

# **Predicción de Transporte de Relaves Mineros en la Carga Suspendida posterior a una Falla de una Represa de Tierra para Relaves en el Río Quimi en la Mina Mirador, Ecuador**

Steven H. Emerman, Profesor Asociado de Hidrología, Departamento de Ciencias de la Tierra, Utah Valley University, 84058, EE.UU., Tel: 801-863-6864 (oficina), 801-798-7224 (casa), 801-921-1228 (celular) , E-mail: StevenE@uvu.edu o SHEmerman@gmail.com

Presentada a E-Tech International el 12 de mayo, 2015

Versión revisada presentada el 17 de mayo, 2015

Versión en castellano presentada el 15 de junio, 2015

## **Resumen**

El objetivo de este estudio fue predecir la velocidad de transporte de los relaves mineros más rápidos en caso de una falla de una represa propuesta de tierra para los relaves mineros en el río Quimi en la Mina Mirador en Ecuador. Los relaves mineros más rápidos viajarán como una carga suspendida a una velocidad similar a la del agua, que se estimó utilizando la Ecuación de Manning y una relación empírica para el coeficiente de rugosidad de Manning para los ríos escarpados de montaña. Se estima que los relaves suspendidos se desplazarán desde la represa de relaves a la confluencia de los ríos Quimi y Zamora en 1,3 horas (suponiendo un caudal promedio), 0,6 horas (suponiendo un caudal pico máximo anual promedio), o 0,3 horas (suponiendo un caudal de Inundación Máxima Probable), después de lo cual se desplazarán por el río Zamora a 113 km/d (caudal promedio) o 391 km/d (caudal pico máximo anual promedio). Las velocidades de desplazamiento de las partículas más rápidas por el río Zamora son probablemente cálculos demasiado bajos porque (1) la Ecuación de Manning calcula la velocidad promedio del agua, (2) los relaves mineros se acelerarán por el río Zamora a medida que el área de la cuenca aumenta, y (3) la falla de la represa puede coincidir con un evento de inundación infrecuente con lo cual el caudal aumentará considerablemente con respecto al pico máximo anual promedio.

## **Introducción**

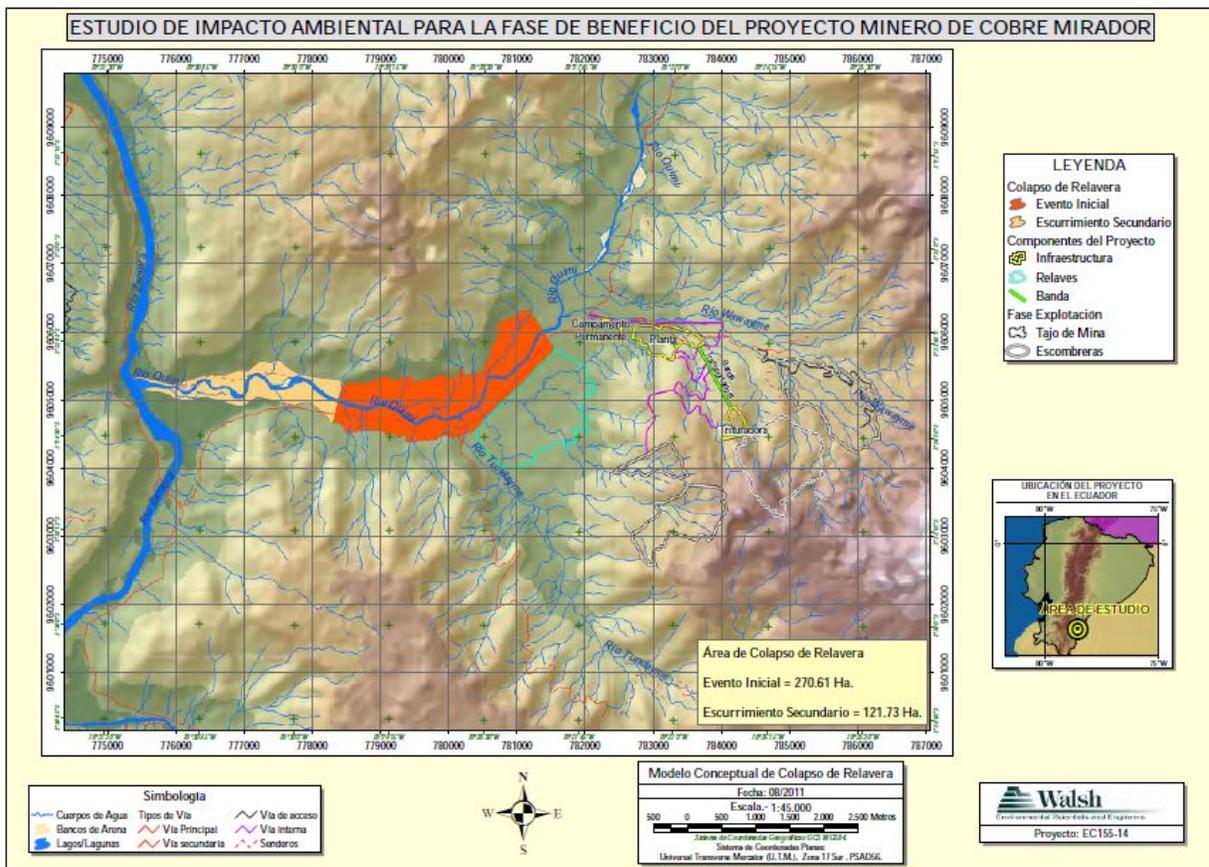
El Proyecto de Cobre Mirador de Ecuacorriente SA propone descargar<sup>[1]</sup> relaves mineros en un embalse junto al río Quimi, Ecuador, con el confinamiento mediante una represa de tierra. La Consultoría Knight Piésold (2007) ha evaluado la peligrosidad de la represa de tierra como MUY ALTA (mayúsculas suyas). En consecuencia y, a petición del Ministerio del Medio Ambiente de Ecuador, Científicos e Ingenieros Ambientales Walsh (2011) simularon una brecha de la represa de relaves y generaron un mapa que muestra la oleada inicial aguas abajo, después de la falla de la represa (ver Fig. 1). El mapa también muestra el transporte secundario de relaves por el río Quimi que ocurriría tras la oleada inicial de relaves y que proviene de la escorrentía normal no relacionado con la falla de la represa. Asimismo, en el mapa se muestra hasta dónde llegarían los relaves que acabarían en la confluencia con el río Zamora. No fue entregada ninguna justificación de porque los relaves no seguirían viajando río abajo por el río Zamora

Emerman (2014) calculó el tiempo promedio requerido para el transporte de relaves mineros desde el término de la oleada inicial aguas abajo hasta la confluencia de los ríos Quimi y

Zamora y la velocidad promedio del transporte por el Río Zamora bajo un conjunto de supuestos que redujo al mínimo la velocidad de transporte. Entre estos se incluyen:

- 1) Todos los relaves mineros son transportados como carga de lecho.
- 2) Los relaves mineros del río Quimi entran en contacto con el río Zamora y se mezclan con los sedimentos no vinculados a la minería del río Zamora, en vez de colocarse encima de éstos.
- 3) La zona activa de transporte de carga de lecho tiene un espesor de grano de 30 diámetros.
- 4) La zona activa está totalmente ocupada por sedimentos, en vez de ser una mezcla de sedimento y agua.

Bajo las anteriores suposiciones muy conservadoras, Emerman (2014) mostró que los relaves mineros tardarían en llegar desde la represa de relaves a la confluencia de los ríos Quimi y Zamora entre 0,01 y 7,01 años y descenderían por el río Zamora a 298-0,54 km/a para el rango de tamaño 0,0625-8 mm. En otras palabras, no había base alguna para la afirmación de Científicos e Ingenieros Ambientales Walsh (2011) de que los relaves mineros viajarían a la confluencia con el río Zamora y no más allá.



**Fig. 1** Según Científicos e Ingenieros Ambientales Walsh (2011), se producirá un evento inicial de transporte de los relaves mineros después de una falla de la represa de tierra en el río Quimi, seguido de transporte secundario de relaves mineros a causa del escurrimiento normal por el río Quimi y terminando en la confluencia con el río Zamora. No se dio ninguna justificación para la suposición de que el transporte de relaves mineros no continuaría por el río Zamora.

El presente estudio tenía como objetivos:

(1) calcular el tiempo que tomaría la primera llegada de relaves mineros transportados por el caudal normal desde el término de la oleada inicial aguas abajo hasta la confluencia del río Quimi y el río Zamora

(2) calcular la velocidad a la que los relaves mineros más rápidos serán transportados por el río Zamora después de la llegada a la confluencia.

Los relaves mineros más rápidos serán transportados como carga suspendida, en vez de carga de lecho. Muste et al. (2005) demostraron en estudios de caz que la velocidad de sedimentos suspendidos puede demorar la velocidad del agua hasta un 5%. La explicación más probable es que las altas concentraciones de sedimentos tienden a residir en remolinos turbulentos que se mueven más lentamente que la velocidad promedia del agua. Sin embargo, teniendo en cuenta las dudas en los datos de entrada, se supuso que la velocidad de sedimentos suspendidos será igual a la velocidad del agua. Todos los cálculos de velocidad del agua se llevaron a cabo en la hoja de cálculo de Microsoft Excel titulada *Rio\_Quimi\_Zamora\_Suspended\_Load\_Calculator* y que acompaña este informe.

### Análisis

La velocidad promedia del agua  $v$  (p/s) se estimó utilizando la Ecuación de Manning (Dingman 2009)

$$v = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

donde  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $R$  es el radio hidráulico (p), y  $S$  es la inclinación (adimensional). (Las unidades deben ser especificadas porque la Ecuación de Manning es dimensionalmente no homogénea.) En ríos con elevado ratio de anchura-profundidad, el radio hidráulico puede ser reemplazado por la profundidad  $d$  de modo que la Ecuación (1) se convierte a

$$v = \frac{1.49}{n} d^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

Para los ríos de montaña de alto gradiente ( $S > 0.002$ ) el coeficiente de rugosidad de Manning puede ser estimado con

$$n = 0.39 S^{0.38} d^{-0.16} \quad (3)$$

en el que  $d$  tiene unidades en pies (Jarrett 1984). Combinando Ecuaciones (2) y (3) con la ecuación de continuidad

$$Q = wvd \quad (4)$$

donde  $w$  es la anchura del río se produce

$$v = 2.1 \left( \frac{Q}{w} \right)^{0.45} S^{0.066} \quad (5)$$

que se utilizó para estimar las velocidades de flujo.

### Datos de Entrada

Todos los datos de entrada para el cálculo del transporte de sedimentos suspendidos aparecen en la Tabla 1. La distancia desde el término del evento inicial (ver Fig. 1) hasta la confluencia del río Quimi y el río Zamora se midió utilizando Google Earth. Las anchuras del río Quimi y el río Zamora se midieron utilizando Google Earth a distancias de diez anchos de río aguas arriba de la confluencia para minimizar cualquier efecto de confluencia en la morfología de río. La inclinación del río Quimi se midió utilizando Google Earth basándose en la diferencia de elevación entre el término del evento inicial y la confluencia con el río Zamora. La inclinación del río Zamora se midió a la misma distancia aguas abajo de la confluencia con el río Quimi. Ambas inclinaciones fueron verificadas utilizando mapas topográficos (ESRI 2014). El uso de la Ecuación (3) para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning fue apropiado porque ambos ríos son ríos de alto gradiente de acuerdo con el criterio de Jarrett (1984).

**Tabla 1. Datos de entrada para el cálculo de transporte de sedimentos suspendidos**

Distancia desde evento inicial hasta confluencia (p)	12,487	
	Rio Quimi	Rio Zamora
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	— <sup>1</sup>	105
Área de cuenca (km <sup>2</sup> )	89	8026
Anchura (p)	116	350
Inclinación	0.0059	0.0051

<sup>1</sup>El caudal promedio del río Quimi no es un dato de entrada porque se estimó a partir del caudal medio del río Zamora y las anchuras relativas de los dos ríos.

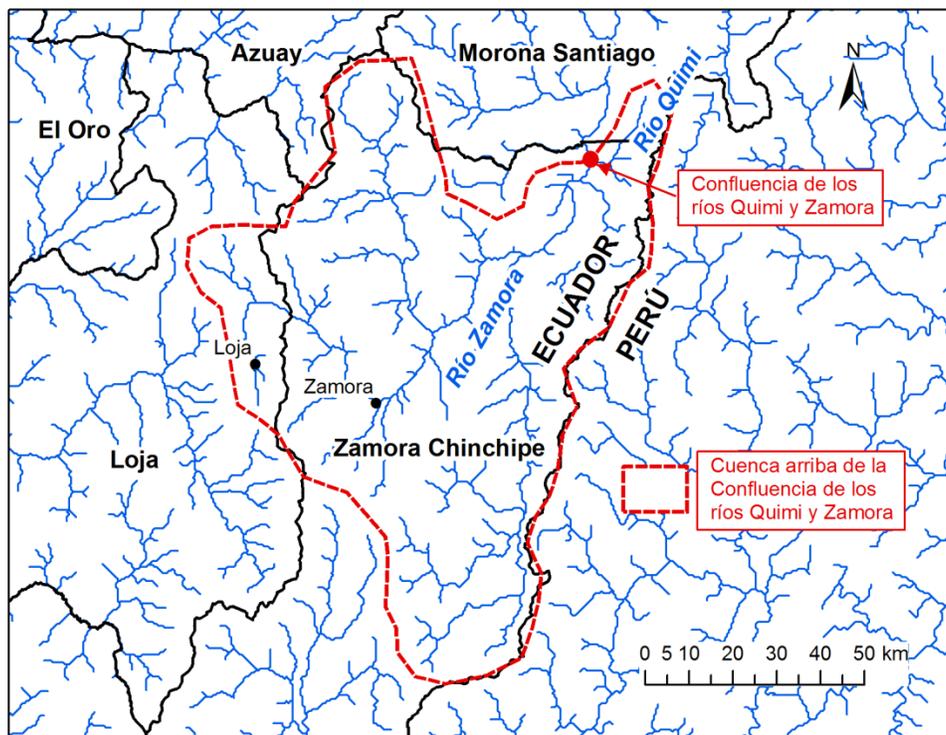
El caudal promedio del río Zamora se estimó como el caudal medio durante el período 1960-2009, medido en Bomboiza (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología n.d.). (No se especifica la ubicación de la estación de medida de Bomboiza, pero basado en la ubicación de la ciudad, es probable que se encuentra a unos 14,5 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Quimi y Zamora.) El caudal promedio del río Quimi se estimó utilizando la relación empírica bien establecida de que el aumento de la anchura del río aguas abajo es proporcional a la raíz cuadrada del caudal del río (Leopold 1994). Sobre esa base, el caudal promedio del río Quimi puede estimarse a partir del caudal promedio del río Zamora por

$$Q_{mean,1} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 Q_{mean,2} \quad (6)$$

donde los subíndices 1 y 2 se refieren al río Quimi y el río Zamora, respectivamente. El caudal pico máximo anual promedio  $Q_{peak}$  para el río Quimi y el río Zamora se estimó usando la relación empírica

$$Q_{peak} = 3A^{0.7} \quad (7)$$

donde  $Q_{peak}$  tiene unidades de  $m^3/s$  y  $A$  es área de la cuenca ( $km^2$ ) (ver Figs. 2a-b), que fue desarrollado por la Consultaría Knight Piésold (2007) a partir de estudios de indicadores de río no publicados en el río Zamora y el río Sabanilla (pero no en el río Quimi). La Consultaría Knight Piésold (2007) estimó que  $Q_{IMP}$ , el caudal de Inundación Máxima Probable (IMP), en el río Quimi sería  $230 m^3/s$ , en base a un modelo del Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Modelado Hidrológico (CIH-SMH) y un Precipitación Máxima Probable (PMP) de 300 mm en 24 horas usando el método de Hershfield (1977) y los registros disponibles de precipitación máxima en 24 horas. La estimación de PMP es “Teóricamente, la precipitación más intensa durante un período dado que es físicamente posible en una determinada área de tormenta en una ubicación geográfica particular en una determinada época del año” (OMM 1986). La Consultaría Knight Piésold (2007) no proporcionó detalles suficientes para repetir su cálculo con el río Zamora.

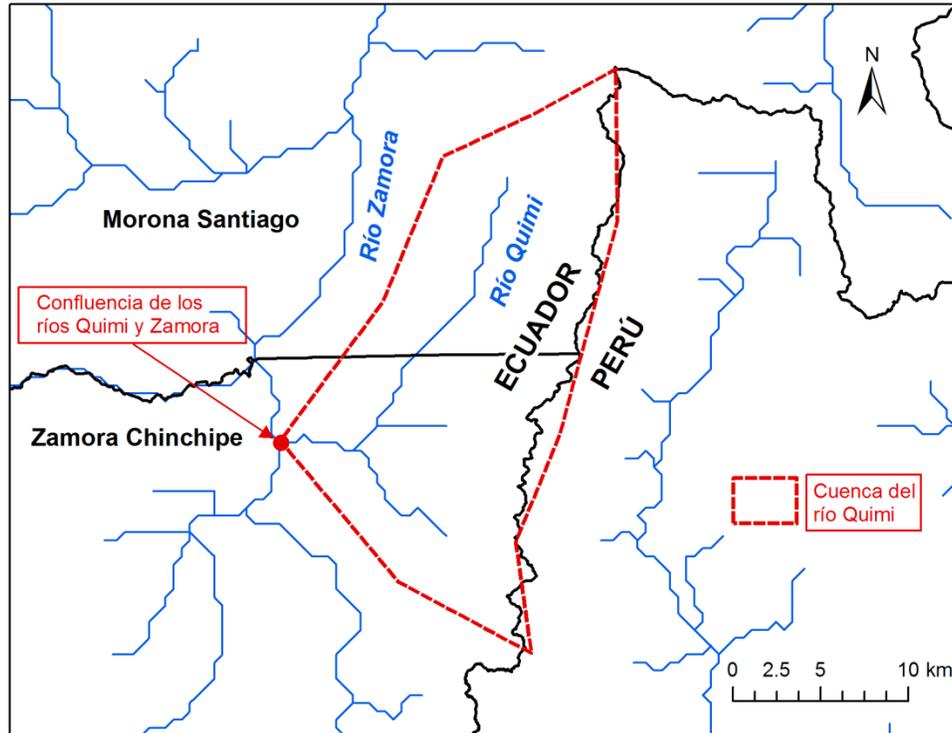


**Fig. 2a** Basado en un área de la cuenca de  $8026 km^2$ , el caudal pico máximo anual promedio del río Zamora en la confluencia con el río Quimi se estimó que sería  $1623 m^3/s$ .

## Resultados

Usando los valores de entrada en la Tabla 1 y las Ecuaciones (5)-(7), se predice que los relaves suspendidos viajarán desde el embalse roto de relaves a la confluencia de los ríos Quimi y Zamora en 1,3 horas (suponiendo un caudal promedio), 0,6 horas (suponiendo un caudal pico máximo anual promedio, o 0,3 horas (suponiendo un caudal de IMP), después de lo cual viajarán por el río Zamora a 113 km/d (caudal promedio) o 391 km/d (caudal pico máximo anual promedio) (ver Tablas 2-3). Con estas velocidades, los relaves mineros más rápidos deben alcanzar la siguiente confluencia importante con el río Santiago (unos 88 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Quimi y Zamora) dentro de aproximadamente 19 horas (caudal promedio)

o cinco horas (caudal pico máximo anual promedio). Las profundidades estimadas para los ríos son bastante poco profundas, pero requeridas por sus altos ratios de anchura-caudal. Las altas relaciones de anchura a profundidad (ver Tablas 1-3) justifican la sustitución del radio hidráulico por la profundidad en la Ecuación (2). El rango de valores calculados para el coeficiente de rugosidad de Manning (0,036-0,053, ver Tablas 2-3) es consistente con el rango dado por Chow (2009) para los ríos de montaña (0,030-0,070, típica = 0,045).



**Fig. 2b** Basado en un área de la cuenca de 89 km<sup>2</sup>, el caudal pico máximo anual promedio del río Quimi en la confluencia con el Río Zamora se estimó que sería 69 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 2. Transporte de sedimentos suspendidos por el río Quimi desde la represa de relaves hasta la confluencia con el río Zamora**

	<b>Caudal Promedio</b>	<b>Caudal Pico Máximo Anual Promedio</b>	<b>Caudal de Inundación Máxima Probable</b>
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	12	69	230
Velocidad (m/s)	0.80	1.81	3.11
Tiempo de llegada (h)	1.3	0.6	0.3
Profundidad (m)	0.41	1.09	2.09
Coeficiente de rugosidad de Manning	0.053	0.045	0.041

El caudal pico máximo anual promedio es 19 veces el caudal promedio del río Zamora y sólo seis veces el caudal promedio del río Quimi (ver Tablas 2-3). Se espera que la cuenca afluyente menor del río Quimi tenga un mayor ratio de caudal pico máximo anual promedio a caudal promedio porque debe tener menos capacidad de almacenamiento de agua subterránea.

Puesto que todas las estimaciones para el río Quimi se basaron en mediciones realizadas ya sea en el río Zamora o el río Sabanilla, es probable que, para el río Quimi, o bien el caudal promedio se haya sobrestimado o el caudal pico máximo anual promedio se haya subestimado o bien, ambos. A partir de los datos disponibles, no es posible determinar lo más probable.

**Tabla 3. Transporte de sedimentos suspendidos por Río Zamora**

	<b>Caudal Promedio</b>	<b>Caudal Pico Máximo Anual Promedio</b>
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	105	1623
Velocidad (km/d)	113	391
Profundidad (m)	0.75	3.36
Coefficiente de rugosidad de Manning	0.045	0.036

### Discusión

Cabe señalar que los resultados de este estudio no son un escenario de velocidad máxima de transporte de relaves mineros en oposición al escenario de velocidad mínima de transporte de relaves mineros de Emerman (2014), que calculó la velocidad promedio del transporte de carga de lecho para relaves mineros bajo circunstancias conservadoras que minimizaron la velocidad promedio de transporte. Debido a las interacciones entre las partículas, debe haber muy poca dispersión (variación de la velocidad promedio de transporte) en el transporte de carga de lecho, aunque hay muy pocos datos que se aplican a este tema. Sin embargo, los relaves más rápidos siempre serán transportados en la carga suspendida a casi la velocidad del agua, independientemente de la lentitud con que las partículas de carga de lecho se muevan (aunque las velocidades de ambos, la carga de lecho y la carga suspendida, son una función del caudal de río). De hecho, por varias razones, los cálculos sobre la velocidad de los relaves mineros más rápidos por el Río Zamora siguen siendo escenarios que reducen al mínimo las velocidades de transporte. En primer lugar, la Ecuación de Manning es una estimación de la velocidad del agua promediada sobre la anchura y la profundidad del río. El agua cerca de la superficie y a mitad de camino entre las orillas tiende a moverse 9-22% más rápido que la velocidad promedio (Dingman 2009). En segundo lugar, la velocidad de transporte por el río Zamora se calculó basada en el caudal pico máximo anual promedio en la confluencia de los ríos Quimi y Zamora (ver Fig. 2). Los relaves mineros suspendidos se acelerarían al descender por el río Zamora a medida que el área de la cuenca y, por lo tanto, el caudal pico máximo anual promedio, aumentan.

Los cálculos de la velocidad del agua con un caudal máximo podrían estar ligeramente sobreestimados dada la suposición de que la anchura del río era fija incluso cuando aumenta el caudal. Aunque hay una considerable variación en el efecto del caudal sobre la anchura, una relación promedio en-una-estación es

$$w = w_{mean} \left( \frac{Q}{Q_{mean}} \right)^{0.11} \quad (8)$$

donde  $Q_{mean}$  y  $w_{mean}$  son el caudal promedio y la anchura promedio (presumiblemente la misma anchura que se midió desde Google Earth) (Rhodes 1977; Dingman 2009). El pequeño valor del exponente en la Ecuación (8) indica que el río típico acomoda un aumento de caudal en un punto dado principalmente por un aumento en la profundidad y en la velocidad, en vez de un aumento de la anchura. Basado en la Ecuación (8) y las Tablas 1-3, los aumentos de anchura causados por los aumentos del caudal desde  $Q_{mean}$  a  $Q_{peak}$  serán factores de 1,22 y 1,35 para el río Quimi y el río Zamora, respectivamente, y serán un factor de 1,39 para un aumento del caudal desde  $Q_{mean}$  a  $Q_{IMP}$  para el río Quimi. Entonces, de acuerdo a la Ecuación (5), la velocidad del agua se reducirá en factores de sólo 0,91 y 0,87 para aumentos de caudal desde  $Q_{mean}$  a  $Q_{peak}$  para el río Quimi y el río Zamora, respectivamente, y un factor de sólo 0,86 para un aumento del caudal desde  $Q_{mean}$  a  $Q_{IMP}$  para el río Quimi.

Otra manera más relevante en que los cálculos de este estudio subestiman la velocidad del agua en el río Zamora es que el caudal máximo considerado para este río fue el caudal pico máximo anual promedio. El caudal puede ser considerablemente mayor en, por ejemplo, un evento de inundación de 100 años, o la Inundación Máxima Probable (IMP), como consideró para el río Quimi la Consultoría Knight Piésold (2007). La coincidencia de una falla<sup>[12]</sup> de la represa de tierra y un evento infrecuente de inundación podría ser improbable si la represa falla debido a la actividad sísmica, pero es mucho más probable si la represa falla debido a la precipitación excesiva y los altos niveles de agua detrás de la represa. Desafortunadamente, no existen datos publicados para realizar una estimación creíble del caudal de un evento de inundación de 100 años ya sea en el río Quimi o en el río Zamora.

Un efecto posiblemente más importante en la velocidad de los relaves mineros que la coincidencia de la falla de la represa con una inundación infrecuente es el caudal elevado en ambos el río Quimi y el río Zamora a causa la falla de la propia represa. Este efecto debería haber sido considerado en el cálculo de la oleada inicial por Científicos e Ingenieros Ambientales Walsh (2011) (ver Fig. 1). Este cálculo se basó en la Calculadora de Deslizamientos de Flujo de Relaves desarrollada por Jeyapalan (1982) y está disponible en WISE Uranium Project (2014). No tengo conocimiento de que se haya llevado a cabo ninguna reevaluación de este modelo a partir de los hundimientos de las represas de tierra que han ocurrido desde el desarrollo de este modelo.

## Referencias

- Chow, 1959. Open-Channel Hydraulics: Blackburn Press, Caldwell, NJ, 700 p.
- Científicos e Ingenieros Ambientales Walsh, 2011. Anexo a Beneficio, 9 p.
- Consultoría Knight Piésold, 2007. Appendix 7d Knight Piésold – Rio Quimi Tailings Management Facility Feasibility Study, 111 p.
- Dingman, S.L., 2009. Fluvial Hydraulics: Oxford University Press, New York, 559 p.
- Emerman, S.H., 2014. Prediction of transport of mine tailings following failure of an earthen dam on the Rio Quimi, Ecuador. Informe a E-Tech International, 7 p.
- ESRI, 2014. World Topographic Map. Disponible en línea a <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>.
- Hershfield, D.M., 1977. Some tools for hydrometeorologists. En: Second Conference on Hydrometeorology, American Meteorological Society, pp. 79-82.
- Jarrett, R.D., 1984. Hydraulics of high-gradient streams: Journal of Hydraulic Engineering, v. 110, pp. 1519-1539.

- Jeyapalan, J.K., 1982. Dam-break studies for mine tailings impoundments. En: Uranium Mill Tailings Management, Proceedings of the Fifth Symposium, December 9-10, 1982, Fort Collins, CO, pp. 39-53.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, n.d. Series Mensuales de Datos Hidrológicos, Nombre: Bomboiza aj Zamora, Código: H881, Período: 1960-2009.
- Leopold, L., 1994. A View of the River: Harvard University Press, Cambridge, MA, 298 p.
- Muste, M., K. Yu, I. Fujita, and R. Ettema, 2005. Two-phase versus mixed-flow perspective on suspended sediment transport in turbulent channel flows: Water Resources Research, v. 41:W10402, doi: 10.1029/2004WR003595.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial), 1986. Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation: Operational Hydrology, Report 1 (WMO No. 332, 2<sup>nd</sup> ed.).
- Rhodes, D.D., 1977. The b-f-m diagram: Graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry: American Journal of Science, v. 277, pp. 73-96.
- WISE Uranium Project, 2014. Tailings Flow Slide Calculator. Disponible en línea a <http://www.wise-uranium.org/ctfs.html>.