





COMISION TRINACIONAL PARA EL DESARROLLO DE LA CUENCA DEL RIO PILCOMAYO

# ONDA DE CONTAMINACIÓN POR ROTURA DE DIQUES DE COLAS EN LA ALTA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO

**Primer Informe Parcial** 





Proyecto LHA 346 Informe LHA 01-346-14 Ezeiza, Setiembre de 2014

# Laboratorio de Hidráulica



#### AUTORIDADES DEL INA

#### PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

#### **GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS**

Ing. Jorge A. MAZA

#### DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

#### JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

#### DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

#### **EQUIPO DE TRABAJO**

Ing. Martín SABAROTS GERBEC Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI Ing. Nicolás D. BADANO

#### **INFORME PRODUCIDO POR**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ Ing. Martín SABAROTS GERBEC Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI Ing. Nicolás D. BADANO



#### ONDA DE CONTAMINACIÓN POR ROTURA DE DIQUES DE COLAS EN LA ALTA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO

Primer Informe

#### RESUMEN

Se describe el problema de fallas de diques de colas. Se caracteriza la situación de los diques de colas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo. Se presentan descripciones detalladas de los dos eventos de falla más significativos ocurridos en esta zona, correspondientes a los diques de Porco y de Santiago Apóstol. Se plantea el modelo teórico base para la modelación del fenómeno. Se efectúa una modelación preliminar de la falla del dique de Porco.

**Descriptores temáticos**: Diques de colas, onda de contaminación, onda de rotura de presas, modelación numérica

Descriptores geográficos: Río Pilcomayo, Argentina, Bolivia, Paraguay



# ÍNDICE

1 IN	NTRODUCCIÓN	4
2 D	ESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
2.1	Zona de estudio	5
2.2	Diques de colas	6
2.3	Fallas de diques de colas	11
2.4	Diques de colas en la cuenca del Pilcomayo	16
3 D	ESCRIPCIÓN DE EVENTOS DE FALLA	22
3.1	Casos de referencia	22
3.2	Falla del dique de Porco	22
3.2.	1 Sistema de diques de Porco	22
3.2.	2 Descripción de la falla	28
3.2.	3 Contaminación	29
3.3	Falla del dique Santiago Apóstol	32
3.3.	1 Descripción general	32
3.3.	2 Descripción cronológica de la falla	34
3.3.	3 Descripción física de la falla	35



3.3	3.4 Observaciones in situ	36
3.3	3.5 Campaña de calidad del agua	38
Ν	Misión La Paz, 19 de julio	39
V	Villamontes, 19 de julio	40
Р	Puente Aruma, 20 de julio	42
V	Viña Quemada, 22 de julio	45
Р	Puente Méndez, 23 de julio	47
S	Santiago Apóstol - Colavi, 24 de julio	50
S	Síntesis	56
3.3	3.6 Interpretación	58
4 N	MODELACIÓN DEL FENÓMENO	60
4.1	Planteo del problema	60
4.2	Modelo teórico	60
4.3	Software	63
4.4	Ensayos preliminares	63
5 C	CONCLUSIONES	78
REFE	ERENCIAS	80



## 1 INTRODUCCIÓN

La Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo (CTN) encargó al Instituto Nacional del Agua (INA), a través del Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED) de la Universidad Nacional de Misiones, estudios que permitan establecer los potenciales alcances de vertidos de barros almacenados ante eventuales fallas en diques de colas de la cuenca del río Pilcomayo, de modo de contribuir a identificar, dimensionar y jerarquizar el tipo de acciones a tomar frente a este peligro. Estos estudios se enmarcan en el contexto de contribuir a mejorar las condiciones de vida de los habitantes de la cuenca del río Pilcomayo y de su entorno medioambiental, apoyándose en un refuerzo significativo del proceso de integración regional.

Los estudios se llevan adelante mediante la utilización de técnicas de simulación numérica, en incluyen los siguientes pasos:

- Establecimiento de un modelo conceptual del fenómeno.
- Identificación del modelo matemático capaz de describir las distintas etapas de desarrollo, e identificación y adquisición del código numérico (software) que lo representa.
- Validación del modelo en base a datos disponibles.
- Identificación de los diques de colas que implican los mayores riesgos, en base a su dimensión, ubicación y mantenimiento.
- Caracterización de los lodos almacenados en los diques, identificando los contaminantes que tengan un efecto probado sobre el ecosistema (vegetación, fauna, población).
- Planteo de escenarios de falla.
- Ensayo de los escenarios de falla y obtención y análisis de los resultados.
- Interpretación de los resultados obtenidos en relación a sus implicancias sobre el ecosistema.

En este Primer Informe Parcial se presenta una descripción del problema, incluyendo la temática de diques de cola y el caso particular de la cuenca del Pilcomayo (capítulo 2), una descripción detallada de casos de falla de referencia en la cuenca del Pilcomayo (capítulo 3), y el planteo teórico del problema, junto con los primeros ensayos preliminares de simulación numérica del fenómeno (capítulo 4). En el capítulo 5 se desarrollan las conclusiones de esta etapa del estudio.



# 2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

#### 2.1 Zona de estudio

La cuenca del río Pilcomayo se desarrolla sobre el territorio de tres países vecinos: Argentina, Bolivia y Paraguay (Figura 2.1). Tiene una superficie de 270.000 km<sup>2</sup> y está habitada por aproximadamente 1.500.000 personas. Su gran extensión implica geografías muy variables, desde su naciente en la Cordillera de los Andes, pasando por el tramo medio del Subandino, y extendiéndose finalmente hasta las llanuras del Chaco.



Figura 2.1. Cuenca del río Pilcomayo.

Los procesos naturales están dominados por la estacionalidad del clima, con alternancia de estaciones secas y húmedas que causan una altísima variabilidad de los caudales de los ríos, que oscilan entre valores mínimos y máximos instantáneos del orden de 10 y 4500 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, de acuerdos a los aforos en estación La Paz. En la Cuenca Alta se combinan características regionales semidesérticas con materiales muy erosionables, llevando a una producción de sedimentos que es una de las más altas del mundo, lo que se explica por el carácter geológicamente reciente de esta región. En tanto, la Cuenca Baja presenta una pendiente muy débil, generando una fuerte tendencia a la sedimentación.



En la Cuenca Alta (Figura 2.2) la actividad económica principal es la minería. Su principal centro minero es la ciudad de Potosí (Bolivia) con el Cerro Rico, pero existen centros mineros de escala mediana y pequeña en toda el área. Esta actividad minera se remonta a 500 años atrás. Mucho más recientemente (1985) se introdujo el proceso de flotación, de mayor potencial contaminante, con el fin de maximizar la extracción de metales.



Figura 2.2. Cuenca Alta del río Pilcomayo.

#### 2.2 Diques de colas

Las colas (o relaves) son los residuos de la actividad minera durante la etapa de procesamiento de los minerales. La fase sólida se deposita en escombreras, mientras que los lodos son derivados, por gravedad o bombeo, a diques de colas, donde se almacenan (Figura 2.3). Estos lodos tienen diversa composición, con elevadas concentraciones de metales pesados y otros tóxicos. La construcción de diques de colas surgió como una necesidad para disminuir el impacto contaminante de la actividad minera sobre los cursos de agua receptores, que de otra manera recibían y transportaban los lodos.



Figura 2.3. Dique de colas de Laguna Pampa

Existen dos estrategias para la construcción de diques de cola, que los ubica entonces en una de las dos categorías siguientes:

- *Diques de retención:* Se construyen en su totalidad, alcanzando la altura definitiva desde el inicio de la vida útil (Figura 2.4).
- Diques de recrecimiento: Se construyen paulatinamente, a medida que se almacena el material. Existen las variantes de aguas abajo, centrada y de aguas arriba (Figura 2.5), siendo la última de ellas la más económica.



Figura 2.4. Esquema de dique de retención



**c)** Aguas arriba

Figura 2.5. Esquemas de diques de recrecimiento

Respecto de su ubicación, que condiciona la administración del agua que ingresa al reservorio, los diques de colas se categorizan en:

- *En valle:* Se localiza en un valle de drenaje (Figura 2.6a), por lo cual debe disponer de formas de evacuar la escorrentía.
- *En ladera:* Se recuesta sobre la ladera de un cerro (Figura 2.6b), por lo cual el aporte de escorrentía es muy bajo.
- *Entre valle y ladera:* Se ubica en una posición intermedia entre los dos casos anteriores (Figura 2.6c), por lo cual la escorrentía a administrar es intermedia.
- *En anillo:* Se conforma como un recinto cerrado (Figura 2.6d), por lo cual sólo hay aporte directo de la lluvia.

Todas estas ubicaciones admiten patrones 'encadenados' o 'segmentado', tal como se muestra en la Figura 2.7.

LHA





c) Entre valle y ladera















**b)** En ladera





c) Entre valle y ladera



d) En anillo

Figura 2.7. Conjuntos de diques de colas

#### 2.3 Fallas de diques de colas

La masa de lodos tóxicos acumulada en el reservorio representa un peligro frente al riesgo de falla del dique de contención, que podría liberarla para ser transportada cuenca abajo por la corriente. Esa eventual falla puede producir tanto situaciones de emergencia como efectos de más largo plazo.

De un inventario mundial de 18.401 sitios mineros, la tasa de fallas sobre los últimos 100 años fue estimada en 1,2%, dos órdenes de magnitud mayor que la correspondiente a presas convencionales de retención de agua (Azam & Li 2010). La Figura 2.8 muestra la cantidad de eventos registrados por década. Para aquellos casos en los que se contó con suficiente información, Azam & Li (2010) produjeron distribuciones de casos de falla por región (Figura 2.9a), por causa de falla (Figura 2.9b), por capacidad de contención (Figura 2.9c), por volumen de colas liberado (Figura 2.9d), y por impacto socio-económico (Figura 2.9e).





Figura 2.8. Cantidad de eventos de falla de diques de colas a nivel mundial



a) Por región





#### b) Por causa de falla



c) Por capacidad de contención





#### d) Por volumen de colas liberado



e) Por impacto socio-económico

Figura 2.9. Distribución de casos de falla



Las principales conclusiones que surgen de este análisis son las siguientes (Azam & Li 2010):

- Los casos de falla de diques de colas tuvieron su pico en alrededor de 50 eventos por década desde los 1960's hasta los 1980's, pero han caído a alrededor de 20 eventos por década sobre los últimos 20 años.
- Recientemente, los picos de frecuencia de esos incidentes se han desplazado geográficamente desde países desarrollados a países en desarrollo.
- o Las causas principales de fallas son "lluvia inusual" y "manejo deficiente".
- Las fallas ocurren predominantemente en presas de tamaño "pequeño a mediano", de hasta 30 m de altura, y conteniendo volúmenes de colas máximos de 5 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.
- Luego de la falla, el volumen de colas liberado generalmente alcanza alrededor de 1/5 del contenido dentro del reservorio.
- En el caso de "fallas intermedias" es posible manejar la contaminación ambiental y los daños a la infraestructura.
- Los casos de derrames catastróficos tienen asociado pérdida de vidas y cuestiones de salud pública.

A título ilustrativo, en la Tabla 2.1 se indican casos de fallas significativos a nivel mundial.

Fecha	Ubicación	Incidente	Impactos
Oct/2003	Quinta, Chile	Falla de presa	50.000 ton de colas, fluyó 20 km
Ago/2002	Filipinas	Falla por crecida	Villa inundada, 250 evacuados
Nov/2001	Singleton, NSW	Tubificación en presa	Flujo contenido antes de falla de presa
Oct/2001	Guangxi, China	Falla de presa	115 muertos, 100 casas destruidas
Jun/2001	Minas Gerais, Brasil	Falla de presa	Colas fluyeron 6 km, 5 muertos
Oct/2000	Kentucky, USA	Falla de presa	950.000 m <sup>3</sup> de lodo fluyeron 120 km
Set/2000	Gallivare, Suecia	Tubificación en presa	2,5 Mm <sup>3</sup> de colas liberados
Mar/2000	Borsa, Rumania	Falla por crecida	22.000 ton de metales pesados liberadas en río de 100 km de extensión
Ene/2000	Baia Mare, Rumania	Falla por crecida	22.000 ton de metales pesados liberadas
Abr/1999	Placer, Filipinas	Falla de descargador	700.000 ton de colas de cianuro enterraron 17 casas
Abr/1998	Los Frailes, España	Tubificación en fundación	5 Mm <sup>3</sup> de agua tóxica inundó más de 1000 ha de tierra agrícola

#### Tabla 2.1. Casos significativos de fallas de diques de colas



Existen antecedentes de incidentes de falla en la Alta Cuenca del Pilcomayo:

- El 29 de agosto de 1996 se produjo un desastre de gran envergadura ante la falla del dique de Porco, descargando lodos tóxicos hacia la subcuenca del río Pilaya (ver próximo capítulo).
- El 2 de agosto de 2000 se produjo un derrame desde el dique de colas de Itos por la perforación de una membrana, que afectó un área de alrededor de 3 kilómetros, llegando hasta el sector de Iroco.
- El 4 de julio de 2014 tuvo lugar un incidente de falla de un dique de colas perteneciente a la Empresa Minera Santiago Apóstol, ubicado en la localidad potosina de Canutillos (municipio de Tacobamba), descargando al río Colavi, afluente del Pilcomayo (ver próximo capítulo).

#### 2.4 Diques de colas en la cuenca del Pilcomayo

En un estudio antecedente (Orozco Collazos 2013) se presentó un inventario de las diques de colas existentes en la Alta Cuenca del río Pilcomayo, el cual se reproduce en la Tabla 2.2. En la columna TPD (toneladas por día) se indica la capacidad de recepción de colas de cada dique.

N°	EMPRESA	INGENIO	TPD	MINERAL	LOCALIDAD	MUNICIPIO	PROVINCIA
1	Pan American Silver (San Vicente)	San Vicente	750	Zn-Ag	San Vicente	Atocha	Sud Chichas
2	LAMBOL(Choroma)	Lambol 3	200	Zn-Ag	Choroma	Tupiza	Sud Chichas
3	E.M. Rolando (ex-Occidental)	Rolando	40	Zn-Pb-Ag-Sn	San Antonio	Yocalla	Tomás Frías
4	Huari Huari (Sinchiwayra)	Don Diego	1000	Zn-Pb-Ag	Chillimoco	Don Diego	Tomás Frías
5	ESA - AIP (dique de Colas San Antonio)	DCSA	3860	Zn-Pb-Ag	San Antonio	Yocalla	Tomás Frías
6	C.M. Unificada (ex-IMSUR - Rocicler II)	Unificada	300	Zn-Pb-Ag	San Antonio	Yocalla	Tomás Frías
7	Empresa Minera Manquiri S.A.	San Bartolome	8200	Ag	Apacheta	Potosí	Tomás Frías
8	Casa Blanca	Casa Blanca	200	Zn-Pb-Ag	Villacollo	Potosí	Tomás Frías
9	CMV - Tupiza	CMV	50	Zn-Pb-Ag	Torre Huayco	Tupiza	Sud Chichas
10	Cooperativa Minera Porco	Ingenio Porco	100	Zn-Pb-Ag	Porco	Porco	Quijarro
11	E.M.Copacabana de Esmoraca	Copacabana	100	W	Esmoraca	Tupiza	Sud Chichas
12	Andacaba	Andacaba	750	Zn-Pb-Ag-Sn	CuchuIngenio	Cuchu Ingenio	Linares
13	Cooperativa Minera Siete Suyos	Santa Ana	50	Pb-Ag	Santa Ana	Atocha	Sud Chichas
14	Cooperativa Minera Locatarios	Tasna	200	Bi-w-Sn	Buen Retiro	Atocha	Sud Chichas
15	E.M. SILVER & TIN	Santiago Apostol	40	Ag-Sn	Canutillos	Tacobamba	Cornelio Saavedra
16	Diques Laguna Pampa I	DCLP-I	3860	Zn-Pb-Ag	San Antonio	Yocalla	Tomás Frías
17	Diques Laguna Pampa II	DCLP-II	3860	Zn-Pb-Ag	San Antonio	Yocalla	Tomás Frías
18	Cooperativa Minera Chorolque	Fierro Unu	70	Sn	Santa Bárbara	Atocha	Nor Chichas
19	Porco - Sinchi Wayra	Dique D	1200	Zn-Pb-Ag	Porco	Porco	Quijarro
20	E.M. Segovia	Segovia	50	Zn-Pb-Ag	Vicuñiitayoc	Tupiza	Sud Chichas

Tabla 2.2. Inventario de diques de colas en la Alta Cuenca del río Pilcomayo

A. Menéndez et al.



N°	EMPRESA	INGENIO	TPD	MINERAL	LOCALIDAD	MUNICIPIO	PROVINCIA
21	E.M. Santa Lucia	Santa Lucia	300	Zn-Pb-Ag	Agua Dulce	Yocalla	Tomás Frías
22	E.M. Corazón de Plata	Corazón de Plata	100	Zn-Pb-Ag	Agua Dulce	Yocalla	Tomás Frías
23	Chocaya Animas	Palca Chocaya	40	Zn-Ag	Palca	Atocha	Sud Chichas
24	E.M. Villegas	Villegas	40	Pb-Ag	Tolamayu	Atocha	Sud Chichas
25	COMINESA (Mina Churquini)	Kunkani	70	Zn-Pb-Ag	Churquini	Atocha	Sud Chichas
26	COMINESA	Abaroa	50	Zn-Pb-Ag	Abaroa	Tupiza	Sud Chichas
27	COMINESA	Ñoquis	60	Zn-Pb-Ag	Ñoquis	Tupiza	Sud Chichas
28	COMINESA (Mina Candelaria)	Copacabana	50	Sb	Candelaria	Tupiza	Sud Chichas
29	Minera Cayalu S.R.L.	Cayalu	100	Zn-Pb-Ag	Alcotambo	Potosí	Tomás Frías
30	Cooperativa Minera COMPOTOSI	COMPOTOSI	100	Zn-Pb-Ag	Alcotambo	Potosí	Tomás Frías
31	Empresa Minera La Estrella	La Estrella	1000	Zn-Pb-Ag	Mojon Pampa	Potosí	Tomás Frías
32	FEDECOMIN	Fedecomin	50	Zn-Pb-Ag	Agua Dulce	Yocalla	Tomás Frías
33	KZ Minerals S.A.	KZM	200	Zn-Pb-Ag	Agua Dulce	Yocalla	Tomás Frías
34	Cooperativa Minera 10 DE NOVIEMBRE	10 de Noviembre	100	Zn-Pb-Ag	Villacollo	Potosí	Tomás Frías
35	Empresa Minera zabaleta	Zabaleta	50	Zn-Pb-Ag	Villacollo	Potosí	Tomás Frías
36	Empresa Minera MINTEX	Mintex	100	Zn-Pb-Ag	Alcotambo	Potosí	Tomás Frías
37	Empresa Minera Tata San Miguel	Tata San Miguel	300	Zn-Pb-Ag	Alcotambo	Potosí	Tomás Frías
38	Empresa Minera Bombori	Bombori	200	Zn-Pb-Ag	Alcotambo	Potosí	Tomás Frías
39	E.M. CAYVE	Carrasco Veizaga	80	Zn-Pb-Ag	Alcotambo	Potosí	Tomás Frías
40	Villa Imperial	Villa Imperial	70	Zn-Pb-Ag	Alcotambo	Potosí	Tomás Frías
41	E.M. Taboada	Ingenio	100	Zn-Pb-Ag	Apacheta	Potosí	Tomás Frías
42	Empresa Minera Reserva (ex- Tuntoco)	Reserva	200	Zn-Pb-Ag	Cuchu Ingenio	Cuchu Ingenio	Tomás Frías
43	Centro Minero Apacani	La Esquina	100	Zn-Pb-Ag	La Esquina	Potosí	Tomás Frías
44	Empresa Minera 7 Amigos	Proyecto Bolivar	100	Zn-Pb-Ag	Cachi Tambo	Potosí	Tomás Frías
45	Jungie Mining Industry SRL	Ingenio	100	Zn-Pb-Ag	Agua Dulce	Yocalla	Tomás Frías

La Figura 2.10a indica la ubicación de estos 45 diques, superpuesta sobre el Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno, construido en base a datos satelitales (SRTM v4.1, *Shuttle Radar Topographic Mission*). Se observa que se distribuyen en dos grupos: uno hacia el norte (en los alrededores de Potosí), más compacto y otro hacia el sur, más disperso, cuyas vistas se amplían en las Figuras 2.10b y 2.10c, respectivamente.

De la Tabla 2.2 surge el ranking de 9 diques con capacidad de recepción no menor a 750 TPD (el siguiente en el ranking cae a no más de 300 TPD), la cual se presenta en la Tabla 2.3. Sus ubicaciones se indican en la Figura 2.11. Este conjunto de diques representa el de mayor riesgo en cuanto a volumen potencial de derrame.





a) General



b) Grupo Norte









Orden	Dique	TPD
1º	Manquiri	8200
2º	San Antonio	3860
3º	Laguna Pampa I	3860
<b>4</b> ⁰	Laguna Pampa II	3860
5º	Porco - Sinchi Wayra	1200
6º	Huari Huari (Sinchiwayra)	1000
<b>7</b> ⁰	La Estrella	1000
8º	Pan American Silver (San Vicente)	750
<u>9</u> º	Andacaba	750

Tabla 2.3. Ranking de diques de colas de mayor capacidad de recepción





Figura 2.11. Ubicación de diques de colas de mayor capacidad de recepción

Ahora bien, de acuerdo a Orozco Collazos (2013) los diques de Manquiri (1º), Porco-Sinchi Wayra (4º), Huari Huari (6º) y Pan American Silver (8º) están bien construidos y son administrados con un control estricto, de modo que su riesgo de falla es relativamente bajo. En consecuencia, se los excluyó de la lista de alto riesgo relativo, y esa lista se complementó con diques de colas de menor capacidad, pero de mayor riesgo de falla, quedando entonces la presentada en la Tabla 2.4 (Orozco Collazos 2013). En la Figura 2.12 se muestra, a título ilustrativo, las filtraciones detectadas en el dique de Andacaba.



Orden	Dique	TPD		
1º	1º San Antonio			
2º	2º Laguna Pampa I			
3º	Laguna Pampa II	3860		
4º La Estrella		1000		
5º	5º Andacaba			
6º	Lambol-Choroma	200		
<b>7</b> ⁰	COMPOTOSI	100		
8º	Chocaya-Ánimas	40		

 Tabla 2.4. Ranking de diques de colas de mayor riesgo de falla



Figura 2.12. Filtraciones detectadas en el dique de Andacaba (Orozco Collazos 2013)



## 3 DESCRIPCIÓN DE EVENTOS DE FALLA

#### 3.1 Casos de referencia

Las fallas de los diques de Porco y de Santiago Apóstol, mencionadas en el capítulo anterior, fueron tomadas como casos de referencia para la cuenca del Pilcomayo. En relación a la primera, de una magnitud considerable, se dispuso de una descripción bastante detallada de sus consecuencias. Por su parte, la falla del dique Santiago Apóstol, aunque de mucha menor envergadura, se produjo durante el desarrollo de este estudio, y sus consecuencias fueron registradas durante una campaña efectuada ad-hoc por la CTN. Estos dos casos se describen en las secciones siguientes.

#### 3.2 Falla del dique de Porco

#### 3.2.1 Sistema de diques de Porco

Los diques de colas de Porco se encuentran próximos a la localidad del mismo nombre, a 4.100 m sobre el nivel del mar (Figura 3.1). Al momento de la falla, en 1996, estaban en funcionamiento dos diques. Posteriormente, en 1997, se construyó un tercer dique. Finalmente, en 1998 comenzó la construcción del dique de colas que actualmente está operando en esa zona. Las fechas de construcción y operación fueron obtenidas a partir de la observación de imágenes LANDSAT, tal como se muestra en la Figura 3.2, donde se observa la secuencia de diques desde 1996 hasta la actualidad.

Los diques operativos en 1996 se encontraban sobre la margen derecha de uno de los tributarios del Río Aguas de Castillas, el cual forma parte de la cuenca del Río Pilaya (Figura 3.3).





Figura 3.1. Ubicación de diques de colas de Porco



a) Diques 1 y 2, 12 de agosto de 1996





b) Dique 3, 3 de enero de 1997



*c)* Dique 3, 18 de octubre de 1997



*d)* Dique 4, 27 de marzo de 1998





e) Dique 4, 3 de setiembre de 1998



**f)** Dique 4, 4 de junio de 2000



**g)** Dique 4, 9 de enero de 2009





h) Dique 4, 10 de octubre de 2013





Figura 3.3. Hidrografía en la zona de los diques de Porco



En la Figura 3.4 se muestra una imagen actual con las ubicaciones relativas de los cuatro diques de Porco, donde se observa que los tres primeros ya están cerrados. Por su parte, la Figura 3.5 presenta ampliada la zona de los diques 1 y 2 en la situación actual.



Figura 3.4. Sistema de diques de colas de Porco.



Figura 3.5. Situación actual de los diques de colas 1 y 2, operativos en 1996.

A. Menéndez et al.



#### 3.2.2 Descripción de la falla

Según Macklin (1996), el 29 de agosto de 1996 se registró una descarga limitada por sobre el coronamiento del dique 2. Si bien esa época del año no corresponde a la temporada de lluvias, precipitaciones aisladas o el derretimiento de nieve pudieron haber contribuido al desborde del dique.

Días después, el 1 de septiembre de 1996, la contención superior de la presa cedió y 235.000 m<sup>3</sup> de colas fueron descargadas en el cauce seco del valle aguas abajo.

Del análisis de las imágenes LANDSAT se ha podido observar la descarga de colas ocurrida en esa fecha. En la Figura 3.6a, tomada el 12 de agosto de 1996, se identifican los dos diques en funcionamientos, mientras que en la Figura 3.6b, tomada 13 días después del accidente, se observan los dos diques y rastros de las colas desde el dique 2, que alcanzan la confluencia de la quebrada con el Río Aguas de Castilla.

Se estima que, si bien el 87% de la contaminación ocurrió en los primeros 50 km, la mayor parte se depositó en los primeros 2 km aguas abajo de la presa.



a) Antes de la falla del dique 2, 12 de agosto de 1996





b) Después de la falla del dique 2, 10 de setiembre de 1996

Figura 3.6. Imágenes LANDSAT antes y despues de la falla

#### 3.2.3 Contaminación

Entre octubre y noviembre de 1996 se realizó una campaña de toma de muestras de sedimentos a fin de determinar el alcance de la contaminación (Macklin 1996). Se tomaron muestras en las colas mineras de Porco y en los cursos aguas abajo (que aportan al río Pilaya), las cuales fueron analizadas para determinar el contenido de metales pesados. Como referencia, también se tomaron muestras en el río Pilcomayo aguas arriba de la confluencia con el Pilaya, donde la descarga de Porco no pudo haber llegado.

Los metales analizados fueron Plomo, Cadmio, Arsénico, Selenio, Cobre, Cromo, Cobalto, Níquel y Cinc. En la Tabla 3.1 y la Figura 3.7 se presentan las concentraciones en sedimento del cauce de Arsénico (As) y Plomo (Pb), que son las dos componentes que muestran tendencias más claras de decaimiento.

Sitio de muestro	As (mg/kg)	Pb(mg/kg)
Colas - Porco	2893	3393
Río Agua Castilla – 10km	2446	2411
Río Agua Castilla – 15km	1234	1335
Río Jatun Mayo – 60km	642	744
Río Tumusla – 130km	225	551
Río Pilaya – 200km	100	524
Río Pilcomayo – 350km	62	417

Tabla 2 1	Posultados	do compoño	octubro	1006	Arcónico	v Plomo	on sodimontos
1 avia 5. i .	Resultatios	ue campana	occubre	1990 -	AISEIIICO	y FIOIIIO	enseumentos





Figura 3.7. Concentración de As en sedimentos de cauce

En las Figuras 3.8 y 3.9 se vuelven a representar las concentraciones de As y Pb sobre el mapa de la cuenca. Allí también se indican las correspondientes a dos estaciones de muestreo sobre el río Pilcomayo, aguas abajo de Potosí, donde no hay influencia del vertido de Porco. Sin embargo, esas concentraciones son muy altas, indicando la influencia de descargas desde fuentes ubicadas en torno a Potosí.





Figura 3.8. Concentración de As en sedimentos de cauce



Figura 3.9. Concentración de Pb en sedimentos de cauce



#### 3.3 Falla del dique Santiago Apóstol

#### 3.3.1 Descripción general

El dique de colas Santiago Apóstol es operado por la Empresa Minera SILVER & TIN. Se encuentra en ubicado en la localidad de Canutillos, a 5 km de Colavi, en el Municipio Tacobamba de la provincia Cornelio Saavedra del Departamento Potosí, Bolivia. Es parte del Ingenio Minero-Metalúrgico de Canutillos, en donde además existen otros dos ingenios. En la Figura 3.9 se observa una panorámica del complejo, y a la derecha se ve el dique.



Figura 3.9. Panorámica del complejo Ingenio Minero-Metalúrgico de Canutillos

En lo referido a la hidrografía (Figura 3.10), a 120 m del pie del dique se encuentra el río Canutillos. Este confluye con el río Chivitas a 4,2 km aguas abajo, conformando el río Colavi, el cual aporta al río Tacomba luego de 13 km de recorrido, donde se encuentra la localidad de Tacobamba sobre margen izquierda. La longitud del cauce del río Tacomba desde ese punto hasta la confluencia con el río Pilcomayo es de 13 km. Entonces, el dique Santiago Apóstol se encuentra a 30k m aguas arriba de la desembocadura del río Tacobamba en el Pilcomayo.



Figura 3.10. Ubicación del Dique Santiago Apóstol



El Ingenio de Canutillos dispone de 3 molinos y flotadores bajo cubierta, donde se procesan 800 ton/mes (40 ton/día). Como reactivos se utilizan 24.212 kg/mes de Aeroflot, 3.708 km/mes de espumante, 6 kg/mes de Zantato Z11 y 10 ton/mes de cal viva (SDMT 2014).

El Ingenio Minero tiene un circuito cerrado para sus operaciones, que incluye un estanque de sedimentación y recuperación de aguas mediante un sistema de bombeo que reinyecta al Ingenio. Las colas provenientes del Ingenio Minero son depositadas en las presa de colas, la cual no cuenta con geomembrana ni en el vaso ni en el talud del dique de colas. Su capacidad de almacenamiento se encuentra al límite y el talud externo de la corona principal presenta erosión en surco y en cárcava por efecto de las lluvias (SDMT 2014).

A partir de imágenes satelitales es posible constatar el acelerado recrecimiento del dique en los últimos años (Figura 3.11). El recrecimiento se acentuó significativamente entre 2011 y 2013, cuando la longitud de coronamiento pasó de 45 a 71 m.



a) Agosto de 2009



b) Setiembre de 2011





**c)** Julio de 2013

Figura 3.11. Evolución del dique Santiago Apóstol

#### 3.3.2 Descripción cronológica de la falla

A las 5 horas del viernes 4 de julio de 2014 se detectó la falla <sup>1</sup> en el dique de colas Santiago Apóstol. En el informe SDMT (2014) la falla se describe como sifonamiento del dique, que dio lugar a la descarga de colas hacia aguas abajo.

El sábado 5 de julio pobladores de Tasapampa detectaron un cambio de coloración del río Pilcomayo. Tasapampa se encuentra ubicada sobre margen izquierda del río Pilcomayo, 45 km aguas abajo de la desembocadura del río Tacobamba (Figura 3.10).

El domingo 6 de julio, a las 9 hs, el aforador de la CTN en Viña Quemada detectó un cambio de coloración del río, describiendo el color como óxido de hierro (naranja-café), diferente de la coloración usual, (marrón). Progresivamente el color del río volvió a ser el normal, completándose esta reversión el lunes 6 de julio a las 15 horas.

Durante los días 11 y 12 de julio la SDMT (Secretaría de la Madre Tierra, Gobernación de Potosí) realizó una inspección, durante la cual constató trabajos de remediación, entre los que se incluían el taponamiento de la bóveda de la cachimba y la remoción de las colas derramadas en el río Colavi y Canutillos.

El 23 de julio la CTN realizó una inspección visual y tomó muestras de sedimentos en el dique y alrededores, tal como se describe más abajo.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> EL DEBER – 27/Julio/2014. http://www.eldeber.com.bo/Pais/el-descontrol-en-la-minera-contaminalas-aguas-del-ro-pilcomayo/140727005558
## 3.3.3 Descripción física de la falla

A partir del informe de la SDMT (2014), las publicaciones de la prensa y las observaciones del Ing. Orozco Collazos (experto en materia de diques de colas) se efectuó la reconstrucción de las causas de la falla, tal como se explica a continuación.

A partir de la observación en el sitio, se sabe que el conducto de drenaje está construido en roca (Figura 3.11). En la Figura 3.12a se presenta un corte longitudinal esquemático del dique, donde se identifican la cachimba, el conducto de descarga de colas (*spigot*), los sucesivos recrecimientos, el espejo de agua que tendría el dique al momento de la falla y las dimensiones estimadas a partir de la visita en campo. Previo a la falla, la carga de residuos mineros por sobre el inicio del conducto de drenaje era de aproximadamente 10 m (Figura 3.2a). La cachimba colapsó debido al peso del material depositado en el dique, lo cual devino en la posterior descarga de colas a través del conducto de drenaje, generándose un pozo conoidal con vértice en el inicio del conducto de drenaje (Figura 3.12b). El talud de la presa no falló. En la Figura 3.13 se tiene una vista completa del dique de colas y su falla.



Figura 3.11. Orificio de salida del conducto de drenaje al pie de presa







b. Corte esquemático del dique después de la falla

Figura 3.12. Corte esquemático del dique



Figura 3.13. Vista del pozo producido en el depósito de colas

Se estima que el volumen del pozo asciende a 4.200 m<sup>3</sup>. Además, el sobrenadante, constituido por agua y lodo con alto porcentaje de humedad, habría sido de 6.800 m<sup>3</sup>. Entonces, la descarga total desde el dique habría alcanzado 11.000 m<sup>3</sup>, con un porcentaje de agua del 60% (SDMT 2014).

## 3.3.4 Observaciones in situ

A pocos metros aguas arriba de la posición que tenía la cachimba se observó el pozo excavado para llevar a cabo el taponamiento del conducto y así detener descargas de colas remanentes (Figura 3.14).

La Figura 3.15 muestra una vista más cercana de la salida del conducto de descarga, donde se distingue lo que sería la altura inicial del dique, por sobre la cual luego se efectuó el recrecimiento.





Figura 3.14. Vista del pozo construido para obturar el conducto de drenaje



Figura 3.15. Vista cercana de la salida del conducto de descarga



Aguas abajo del dique se detectaron depósitos de barros de alta densidad hasta una distancia de 4 km. El espesor de estos lodos inmediatamente aguas abajo del dique pudo haber sido de hasta 1 m antes de las tareas de remediación. Además, se observaron marcas en las rocas a niveles superiores, que se asociaron a un flujo de lodos de baja densidad desplazándose como una onda de crecida a lo largo del río Colavi, la cual es la que seguramente llegó hasta el río Pilcomayo y generó los efectos de cambio de coloración mencionados más arriba.

En la Figura 3.16 se muestra el análisis de una sección sobre el río Canutillos. Las marcas de la crecida indicaron 0,30 m por sobre el nivel del río al momento de la inspección, que tenía entonces una profundidad de 0,10 m y 0,60 m/s de velocidad de la corriente (tener en cuenta la acentuada pendiente longitudinal del río Canutillos, de aproximadamente 13%, de acuerdo a lo que surge del MDE). A partir de la estimación del área máxima de escurrimiento de la crecida (Figura 3.16), se infirió un caudal pico de 0,5 m<sup>3</sup>/s.



Figura 3.16. Sección del río Colavi

## 3.3.5 Campaña de calidad del agua

Entre el 19 y el 24 de julio de 2014 se llevó a cabo una campaña extraordinaria de calidad de aguas por parte de la CTN. La campaña consistió en toma de muestras de agua y de sedimento, y en aforos de caudales líquidos en los puntos indicados en rojo en la Figura 3.17. La campaña fue realizada en un período de estiaje (el período de lluvias comprende de diciembre a mayo).





Figura 3.17. Puntos de muestreo de la campaña de calidad del agua

## Misión La Paz, 19 de julio

Misión La Paz se ubica aguas arriba del punto conocido como "Embocadura" (Figura 3.18). Constituye un punto de muestreo habitual, y se considera el último punto del río Pilcomayo en la cuenca baja donde se puede realizar un aforo de todo el río en una única sección. Las coordenadas son: 22°22'40,33" S, 62°31'7,05" O. En relación con el dique Santiago Apóstol, esta sección se encuentra a 660 km de distancia aguas abajo. En las Figura 3.19 se muestran fotografías con vistas hacia aguas arriba y aguas abajo.

El nivel del río se encontró bajo, consecuente con la condición de aguas bajas. Se tomaron muestras de agua en el tramo medio del puente y se analizaron algunos de los parámetros de calidad in situ a saber:

- Conductividad = 1138 µS/cm
- pH = 8,26
- Turbiedad = 576/589/593 NTU

La turbiedad alcanza valores más elevados que en la cuenca alta (ver más abajo), lo que indica un importante proceso de resuspensión de sedimentos depositados durante las crecidas.

Consultados los pobladores del lugar, estos no observaron cambios ni en la coloración ni en los niveles del río que se pudieran asociar al evento de falla.





Figura 3.18. Ubicación sección Misión La Paz



*Figura 3.19.* Vista desde el puente de Misión La Paz, hacia aguas arriba (izquierda) y hacia aguas abajo (derecha)

## Villamontes, 19 de julio

Villamontes es uno de los puntos de monitoreo en el inicio de la cuenca baja del Pilcomayo (Figura 3.20). Las coordenadas son: 21°15'31,7"S, 63°30'41,6"O. En relación con el dique Santiago Apóstol, esta sección se encuentra a 460 km de distancia, aguas abajo. En la Figura 3.21 se muestran fotografías con vistas hacia aguas arriba y aguas abajo.





Figura 3.20. Ubicación sección Villamontes



Figura 3.21. Vista desde la sección Villamontes, hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)

En este punto existe una estación permanente de aforo mediante molinete (Figura 3.22), dependiente del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI), en la que se llevó a cabo la medición del caudal líquido del río. De ellas surgió una velocidad media de 0,28 m/s y un caudal de 54,0 m<sup>3</sup>/s.





Figura 3.22. Sección de aforo en Villamontes

Aproximadamente a 800 m aguas arriba de la sección de aforo, sobre el puente Uztarez, se tomaron muestras de calidad de agua, que arrojaron los siguientes valores in situ:

- Conductividad = 1182 µS/cm
- pH = 8,66
- Turbiedad = 21,0/22,6/21,3 NTU

Se observa que los valores de conductividad y pH no varían sensiblemente respecto de lo registrado en Misión La Paz. Sin embargo, la turbiedad es menor (lo cual se pudo apreciar a simple vista en el lugar), lo que evidencia poco contenido de material en suspensión.

Tampoco en esta zona se registraron cambios notorios en la coloración o niveles del río, de acuerdo a los pobladores locales.

#### Puente Aruma, 20 de julio

Puente Aruma es un punto de monitoreo regular. Se ubica aguas arriba de Villamontes y aguas abajo de la confluencia del Pilcomayo con el río Pilaya (Figura 3.23). Las coordenadas son: 20°54'51.1"S, 64°6'40.0"O. En relación con el dique Santiago Apóstol, esta sección se encuentra a 360 km aguas abajo. En la Figura 3.24 se muestran fotografías con vistas hacia aguas arriba y aguas abajo.





Figura 3.23. Ubicación sección Puente Aruma







Figura 3.24. Vista desde Puente Aruma, hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)

Al igual que en Villamontes, se realizó la medición de caudal mediante molinete desde el puente (Figura 3.25). La velocidad media resultó de 0,50 m/s, mientras que el caudal fue de 51,3 m<sup>3</sup>/s.



Figura 3.25. Sección de aforo en Puente Aruma



En el tramo medio del cauce, sobre el Puente Aruma, se tomaron muestras de calidad de agua, que arrojaron los siguientes valores in situ:

- Conductividad = 1123 µS/cm
- pH = 8,70
- Turbiedad = 23,4/22,1/21,7 NTU

Nuevamente, los parámetros medidos in situ no difieren sustancialmente de las muestras de aguas abajo. La turbiedad se asemeja a la de Villamontes, lo que indica poco contenido de material en suspensión.

El aforador local consultado no constató cambios de coloración o niveles del río asociados al evento de falla. Cabe destacar que Puente Aruma se encuentra aguas abajo de la confluencia de los ríos Pilaya y Pilcomayo, lo cual significa un importante efecto de dilución de la eventual carga contaminante transportada por el Pilcomayo superior.

#### Viña Quemada, 22 de julio

Viña Quemada también es un punto de monitoreo frecuente (Figura 3.26). La escala hidrométrica se encuentra sobre margen derecha, aguas arriba del pueblo, en una sección de angostamiento del río. Las coordenadas son: 19°24'29,9" S 64°51'42,4" O. En relación con el dique Santiago Apóstol, esta sección se encuentra a 125 km de distancia, aguas abajo. En la Figura 3.27 se muestran fotografías con vistas hacia aguas arriba y aguas abajo.



Figura 3.26. Ubicación sección Viña Quemada





Figura 3.27. Vista desde la sección Viña Quemada, hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)

Se realizó la medición de caudal mediante molinete vadeando el río. La velocidad media resultó de 0,55 m/s, mientras que el caudal fue de 9,9 m<sup>3</sup>/s.

La sección de aforo se ubica aguas arriba de un punto con ligero aumento de pendiente. La menor pendiente en el tramo de aforo, y la sección de flujo mayor, facilitó la medición de caudal al menguar la velocidad. Esas velocidades más bajas provocan sedimentación de material fino en el cauce y las márgenes.



En el tramo medio del cauce se tomaron muestras de calidad de agua, que arrojaron los siguientes valores in situ:

- Conductividad = 1213 µS/cm
- pH = 8,72
- Turbiedad =43,7/41,9/44,1 NTU

Nuevamente, los parámetros medidos in situ no difieren sustancialmente de las muestras de las estaciones Villamontes y Puente Aruma, salvo que la turbiedad es algo más elevada.

En conversaciones con el aforador local, se tomó conocimiento que el domingo 6 de julio se observó un cambio de coloración del río, tornándose color óxido. Indicó además la presencia de sedimento en las márgenes con un color similar al del río. Se tomaron muestras de dicho sedimento, depositado en una capa de no más de 1 mm de espesor, en el que se apreció claramente la diferencia de coloración respecto del sedimento de margen subyacente, del cual también se tomó una muestra como "blanco" (Figura 3.28).



Figura 3.28. Toma de muestra de sedimento en margen izquierda, sección Viña Quemada

## Puente Méndez, 23 de julio

Puente Méndez es un punto regular de monitoreo ubicado próximo a la ciudad de Sucre. La sección donde se tomaron muestras y aforo se localiza 300 m aguas abajo del puente (Figura 3.29). Sus coordenadas son: 19°21'36,5"S 65°10'14,9"O. En relación con el dique Santiago Apóstol, esta sección se encuentra a 85 km de distancia, aguas abajo. En la Figura 3.30 se muestran fotografías con vistas hacia aguas arriba y aguas abajo.





Figura 3.29. Ubicación sección Puente Mendez







Figura 3.30. Vista desde Puente Mendez, hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)

Se realizó la medición de caudal mediante molinete vadeando el río. La velocidad media resultó de 0,57m/s, mientras que el caudal fue de 9,5 m<sup>3</sup>/s.

En el tramo medio del cauce se tomaron las muestras de calidad de agua, que arrojaron los siguientes valores in situ:

- Conductividad = 1185 µS/cm
- pH = 8,69
- Turbiedad =72,3/69,2/71,9 NTU

Nuevamente, la conductividad y el pH no difieren sustancialmente de las muestras de las tres estaciones anteriores, mientras que la turbiedad es levemente superior.

Como en Viña Quemada, en las márgenes se observaron depósitos de sedimentos color óxido, diferenciándose claramente respecto del color marrón del sedimento subyacente (Figura 3.31). Aquí también se tomaron muestras. En la Figura 3.32 se observa un perfil de sedimento extraído, donde se distingue claramente una capa de pocos milímetros de material superficial con coloración óxido, diferente a la del sedimento inferior.





Figura 3.31. Sedimentos depositados de color óxido en Puente Mendez



Figura 3.32. Perfil de sedimento de la margen en Puente Mendez

## Santiago Apóstol - Colavi, 24 de julio

Tal como se indicó más arriba, la descarga del dique Santiago Apóstol alcanza, a 120 m del pie de presa, el río Canutillos, el cual a esa altura ya ha recibido el aporte de otros ingenios mineros. Se realizaron aforos y medición de parámetros in situ en el rio Canutillos antes y después del aporte de la descarga del dique. En la Figura 3.33 se observa esa confluencia.



Figura 3.33. Vista de la confluencia entre la descarga del dique (rojo) y el río Canutillos (azul)

El aforo aguas arriba de la confluencia (Quebrada Canutillos) resultó de 2,1 l/s, siendo la velocidad media de 0,14 m/s. La característica del agua es ácida, con los siguientes valores de los parámetros:

- pH=2,93
- Conductividad = 1424 µS/cm

Aguas abajo de la confluencia el caudal fue de 3,7 l/s, y los parámetros de calidad dieron:

- pH=3,08
- Conductividad = 1579 µS/cm

Se observa que el pH y la conductividad se incrementan levemente luego de la confluencia.

La Figura 3.34 muestra una vista del dique de colas donde se destaca en punteado el contorno del pozo formado por la descarga de colas debido a la falla.



Figura 3.34. Vista del dique Santiago Apóstol



Al pie del dique se pudieron observar las colas descargadas (Figura 3.35). Se logra diferenciar entre marcas de un barro espeso, con capacidad limitada de progreso ("lengua" de barros sobre margen izquierda), y una mezcla más fluida que, durante su paso por la caída que muestra ese valle, provocó salpicaduras sobre la ladera de margen derecha.



Figura 3.35. Vista de colas derramadas al pie del dique

En la Figura 3.36 se aprecian depósitos de colas secos, cuyos espesores fueron variables entre 5 y 50 cm (este último en la zona de caída).

Se tomaron muestras de sedimento de las colas al pie de presa y sobre el río Canutillos, en los puntos indicados en la Figura 3.37. La toma de muestra COL 1 se efectuó aguas abajo del dique (Figura 3.38), antes de la descarga al río Canutillos. Nótese que los barros tenían una fuerte alteración debido a los trabajos de remoción que se habían llevado a cabo en días previos. De la misma figura se infiere que los barros pudieron haber alcanzado hasta 1 m de espesor, expandiéndose lateralmente hasta 5 m. Las muestras COL 4/5 fueron tomadas a 3,58 km aguas abajo del dique. Allí se encontró material removido del cauce y apilado en las márgenes (Figura 3.39), lo que indica que hasta allí llegaron los barros más densos. Aguas abajo del punto de muestreo COL 4/5 los sedimentos encontrados en las márgenes eran de un espesor menor a los 2 cm, y se encontraban en su mayoría secos. En la Figura 3.40 se observa el punto de extracción de la muestra COL 2.





Figura 3.36. Vistas de colas secas





Figura 3.37. Ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos cerca del dique



Figura 3.38. Vista de colas sobre el río Canutillos





Figura 3.39. Toma de la muestra de sedimento de colas COL 5



Figura 3.40. Toma de la muestra de sedimento de colas COL 2



## Síntesis

La Tabla 3.2 presenta el resumen de los datos medidos in-situ. Se observa que la conductividad y el pH permanecen relativamente uniformes. Por su parte, la turbiedad muestra una tendencia decreciente desde Puente Mendez hacia aguas abajo, indicando sedimentación, y luego un fuerte incremento en Misión La Paz, el cual se adjudica a la resuspensión de material previamente depositado.

	Misión La Paz	Villamontes	Puente Aruma	Viña Quemada	Puente Mendez
Conductividad (µS/cm)	1138	1182	1123	1213	1185
Turbiedad (NTU)	589	22,6	22,1	41,9	69,2
рН	8,26	8,66	8,7	8,72	8,68
Caudal (m3/s)	43 <sup>2</sup>	54	51	9,9	9,5
Velocidad (m/s)	0,786 <sup>2</sup>	0,28	0,5	0,55	0,57

En la Tabla 3.3 se muestran aforos efectuados por la CTN en épocas similares de años anteriores para las estaciones mostradas en la Figura 3.41. Comparando con los caudales medidos en la campaña de calidad de la CTN (Tabla 3.2), se observa que estos resultan compatibles con los históricos. Utilizando los valores medios históricos de caudal mostrados en la Tabla 3.3 surge que:

- El tramo Puente Aruma Villamontes (98 km) presenta un aporte en ruta del orden de 15 m<sup>3</sup>/s.
- En la confluencia entre el río Pilaya y el Pilcomayo, cada uno aporta aproximadamente el 50% del caudal.
- Entra Viña Quemada y la confluencia el aporte en ruta es del orden de 20 m<sup>3</sup>/s.
- El caudal aumenta entre entre 5 y 6 veces Viña Quemada y Villamontes, lo cual produce una gran dilución en la concentración de sedimentos suspendidos.

A. Menéndez et al.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Datos obtenidos de la CTN (<u>www.pilcomayo.net</u>). Las mediciones fueron realizadas el 20 de julio de 2014, un día después del muestro de calidad de agua.

Villamontes		Puente Aruma		Viña Quemada		San Josecito	
Fecha	Caudal [m³/s]	Fecha	Caudal [m³/s]	Fecha	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Fecha	Caudal [m <sup>3</sup> /s]
20-Jul-1976	43	-	-	-	-	-	-
22-Jul-1977	37	-	-	-	-	-	-
20-Jul-1978	48	-	-	-	-	-	-
21-Jul-1979	75	-	-	-	-	-	-
24-Jul-1980	49	-	-	-	-	-	-
20-Jul-1981	59	-	-	-	-	-	-
21-Jul-1982	60	-	-	-	-	-	-
19-Jul-1983	43	-	-	-	-	-	-
20-Jul-1984	65	-	-	-	-	-	-
18-Jul-1985	72	-	-	-	-	-	-
01-Aug-1989	27	-	-	-	-	-	-
22-Jul-1990	39	-	-	-	-	-	-
02-Aug-1996	33	-	-	-	-	-	-
20-Jul-2004	32	-	-	-	-	-	-
20-Jul-2005	35	-	-	-	-	-	-
23-Jul-2006	34	-	-	19-Jul-2006	5	-	-
25-Jul-2007	40	-	-	21-Jul-2007	5	-	-
02-Aug-2009	44	01-Aug-2009	44	21-Jul-2010	9	-	-
06-Aug-2010	50	02-Aug-2010	16	20-Jul-2012	11	02-Aug-2010	14
19-Jul-2012	35	17-Jul-2012	26	30-Jul-2012	9	17-Jul-2012	16
25-Jul-2013	47	30-Jul-2013	39	-	-	30-Jul-2013	20
Mínimo	27	Mínimo	16	Mínimo	5	Mínimo	14
Medio	46	Medio	31	Medio	8	Medio	17
Máximo	75	Máximo	44	Máximo	11	Máximo	20
Medido en campañ	53,98	Medido en campaña	51.23	Medido en campaña	9.86	Medido en campaña	-

Tabla 3.3. Caudales aforados en aguas bajas alrededor del 20 de julio



Figura 3.41. Ubicación de estaciones de aforo



Las Tablas 3.4 y 3.5 indican los valores de parámetros de calidad medidos in situ para las campañas de los dos años anteriores, también en situación de estiaje. Comparando con los valores medidos en la campaña de calidad de la CTN (Tabla 3.2), se observa que los valores de conductividad y pH y son compatibles. En cambio los de turbidez son significativamente superiores desde Puerto Mendez a Villamontes para los dos años anteriores, lo cual se asocia a que, en ambos casos, previamente se habían registrado crecidas, con lo cual se estaba produciendo un proceso de resuspensión de los sedimentos depositados.

	Misión La Paz	Villamontes	Puente Aruma	Viña Quemada	Puente Mendez
Conductividad (µS/cm)	1359	1341	1356	-	1565
Turbiedad (NTU)	573	676	>1100	-	>1100
рН	8,26	8,24	8,08	-	7,75

Tabla 3.4. Mediciones in-situ octubre 2013

Tabla 25	Modicionos	in_citu	octubro	/noviembre	2012
i apia 3.3.	weaktones	ทา-รแน	occubre	noviembre	2012

	Misión La Paz	Villamontes	Puente Aruma	Viña Quemada	Puente Mendez
Conductividad (µS/cm)	1637	1275	960	-	700
Turbiedad (NTU)	329	989	>1100	-	>1100
рН	8,37	8,23	8,24	-	8,10

Estos datos serán complementados en el siguiente Informe con los correspondiente a las concentraciones de contaminantes en sedimento, aún no disponibles.

## 3.3.6 Interpretación

A partir de la información presentada surge la siguiente interpretación en relación al evento de falla del dique Santiago Apóstol:

- La falla del dique Santiago Apóstol se debió al colapso de la cachimba, posiblemente debido al peso de las colas y las características constructivas precarias de la misma.
- El volumen de descargado se estimó en 11.000 m<sup>3</sup>, con un contenido de agua del 60%.
- En los rastros de la descarga de las colas se diferencian dos fases. La primera, más densa, avanzó 3,6 km aguas abajo del dique y quedó depositada en el cauce, hasta su remoción por tareas de remediación. La segunda fase, más líquida, se desplazó como una onda incluso a lo largo del río Pilcomayo, alcanzando al menos hasta la



localidad de Viña Quemada. Esto será corroborado cuando se disponga de los resultados del análisis de las muestra de sedimento tomadas durante la campaña.

- El pico de crecida de la descarga líquida pudo haber alcanzado los 0,5 m<sup>3</sup>/s al pie del dique.
- El aporte de caudal en ruta al río Pilcomayo, y en particular el del río Pilaya, es lo suficientemente importante como para haber diluido la onda contaminante de barros líquidos.



# 4 MODELACIÓN DEL FENÓMENO

## 4.1 Planteo del problema

En base al análisis del evento de falla del dique Santiago Apóstol, descripto en el capítulo anterior, se ha planteado el siguiente modelo conceptual del problema:

- La falla de un dique de colas provoca la descarga relativamente brusca de una parte del barro depositado, el cual se desplaza como un flujo hiperconcentrado (ver más abajo), generando una lengua de barro (Figura 4.1) cuya extensión depende primariamente del volumen descargado.
- Dado que sobre el depósito de barro se asienta un sobrenadante, constituido por agua y barro de baja densidad, la falla produce también su descarga brusca, generando una "onda de contaminación" que se adelanta a la lengua de barro, logrando desplazarse hacia aguas abajo con la corriente de agua, mientras se atenúa.



Figura 4.1. Ilustración de lengua de barro

## 4.2 Modelo teórico

Los flujos con concentraciones muy altas de sedimentos se denominan hiperconcentrados. En realidad, hay una transición continua entre la física del agua y la del sedimento, cuyo rango va desde el flujo de agua clara (fluido newtoniano) hasta los deslizamientos de tierra, pasando por los flujos hiperconcentrados (O'Brien 2004). Las propiedades de un flujo hiperconcentrado cambian con la concentración de sedimento, por lo que lo que la mezcla se comporta como un fluido no-homogéneo y no-Newtoniano, cuyas propiedades cambian a



lo largo del tiempo a medida que se desplaza hacia aguas abajo.

La concentración de sedimentos es el principal parámetro que define el comportamiento de un flujo hiperconcentrado. Esta concentración se expresa habitualmente en términos de volumen,  $C_{\nu}$ , que se define como el volumen de sedimento presente relativo al volumen total (líquido más sedimento). A partir de los valores de este factor pueden clasificarse los distintos tipos de flujo (NRC 1982):

- Flujo de agua (*water flow*), con  $C_v < 0.20$
- Inundación de barro (*mud flood*), con 0,20 <  $C_v$  < 0,45
- Flujo de barro (*mud flow*), con 0,45 <  $C_v$  < 0,55
- Deslizamiento de tierra (*landslide*), con 0,55 <  $C_v$  < 0,85

En la Figura 3.1 se identifican estos tipos para distintos valores de la concentración volumétrica ( $C_v$ ) y concentración másica ( $C_w$ ). Los flujos hiperconcentrados comprenden las categorías inundación de barro y flujo de barro.



Figura 4.1. Clasificación de flujos de barro de acuerdo a la concentración de sedimentos

En los flujos hiperconcentrados existen interacciones complejas entre los procesos propios de cada fase, incluyendo la turbulencia, las tensiones viscosas, el intercambio de cantidad de movimiento entre fluido y partículas, la colisión entre partículas sólidas y las tensiones de cohesión en el sedimento (O'Brien 2004). Se distinguen, entonces, 5 componentes de la tensión de corte:

- Tensión de cesión cohesiva
- Tensión de corte de Mohr-Coulomb (que depende de la presión intergranular y el ángulo de reposo)
- o Tensión de corte viscosa



- Tensión de corte turbulenta
- Tensión de corte dispersiva (que depende del tamaño de grano y la longitud de mezcla)

Estas tensiones pueden representarse mediante un modelo reológico cuadrático (O'Brien & Julien 1985), el cual incluye tres términos aditivos:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy}\right) + C \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$$

donde  $\tau_y$  es la tensión de cesión (yield stress), que debe superarse antes de que pueda iniciarse la deformación ó el flujo, e incluye las tensiones de cesión cohesiva y de corte de Mohr-Coulomb;  $\eta$  es la viscosidad dinámica (asociada a la tensión de corte viscosa); y *C* es el coeficiente de tensión de corte inercial, que parametriza a las tensiones de corte turbulenta y dispersiva. La tensión de cesión y la viscosidad dinámica se calculan a partir de ecuaciones potenciales, con dos exponentes que son función de la concentración de sedimentos, para los cuales existe una lista de valores recomendados (O'Brien & Julien 1988):

$$\eta = \propto_1 e^{\beta_1 C_v}$$
$$\tau_v = \propto_2 e^{\beta_2 C_v}$$

Los dos primeros términos del modelo reológico se refieren como tensiones de corte de Bingham, y definen el comportamiento de un flujo de barros cohesivos en un régimen de flujo viscoso. El último término define un régimen de flujo inercial para un flujo de barros. En la Figura 4.2 se esquematiza el comportamiento del fluido de acuerdo a distintas leyes de relación entre la tensión de corte y la tasa de deformación.



Figura 4.2. Modelos de deformación de fluidos (tensión de corte versus tasa de deformación)



## 4.3 Software

Para la simulación del problema se utiliza el software FLO-2D (http://www.flo-2d.com/).

FLO-2D contiene un modelo de traslado de ondas de crecida que simula numéricamente flujo en canales, escorrentía superficial no confinada y flujo en calles sobre una topografía compleja en base a un análisis bidimensional (en planta) del problema, combinado eventualmente con un tratamiento unidimensional para el flujo confinado. Incluye modelación hidrológica (transformación lluvia-caudal), transporte de sedimentos, representación de obstrucciones (terraplenes, edificios) y de estructuras hidráulicas (puentes, alcantarillas, conductos de drenaje), flujos hiperconcentrados y flujo de agua subterránea. Puede simular flujos resultantes de la formación de brechas en presas.

Para el seguimiento de flujos hiperconcentrados, FLO-2D utiliza el modelo reológico cuadrático de O'Brien & Julien (1985). El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad tanto para la fase líquida como para la fase sólida (sedimentos). Para cada paso de tiempo y elemento de la malla, el modelo realiza un control de los flujos de agua y sedimentos entrantes y salientes, y calcula los volúmenes remanentes de ambas fases y la concentración resultante. A partir de esta concentración se calculan los parámetros viscosos para resolver la ecuación de cantidad de movimiento en el paso de tiempo siguiente (FLO-2D 2009).

## 4.4 Ensayos preliminares

La puesta en marcha del modelo FLO-2D para el problema particular de falla de un dique de colas no es una tarea sencilla debido a dos causas: en primer lugar, la complejidad del problema; en segundo lugar, las propias limitaciones del software, que todavía se halla en un estado de desarrollo relativamente incipiente en la temática de flujos hiperconcentrados, siendo su operación poco transparente y presentando algunos errores de implementación (*bugs*).

Se efectuaron variados ensayos para determinar los alcances del software, entender su alimentación, y extraer e interpretar los resultados útiles. Por otro lado, se analizaron distintas metodologías de simulación para representar parcialmente este problema específico. El software no permite especificar una condición inicial con el embalse lleno de mezcla (sí es posible con agua pura). Entonces, se la intentó generar efectuando su llenado mediante la especificación de un hidrograma de caudal de barros, pero se obtuvieron resultados insatisfactorios porque se registraban pérdidas de volumen (lo cual se adjudica también a limitaciones del software). Se decidió entonces recurrir a la estrategia de generar externamente un hidrograma al pie de la presa representativo de la descarga por falla, para ser utilizado como condición de borde en un problema de traslado de la onda. Se comenzó a simular ese traslado sobre una malla bidimensional de altitudes, tratando de representar sobre ella los cauces principales, pero esto condujo a inestabilidades en la respuesta. Entonces, se recurrió a la utilización de la técnica de representar el cauce principal como un canal unidimensional (1D) dentro del dominio bidimensional (2D).

Entonces, la estrategia de modelación seleccionada, al menos preliminarmente, es la siguiente:

- Establecimiento del hidrograma de caudal al pie de presa, asociado a su falla.
- Traslado del hidrograma hacia aguas abajo, incluyendo un modelo 1D.



Se tomó como problema base la falla del dique de Porco, descripta en el capítulo anterior. En esta etapa se representó un tramo de sólo 23 km. Se construyó el Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno utilizando la base de datos ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), que provee altitudes sobre una grilla de aproximadamente 30 m de paso. El mismo paso se utilizó para la construcción de la grilla cuadrangular del modelo bidimensional. En la Figura 4.3 se muestra el dominio de cálculo preliminar sobre el MDE, donde también se indica la grilla de discretización.



Figura 4.3. Dominio de cálculo

Los cauces principales se representaron mediante un modelo unidimensional integrado al bidimensional, especificándose secciones transversales inferidas con formas simplificadas de 30 m de ancho y una longitud total aproximada del modelo de 22 kilómetros (los resultados son relativamente poco sensibles a esta esquematización, en la medida en que se garantice un corredor para el flujo). La celda de ingreso del hidrograma se encuentra a una altura de 4.012 msnm y la de salida del modelo a 3.600 msnm, dando una pendiente media de 1,9%.

La falla de la presa se representa a través de un hidrograma para el caudal de la mezcla a la salida. Este se esquematizó de modo de incluir los dos fenómenos identificados en la sección 4.1, a saber:

- Un pulso inicial de agua y sedimentos en suspensión.
- Un segundo pulso de flujo crecientemente hiperconcentrado.

La Figura 4.4a presenta el hidrograma propuesto para la mezcla, junto con la fracción de caudal sólido, mientras que la Figura 4.4b muestra la concentración de la mezcla (en volumen) y su altura (ésta última es un resultado del modelo). Se observa que los pulsos comienzan con caudales puramente líquidos. El primero culmina con una concentración de 0,15, que lo categoriza como sedimento transportado en suspensión, mientras que el segundo alcanza una concentración de 0,50, asociada a flujo hiperconcentrado. El caudal sólido integrado da un volumen de sólidos cercano a los 235.000 m<sup>3</sup> informados.

Para los parámetros reológicos se tomaron, preliminarmente, valores informados en la literatura (O'Brien 2004):  $\alpha_1 = 0,00172$ ;  $\beta_1 = 29,5$ ;  $\alpha_2 = 0,000602$ ;  $\beta_2 = 33,1$ .





b) Altura y concentración

Figura 4.4. Series temporales al pie de la presa





En la Figura 4.5 se presentan los resultados para las series temporales de caudal y velocidad de flujo de la mezcla en distintas estaciones aguas abajo de la presa. Se observa la difusión de los dos pulsos de caudal, que es más rápida para el segundo por su mayor viscosidad. La velocidad pico de flujo también tiene una tendencia a la atenuación hacia aguas abajo, aunque se producen amplificaciones locales en zonas de sección contraída. Las oscilaciones son el resultado de la fuerte variabilidad del nivel del fondo.



**a)** x = 500 m

Figura 4.5 (Continúa). Hidrograma y velocidades de flujo de la mezcla en distintas estaciones





**c)** x = 10.000 m

Figura 4.5 (Continúa). Hidrograma y velocidades de flujo de la mezcla en distintas estaciones





**e)** x = 20.000 m

Figura 4.5. Hidrograma y velocidades de flujo de la mezcla en distintas estaciones



La Figura 4.6 muestra los resultados para las series temporales de altura y concentración de la mezcla en las mismas estaciones. Se observa que ambos pulsos tienden a hacerse más líquidos (menor concentración de sólidos) hacia aguas abajo. También se nota una subdivisión en dos de cada pulso (lo cual se adjudica a la no linealidad del problema), combinándose luego el segundo sub-pulso del primer pulso con el primer sub-pulso del segundo pulso (nótese que este fenómeno tiene también su réplica en el caudal y la velocidad, Figura 4.5, sólo que es algo menos aparente por la tendencia general a la atenuación). La altura de los pulsos disminuye hacia aguas abajo, en forma más significativa para el primer pulso. La altura no disminuye a cero a tiempos largos, indicando que permanece una altura final de barro estanco (lengua de barro), lo cual acuerda con lo observado.



**a)** x = 500 m

Figura 4.6 (Continúa). Altura y concentración de la mezcla en distintas estaciones





**c)** x = 10.000 m

Figura 4.6 (Continúa). Altura y concentración de la mezcla en distintas estaciones




**e)** x = 20.000 m

Figura 4.6. Altura y concentración de la mezcla en distintas estaciones



La Figura 4.7 muestra la secuencia en planta de la evolución del flujo, caracterizado en base a su concentración de sólidos. Se observa el relativamente rápido desplazamiento del pulso inicial, y luego el establecimiento de la lengua de barro.





Figura 4.7 (Continúa). Secuencia de evolución del flujo









Figura 4.7 (Continúa). Secuencia de evolución del flujo









Figura 4.7 (Continúa). Secuencia de evolución del flujo









Figura 4.7 (Continúa). Secuencia de evolución del flujo





Figura 4.7. Secuencia de evolución del flujo

Las distribuciones espaciales finales de altura (luego de un filtrado para evitar el ruido impuesto por los saltos bruscos de nivel de fondo) y concentración de la mezcla se presentan en la Figura 4.8. Se observa que la altura está fuertemente influenciada por las condiciones locales, aunque se observa una tendencia hacia el decrecimiento en el último tramo. Por su parte, la concentración muestra una clara tendencia decreciente, indicando que los barros más densos permanecen en la zona de cabecera.





Figura 4.8. Altura y concentración final de la mezcla

En la próxima etapa de los estudios se procederá a una modelación detallada de este evento, incluyendo su validación en base a los datos existentes.



## 5 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones de esta etapa de estudios:

- La tasa de fallas de diques de colas sobre los últimos 100 años es de 1,2%, dos órdenes de magnitud mayor que la correspondiente a presas convencionales de retención de agua. Los casos de falla de diques de colas tuvieron su pico en alrededor de 50 eventos por década desde los 1960's hasta los 1980's, pero han caído a alrededor de 20 eventos por década sobre los últimos 20 años. Recientemente, los picos de frecuencia de esos incidentes se han desplazado geográficamente desde países desarrollados a países en desarrollo. Las causas principales de fallas son "Iluvia inusual" y "manejo deficiente". Las fallas ocurren predominantemente en presas de tamaño "pequeño a mediano", de hasta 30 m de altura, y conteniendo volúmenes de colas máximos de 5 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Luego de la falla, el volumen de colas liberado generalmente alcanza alrededor de 1/5 del contenido dentro del reservorio. En el caso de "fallas intermedias" es posible manejar la contaminación ambiental y los daños a la infraestructura. Los casos de derrames catastróficos tienen asociado pérdida de vidas y cuestiones de salud pública.
- Existen antecedentes de incidentes de falla en la Alta Cuenca del Pilcomayo: el 29 de agosto de 1996 se produjo un desastre de gran envergadura ante la falla del dique de Porco; el 2 de agosto de 2000 se produjo un derrame desde el dique de Itos por la perforación de una membrana; el 4 de julio de 2014 tuvo lugar un incidente de falla del dique de Santiago Apóstol.
- Por la falla del dique de Porco se descargaron 235.000 m<sup>3</sup> de colas. Se estima que, si bien el 87% de la contaminación ocurrió en los primeros 50 km, la mayor parte se depositó en los primeros 2 km aguas abajo de la presa. Se tomaron muestras en las colas mineras de Porco y en los cursos de aguas abajo, las cuales fueron analizadas para determinar el contenido de metales pesados.
- Por la falla del dique Santiago Apóstol se derramaron 4.200 m<sup>3</sup> de colas, además de 6.800 m<sup>3</sup> de sobrenadante, constituido por agua y lodo con alto porcentaje de humedad. Se detectaron cambios de coloración del río Pilcomayo en Tasapampa el 5 de julio y en Viña Quemada el 6 de julio. Aguas abajo del dique se observaron depósitos de barros de alta densidad hasta una distancia de 4 km. El espesor de estos lodos inmediatamente aguas abajo del dique pudo haber sido de hasta 1 m antes de las tareas de remediación. Además, se observaron marcas en las rocas a niveles superiores, que se asociaron a un flujo de lodos de baja densidad desplazándose como una onda de crecida a lo largo del río Colavi, la cual es la que seguramente llegó hasta el río Pilcomayo y generó los mencionados efectos de cambio de coloración.



- Al momento de producirse este Informe, no se disponía aún de los resultados de los análisis de las muestras de sedimento tomadas durante la campaña de la CTN.
- Se han identificado 45 diques de colas en la Alta Cuenca del río Pilcomayo. De ellos, se han seleccionado preliminarmente 8 como los de mayor riesgo relativo.
- Se ha planteado el siguiente modelo conceptual del problema: (i) la falla de un dique de colas provoca la descarga relativamente brusca de una parte del barro depositado, el cual se desplaza como un flujo hiperconcentrado, generando una lengua de barro cuya extensión depende primariamente del volumen descargado; (ii) dado que sobre el depósito de barro se asienta un sobrenadante, constituido por agua y barro de baja densidad, la falla produce también su descarga brusca, generando una "onda de contaminación" que se adelanta a la lengua de barro, logrando desplazarse hacia aguas abajo con la corriente de agua, mientras se atenúa.
- Se efectuó una modelación preliminar de la falla del dique de Porco, sobre un tramo de 23 km. La falla de la presa se representó a través de un hidrograma para el caudal de la mezcla a la salida, esquematizado del siguiente modo: (i) un pulso inicial de agua y sedimentos en suspensión; (ii) un segundo pulso de flujo crecientemente hiperconcentrado. Se observó que: (a) los dos pulsos de caudal se difunden, algo más rápidamente el segundo por su mayor viscosidad; (b) la altura de los pulsos disminuye hacia aguas abajo, en forma más significativa para el primer pulso; (c) la altura no disminuye a cero a tiempos largos, indicando que permanece una altura final de barro estanco (lengua de barro), lo cual acuerda con lo observado; (d) la concentración muestra una clara tendencia decreciente hacia aguas abajo, indicando que los barros más densos permanecen en la zona de cabecera. En la próxima etapa de los estudios se procederá a una modelación detallada de este evento, incluyendo su validación en base a los datos existentes

## REFERENCIAS

Azam, Sahidand, Li, Qiren, 2010. "Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years", Geotechnical News, December.

FLO-2D, 2009. "FLO-2D Reference Manual".

Macklin M. G., et al, 1996. "Review of time Porco mine tailings dam burst and associated mining waste problems, Pilcomayo Basin, Bolivia". School of Geography, University of Leeds.

O'Brien, J.S., 2004. "Simulating Mudflow Guidelines". Guidelines provided with FLO-2D model.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y., 1985. "Physical processes of hyperconcentrated sediment flows," Proc. of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah, Utah Water Research Laboratory, Series UWRL/g-85/03, 260-279.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y., 1988. "Laboratory analysis of mudflow properties," J. of Hyd. Eng., ASCE, 114(8), 877-887.

Orozco Collazos (Consultora Metalúrgica Ambiental), 2013, "Actualización de los Estudios de Funcionamiento de las Presas de Colas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo", Informe DECTN.

NRC (National Research Council), 1982. "Selecting a methodology for delineating mudslide hazard areas for the National Flood Insurance Program", National Academy of Sciences Report by the Advisory Board on the Built Environment, Washington, D.C.

SDMT (Secretaria Departamental de la Madre Tierra, Gobierno de Potosí), 2014. "Inspección ambiental – Empresa Minera SILVER & TIN Ingenio Minero Metalúrgico y Presas de Colas. Municipio de Tacobamba". Informe Técnico SDMT/GA/EC N° 054/014 – Inspección.