidades de la zona

El plan regional de Ica consta de una recopilación de información sobre las características de la región de Ica, los desastres naturales a los que está sometido y un sistema de prevención de desastres. La razón de su inclusión es que la identificación de los peligros y vulnerabilidades de la ciudad de Ica son importantes para el planteamiento de medidas de prevención de riesgo de desastre por huacos. De acuerdo con el Gobierno Regional de Ica (2009), los aspectos más relevantes son los siguientes:

- ⊙ Los huacos son descritos como “gigantescos”. Está conformada por corrientes de barro espesas que arrastran consigo rocas de hasta 40 toneladas de peso. En los conos aluviales, los huacos se disipan en cientos de cauces.
- ⊙ En el cono aluvial de la quebrada Cansas, conformado por Parcona y La Tinguña, se han asentado 80 000 personas. Asimismo, ha aumentado el número de pobladores en San José de los Molinos, a pesar de que este pueblo ha sido destruido más de dieciocho veces en los últimos 100 años.
- ⊙ El tráfico y la ocupación de terrenos es una realidad que ocurre.

⦿ Las zonas donde se ubican los conos aluviales no deben de ser habitado, sino que tienen que ser usados como zonas donde los huaicos se disipan. Asimismo, cualquier obra que intente encauzar a los huaicos no debe dirigirla hacia el río Ica, pues el material que arrastra termina por colmatarlo y desbordarlo.

⦿ Se estima que en la quebrada Cansas se habría acumulado 300 millones de m<sup>3</sup> de arena de origen eólico.





## CAPÍTULO 6: CONCEPTO DE MEDIDAS DE PREVENCIÓN

### 6.1. Marco bajo el cual se presenta el concepto de medidas de prevención

Los desastres naturales causan pérdidas a un nivel aceptable en países desarrollados, mientras que en los países subdesarrollados causan un descenso del nivel de vida en la región afectada y serios problemas macroeconómicos en países pequeños. El aumento de la población, la expansión de las grandes zonas urbanas y la globalización obligan a crear ciudades crecientemente riesgosas (Kuroiwa 2012: 6, 9).

Para enfrentar esta situación, se debe pensar en proyectar ciudades sostenibles. Estas ciudades deben ser: seguras, ordenadas, saludables, atractivas cultural y físicamente, eficientes, gobernables y competitivas. El objetivo es brindar seguridad a las ciudades peruanas más riesgosas como respuesta a su crecimiento desordenado. Para ello, es necesario que todos los involucrados participen de manera efectiva y trabajen en equipo (Kuroiwa 2012: 18, 19).

Los esfuerzos para lograr el desarrollo internacional están concentrados en los efectos que generan el cambio climático y el riesgo de desastre. En el Perú, el Sistema Nacional de Inversión Pública (Snip) es el organismo que se encarga de certificar que los proyectos financiados por el Estado sean de calidad, es decir, la inversión de los recursos sea usado eficientemente para, así, asegurar un mayor bienestar a la población (MEF 2010: 8). En el río Ica y la quebrada Cansas se tiene que la combinación de los efectos de aplicar medidas que apuntan a la reducción del riesgo de desastre por huaicos y acciones que aumentan ese riesgo puede anularse, representado una inversión perdida en proyectos de ingeniería.

Se entiende que la provincia de Ica es históricamente afectada por eventos de origen hidrometeorológicos y de geodinámica. (el resumen de estos eventos se muestra en el Anexo 07) . De acuerdo con Remaître et al (2005), para reducir el riesgo de desastre por flujos de escombros, se suele combinar medidas estructurales y no estructurales (como la zonificación de áreas propensas a riesgo). Por ello, la construcción de diques en la quebrada Cansas y las obras de encauzamiento del río Ica no parecen resolver el problema en totalidad, ya que se ha dejado de lado aspectos socioculturales, como por ejemplo la calidad de vida para los pobladores afectados, el cual está vinculado con el estado en que se encuentran los ecosistemas.

La cosmología de la máquina proclama una visión determinista de la tecnología. El concepto de tecnología ampliamente difundido engloba a las máquinas como bienes de consumo y estatus, acompañadas de exageradas promesas de bienestar. Es importante corregir el concepto, ya que la tecnología está inmersa dentro de una compleja red social, conectada a objetos, lugares y saberes culturales específicos (Herrera 2011: 17). Por ello es que la construcción de obras de ingeniería fracasa si no se realiza un estudio integrado del problema.

Lo anterior se pone en evidencia por la presencia de viviendas en zonas de peligro. Resulta evidente que el planteamiento de nuevas medidas debe de hacerse en forma sistemática, con una inversión cuidadosa, ya que los fondos los proporcionan las entidades públicas, y enfocándolas a reducir el riesgo de desastre por huacos al reducir los factores humanos (vulnerabilidad) del problema y no intentando cambiar los factores naturales (peligro) al construir diques.

#### **6.1.1. El enfoque ecosistémico y la GIRH**

Las definiciones de estos dos conceptos se presentan a continuación:

“El enfoque ecosistémico es una estrategia para la gestión integral del suelo, agua y recursos vivos que promueve la conservación y el uso sostenible de manera equitativa. Este enfoque posiciona a las personas que viven dentro de los ecosistemas y a sus medios de vida en el centro de las decisiones sobre la gestión y la conservación” (Quintero 2010: 16).

“La GIRH es un proceso que promueve el desarrollo coordinado y la gestión de agua, suelo y recursos relacionados para maximizar el resultado económico y el bienestar social de una manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales” (Quintero 2010: 16). La GIRH aplica cuatro principios básicos:

-El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente.

-El desarrollo y la gestión del agua deben basarse en un enfoque participativo, involucrando usuarios, planificadores y gestores de política en todos los niveles.

-El agua tiene un valor económico en todos sus niveles de uso y debería ser reconocida como un bien económico.



Ya que el agua brinda beneficios a la sociedad, esta última tiene la obligación de cuidar la naturaleza que le da estos beneficios.

### 6.1.2. La ciencia de la restauración de ríos

En el río Ica se tiene un serio problema de contaminación por residuos sólidos, vertimientos de aguas negras y alteración de la sección transversal, ya sea por obras de encauzamiento, el asentamiento de casas alrededor o la extracción de material del lecho. Asimismo, en la quebrada Cansas se tiene que el cono aluvial es usado como botadero de basura y de desmonte de construcción. Su sección transversal también ha sido alterada, por un lado por la basura, y por otro por la construcción de diques que apuntan a disipar la energía de los flujos de escombros (lo último puede considerarse como una modificación necesaria para atenuar un problema más serio).

Para continuar como ecosistemas saludables, los ríos deben ser capaces de adaptarse y absorber cambios en escalas de tiempo mayores al tiempo en que ocurren las perturbaciones (Wohl et al 2005: 6). La intervención, ya sea estructural o no estructural, en el río Ica o la quebrada Cansas para hacer frente a los huacos o inundaciones indudablemente provoca alteraciones en el ecosistema que deben ser tratadas bajo el concepto de restauración de ríos.

La restauración de ríos se define como el trabajo que se hace para mejorar la hidrología, geomorfología y los procesos ecológicos en una cuenca degradada, así como reemplazar elementos perdidos, dañados o comprometidos en un sistema natural. Si se quiere usar una escala espacial para trabajar las restauraciones de ríos, debe ser a nivel de toda la cuenca. La restauración de ríos se esfuerza por reestablecer los índices normales de procesos ecológicos y químicos y/o reemplazar los elementos bióticos dañados o perdidos. Se busca que el ecosistema pueda gozar de una integridad ecológica, es decir que el ecosistema pueda acoger a seres vivos y procesos de manera sostenible (Wohl et al 2005: 2).

De acuerdo con Wohl et al (2005), el conocimiento que involucra la restauración de ríos se encuentra a la vanguardia. Sin embargo, muchos proyectos de restauración de ríos son ejecutados en un contexto científico pobre. Es una realidad que la degradación de los ecosistemas de los ríos y la pérdida de la biodiversidad acuática van en aumento. Los ecosistemas de los ríos siguen deteriorándose como resultado de la influencia de las actividades de los seres humanos. Para revertir (o detener al menos) lo anterior, la restauración de ríos

funciona como un complemento esencial para la conservación y el manejo de los recursos naturales.

Muchos proyectos se llevan a cabo sin tener un concepto de cómo funcionan los ecosistemas de los ríos. No se sabe cómo funcionan o se encuentran conectados los diferentes procesos dentro de un ecosistema; cómo responde un río frente a modificaciones, tanto en el espacio y como en el tiempo; y tampoco se implementa un programa de monitoreo para tener un registro de los efectos de las acciones tomadas al final del proyecto, por lo que es incierto el éxito o fracaso del mismo (Wohl et al 2005: 1).

Es importante recalcar que, en un proyecto de restauración de ríos, los beneficios son en su mayoría sociales, como construir un espíritu de comunidad o incrementar el orgullo del lugar. Dada esas condiciones, se tiene que el éxito de una restauración es comúnmente evaluada bajo consideraciones sociales, más que por el desempeño ecológico. Por otro lado, cuando la intervención es motivada por razones ecológicas suele ser porque los bienes o servicios del ecosistema que son aprovechados por la comunidad han sido comprometidos (Wohl et al 2005: 3). La capacidad de los ríos de proveer servicios depende de mantener o restaurar altos niveles de integridad ecológica (Wohl et al 2005: 3, 4).

Resulta importante educar a las personas acerca de las relaciones existentes entre el manejo y la provisión de servicios de un río. Tanto los factores científicos y no científicos condicionan el éxito de la restauración. Las limitaciones científicas incluyen información no disponible de ecosistemas o procesos en condiciones críticas, e inadecuada interpretación de la información obtenida del desempeño de modelos aplicados en otros lugares. Las limitaciones no científicas incluyen inviabilidad de acciones concretas (y deseadas) de restauración, diferencias filosóficas entre las personas o entidades interesadas y desacuerdos sobre quién debería asumir los costos sociales y económicos de la restauración (Wohl et al 2005: 4).

También son importantes los aspectos temporales y espaciales para la ciencia de ríos. Juntos dirigen los procesos ecológicos producidos por los flujos. La historia de un río debe ser recopilado. Este legado de efectos puede ser estudiado al examinar registros históricos como fotografías y registros de descargas, los cuales pueden ayudar a establecer condiciones iniciales de estudio. Los ecosistemas de los ríos están en constante respuesta al flujo medioambiental y las actividades humanas (Wohl et al 2005: 5).

La comprensión científica del funcionamiento de un río presenta tres desafíos. Primero, como sólo se cuenta con información detallada de otros proyectos de restauración, con diferentes escalas espacial y temporal, se suele transferir ese conocimiento a un proyecto con condiciones distintas. Ello involucra suposiciones no probadas de transferencia y escala de información. Sin embargo, los científicos de ríos todavía no han logrado llegar a un consenso sobre las limitaciones de transferencia del conocimiento generado de otro sistema o situación. El segundo desafío proviene de la necesidad de considerar a los proyectos de restauración como experimentos que pueden enseñarnos acerca de cómo operan los ecosistemas. La mayoría de proyectos de restauración han sido implementados sin el estudio de diseño, data de inicio de estudio y la evaluación de recientes proyectos a fin de contar con un respaldo técnico. Asimismo, existe una falta de oportunidades para conducir experimentos a gran escala, donde todas las respuestas del sistema puedan ser evaluadas en escalas que sirvan para tomar acciones. El tercer desafío científico que enfrenta la restauración de ríos es la dificultad de integrar el conocimiento de varias disciplinas dentro de un marco interdisciplinario. Aquel es un típico y, a la vez, duradero problema que tiene que ver con desacuerdos del lenguaje a usar, marco conceptual, escalas de operación, métodos de investigación y respaldos históricos de las disciplinas involucradas en la ciencia, manejo y restauración de ríos. Actualmente, los científicos de ríos están intentando integrar principios de hidrología, geomorfología y ecología dentro de un único sistema para entender y predecir mejor como los sistemas de los ríos funcionan y responden a la manipulación (Wohl et al 2005: 6).

En resumen, los científicos y la sociedad deben admitir que las decisiones que se tomen respecto a la restauración de ríos continuarán siendo hechos en base a importantes incertidumbres científicas. Por eso es que las acciones de restauración seguirán siendo planteadas en base a análisis cualitativos. No es realista esperar que la ciencia de la restauración de ríos se transforme rápidamente en una disciplina predictiva y cuantitativa en el corto plazo. Si aún no se tiene la habilidad para realizar predicciones específicas sobre los sistemas naturales, mucho menos se podrá con los sistemas que han sufrido altos grados de alteración. La restauración de ríos es fundamentalmente un proceso social que envuelve ciencias de varios grados. Los ríos contribuyen a la calidad de vida de los seres humanos en muchos aspectos, incluyendo el emocional, estético, intelectual, físico, social y espiritual. Sin embargo, la prevalencia de la visión económica que apuesta por la conversión de los recursos naturales en capital, disminuye esos recursos

generados por la restauración ecológica, que bien podrían ser dirigidos a la sociedad (Wohl et al 2005: 7).

Finalmente se tiene que el principal desafío social para los científicos de ríos es asumir más responsabilidad como educadores públicos. Ambos, tanto el científico como el educador, están en la capacidad de proveer información científica y de ser agentes de cambio de los valores sociales (Wohl et al 2005: 7).

### **6.1.3. Aspectos reológicos del flujo**

De acuerdo con Julien y León, la mitigación de los efectos de los flujos debe evitar el riesgo de inundación, regular y zonificar las áreas recorridas por los huaicos, almacenar material transportado y filtrar el agua excedente.

Los flujos de escombros se originan en taludes empinados y logra altas velocidades. Las fuerzas de impacto generados por el rápido movimiento del material grueso puede ser excesivamente destructiva. La mitigación del riesgo por flujo de escombros debe centrarse en detener los elementos más grandes transportados por los huaicos y evitar las fuerzas de impacto destructivas, así como drenar el agua.

Para ello, si se construyen presas, éstas deben ser capaces de detener la ola frontal del flujo de escombros, almacenar la mayor cantidad de material sólido posible y drenar el agua del flujo de escombros. La capacidad de retención está limitada por la pendiente del talud, pero su propósito es remover los elementos de escombros más grandes de la matriz del flujo. Una vez que el agua de los poros ha sido drenada, la movilidad de los clastos gruesos decrece rápidamente. El diseño de las presas requiere un estudio del volumen potencial de almacenamiento, fuerzas de impacto máximo, protección contra la erosión, estabilidad bajo cargas estáticas, y un plan para el acceso al mantenimiento y remoción de escombros. Las presas en cuencas que generan frecuentemente flujos de escombros deberían ser periódicamente inspeccionadas por daños de impacto, estabilidad de la cimentación y erosión alrededor de la estructura. Incluso, las presas pueden ser equipadas con sistemas de alerta temprana para monitorear la llegada de flujos de escombros o los niveles de relleno para proveer alertas avanzadas para evacuaciones en la cuenca baja (Julien y León: 11, 12).

## 6.2. Presentación del concepto de medidas de prevención

El concepto que se presenta a continuación se ha desarrollado teniendo en cuenta los espacios de tiempo antes, durante y después del desastre. De esta forma se tendrá organizado los planes de ejecución en forma permanente. Los conceptos giran en torno a la quebrada Cansas y al río Ica (tramo urbano).

### 6.2.1. Revegetación de la quebrada Cansas

Las plantas adaptadas a ambientes secos reciben el nombre de xerófitas. Sus semillas caen al suelo y pueden permanecer durmientes durante muchos años. Para poder germinar, necesitan estar remojadas por lo menos veinticuatro horas. Debido a que la quebrada Cansas presenta un clima seco con muy pocas temporadas de lluvias, el único o más importante evento relacionado con la posibilidad de las semillas para germinar son los huaicos. Ellos permiten el transporte de las semillas depositadas en el suelo por las plantas típicas del clima desértico (Whaley et al 2009: 2-3, 30-33).

La presencia de vegetación en un talud permite disminuir el efecto de la erosión producida por el escurrimiento del agua superficial. Asimismo, como ya se presentó en el ítem 2.3.2., las raíces de las plantas sí aportan resistencia mediante una cohesión adicional a la del suelo, por lo que aumentan el factor de seguridad para la estabilidad de un talud al incrementar  $T_c$  (ver Ecuación 2-21).

En las visitas a la quebrada Cansas, se pudo observar presencia de vegetación en las zonas entre dique y dique. Indirectamente se ha propiciado la germinación de las semillas, debido a la contención del agua de los flujos. El concepto es el siguiente:

-No alterar el estado de la quebrada mediante la construcción de más diques de enrocados o de concreto, o el “encauzamiento” de su cauce.




-Esparcir semillas típicas en la zona y dejar que los pequeños flujos las hagan germinar. El sistema natural de la quebrada propicia su germinación una vez al año siempre y cuando puedan permanecer bajo condiciones de humedad mínima de 24 horas. La lista de las semillas típicas de quebrada Cansas puede encontrarse en el estudio hecho por la *Royal Botanic Gardens* en el 2009 (está incluida en la bibliografía de esta investigación).



-Apoyar al ciclo hidrológico que ocurre en la quebrada Cansas con programas de riego ligeros sólo en el caso que el agua que requieran las semillas usadas para la revegetación no llegue en el tiempo estimado. El agua es un asunto de importancia en la región de Ica. Su escasez obliga a gestionar su uso de manera eficaz e integrada.

Cuadro 6-1. *Plantas en la quebrada Cansas.*

(Referencia: elaboración propia)

|  |   |
|--|---|
| <p><i>Arbusto en la quebrada Cansas</i></p>  | <p><i>Árbol ulliquete</i><br/>(<i>Neoraimondia arequipensis</i>)</p>                |
|    |  |
| <p><i>Cactus gigantón o jacuno</i><br/>(<i>Armatocereus procerus</i>)</p>            |   |
|  |   |

### 6.2.2. Control demográfico y de las actividades en la quebrada Cansas

El control demográfico consiste en la zonificación y la reubicación de varios sectores de la ciudad de Ica y las zonas rurales. Si bien es de esperarse un costo grande, el traslado puede ser progresivo y será compensado cuando el próximo evento se presente, destruyendo zonas poco pobladas (o sin poblar en el mejor de los casos). Se tendrán menos costos por reconstrucción y menor cantidad de pérdidas de vidas humanas. Las zonas urbanas ubicadas dentro de la quebrada Cansas se muestran en el Mapa 02.

Los primeros pobladores en ser reubicados deberán ser los que se encuentran asentados sobre las riberas del río Ica, específicamente, encima de las obras de encauzamiento (ver cuadros del 5-12 al 5-15). Los muros han sido utilizados como cimentación de algunas viviendas, ocasionando que se resquebrajen. Del mismo modo, se arroja y quema basura en el lecho del río Ica, muy cerca de las obras de encauzamiento, lo que los debilita aún más.

Es un hecho que la presencia de escombros durante la ocurrencia de los huaicos es un aspecto que se agrava si se coloca material a lo largo de su trayecto. También la exposición de material subyacente a las capas superiores de suelo en la quebrada Cansas representa un peligro. La extracción de piedras de la quebrada deja expuesto material fino. No sólo es basura, sino desmonte originado por el sector construcción y el suelo expuesto lo que pueden arrastrar los huaicos.



Fig. 6-1. *Desmonte arrojado en la parte baja de la quebrada Cansas.*  
(Referencia: elaboración propia)

En el ítem 2.1.2. se trató el tema de la temperatura granular y de la influencia que tiene en el movimiento del flujo de escombros. Si bien la composición granulométrica de cada huaico puede ser distinta, la presencia de desmonte y de material fino en la zona llana de la quebrada hará más agresivo el comportamiento del flujo. Si la falla del talud y su movimiento cuesta abajo se pudo haber iniciado con un determinado tipo de suelo más o menos homogéneo, la adición de desmonte y suelo fino que pueda arrastrar el flujo provocará un efecto equivalente a la composición necesaria para que se produzca el flujo de escombros. La distribución de granos sólidos hará que el material de gran tamaño se coloque encima del flujo y viaje con éste. El desmonte irá golpeando lo que encuentre en su camino y sus efectos serán distintos a la presencia de rocas de gran tamaño (puede ser que ya no destruya tanto, pero puede hacer daño a las personas por los bordes afilados que tenga). La idea es evitar generar condiciones en la quebrada Cansas que favorezcan el comportamiento del flujo como un flujo de escombros.

De lo anterior, se llega a la conclusión de que no todos los huaicos (o los flujos a los que la gente suele llamar huaicos) son flujos de escombros.

En la ciudad de Ica, la recolección de la basura se subcontrata, ya que tanto la provincia como los distritos de Ica no cuentan con una planta de tratamiento de residuos sólidos. Los vehículos recogen una cantidad de basura igual a 80 ton/día (Gobierno Regional de Ica 2009: 80). Las municipalidades deben iniciar un programa de concientización sobre la basura, ejerciendo un mejor control de los lugares elegidos como botaderos. Ni la quebrada Cansas ni el río Ica pueden ser escogidos como botaderos, ya que por ahí pasan los flujos.

Las zonas usadas como canteras tampoco pueden ser el lecho del río Ica ni la quebrada Cansas, ya que modifican la forma del cauce y su respuesta hidráulica. Las canteras deben ser ubicadas en zonas donde los huaicos no causen problemas. Si se va a usar la quebrada Cansas como cantera, no debe de explotarse un solo punto, sino una gran extensión, para así no dejar expuesto el suelo subyacente. La idea es reducir las rocas de gran tamaño que puedan arrastrar los flujos, pero sin dejar al material fino expuesto. La erosión sería mayor y se arrastraría igualmente gran cantidad de material.

La explotación de canteras se hará sin explosivos cuando la roca se encuentre suelta y tenga tamaños menores a un metro. Si la explotación se hace con explosivos, hay que seguir la normatividad vigente del Discamec (ANA: 14-15).

### 6.2.3. Tiempos de respuesta ante la ocurrencia de huaicos

En el Capítulo 2, se presentaron algunas características importantes del flujo de escombros. Una de ellas fue la difusión de la presión de poros. La ecuación se presenta a continuación:

$$t_{dif} = \frac{h^2 \cdot \mu}{k \cdot E} \dots (6-1)$$

En la ecuación anterior,  $t_{dif}$  es el tiempo de difusión de la presión de poros,  $h$  es el espesor del flujo de escombros,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua,  $k$  es la permeabilidad hidráulica y  $E$  es el módulo de rigidez del material compuesto.

En base al estudio de suelos del Petacc (2001), se puede calcular la conductividad hidráulica máxima, mínima y promedio:

Tabla 6-1. *Conductividad hidráulica del suelo en la quebrada Cansas.*

(Referencia: elaboración propia)

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| <b>K<sub>máx</sub> (cm/s)</b>  | 4.90E-01 |
| <b>K<sub>min</sub> (cm/s)</b>  | 6.08E-03 |
| <b>K<sub>prom</sub> (cm/s)</b> | 1.62E-01 |

Los valores de conductividad hidráulica de la tabla anterior son típicos de las arenas limpias, y mezclas de arena y grava limpias (de  $10^{-3}$  cm/s a  $10^0$  cm/s), e indica que se trata de un suelo con buen drenaje (Terzaghi et al 1996: 73). Se deduce, entonces, que en la quebrada Cansas, la cantidad de material fino presente es poco o está en las capas más profundas. La primera posibilidad se explica por la fecha entre el estudio y el último gran evento en la quebrada: de 1998 a 2001. El material fino depositado en la superficie fue poco comparado con el del año 2013 y 2015, en donde se realizó el viaje de visita a la quebrada y se encontró suelo fino. Para la segunda posibilidad, la explicación es que los flujos remueven el material necesario para producir huaicos con determinadas características (algunos llegarán a formar flujos de escombros), y, cuando acaban, el material depositado en la parte superior será el suelo grueso con abundante presencia de bolones y rocas. Como interesa realizar un cálculo aproximado, se asumirán los valores de la tabla 6-1.



La viscosidad dinámica del agua varía con la temperatura. La temperatura promedio en la ciudad de Ica (ubicada a 398 msnm) es 22.8 °C (ver ítem 3.1.2.). Como se está estudiando la difusión de presión de poros, lo que ocurre una vez que el flujo se ha detenido, se asumirá que la temperatura promedio en la ciudad de Ica es la temperatura del agua. Sin embargo, los huaicos suelen ocurrir en épocas de fuertes lluvias, siendo eventos anómalos asociados al Fenómeno El Niño. Por ello, la temperatura será mayor frente al promedio normal. Usando como referencia el incremento de temperatura respecto de la mínima, se tiene,  $T=22.8+4=26.8^{\circ}\text{C}$  (ver ítem 4.2.1.). La viscosidad dinámica del agua a esa temperatura será:

Tabla 6-2. *Viscosidad dinámica del agua.*

(Referencia: Street et al 1996)

| T (°C) | $\mu$ (Pa.s) |
|--------|--------------|
| 25     | 8.900E-04    |
| 30     | 7.980E-04    |
| 26.8   | 8.569E-04    |

No se ha tomado en cuenta la variación de la viscosidad dinámica del agua por efecto de volumen de finos en suspensión, ya que se está asumiendo que las arenas y gravas controlan el flujo en la quebrada Cansas.

La permeabilidad hidráulica y el módulo de rigidez del material de la zona se desconoce, ya que no hay registros (hasta donde se sabe) de ensayos de compresibilidad de muestras de los huaicos que bajan de la quebrada Cansas. Se tomará como referencia los valores típicos de flujo de escombros planteados por Iverson (1997). Los valores se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 6-3. Valores típicos de las propiedades básicas de mezclas de flujo de escombros.

(Referencia: adaptado de Iverson 1997)

| Propiedad y unidad                         | Símbolo  | Valores Típicos                      |
|--|----------|--------------------------------------|
| <b>Propiedades del grano sólido</b>        |          |                                      |
| Densidad de la masa (kg/m <sup>3</sup> )   | $\rho_s$ | 2500 - 3000                          |
| Diámetro promedio (m)                      | $\delta$ | 10 <sup>-5</sup> - 10                |
| Ángulo de fricción (°)                     | $\phi_g$ | 25 - 45                              |
| Coeficiente de restitución                 | $e$      | 0.1 - 0.5                            |
| <b>Propiedades del fluido intersticial</b> |          |                                      |
| Densidad de la masa (kg/m <sup>3</sup> )   | $\rho_f$ | 1000 - 1200                          |
| Viscosidad (Pa.s)                          | $\mu$    | 0.001 - 0.1                          |
| <b>Propiedades de la mezcla</b>            |          |                                      |
| Fracción volúmetrica de sólidos            | $v_s$    | 0.4 - 0.8                            |
| Fracción volúmetrica del fluido            | $v_f$    | 0.2 - 0.6                            |
| Permeabilidad hidráulica (m <sup>2</sup> ) | $k$      | 10 <sup>-13</sup> - 10 <sup>-9</sup> |
| Conductividad hidráulica (m/s)             | $K$      | 10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-2</sup>  |
| Rigidez a la compresión (Pa)               | $E$      | 10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup>    |
| Ángulo de fricción (°)                     | $\phi$   | 25 - 45                              |

Tomando “altos” valores de permeabilidad hidráulica (relacionados con los “altos” valores de conductividad hidráulica del suelo en la quebrada Cansas) iguales a 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>, 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup> y 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>, y con un módulo de rigidez promedio E=10<sup>4</sup> Pa, se obtienen las siguientes curvas:

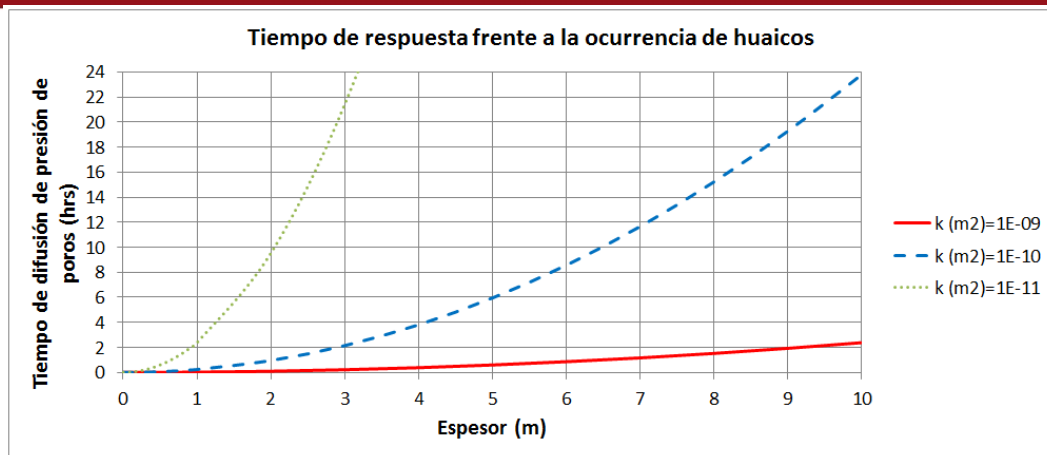


Fig. 6-2. *Tiempo de respuesta frente a la ocurrencia de huaicos.*

(Referencia: elaboración propia)

Se observa que el tiempo de difusión de presión de poros, para el mayor valor de permeabilidad hidráulica, para un espesor de flujo de escombros de cinco metros (tentando un valor de espesor debido a la experiencia de la visita a la quebrada Cansas) es más o menos una hora.

Frente a esta situación, se plantean los siguientes tiempos de respuesta ante la ocurrencia de huaicos para un espesor entre 3 a 5 m, espesores estimados en base a la visita a la quebrada Cansas:

-Los equipos de rescate tienen entre veinte minutos y una hora para reaccionar ante la situación, lo que exige que conozcan de antemano las zonas vulnerables a los huaicos. Hay que tener en cuenta que se tiene la posibilidad de que las personas, en vista de la desesperación, se pongan a buscar por su cuenta a sus familias sepultadas por el huaico, exponiéndose ellos mismos a hundirse dentro del material depositado. Para este análisis, se utilizó la curva con  $k=10^{-09} \text{ m}^2$ .

-El movimiento de los escombros, una vez que se haya disipado gran parte de la presión de poros, no debe de retrasarse mucho tiempo después de ocurrido el evento. La consolidación del suelo se llevará a cabo y el material se comportará cada vez más como un sólido (ganará resistencia), dificultando las tareas de rescate y la remoción del material. Se recomienda empezar las labores de remoción de escombros a partir de las dos horas de finalizado el evento, como mínimo, y hasta seis horas de finalizado el evento, como máximo. Obviamente, estos tiempos están sujetos a si las tareas de rescate ya se han realizado y/o si se necesita remover los escombros para completarlas. Lo que se debe priorizar es salvar la

vida de las personas y no tanto ver el rendimiento en la remoción de los escombros. Para este análisis, se utilizó la curva con  $k=10^{-10} \text{ m}^2$ .

-Es importante que las personas que viven en el área afectada se mantengan alejadas del material depositado, ya que se exponen a quedar atrapadas dentro de los escombros. El máximo tiempo en que el suelo puede permanecer licuado va de 21 horas hasta varios días, por lo que se recomienda esperar como mínimo 21 horas antes de dejar pasar a las personas por el área afectada. Para este análisis, se utilizó la curva con  $k=10^{-11} \text{ m}^2$ .

#### **6.2.4. Registro de datos hidrológicos y geotécnicos**

Para que ocurran los huaicos, tienen que ocurrir tres cosas: acumulación de material en la quebrada, saturación del suelo debido a lluvias intensas y falla del talud.

Los tres aspectos anteriores pueden anticipar la ocurrencia del próximo huaico, por lo que resulta necesario llevar un registro del material eólico transportado (arenas) y la acumulación de basura y escombros en la parte baja de la quebrada; la migración de la nubosidad por anomalías climáticas; y el movimiento de masa del suelo.

Se debe monitorear la quebrada Cansas mediante trabajos de campo que recopilen información geotécnica del estado en el que se encuentran tanto la llanura como las laderas de la quebrada Cansas, identificando las épocas del año en que se produce mayor índice de acumulación de material (tanto por acción natural como por acción del hombre). Mediante el reconocimiento del material depositado, y una secuencia de fotografías que hagan seguimiento a la modificación del panorama de la quebrada, se estimará el espesor de la capa de suelo crítica que de inicio a una época de riesgo de falla de talud.

Por otro lado, se deberá hacer seguimiento de las precipitaciones en la quebrada Cansas, enfocándose en la parte alta que es donde se producen las mayores precipitaciones (ver ítem 4.2.2.). En el Mapa 07 se muestra la ubicación propuesta de estaciones hidrometeorológicas.

Debido a que el clima de la cuenca del río Ica es seco, se tomará como ejes de control los tiempos cercanos al Fenómeno El Niño y/o alguna otra condición meteorológica que indique precipitaciones mayores a las que permitan el

escurrimiento del agua por la quebrada sin riesgo de erosión o saturación del suelo. Para ello, la intensidad de la lluvia que caiga en la quebrada deberá:

☉ Caso 1: ser menor a la conductividad hidráulica promedio para antecedentes de suelo seco. El suelo necesitará mayor cantidad de agua antes de llegar a saturarse por completo, por lo que la intensidad de lluvia deberá ser grande.

☉ Caso 2: no ser mayor a la mínima conductividad hidráulica para antecedentes de suelo con lluvias ocasionales. El suelo estará húmedo e incluso podría haber zonas ya saturadas, por lo que se requiere una menor intensidad de lluvia para lograr el estado completamente saturado.

Las conductibilidades hidráulicas de ambos casos están establecidas en la Tabla 6-1. Se tiene, entonces:

$$\text{Caso 1: } I_{\max} = \frac{0.162\text{cm}}{s} * \frac{10\text{mm}}{1\text{cm}} * \frac{60\text{s}}{1\text{min}} * \frac{60\text{min}}{1\text{h}} = 5832\text{mm/hora}$$

$$\text{Caso 2: } I_{\max} = \frac{0.00608\text{cm}}{s} * \frac{10\text{mm}}{1\text{cm}} * \frac{60\text{s}}{1\text{min}} * \frac{60\text{min}}{1\text{h}} = 218.9\text{mm/hora}$$

Si ocurren lluvias con mayor intensidad, se considerará el inicio de una época de riesgo.

Finalmente, de presentarse al mismo tiempo los dos aspectos anteriores (acumulación de material y saturación del suelo), el deslizamiento de cualquier talud de la quebrada Cansas precede a la ocurrencia de un huaico. La época debe ser considerada de alto riesgo, por lo que es necesario monitorear el movimiento del suelo para poder establecer si está cerca de la falla o si se trata de movimientos de masa comunes en los taludes. Los datos deben ser procesados, guardados y comunicados a las autoridades pertinentes, quienes decidirán si es conveniente la emisión de una alerta temprana de huaico.

### 6.2.5. Creación de un sistema de Pago por Servicios Ambientales

Esta medida da con el tiempo gran información sobre la quebrada Cansas, permitiendo ejecutar acciones en base a la respuesta que tendrá la quebrada, pero no es una solución a corto plazo. Requiere un alto nivel de cooperación y trabajo multidisciplinario y apoyo del Gobierno, así como el cambio de enfoque en la población sobre reducción de riegos y pago por mantenimiento de los recursos de la quebrada.



El agua es un recurso vital. Cumple un rol económico, ambiental (regula y asegura su integridad) y social (fundamento de muchas culturas). Forma parte de la cultura, cosmovisión y mitología de los pueblos andinos (Quintero 2010: 13).

La relación del agua con el flujo de escombros y la ciudad de Ica se da por las actividades económicas, específicamente, la agricultura. El uso de tierras inundables como zonas de cultivo es frecuente y el despilfarro del agua también viene con ello, empujado por la creciente industrialización.

Si bien la quebrada Cansas puede parecer una quebrada árida y sin valor, provee servicios ambientales hidrológicos. “Los servicios ambientales (o servicios ecosistémicos) son los beneficios que los ecosistemas proveen a los seres humanos” (Quintero 2010: 14). “Pueden ser proveídos por el funcionamiento de los ecosistemas naturales y, bajo ciertas circunstancias, por ecosistemas manejados” (Quintero 2010: 21). Por ejemplo, serían los huaicos, aunque suene paradójico, ya que son responsables de activar las semillas que se encuentran durmientes en el suelo, y el material de la quebrada extraído de las canteras. La revegetación de la quebrada puede ser aprovechada como una oportunidad para la ciudad de Ica de hacer turismo. Asimismo, la extracción de rocas y piedras de la quebrada puede hacer siempre y cuando no aumenten el riesgo de desastre por huaicos. Sin embargo, para mantener el ecosistema de la quebrada y proteger a la ciudad y los poblados afectados por los huaicos, es necesario el aporte voluntario de las personas interesadas. Aquí entra el concepto de pago por servicios ambientales (PSA en adelante).

El concepto de PSA comúnmente se entiende de forma incorrecta y se limita a las oportunidades y problemas de mecanismos de pago por servicios ambientales (Quintero 2010: 14). De acuerdo con la “Evaluación de los Ecosistemas del Milenio”, los servicios ambientales pueden ser de apoyo, de regulación, de aprovisionamiento y culturales, (Quintero 2010: 16). “El pago por servicios ambientales: es una transacción voluntaria de un servicio ambiental, donde participan al menos un comprador y un vendedor; el servicio ambiental está bien definido, y el proveedor del servicio asegura su provisión” (Quintero 2010: 21).

En Latinoamérica, los esquemas PSA no existen realmente, ya que no cumplen completamente con su definición. Lo que se tiene son esquemas tipo PSA, cuyas diferencias radican en que los pagos no son voluntarios, sino que es resultado de la negociación de unos pocos; e insuficiente cantidad de proveedores capaces de modificar de manera positiva, y a escala de cuenca hidrográfica, el

servicio ambiental hidrológico (SAH en adelante), lo que a su vez provoca que no se pueda determinar un precio por el SAH al no tener una legítima competencia entre oferta y demanda. Este tipo de mecanismos se crearon sin tener un marco político o institucional de referencia, además de no contar con estudios hidrológicos que evalúen el efecto de las acciones promovidas por ellos sobre la provisión del servicio. Por ello, los esquemas tipo PSA enfocan sus esfuerzos a financiar acciones que se creen que tienen una alta probabilidad de tener el impacto positivo esperado sobre los servicios hidrológicos, a pesar de que no se tenga certeza de ello (Quintero 2010: 20, 21, 22).

Los esquemas tipo PSA implementados en los últimos años en la región andina han sido mayormente, por no decir únicamente, para proteger o conservar los servicios ambientales proporcionados por cuencas altoandinas (Quintero 2010: 25).

Los SAH pueden ser priorizados de acuerdo con las necesidades de los grupos humanos a los que son dirigidos. Asimismo, los servicios hidrológicos dependen del régimen hidrológico, es decir, las propiedades biofísicas de los ecosistemas hacen que el agua tenga una variabilidad estacional y calidad definida. De la variabilidad estacional en la cantidad y calidad del agua se obtienen los SAH de los ecosistemas y pueden incluir: regulación del ciclo hidrológico, altos rendimientos hídricos, mantenimiento de la calidad del agua (tanto químicamente como en carga de sedimentos), y recarga de acuíferos (Quintero 2010: 26).

Cambios de uso de tierras provocan que los procesos biofísicos que controlan el régimen hidrológico cambien y por lo tanto, los servicios hidrológicos proporcionados por el ecosistema se degradan. Sin embargo, es posible recuperar en parte (si no es todo) los servicios hidrológicos de ecosistemas intervenidos mediante proyectos de restauración o recuperación de cuencas. Para ello, cualquier esfuerzo por recuperar los servicios hidrológicos debe hacerse con miras a lograr el objetivo deseado, pudiendo ser: mantener el mayor flujo de base posible en la época seca, disminuir los caudales de crecida, disminuir la carga de sedimentos en los ríos, etc. Es importante tener claro desde el inicio de la aplicación de la medida cuál es el SAH que se puede perder si el ecosistema es alterado, qué fue perdido y/o qué se puede recuperar. “Solamente al cuantificar la disminución o alteración del servicio hidrológico, se podrá conocer el valor real de conservar los ecosistemas naturales. También, al conocer la capacidad de recuperación de un ecosistema

alterado, se podrá identificar o seleccionar esquemas apropiados para conseguir el objetivo deseado” (Quintero 2010: 27).

#### 6.2.6. Construcción de presas de control de avenidas tradicionales

Al pensar en presas en la actualidad inevitablemente vendrán a la mente imágenes de espejos de agua represados por altos muros de concreto como los de la represa de Asuán en el Nilo egipcio; grandes plantas hidroeléctricas como Tres Gargantas, sobre el Yangtsé chino; y de desplazamiento masivo, destrucción del patrimonio cultural y de fuerte impacto ambiental, como lo recalcan los opositores al proyecto Belo Monte, sobre el Xingú amazónico. Es necesario hacerse una nueva imagen mental para entender que las presas y represas de la región andina fueron estrategias originales de manejo de la disponibilidad del agua (Herrera 2011: 62, 63).

La recopilación de información inicial sería de carácter histórico. Por ello se requiere de un trabajo multidisciplinario. “El recurrente fracaso de los múltiples proyectos de desarrollo enfocados en la recuperación de tecnologías tradicionales y ancestrales se debe principalmente a una visión de la tecnología como algo neutral y externo a la sociedad” (Herrera 2011: 18). Durante los proyectos de recuperación de tecnologías, se suele separar el trabajo intelectual y el trabajo práctico, reservando el primero para académicos y técnicos con formación universitaria, y el segundo, para trabajadores y campesinos. Lo anterior crea una diferencia social que se profundiza si, además, se jerarquizan las labores (Herrera 2011: 21).

Cuando se ha querido realizar el rescate de tecnologías andinas, a menudo impulsados desde “arriba” por los diferentes agentes del desarrollo, han intentado implantarlo como si fuera conocimiento técnico. Con eso, han obviado no sólo los aspectos sociales e históricos de la tecnología en el ámbito local, sino también las capacidades de creación e invención de los campesinos. Por el contrario, las recuperaciones desde “abajo” y a pequeña escala, tienden a ser más silenciosas y efectivas (Herrera 2011: 23).

Las presas de control de avenidas (*check dams*), construidas perpendicularmente al curso del agua para frenar la velocidad y potencial fuerza destructiva de los flujos de las quebradas estacionales, son las más antiguas que se pueden fechar con alguna certeza. Estas retienen sedimentos y humedad, que favorecen una vegetación más rica y duradera a lo largo de la época seca (Herrera 2011: 65, 66).

Denevan diferencia cinco tipos o formas básicas de terrazas: las presas de control de avenidas (*check dams*); las terrazas del fondo de cauces (*cross channel terraces*); las terrazas en ladera (*sloping field terraces*); los andenes, takanes o bancales (*bench terraces*); y las terrazas del fondo de valles (*broad field bench terraces*). Los andenes y las terrazas del fondo de valles tienden a ser irrigados y se caracterizan por tener muros de piedra o tierra altos, superficies de cultivo relativamente planas que permiten una adecuada distribución del agua y una sucesión de tierra y cascajo, para facilitar el drenaje. El resto aprovecha el agua de lluvia y de escorrentía, y se caracterizan por superficies inclinadas que se adecúan al contorno de las laderas o a los cauces de quebradas estacionales (Herrera 2011: 72, 73).

No hay muchos intentos por recuperar presas y represas antiguas, ya que hay una débil formación en tecnologías andinas dentro de la gran mayoría de facultades de ingeniería en las universidades de los países andinos. Debido a ello, se elaboran proyectos enfocados en represar grandes cantidades de agua para la irrigación. Bajo este enfoque, la infiltración es considerada un problema que debe afrontarse mediante la construcción de reservorios y canales impermeables, lo cual aumenta los esfuerzos sobre los muros de concreto que no pueden ser reparados utilizando la mano de obra y materiales localmente disponibles. Las tecnologías andinas, en cambio, aprovechan la infiltración y manejan los niveles y flujos freáticos según las condiciones y posibilidades locales, (Herrera 2011: 84).

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

- ⦿ La investigación científica del comportamiento del flujo de escombros ha permitido entender los efectos sobre los lugares por donde pasan y mostrar el concepto de medidas para la reducción del riesgo de desastre por huaicos en Ica.
- ⦿ El riesgo de desastre por huaicos de la quebrada Cansas en Ica es causado más por factores humanos que naturales.
- ⦿ El crecimiento desordenado de la ciudad de Ica promueve un escenario de desastre mayor al Fenómeno El Niño 1997-1998.
- ⦿ Los huaicos son fenómenos naturales que cumplen un papel fundamental en el mantenimiento del ecosistema de la quebrada Cansas.
- ⦿ La definición de “huaico” puede ser planteada en base a este trabajo de investigación, pero no pretende generalizarlo, ya que diferentes zonas del Perú pueden presentar flujos con distintos comportamientos y características.
- ⦿ El riesgo de desastre aumenta día a día en la quebrada Cansas, ya que contiene arenas eólicas depositadas en las laderas y rocas de gran tamaño a lo largo del lecho; la parte baja de la quebrada Cansas es utilizada como lugar de desmonte y quema de basura; y la parte alta es utilizada como cantera.
- ⦿ Se dan suficientes condiciones hidrológicas y geotécnicas para formar el flujo de escombros en la quebrada Cansas, con poca presencia de finos, mas sus efectos se concentran en las zonas cercanas a la quebrada Cansas (La Tinquña, Chanchajalla, Parcona). Pero es importante recalcar que se tratará de un subtipo de flujo de escombros: flujo granular, no Newtoniano.
- ⦿ La ciudad de Ica es propensa a sufrir inundaciones y flujos de lodo más que flujo de escombros. El riesgo de desastre se concentra en los márgenes del río en donde su encauzamiento ha sido aprovechado por los pobladores para asentarse.
- ⦿ Los diques construidos en la quebrada Cansas se encuentran en mal estado y no parecen ser la mejor forma de reducir el riesgo de desastre. La única



forma en que los huaicos se detengan es luego de haber consumido toda su energía traslacional y temperatura granular.

- ⊙ Muestras de suelo de la quebrada Cansas, producto de los huaicos, deben ser recogidas para futuras investigaciones. De esa forma, puede caracterizarse mejor el flujo que ocurre.
- ⊙ Los tiempos de respuesta propuestos en este trabajo pueden ser mejorados si se realizan muestreos del suelo depositado inmediatamente después de ocurrido el flujo de escombros. Los datos necesarios son la permeabilidad y conductividad hidráulica, el módulo de rigidez del material compuesto y el espesor promedio del material depositado.
- ⊙ Los conceptos presentados pretenden formar un plan integrado para reducir el riesgo de desastre por huaicos, teniendo como base un adecuado manejo del agua y el suelo, de los fondos públicos, y a la población.
- ⊙ La implementación de un modelo tipo PSA es una buena alternativa para conocer la repuesta de la quebrada frente a cualquier medida que se quiera ejecutar en el futuro en la quebrada Cansas. Requiere investigación a largo plazo, trabajo interdisciplinario y el apoyo del Gobierno.
- ⊙ El uso de presas de control de avenidas tradicionales puede ser una medida que usada adecuadamente puede controlar los flujos de escombros en la misma medida que los diques actualmente instalados. Sin embargo, su construcción, mantenimiento y reparación requiere de una investigación adicional que escapa a los alcances de este trabajo.
- ⊙ Es necesario realizar caracterizaciones cuantitativas de los huaicos., ya que el análisis que incluye la geomorfología, sedimentología, reología y modelamiento numérico produce valiosa información para entender el comportamiento del flujo de escombros.
- ⊙ El ensayo de material aluvial de la quebrada Cansas permitirá caracterizar mejor al flujo de escombros, ya que se pueden obtener valores que servirán para el modelamiento del flujo.
- ⊙ No se recomienda usar modelos de otras cuencas para estudiar el comportamiento de los huaicos en la quebrada Cansas, ya que cada uno es calibrado con características reológicas particulares.

- ⦿ La instalación de estaciones hidrometeorológicas en la quebrada Cansas permitirá la generación de registros cuantitativos que permitan mejorar acciones de reducción de riesgo por huaicos.
- ⦿ Las medidas a adoptarse tienen que ser tanto estructurales y no estructurales, ya que como se ha visto en este trabajo, las obras de ingeniería están deterioradas y el factor humano del problema se acentúa.
- ⦿ Toda medida a ejecutarse en el río Ica o la quebrada Cansas debe ser monitoreada en el tiempo para evaluar constantemente los resultados de la inversión. Ello involucra también una evaluación económica.



## BIBLIOGRAFÍA

BENDEZÚ HERENCIA, Rosario y MALLQUI AYALA, Juan (1999). *Mapa de peligros y medidas de mitigación de desastres de la ciudad de Ica*. Consulta: 25 de mayo de 2013.

<[http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios\\_CS/Region\\_Ica/ica/ica.pdf](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Ica/ica/ica.pdf)>

CHAVARRI VELARDE, Eduardo Abraham (2002). *Balance hidrológico de la cuenca integral del río Ica*. Inrena. Consulta: 17 de setiembre de 2013.

<[http://www.ana.gob.pe/media/296614/estudio\\_hidrologico\\_ica.pdf](http://www.ana.gob.pe/media/296614/estudio_hidrologico_ica.pdf)>

CORPORACIÓN ANDINA DE FOMENTO (2000). *Las lecciones de El Niño*. Volumen V. Venezuela: Unidad de Publicaciones de la CAF.

GOBIERNO REGIONAL DE ICA (2009). *Plan Regional de Prevención y Atención de Desastres. Región Ica 2009-2019*. Ica: Gobierno Regional de Ica. Consulta: de octubre de 2013.

<[http://www.concytec.gob.pe/portalsinacyt/images/stories/corcytecs/ica/plan\\_regi\\_atencion\\_desastres\\_2009\\_2019.pdf](http://www.concytec.gob.pe/portalsinacyt/images/stories/corcytecs/ica/plan_regi_atencion_desastres_2009_2019.pdf)>

HERRERA WASSILOWSKY, Alexander (2011). *La recuperación de tecnologías indígenas. Arqueología, tecnología y desarrollo en los Andes*. Primera Edición. Lima: Clacso; IEP.

HUTTER, K.; SVENDSEN, B. y RICKENMANN, D. (1996). *Debris flow modeling: A review*. Springer-Verlag. Consulta: 5 de agosto de 2013.

<[ftp://ftp.wsl.ch/pub/rickenmann/Rickenmann-pdf/1996/Hutter-etal-1996\\_CMT.pdf](ftp://ftp.wsl.ch/pub/rickenmann/Rickenmann-pdf/1996/Hutter-etal-1996_CMT.pdf)>

INRENA (1996). *Diagnóstico de la calidad del agua de la vertiente del Pacífico*. Volumen II. Lima: Ministerio de Agricultura. Consulta: 27 de setiembre de 2013.

<<http://biblioteca.ana.gob.pe:8080/repositorio/handle/123456789/642>>

IVERSON, Richard M.; REID, Mark E. y LAHUSEN, Richard G. (1997). *Debris-Flow mobilization from landslides*. USGS. Consulta: 5 de agosto de 2013.

<[http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/MassMovement/Publications/AREPS\\_1997/iverson\\_reid\\_lahusen\\_AREPS\\_1997.pdf](http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/MassMovement/Publications/AREPS_1997/iverson_reid_lahusen_AREPS_1997.pdf)>

IVERSON, Richard M. (1997). *The physics of debris flows*. EE.UU.: USGS. Consulta: 5 de agosto de 2013.

<[http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/MassMovement/Publications/RevGeophysics\\_Aug1997/iverson\\_rev\\_geophysics\\_aug97.pdf](http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/MassMovement/Publications/RevGeophysics_Aug1997/iverson_rev_geophysics_aug97.pdf)>

JEWEL, R. J.; FOURIE, A. B. (2002). *Paste and Thickened Tailings – A Guide*. Segunda Edición: Australia Center for Geomechanics.

JULIEN, Pierre Y.; LEÓN S., Claudia A. *Mud floods, mudflows and debris flows classification, rheology and structural design*.

KUROIWA H., Julio (2002). *Reducción de desastres: viviendo en armonía con la naturaleza*. Lima: PNUD.

KUROIWA, Julio (2012). “Ciudades sostenibles. Agenda para el siglo XXI”. Conferencia presentada en el Congreso Nacional de Planificación. Lima, 30 de octubre de 2012, Hotel Sheraton.

<<http://www.reeme.arizona.edu/materials/Ciudades%20Sostenibles.pdf>>

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS (2010). *Sistema Nacional de Inversión Pública y cambio climático. Una estimación de los costos y beneficios de implementar medidas de reducción de riesgos. Primera edición*. Lima: MEF. Consulta: 25 de mayo de 2013.

<[http://www.mef.gob.pe/contenidos/inv\\_publica/docs/estudios\\_documentos/documentos/MEF5-ABCreduccionriesgosVf.pdf](http://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/estudios_documentos/documentos/MEF5-ABCreduccionriesgosVf.pdf)>

MITMA MONTES, Grover; ALVA HURTADO, Jorge (2005). “Vulnerabilidad, riesgo sísmico y efectos de sitio. Microzonificación de la ciudad de Ica”. Ponencia presentada en el XVII Simposio de Prevención de Desastres. Lima. Consulta: 26 de agosto de 2013.

<[http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis27\\_p.pdf](http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis27_p.pdf)>

PEÑA LAUREANO, Fluquer; SÁNCHEZ DÍAZ, Mauro; PARI PINTO, Walter (2010). *Hidrogeología de la cuenca del río Ica. Regiones Ica y Huancavelica*. Boletín N° 3. Lima: Ingemmet.

PETACC (2001). *Estudio definitivo: Proyecto para el control de inundaciones del río Ica y quebrada Cansas/Chanchajalla*. Volumen I. Lima: Inade.

QUINTERO, Marcela (2010). *Servicios Ambientales Hidrológicos en la Región Andina*. Primera Edición. Lima: Condesan; IEP.

REMAÎTRE, Alexandre; MALET, Jean-Philippe; MAQUAIRE, Olivier; ANCEY, Christophe; LOCAT, Jacques (2005). *Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in a clay-shale basin*. Wiley InterScience.

STREET, Robert L.; WATTERS, Gary Z.; VENNARD, John K. (1996). *Elementary Fluid Mechanics*. Sétima edición. Nueva York: John Wiley and Sons.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Tercera Edición. Nueva York: John Wiley and Sons.

WEIR MINERALS DIVISION (2009). *Pumping Non-Newtonian Slurries*. Boletín 14, versión 2: Weir Minerals Division.

WHALEY, Oliver; ORELLANA, Alfonso; PÉREZ, Evelyn; TENORIO, Mario; QUINTEROS, Félix; MENDOZA, Marco; PECHO, Octavio. (2010). *Plantas y Vegetación de Ica, Perú*. Primera Edición. Lima: Royal Botanic Gardens. Consulta: octubre de 2013.

<[http://www.kew.org/science/tropamerica/peru/resources/Plantas\\_de\\_Ica\\_ed2\\_book\\_vlr.pdf](http://www.kew.org/science/tropamerica/peru/resources/Plantas_de_Ica_ed2_book_vlr.pdf)>

WOHL, Ellen; ANGERMEIER, Paul L., BLEDSOE, Brian; KONDOLF, G. Mathias; MACDONNELL Larry; MERRITT, David M.; PALMER, Margaret A.; POFF, N. LeRoy; TARBOTON, David (2005). *River restoration*. Volumen 41: Water Resources Research.