

Las Dinámicas de la Laguna y el Oleaje

Rachel Chisolm, PhD

The University of Texas at Austin
Center for Research in Water Resources

8 de Agosto, 2016



La Cadena de Procesos de un Aluvi3n

- Avalancha hacia la Laguna
- **Oleaje Desbordando la Morrena**
 - Parte 1: Oleajes Generados por Movimientos de Masa
 - Parte 2: Modelos y Simulaciones de Oleajes
- Erosi3n de la Morrena
- Inundaci3n R3o Abajo
- Peligro en la Ciudad

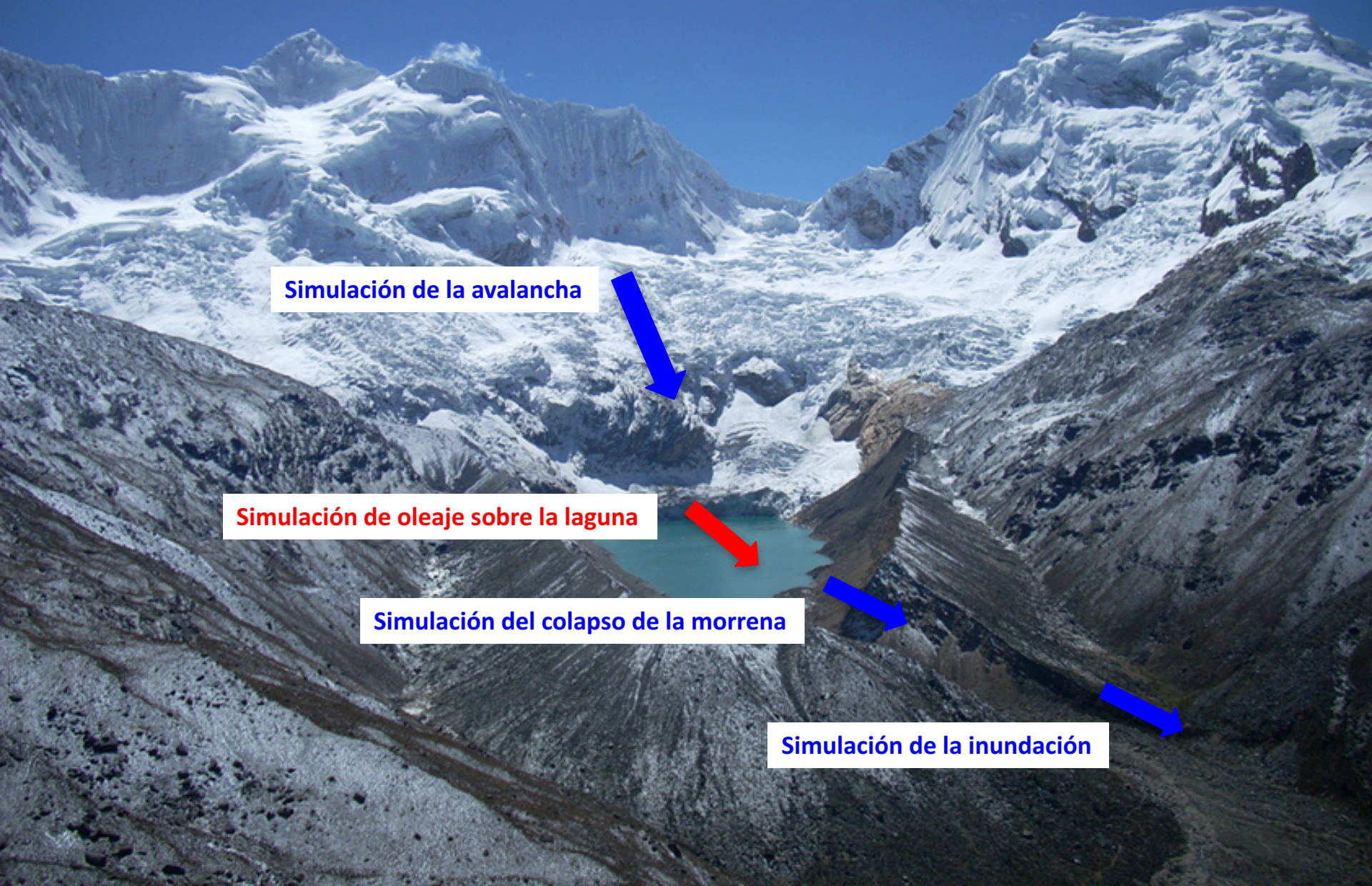
Modelo de la Cadena de Procesos

Simulación de la avalancha

Simulación de oleaje sobre la laguna

Simulación del colapso de la morrena

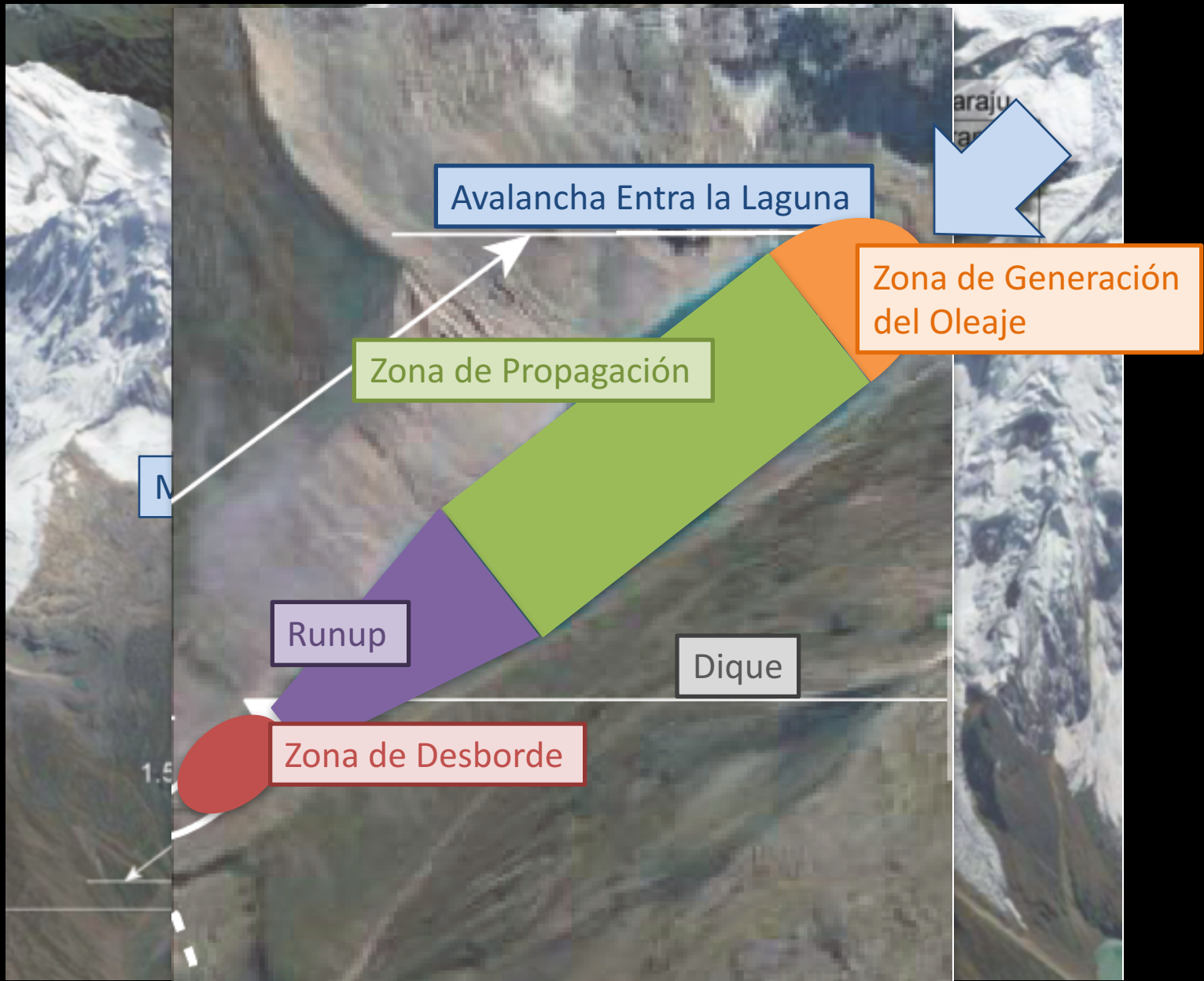
Simulación de la inundación



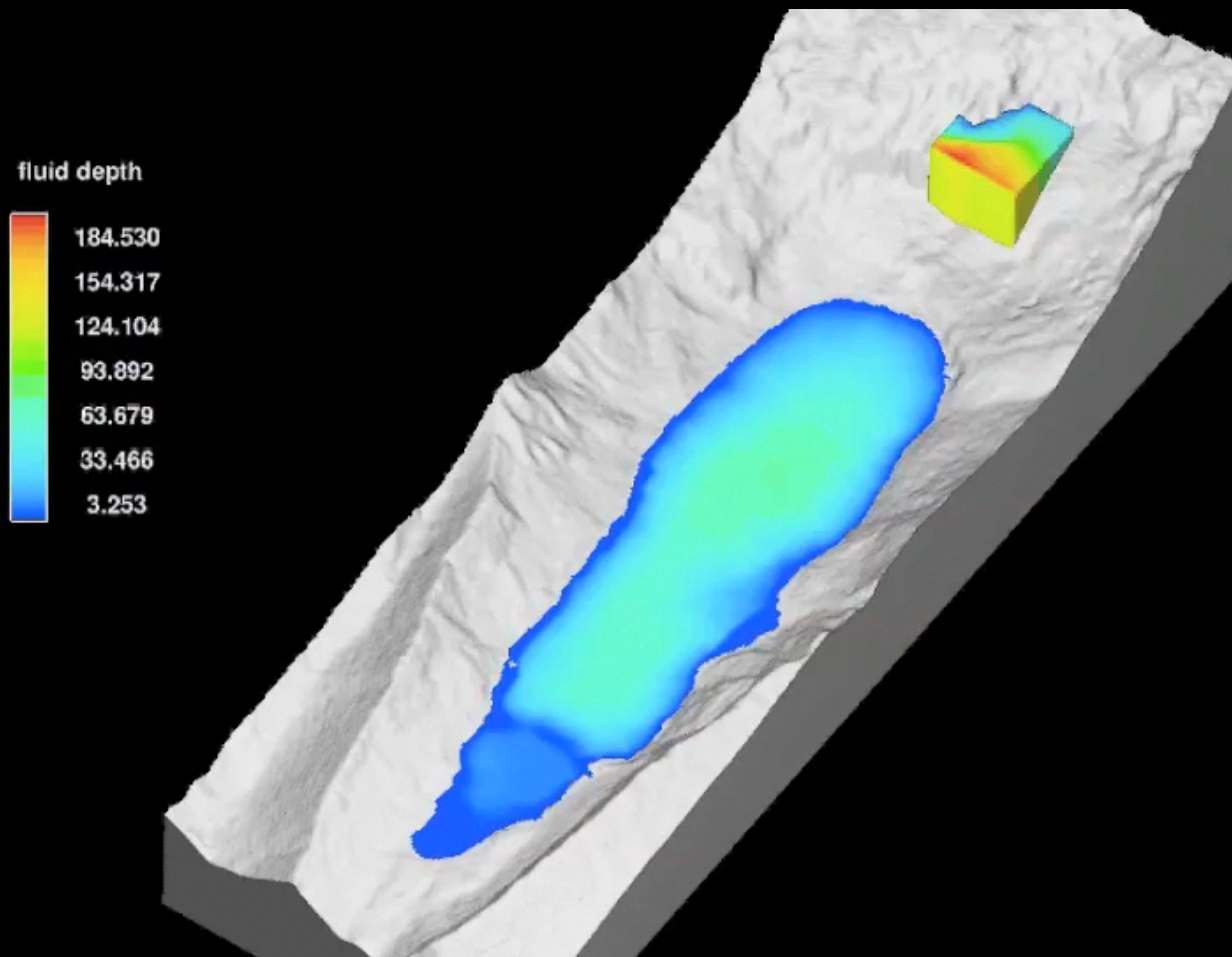
Las Dinámicas de Lagunas

OLEAJES GENERADOS POR MOVIMIENTOS DE MASA

Fases del Oleaje



Video: Avalancha Grande



Mecanismos de Generación de los Oleajes

Momento y desplazamiento de los movimientos de masa

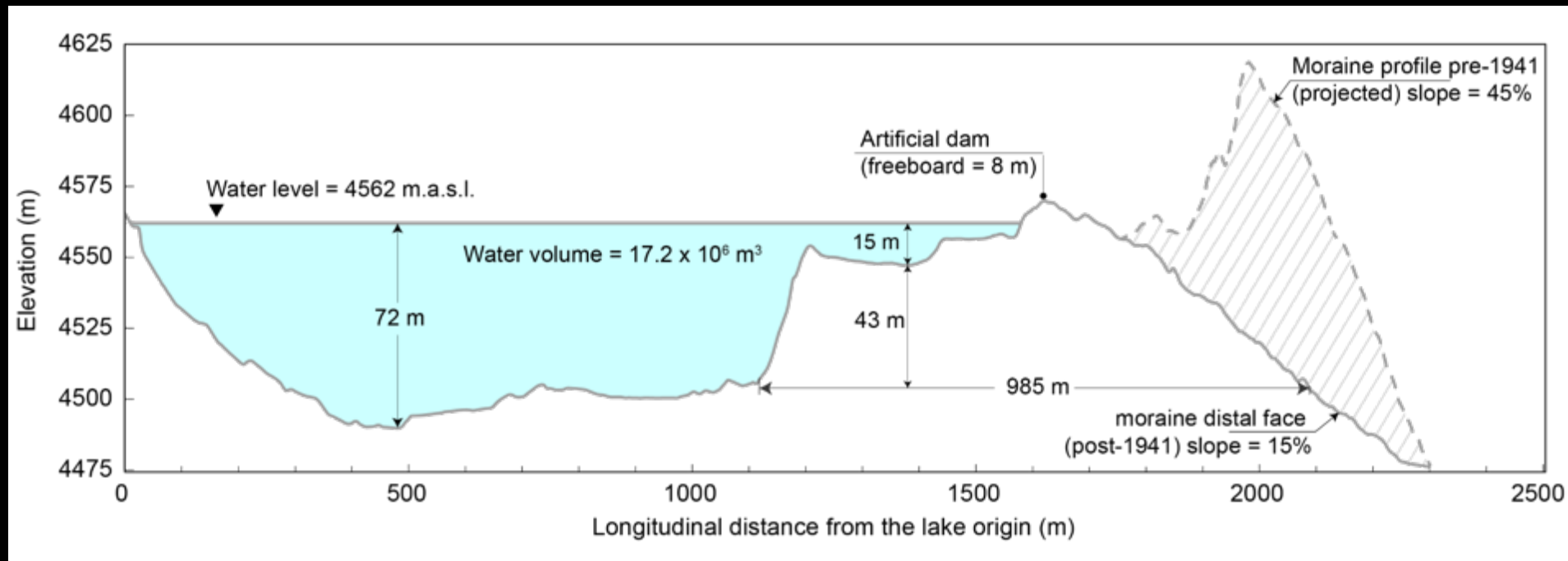
- Avalanchas y caídas de bloques de hielo
 - Si el glaciar tiene un camino directo a la laguna
 - Pueden generar olas muy altas (si hay un gran volumen de avalancha)
- Derrumbes o desprendimientos de tierra
 - Normalmente de las morrenas laterales
 - En general son mas pequeños que los oleajes generados por avalanchas
- Video: Ola generada por una caída de hielo en Argentina
 - <https://youtu.be/suqptBOs2Yg>

Factores que Influyen el Tamaño de la Ola

- Volumen de la avalancha
- El momento del impacto con la laguna:
 - Velocidad de la avalancha
 - Altura de la caída
 - Angulo de impacto
 - Profundidad de la avalancha
 - Densidad de la avalancha
- Profundidad de la laguna

¿PREGUNTAS?

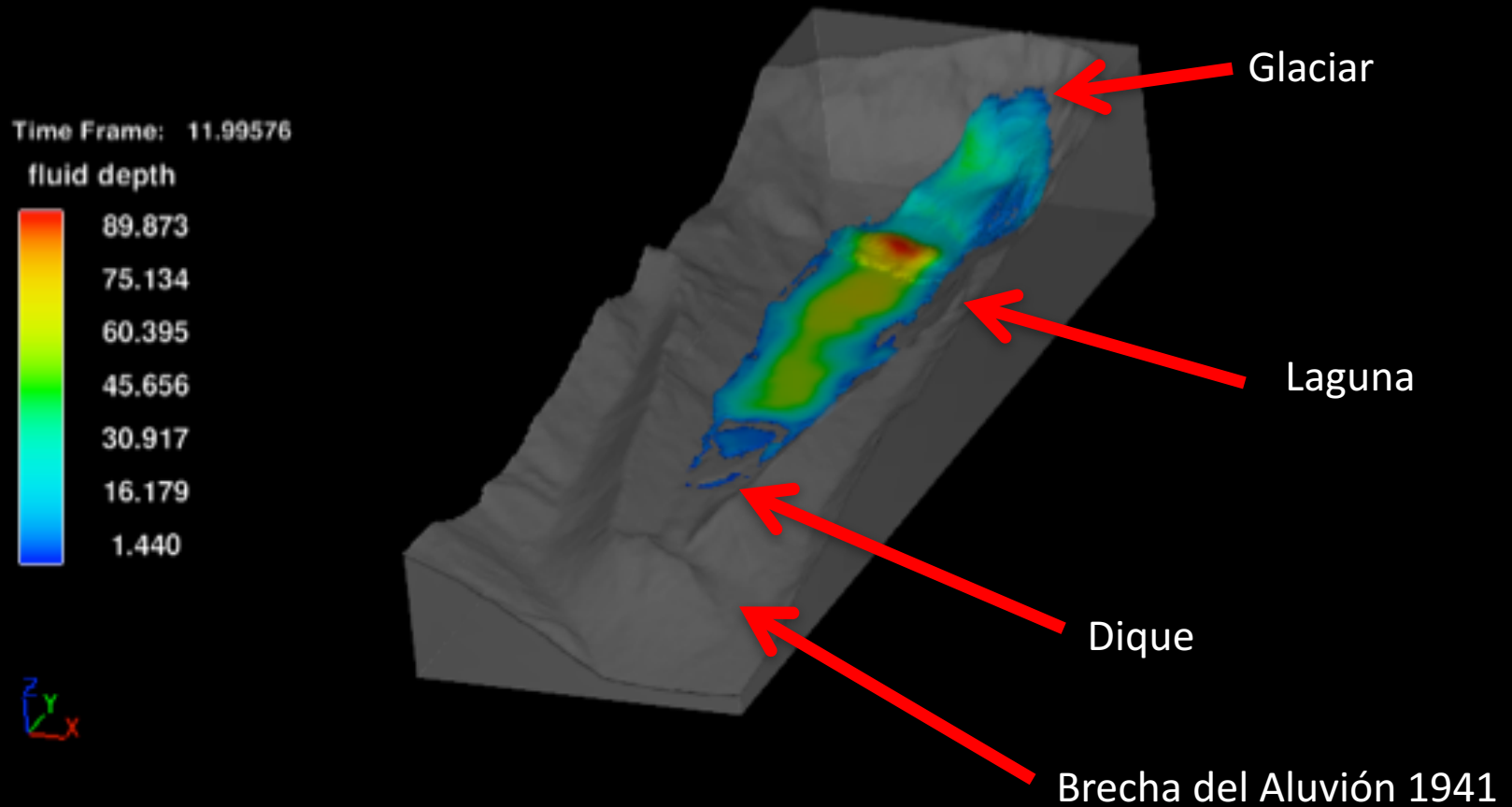
Perfil longitudinal de la laguna y la morrena de Palcacocha



Factor de exageración vertical de 5 (Somos-Valenzuela, et al. 2015).

Generación de la Ola

Avalancha entrando a la laguna

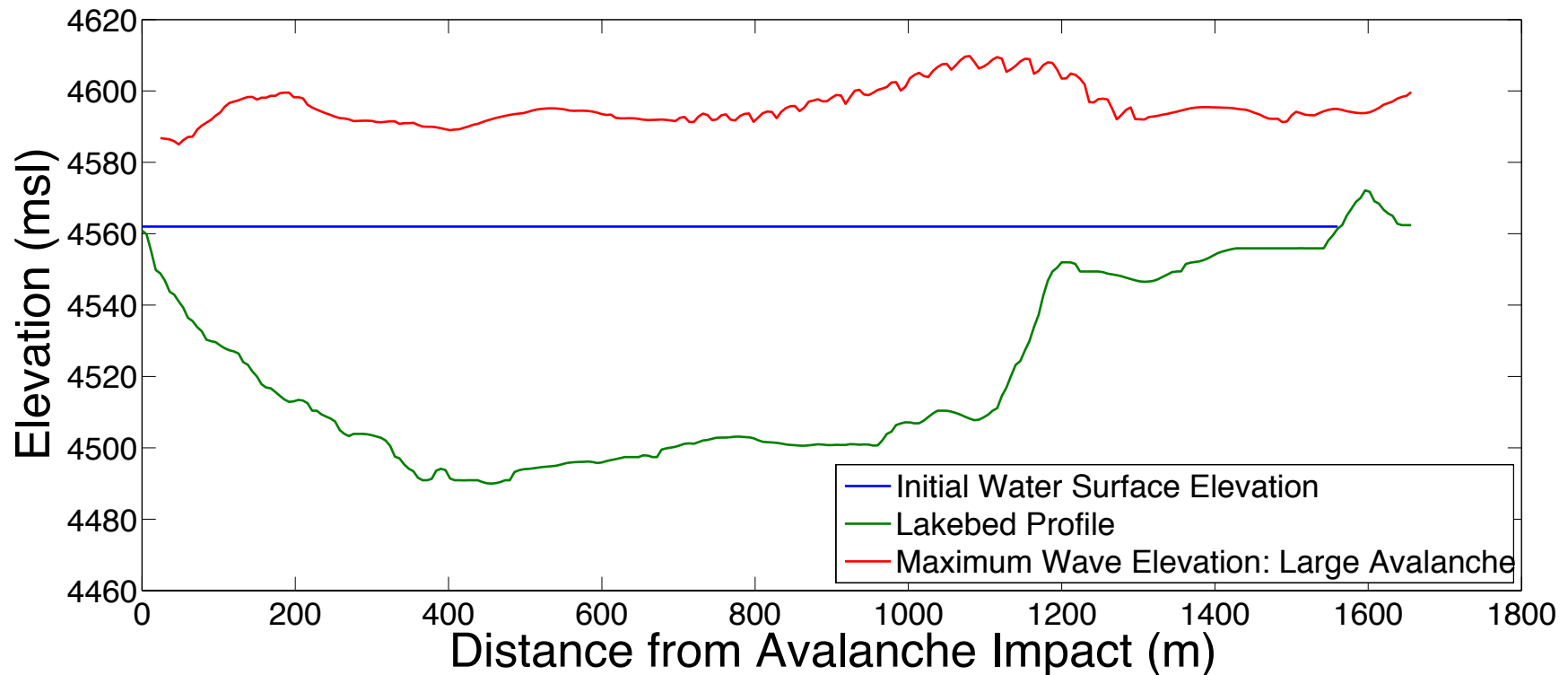


Propagación de la Ola

- La propagación de la ola sigue el mismo eje de la avalancha
- Atenuación de la ola (disminución de la altura)
 - Poco por la difusión de energía (por turbulencia en el agua): $\approx 20-30\%$
 - Cuando encuentre obstáculos o si hay rugosidad en el lecho de la laguna cerca del superficie

Propagación de la Ola: Altura Máxima

Tamaño de la Avalancha	Pequeña	Mediana	Grande
Altura Máxima de la Ola (m)	19.6	30.1	47.8



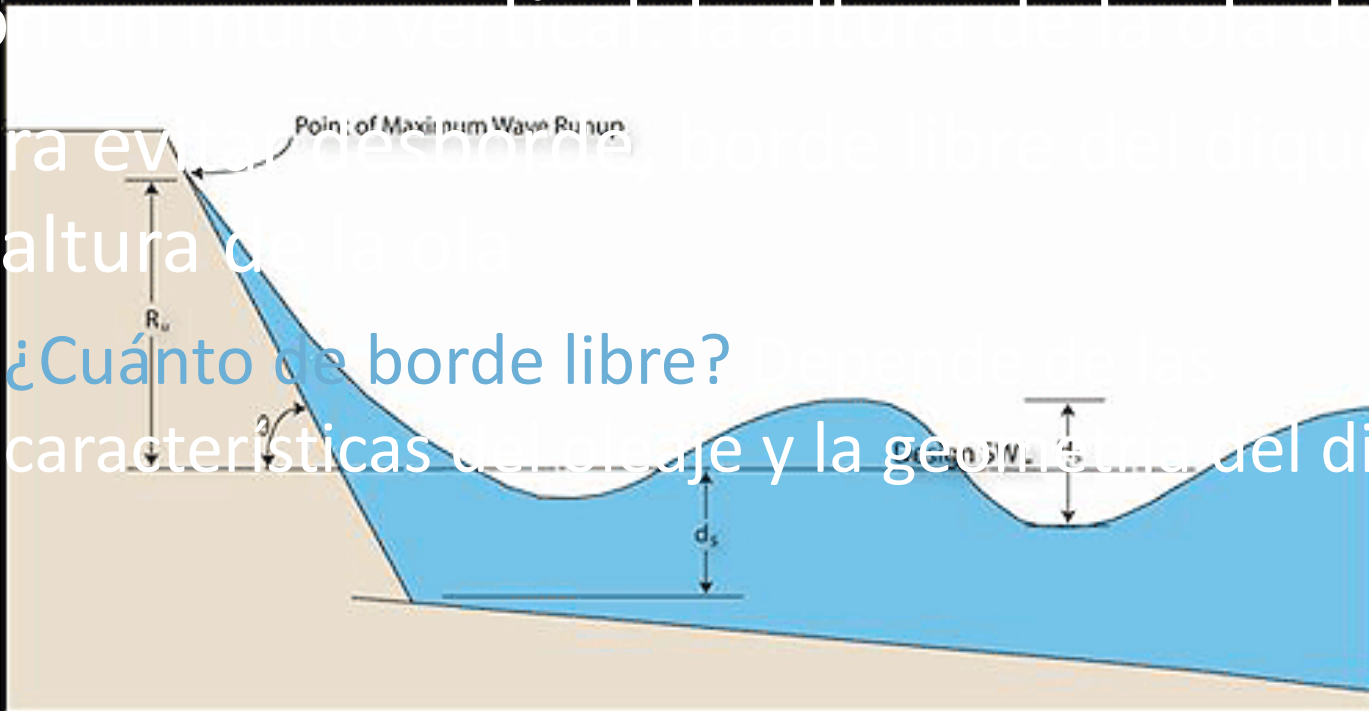
Desborde de la Laguna

- Cuando el oleaje sobrepasa el dique
- El volumen de desborde depende de:
 - La altura de la ola
 - El borde libre del dique
 - La pendiente del dique (mas pendiente = menos desborde)
 - La dirección del oleaje (ángulo de incidencia con el dique)
 - La relación entre el volumen de avalancha y el volumen de la laguna

“Runup” de la ola

“Runup” del Oleaje

- La altura de la ola sube cuando llega a un obstáculo
 - Conversión de energía cinética a energía potencial
- Como resultado, el nivel del agua sube y se forma la ola
- Para evaluar el desborde del borde libre del dique >>>
 - ¿Cuánto de borde libre? Depende de las características del oleaje y la geometría del dique



Fuente del imagen: <http://www.pilebuck.com/highways-coastal-environment-second-edition/chapter-6-coastal-revetments-wave-attack/>

“Runup” y Desborde del Oleaje:

Factores

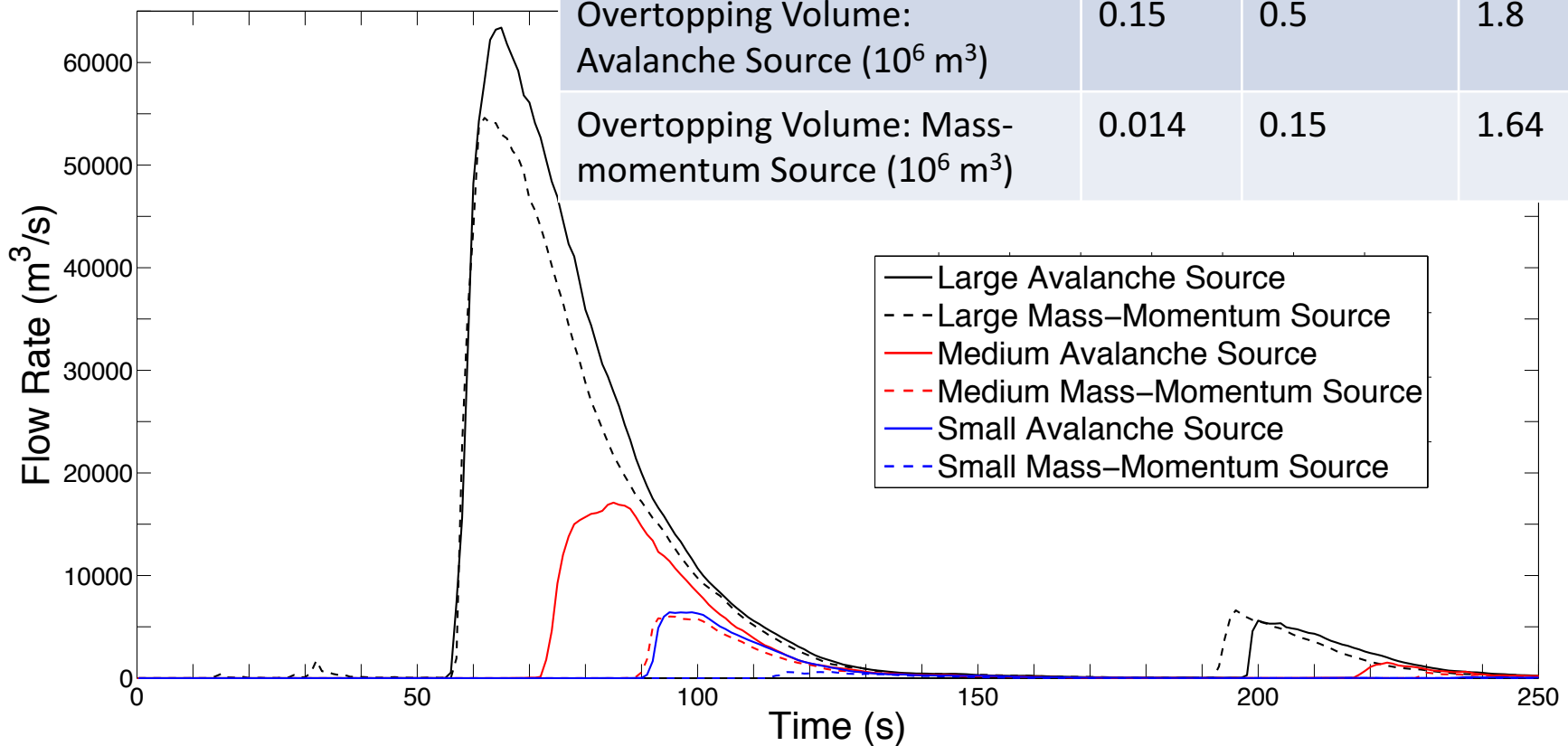
Factores que influyen el magnitud del “runup” y desborde:

- Altura y celeridad de la ola
- Profundidad de la laguna en frente del dique
 - Mas profundidad = menos desborde
- Pendiente del dique en el lado frental (en contacto con la laguna)
 - Mas pendiente = menos desborde
- Borde libre

El desborde parece ser mas sensible a la pendiente del dique y la profundidad de la laguna que al borde libre

Resultados del Modelamiento del Oleaje de Palcacocha: El Desborde

Avalanche Scenario	Small	Medium	Large
Overtopping Volume: Avalanche Source (10^6 m^3)	0.15	0.5	1.8
Overtopping Volume: Mass- momentum Source (10^6 m^3)	0.014	0.15	1.64



Relación: Volumen de Avalancha- Volumen de Laguna

- Huggel et al. (2004)
- Si la proporción del volumen de avalancha:volumen de la laguna es entre 1:1 y 1:10
 - Posible drenaje casi completo de la laguna
- Proporciones entre 1:10 y 1:100
 - Desborde es probable dependiendo del borde libre

Relación: Volumen de Avalancha- Volumen de Laguna

- Ejemplo 1:
 - Volumen de avalancha = $3 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - Volumen de la laguna = $9 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - Proporción es 1:3
 - Drenaje completo es posible
- Ejemplo 2:
 - Volumen de avalancha = $1 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - Volumen de la laguna = $20 \times 10^6 \text{ m}^3$
 - Proporción es 1:20
 - Desborde es probable, pero no drenaje completo de la laguna

¿PREGUNTAS?

Las Dinámicas de Lagunas

PARTE 2: MODELOS Y SIMULACIONES DE OLEAJES

Modelo vs. Simulación

- Un modelo es un método para representar procesos
 - Modelos físicos: discretización de ecuaciones derivados de leyes físicas
 - Ej. modelo hidrodinámico usando las ecuaciones de Navier-Stokes (que son derivadas de la física newtoniana)
 - Modelos empíricos: modelos basados en relaciones de regresión usando datos de laboratorios o datos de campo
 - Descripciones de lo que se observe
 - Ej. el método para calcular tamaños de olas de Heller y Hager
- Una simulación es el uso de un modelo para representar un escenario específico en un sitio específico
- Ejemplo:
 - El software de FLOW3D es un modelo
 - El uso del software para el escenario de la avalancha grande con el nivel actual de la laguna es una simulación

Tipos de Modelos Hidrodinámicos

- 1D (no usados para modelamiento de oleajes)
 - Flujo contenido en un canal
 - Usa secciones transversales, distancias y pendientes del río
- 2D
 - Características del flujo son homogéneos in la dirección vertical
 - Puede simular flujos que salen del cauce de un rio
- 3D
 - Simula el flujo en las tres direcciones

Tipos de Modelos Hidrodinámicos

- Hidrostático vs. No-hidrostático
 - Aproximación Boussinesq (aproximación hidrostática)
 - También llamado *aproximación de aguas poco profundas*
 - No se consideran aceleraciones verticales
 - No-hidrostático
 - Se simulan todas las aceleraciones verticales

Las Entradas a los Modelos Hidrodinámicos

- Batimetría de la laguna
- Modelo topográfico
- Rugosidad del terreno
- Resolución de la malla
- Condiciones de contorno (características del deslizamiento)

¿Porque usar un modelo hidrodinámico?

- Estimar el peligro actual de una laguna con modelamiento de la cadena de procesos
 - Estimaciones de los volúmenes de desborde y los hidrogramas
- Evaluar escenarios de mitigación/obras de seguridad de lagunas
 - Reducir el volumen de la laguna (el nivel del superficie)
 - Construir un dique reforzado (analizar alturas y pendientes del dique)

¿PREGUNTAS?

El Modelo Empírico de Heller y Hager

- Usa características de la avalancha:
 - Volumen
 - Pendiente
 - Velocidad
 - Espesor
 - Ancho
 - Densidad
- Para determinar las características de la ola:
 - Altura máxima
 - Distancia a la altura máxima
 - Amplitud
 - Longitud de onda
 - Celeridad

Buena representación de la generación de la ola, pero hay mucho error en la estimación del volumen de desborde

El Modelo de Heller y Hager: Parámetros

Entradas:

s = espesor de la avalancha/deslizamiento

m_s = masa del deslizamiento

ρ_s = densidad del deslizamiento

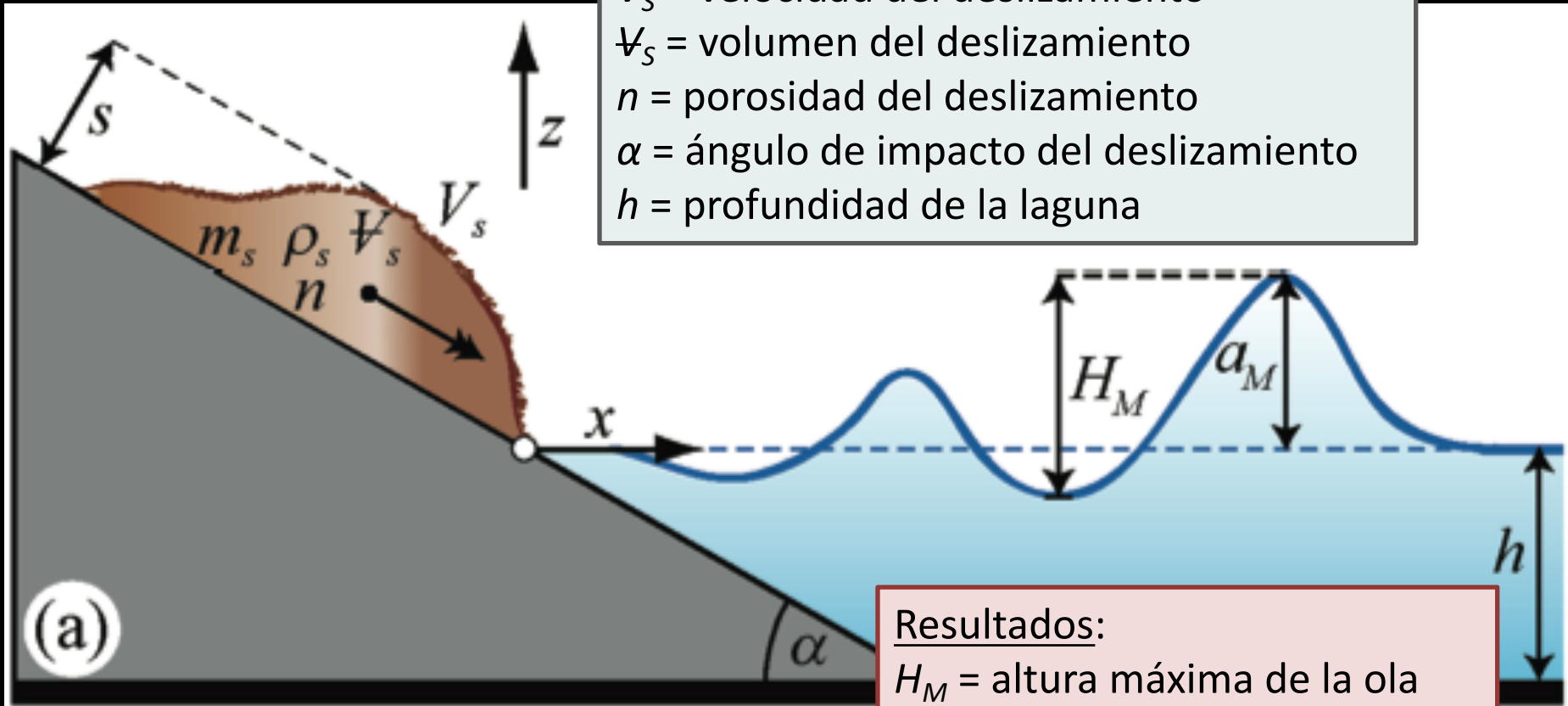
V_s = velocidad del deslizamiento

\forall_s = volumen del deslizamiento

n = porosidad del deslizamiento

α = ángulo de impacto del deslizamiento

h = profundidad de la laguna



Resultados:

H_M = altura máxima de la ola

a_M = amplitud máxima de la ola

El Modelo de Heller y Hager: Ejemplo de la Laguna Palcacocha

- Ver la hoja de calculo en Excel

Entradas:

s = espesor de la avalancha/deslizamiento

m_s = masa del deslizamiento

ρ_s = densidad del deslizamiento

V_s = velocidad del deslizamiento

\forall_s = volumen del deslizamiento

n = porosidad del deslizamiento

α = ángulo de impacto del deslizamiento

h = profundidad de la laguna

Resultados:

H_M = altura máxima de la ola

a_M = amplitud máxima de la ola

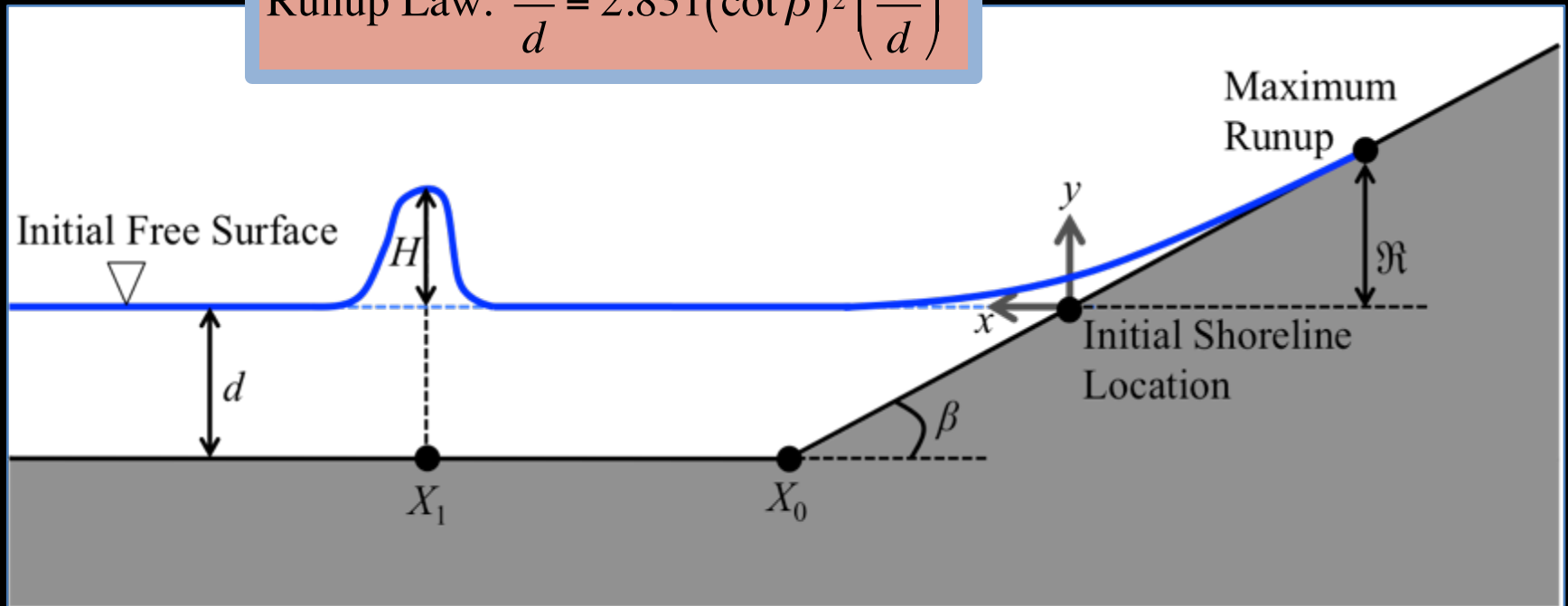
¿PREGUNTAS?

Nuevo Método Analítico para Calcular Volúmenes de Desborde

- Adaptado de las ecuaciones de tsunami
“runup”

Tsunami Runup Law (Synolakis, 1987)

$$\text{Runup Law: } \frac{\mathfrak{R}}{d} = 2.831 (\cot \beta)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{H}{d} \right)^{\frac{5}{4}}$$



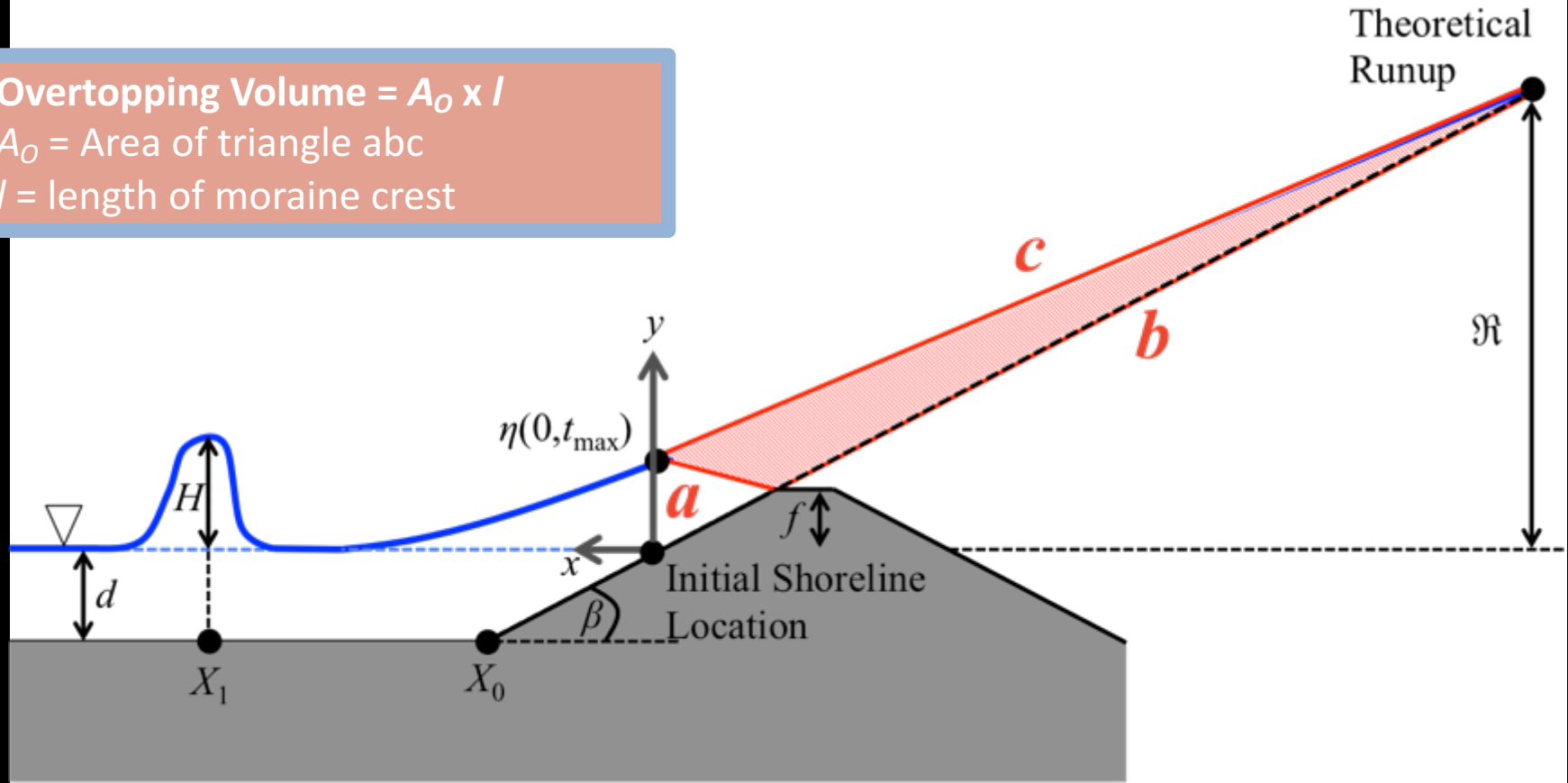
- Linear solitary wave theory
- Shallow water approximation

Las Ecuaciones de Tsunami Adaptadas para Lagunas Glaciares

Overtopping Volume = $A_o \times l$

A_o = Area of triangle abc

l = length of moraine crest



Ejemplo del Calculo del Volumen de Desborde: Artesonraju

Parámetros de Entrada:

Still water depth near the moraine (d)	10 m
Freeboard (f)	5 m
Length of the moraine crest (l)	200 m
Moraine slope (β)	30°
Distance to maximum wave height (X_1)	From Heller and Hager (2009) equations
Maximum wave height	From Heller and Hager (2009) equations

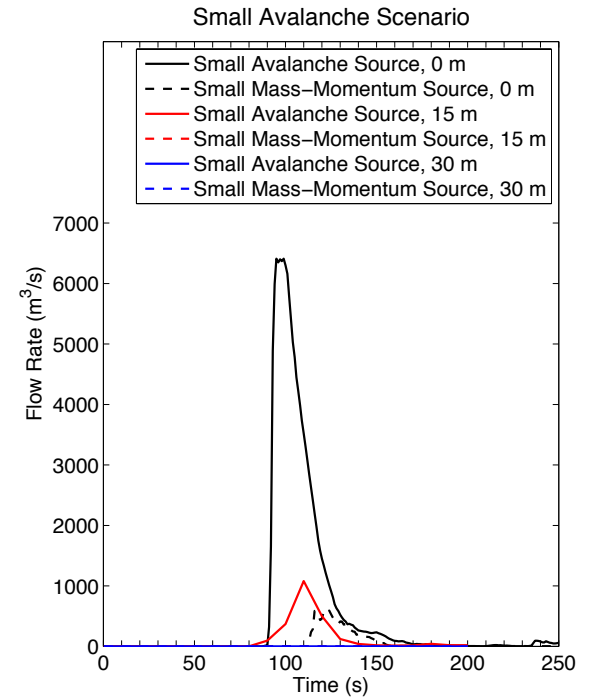
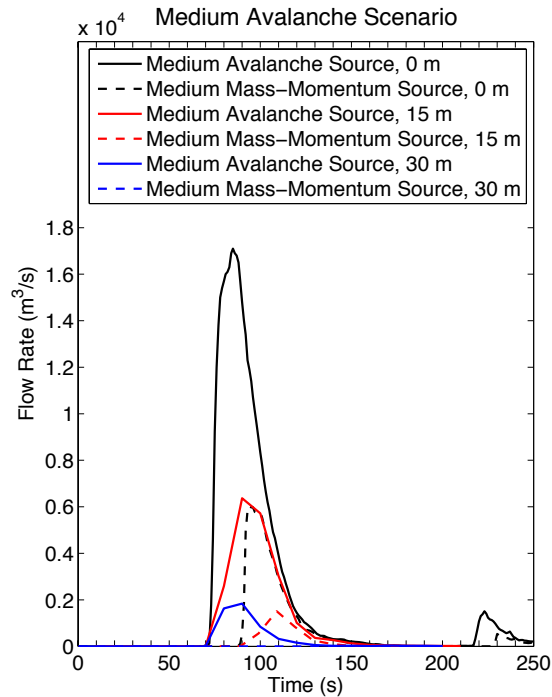
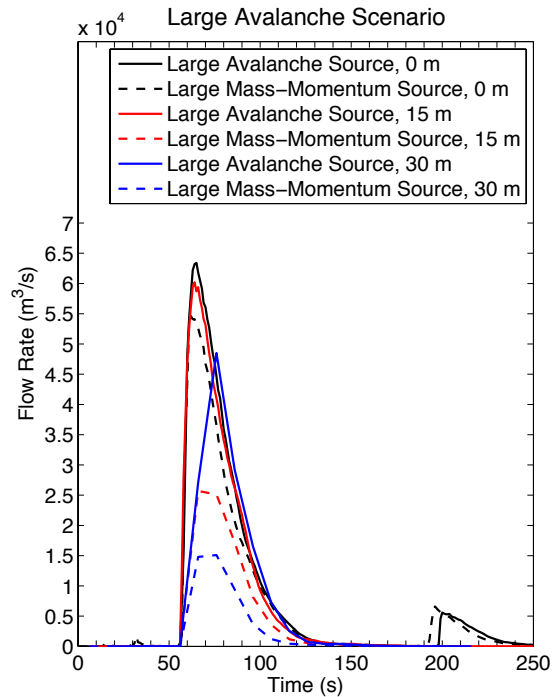
Avalanche Size	Maximum wave height (m)	Free surface elevation at $x=0$, $\eta(0, t_{\max})$ (m)	Theoretical runup height (m)	Total overtopping volume, V_o (m ³)
Large	45.8	25.4	249.6	1.08 x 10⁶
Medium	33.4	17.2	168.2	4.86 x 10⁵
Small	19.7	8.9	87.0	1.27 x 10⁵

¿PREGUNTAS?

Modelo 3D para Evaluar Escenarios de Mitigación en la Laguna Palcacocha

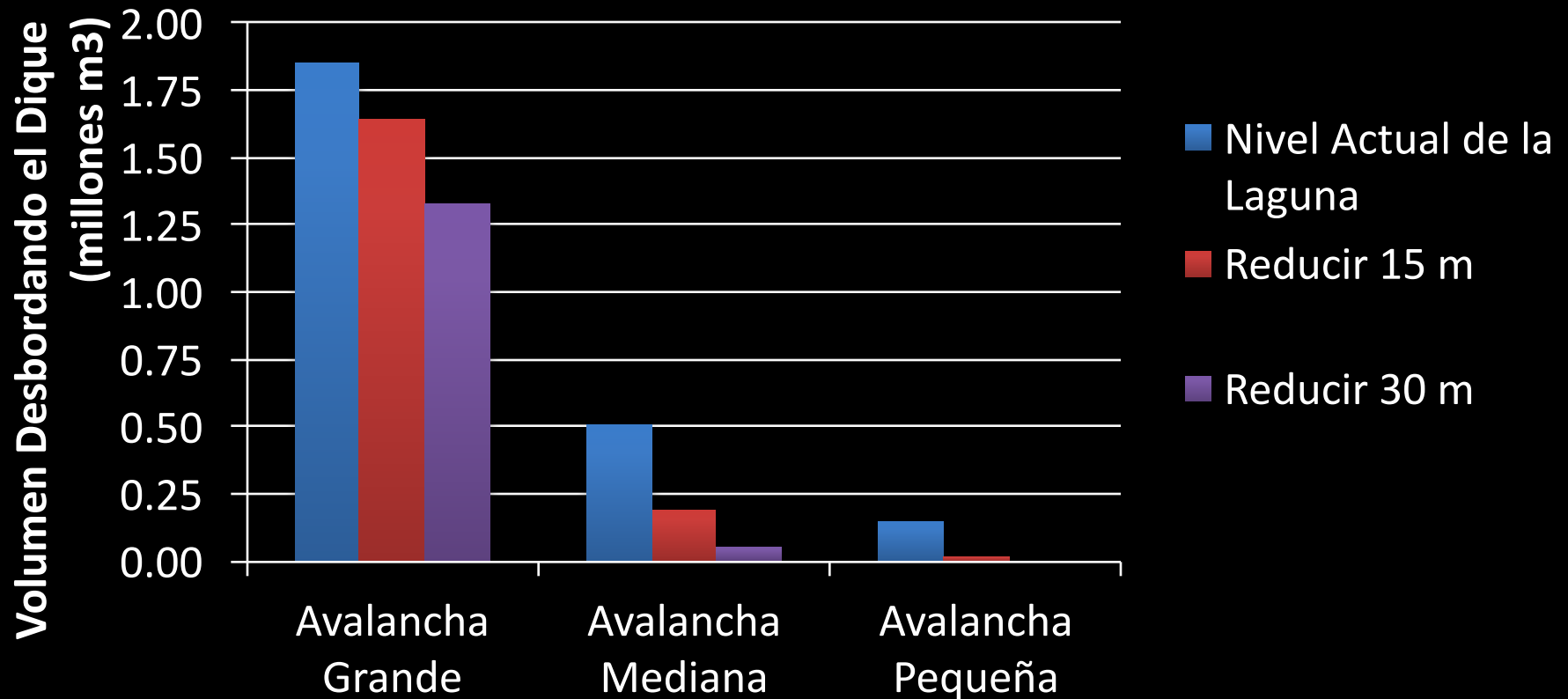
- 2 escenarios de mitigación
 - 15 m más abajo
 - 30 m más abajo
- Para ingresar a un modelo de inundación río abajo:
 - Volúmenes de desborde
 - Hidrogramas de descarga

Resultados: Escenarios de Mitigación de la Laguna Palcacocha



Palcacocha: Escenarios de Mitigación

Reducir el nivel de la Laguna



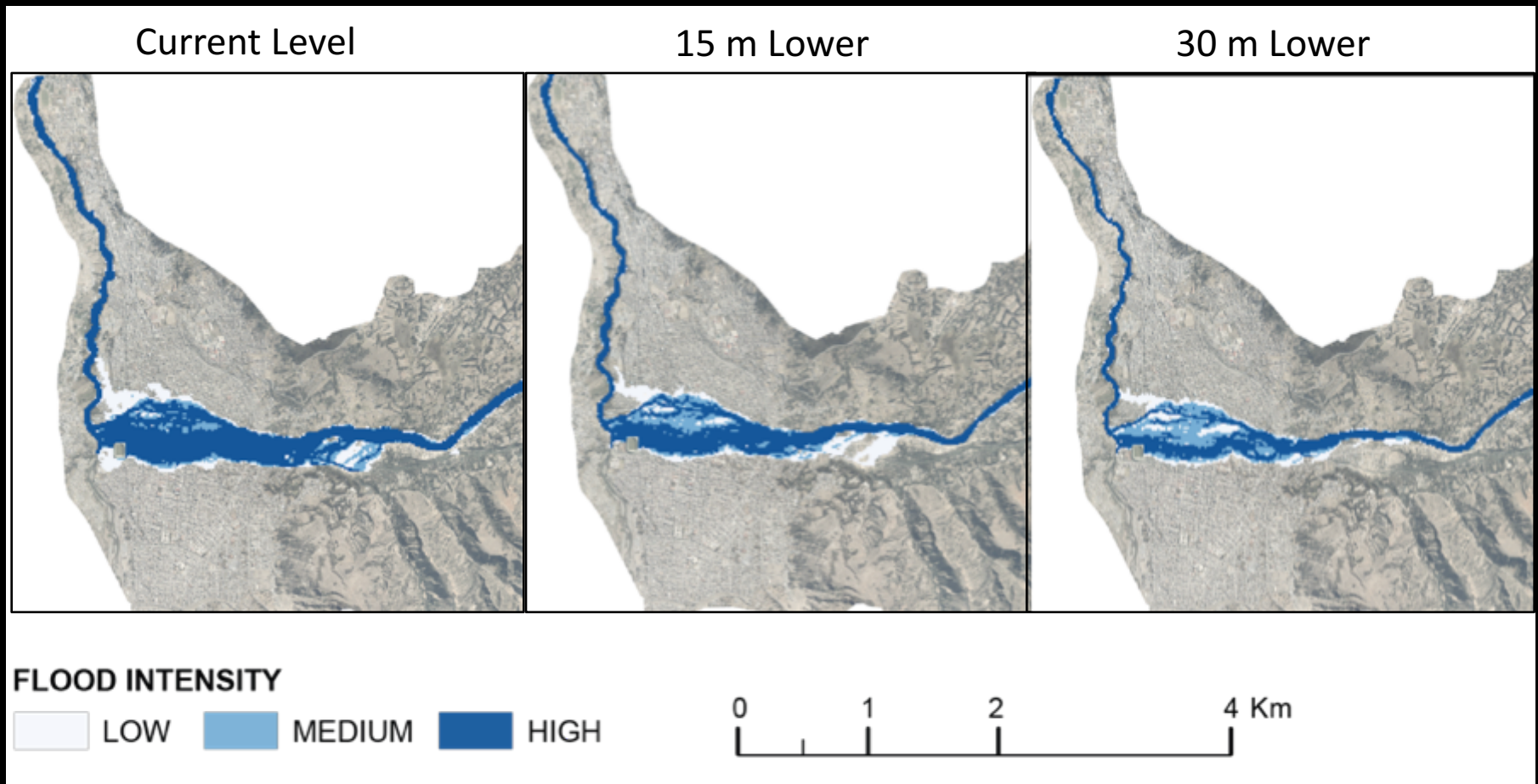
Results: Scenario Assessment

		Lake-lowering Scenario		
		Current Level	15 m Lower	30 m Lower
Avalanche Scenario	Large Avalanche Source	Not Safe	Not Safe	Not Safe
	Large Mass-momentum Source	Not Safe	Not Safe	Not Safe
	Medium Avalanche Source	Not Safe	Not Safe	Not Safe
	Medium Mass-momentum Source	Not Safe	Not Safe	Safe
	Small Avalanche Source	Not Safe	Safe	Safe
	Small Mass-momentum Source	Safe	Safe	Safe

Escenario seguro = no desborde

Escenarios de Mitigación: Impactos en Huaraz

Lake-Lowering Scenarios: Large Avalanche



Resumen

- 4 fases del oleaje
 - Generación
 - Propagación
 - Runup
 - Desborde (oleaje sobrepasando el dique)
- Modelos empíricos y hidrodinámicos

Resumen

- Oleajes generados por movimientos de masa pueden ser grandes (~ 10 -60 m de altura)
- El oleaje puede presentar un peligro para la áreas pobladas
- Modelamiento dinámico requiere un modelo no-hidrostático de 3D (2D SWE no es suficiente)
- Las ecuaciones empíricas de Heller y Hager son adecuadas para la generación de la ola, pero no dan buenos resultados para el desborde

¿PREGUNTAS?