



UNIVERSIDAD NACIONAL “SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”

ESCUELA DE POSTGRADO

SIMULACIÓN DE LA AMENAZA DE AVALANCHA Y SU RIESGO FÍSICO SOBRE LA LAGUNA PALCACOCHA EN LA MICROCUCENCA PARIÁ, HUARAZ, 2016-2017.

Tesis para optar el grado de Maestro
en Ciencias e Ingeniería
Mención: Gestión de Riesgo y Cambio Climático

GILBER GONZALES LIZARME

Asesor: Dr. TORIBIO MARCOS REYES RODRÍGUEZ

Huaraz – Áncash – Perú

2023

Nº Registro: T0867





UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO"
ESCUELA DE POSTGRADO

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

Los miembros del Jurado de Sustentación de Tesis, que suscriben, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Postgrado, de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" para calificar la Tesis presentada por el:

Bachiller : **GILBER GONZALES LIZARME**

Título : **"SIMULACIÓN DE LA AMENAZA DE AVALANCHA Y SU RIESGO FÍSICO SOBRE LA LAGUNA PALCACOCHA EN LA MICROCUENCA PARIÁ, HUARAZ 2016-2017"**

Después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas y observaciones finales, lo declaramos:


APROBADA, con el calificativo de Dieciséis (16)

De conformidad al Reglamento General a la Escuela de Postgrado y al Reglamento de Normas y Procedimientos para optar los Grados Académicos de Maestro y Doctor, queda en condición de ser aprobado por el Consejo de la Escuela de Postgrado y recibir el Grado Académico de Maestro en **CIENCIAS E INGENIERÍA** con mención en **GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO**, a otorgarse por el Honorable Consejo Universitario de la UNASAM.

Huaraz, 10 de noviembre del 2022


Mag. Javier Alberto Cotos Vera
PRESIDENTE


Dr. Tito Moner Tinoco Meyhuay
SECRETARIO


Dr. Toribio Marcos Reyes Rodríguez
VOCAL

Anexo de la R.C.U N° 126 -2022 -UNASAM
ANEXO 1
INFORME DE SIMILITUD.

El que suscribe (asesor) del trabajo de investigación titulado:

Presentado por: _____

con DNI N°: _____

para optar el Grado de Maestro en:

Informo que el documento del trabajo anteriormente indicado ha sido sometido a revisión, mediante la plataforma de evaluación de similitud, conforme al Artículo 11 ° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de : de similitud.

Evaluación y acciones del reporte de similitud para trabajos de investigación, tesis posgrado, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 11, inc 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones	Marque Con una X
Del 1 al 20%	Esta dentro del rango aceptable de similitud y podrá pasar al siguiente paso según sea el caso.	
Del 21 al 30%	Devolver al autor para las correcciones y se presente nuevamente el trabajo en evaluación.	
Mayores al 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes; sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de **Asesor responsable**, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software anti-plagio.

Huaraz,

Apellidos y Nombres: _____

DNI N°: _____

FIRMA

Se adjunta:

1. Reporte completo Generado por la plataforma de evaluación de similitud

MIEMBROS DEL JURADO

Magister Javier Alberto Cotos Vera

Presidente



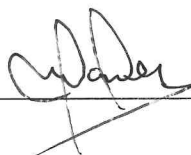
Doctor Tito Moner Tinoco Meyhuay

Secretario



Doctor Toribio Marcos Reyes Rodríguez

Vocal



ASESOR

Doctor Toribio Marcos Reyes Rodríguez



AGRADECIMIENTOS

- la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo por apoyarme en mi perfeccionamiento permanente.
- A mi asesor, por su apoyo y disposición positivas.
- A mis compañeros del Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua.
- Al ingeniero Arnaldo Tacsí Palacios, por el modelamiento del Glap-Top en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.
- Al ingeniero Cesar Salazar Checa por proporcionar la información batimétrica de la laguna Palcacocha.
- A los investigadores de las Universidades de Zurich, Texas y República Checa, por sus trabajos de investigación en alta montaña.



A Dios, por permitirme disfrutar de mi familia y seguir desarrollándome.

A mi esposa Yanina mi gran compañera incondicional, fuente de mucha
comprensión, fortaleza y soporte en momentos difíciles.

A mis hijos Eduardo y Camila principales pilares de sostenimiento, motivación y
orgullo.



ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	xiii
Abstract	xiv
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I	3
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1 Planteamiento y formulación del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Justificación	4
1.4 Delimitación	5
Capítulo II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Antecedentes de la investigación	7
2.2 Bases teóricas	10
2.3 Definición de términos	55
2.4 Hipótesis	58
2.5 Variables	58
Capítulo III	60
METODOLOGÍA	60
3.1 Tipo de investigación	60
3.2 Diseño de investigación	60
3.3 Población y muestra	60
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	61
3.5 Plan de procesamiento y análisis de datos	62



Capitulo IV	67
RESULTADOS Y DISCUSION	67
4.1 Presentación de resultados	67
4.2 Prueba de hipótesis	93
4.3 Discusión	94
Conclusiones	99
Recomendaciones	101
Referencias bibliográficas	103
Anexos	108



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación laguna Palcacocha en la sub cuenca río Quillcay.	6
Figura 2. Evolución de la laguna Palcacocha.	11
Figura 3. Amenazas de avalanchas en los nevados de Palcaraju y Pucaranra.	14
Figura 4. Laguna Palcacocha y sus zonas de amenazas.	16
Figura 5. Geología laguna Palcacocha.	17
Figura 6. Laguna Palcacocha 1939.	18
Figura 7. Laguna Palcacocha en el año 1940.	19
Figura 8. Deposito fluvio aluvial laguna Palcacocha.	19
Figura 9. Geomorfología laguna Palcacocha.	20
Figura 10: Plano batimétrico laguna Palcacocha.	21
Figura 11: Perfil longitudinal laguna Palcacocha.	21
Figura 12. Volúmenes movimientos de masas versus períodos de retorno.	26
Figura 13. Cadena de procesos de aluvión por desborde de laguna glaciár.	27
Figura 14. Dimensiones de bloques en glaciares.	36
Figura 15. Temperatura versus pendiente crítica de falla en glaciares.	37
Figura 16. Pendiente promedio y volumen de avalanchas de hielo en el mundo.	42
Figura 17. Parámetros en la generación de ondas de impulso.	45
Figura 18. Velocidad de impacto de deslizamiento.	46
Figura 19. Recorrido de la ola y el desbordamiento de la presa.	53
Figura 20. Glaciares agrietados sobre laguna Palcacocha.	68
Figura 21. Longitud de las grietas en la superficie del glaciár Palcaraju.	68
Figura 22. Trazado de bloques en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.	69



Figura 23. Bloques iniciadores de avalanchas de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.	70
Figura 24. Clasificación de la pendiente glaciar circundante a la laguna Palcacocha.	71
Figura 25. Caracterización de la pendiente con riesgo de avalancha glaciar.	71
Figura 26. Espesor de hielo circundante a la laguna Palcacocha.	72
Figura 27. Posibles bloques de hielo que se deslizarán hacia la laguna Palcacocha.	73
Figura 28. Recorrido de avalancha en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.	74
Figura 29. Simulación deslizamiento avalancha con el modelo MSF.	75
Figura 30. Puntos de impacto de las rutas de avalancha hacia la laguna Palcacocha.	76
Figura 31. Dique de contención de la laguna Palcacocha.	77
Figura 32. Distancia puntos de impacto al dique de contención de la laguna Palcacocha.	77
Figura 33. Altura de oleaje y desbordamiento producto de las avalanchas.	80
Figura 34. Altura de oleaje y desbordamiento con impacto frontal.	81
Figura 35. Altura de oleaje y desbordamiento con dique de contención vertical.	82
Figura 36. Altura de borde libre versus volumen de desbordamiento.	83
Figura 37. Mapa comparación pendiente y espesor glaciar.	84
Figura 38. Mapa comparación espesor de hielo y volumen de bloques de hielo.	85
Figura 39. Mapa comparación pendiente y altura de oleaje generado por bloques.	86



Figura 40. Comparación espesor glaciar y altura de oleaje generado por bloques.	87
Figura 41. Oleajes y volumen de desbordamientos generados por avalanchas.	89
Figura 42. Volumen de escombros producido por desbordamiento de laguna.	90
Figura 43. Velocidad media del flujo de escombros.	90
Figura 44. Longitud de recorrido y ancho de cono aluvial.	91
Figura 45. Croquis avalancha, generación de impulso y desbordamiento en laguna Palcacocha.	91
Figura 46. Perfiles longitudinales de las zonas de impacto hacia el dique de la laguna Palcacocha.	116
Figura 47. Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - B.	117
Figura 48. Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - C.	117
Figura 49. Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - D.	117
Figura 50. Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - E.	118
Figura 51. Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - F.	118
Figura 52. Perfil transversal de la laguna Palcacocha.	119
Figura 53. Perfil longitudinal laguna Palcacocha.	119

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Batimetría de la Laguna Palcacocha en el año 2016.	12
Tabla 2. Evolución de la laguna Palcacocha.	12
Tabla 3. Valores máximos empíricos de procesos de riesgo en los Alpes Europeos.	33
Tabla 4. Valores empíricos de volúmenes iniciales de avalanchas.	37
Tabla 5. Formulas empíricas estimación Qmax de desbordamiento en función volumen escombros.	39
Tabla 6. Probabilidad de ocurrencia cualitativa de riesgo en laguna de origen glaciar.	44
Tabla 7. Parámetros y limitaciones adimensionales en análisis de oleajes.	52
Tabla 8. Parámetros y limitaciones adimensionales en ascenso de la ola sobre el dique.	53
Tabla 9. Parámetros y limitaciones adimensionales del desborde de olas en el dique.	55
Tabla 10. Operacionalización de las variables de investigación.	59
Tabla 11. Características de desbordamiento de la laguna Palcacocha.	66
Tabla 12. Características geométricas laguna Palcacocha.	67
Tabla 13. Distancia y ángulos de impacto de avalanchas con dirección al dique.	78
Tabla 14. Parámetros geométricos básicos para análisis de oleaje de Palcacocha.	79
Tabla 15. Máximos valores en análisis de oleaje.	80
Tabla 16. Volumen máximo de desbordamiento en impacto frontal.	81



Tabla 17. Análisis de oleaje con escenario de dique de contención vertical.	82
Tabla 18. Reducción volumen desbordamiento con incremento de borde libre.	83
Tabla 19. Caracterización del desbordamiento de la laguna Palcacocha.	88
Tabla 20. Dimensiones de bloques de hielo de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.	109
Tabla 21. Características de bloques de hielo que colisionarán a la laguna Palcacocha.	110
Tabla 22. Características recorrido de los bloques que colisionarían a la laguna Palcacocha.	111
Tabla 23. Tabla datos de entrada y cálculo de la velocidad de caída de los bloques.	112
Tabla 24. Tabla parámetros dimensionales de verificación.	113
Tabla 25. Tabla análisis de altura de oleaje.	114
Tabla 26. Análisis de ascenso de oleaje y volumen de desbordamiento.	115



RESUMEN

La laguna Palcacocha y los glaciares Palcaraju y Pucaranra se ubican en la vertiente occidental de la Cordillera Blanca, en la cabecera de la subcuenca del río Quillcay afluente al río Santa, haciendo uso de herramientas tecnológicas como los sistemas de información geográficas, información topográfica del vaso de almacenamiento de la laguna Palcacocha, DEM de los glaciares de Palcacocha y Pucaranra y con el procedimiento para análisis de oleaje y desbordamiento, se ha simulado y analizado la cadena de proceso GLOF (glacier lake outburst flood – inundación por desborde violento de laguna), evaluando el riesgo físico de la laguna Palcacocha.

Los parámetros analizados con la información recopilada y con metodologías empleadas para la simulación de avalancha, evidencian que existe un impacto y este genera desbordes de la laguna con volumen de entre 2.65 hm³ a 0.19 hm³, deslizándose aguas abajo con velocidades de hasta 100 m/s e impactando a la laguna, generando oleajes de hasta 25.5 metros de alto y subidas de olas de hasta 62.3 metros; teniendo un borde libre de la laguna de 7 metros, con un dique de contención de material morrénico en su gran extensión y mampostería en la brecha del desagüe. Los oleajes generan desbordamiento que sobrepasan los 55.3 metros y 0.18 hm³ de desborde de agua de la laguna, provocando un flujo de escombros con velocidad de 5.8 m/seg, con máxima descarga de 364 m³/seg, con un volumen de escombros de 10.6 hm³. Este evento de avalanchas que impacta en la laguna genera un evento GLOF que pone en riesgo físico la laguna, con una probabilidad de estallido media, produciendo transporte y arrastre de materiales aguas abajo del valle.

Palabras claves: simulado, avalancha, oleaje, desbordamiento, flujo de escombros.



Abstract

The Palcacocha lagoon and the Palcaraju and Pucaranra glaciers are located on the western slope of the Cordillera Blanca, at the head of the Quillcay river sub-basin, a tributary to the Santa river, making use of technological tools such as geographic information systems, topographic information of the basin of storage of the Palcacocha lagoon, DEM of the Palcacocha and Pucaranra glaciers and with the procedure for wave and overflow analysis, the GLOF (glacier lake outburst flood) process chain has been simulated and analyzed. evaluating the physical risk of the Palcacocha lagoon.

The parameters analyzed with the information collected and with methodologies used for the avalanche simulation, show that there is an impact and this generates overflows of the lagoon with a volume of between 2.65 hm³ and 0.19 hm³, sliding downstream with speeds of up to 100 m/s and impacting the lagoon, generating waves of up to 25.5 meters high and wave rises of up to 62.3 meters; having a free edge of the lagoon of 7 meters, with a containment dike of moraine material in its great extension and masonry in the drainage gap. The waves generate overflows that exceed 55.3 meters and 0.18 hm³ of water overflow from the lagoon, causing a debris flow with a speed of 5.8 m/sec, with a maximum discharge of 364 m³/sec, with a debris volume of 10.6 hm³. This avalanche event that impacts the lagoon generates a GLOF event that puts the lagoon at physical risk, with a medium probability of bursting, producing transport and dragging of materials downstream of the valley.

Keywords: simulated, avalanche, waves, overflow, debris flow.



INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático en el planeta han generado el retroceso de los glaciares tropicales del mundo, según el segundo inventario nacional de glaciares y lagunas de la ANA (2014). Así, nuestro país contaba con 2679 glaciares con una superficie de 1 298.6 km² y en la actualidad el ANA publicó para el 2021 que se cuenta con 2025 glaciares con una superficie de 1 058.37 km² y 31 928 hm³ de volumen almacenado y una reducción de la superficie glaciar del 53 %. En este sentido, la cordillera Blanca que está en la región Áncash cuenta con una superficie glaciar del 431.43 km² y una pérdida de superficie glaciar de 40.49 % entre 1975 y 2019. Visto así, la reducción de las masas glaciares que son reservas hídricas sólidas ha generado la formación de lagunas de origen glaciar en vasos de almacenamiento morrénicos y/o rocosos que son propensos a deslizamientos, producto de avalanchas de hielo, nieve, rocas y material morrénico con dirección a la laguna en formación producto de la geodinámica externa. Estos procesos han generado eventos catastróficos como roturas de diques de vasos de almacenamiento de lagunas en Huaraz (1941) y adicionando procesos de geodinámica interna para provocar aludes como los ocurridos en la ciudad de Yungay en 1970.

Como es evidente, los eventos catastróficos han presentado procesos productos de la geodinámica externa en montañas, la cual se inicia con avalanchas de hielo hacia la laguna que impacta con gran velocidad formando olas como tsunamis que golpean en diversas direcciones y, finalmente, llega al dique de contención que pone en riesgo físico la laguna, logrando desbordarlo para erosionar los taludes y luego romper gran parte del dique para iniciar un estallido violento de desborde lacustre, provocando un flujo violento de agua llevando consigo material fluvio-glaciar de



arrastre en dirección al valle, afectando poblaciones e infraestructuras asentadas cerca de las riberas. Estos procesos se denominan evento GLOF, de sus siglas en inglés Glacier lake outburst flood, que significa inundación por desborde violento de lago glaciar.

Así pues, el conocimiento de la gestión de riesgos de desastres se ha vuelto indispensable en el desarrollo local y global de la sociedad, debido a los eventos GLOF que han generado antecedentes históricos de desastres como aluviones, produciendo desastres de dimensiones catastróficas.



Capítulo I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento y formulación del problema

La Cordillera Blanca es la cordillera tropical con mayor cantidad de glaciares del mundo. Debido al cambio climático global, la mayoría de los glaciares se están retirando y adelgazando. El retroceso de los glaciares conduce a la formación y el desarrollo de todo tipo de lagos glaciares potencialmente peligrosos (represas de lecho rocoso, represas de morrena y represas de hielo). La peligrosidad potencial de los lagos glaciares está fuertemente interconectada con los movimientos dinámicos de la pendiente: (1) la liberación repentina de agua de los lagos glaciares (GLOF) es causada principalmente por el movimiento dinámico de la pendiente hacia el lago (alrededor del 80 % en el Cordillera Blanca); (2) el agua liberada puede transformarse fácilmente en flujo de escombros o flujo de lodo, gracias a su alto potencial de erosión y transporte (Emmer et al, 2014).

Una de las consecuencias de la reciente recesión glacial es la formación y el crecimiento rápido de los lagos formados en el hocico de los glaciares. Un riesgo es que estas morrenas represar lagos glaciares podría fallar la liberación de un gran volumen de agua y la creación de una inundación lagos glaciares. Esto ocurrió el 12 de diciembre 1941, en el lago Palcacocha, Perú, inundando la ciudad de Huaraz y matando a varios miles de personas. (Somos M. et al 2014).

De los resultados publicados por la Autoridad Nacional del Agua (2021) en su publicación de “Reserva hídrica en los glaciares del Perú”, ha reducido el 53% de la superficie glacial (1 058.37 km²) y en la cordillera Blanca se ha perdido el 40.49% entre los años 1975 al 2019.



En este marco conceptual se ha desarrollado diversas investigaciones en determinar los impactos del retroceso de los glaciares como son la formación de lagunas y los fenómenos de desbordamiento intempestivo de las lagunas (GLOFS). Sin embargo, pocos estudios aplican metodologías que no requieran el uso de software y/o programas especializados que no son de código abierto, para las investigaciones que simulan deslizamientos en montañas y su impacto en la vulnerabilidad y/o riesgos físicos sobre estructuras naturales o artificiales de almacenamiento.

Bajo este concepto se plantea el problema de investigación siguiente:

¿La amenaza de avalancha es un evento geo climático peligroso asociada con el riesgo físico sobre la laguna Palcacocha?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Simular la amenaza de avalancha y su riesgo físico sobre la Laguna Palcacocha en la microcuenca Paria.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Identificar la amenaza de avalancha sobre la laguna Palcacocha.
- 2) Simular la amenaza de avalancha y su riesgo físico sobre la laguna Palcacocha.

1.3 Justificación

El proyecto de investigación justificó su ejecución por plantear una metodología para simular la amenaza de avalancha en la laguna Palcacocha, a través del análisis y simulación al deslizamiento de bloques de hielo que impactan en las lagunas provocando oleajes que amenazan con desbordamientos intempestivos y

provocando una crecida violenta como un evento GLOF que afectaría las zonas inundables del valle aguas abajo. En este sentido, la investigación recomienda aplicar estrategias de reducción y mitigación de los riesgos que producen las amenazas de avalancha con peligro de desborde lacustre al crear un evento GLOF. Por ello se propone una metodología para conocer el pre dimensionamiento de altura de dique de protección; estas medidas estructurales reducirán la vulnerabilidad de la población frente a desastres de origen geo climático y, por tanto, se menguará el riesgo.

1.4 Delimitación

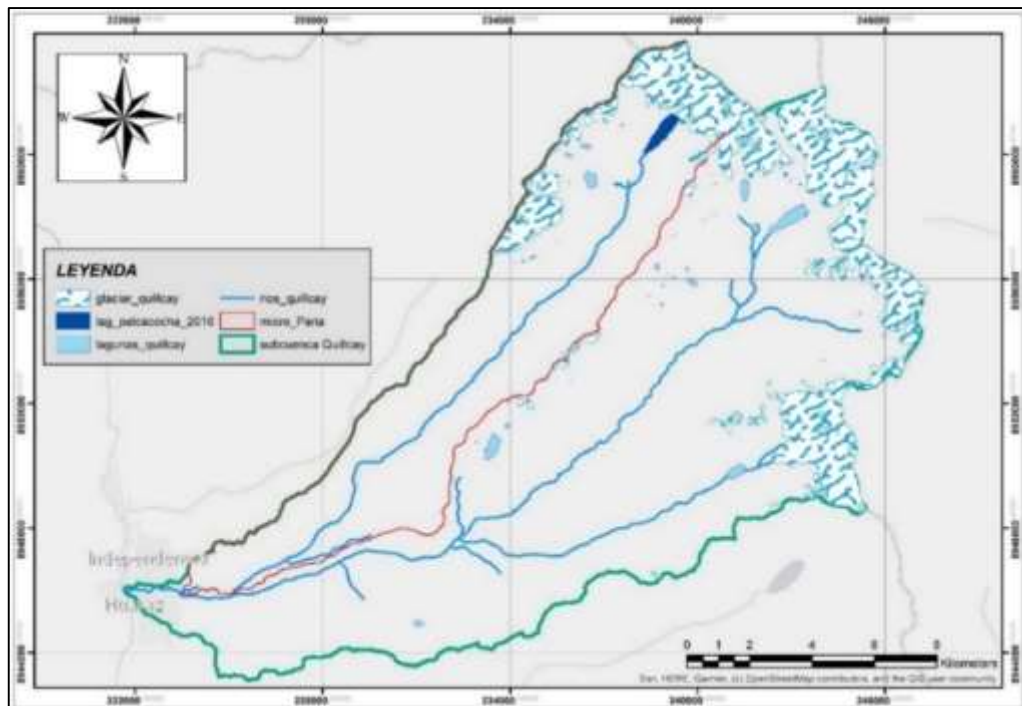
El área de estudio comprende los glaciares de Palcaraju (6 274 msnm) y Pucaranra (6 156 msnm) ubicadas en la vertiente occidental de la cordillera Blanca en forma de circo glaciar cuyas aguas producto del deshielo drenan hacia la laguna de Palcacocha (4 563 msnm) que están ubicadas en la cabecera de la quebrada de Cojup al este de la ciudad de Huaraz, sub cuenca del río Quillcay cuenca del río Santa, departamento de Ancash, Perú.

Se consideró los siguientes criterios para la delimitación de la zona de estudio:

1. Zonas que cuentan con información glaciológica, batimétrica y estudios previos disponibles por instituciones especializadas como la Autoridad Nacional del Agua.
2. La microcuenca cuenca hidrográfica de colección está definida y los glaciares de Palcaraju y Pucaranra drenan hacia la laguna de Palcacocha.

Figura 1

Ubicación de la laguna Palcacocha en la subcuenca río Quillcay.



Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Internacionales

Huggel et al., (2004) estudio un procedimiento de evaluación de peligros glaciales en los Alpes Suizos, el objetivo de su trabajo es la evaluación de peligros de avalanchas de hielo, inundaciones repentinas de lagos glaciares (GLOFS) y flujos de escombros que causan graves daños en regiones montañosas pobladas como los Alpes Suizos. La metodología se basa en la evaluación de tales peligros debe considerar los principios glaciológicos, geomorfológicos e hidráulicos básicos junto con la experiencia obtenida de eventos anteriores, presentando un enfoque para evaluar la magnitud máxima del evento y la probabilidad de ocurrencia de peligros glaciales. El análisis de magnitud se basa en relaciones empíricas derivadas de historias de casos publicadas de los Alpes Suizos y otras regiones montañosas. La probabilidad de ocurrencia es difícil de estimar debido a los rápidos cambios en la naturaleza de los sistemas glaciales, la baja frecuencia de eventos y la alta complejidad de los procesos involucrados. Aquí, la probabilidad se especifica en términos cualitativos y sistemáticos basados en indicadores como el tipo de presa, la geometría y la altura de francobordo (para lagos glaciares) y la tendencia de repetición de avalanchas. Los procedimientos de evaluación se aplican a un desbordamiento reciente de un lago con el subsiguiente flujo de escombros ya una avalancha de hielo en los Alpes suizos. Los resultados arrojan máximos de eventos razonables que no fueron excedidos por los



eventos reales, los métodos proporcionan evaluaciones de primer orden y se pueden aplicar en entornos montañosos dinámicos donde el crecimiento de la población y la infraestructura requieren una evaluación continua de los peligros.

Nacionales

Vilca, O. et al (2021), estudio la cadena de proceso de inundación por desbordamiento de lagos glaciares del 2020 en el lago Salkantaycocha de la cordillera Vilcabamba Perú, el objetivo de su trabajo es investigar la cadena de proceso GLOFS (desborde repentino de lagos glaciares) desencadenada por deslizamiento de tierra ocurrió el 23 de febrero de 2020 en la Cordillera Vilcabamba en los Andes peruanos. La metodología empleada se basó en analizar las situaciones antes y después del evento, así como la dinámica de la parte superior de la cadena del proceso GLOF, con base en investigaciones de campo, datos de sensores remotos, datos meteorológicos y una simulación por computadora con un modelo de flujo de dos fases. Los resultados obtenidos en: comparación de fotografías de campo antes y después del evento nos ayudó a estimar el volumen inicial del deslizamiento de tierra de 1 a 2 millones de m^3 , los datos meteorológicos sugieren precipitaciones y/o procesos de derretimiento/deshielo como posibles causas del deslizamiento de tierra, la simulación revela que el deslizamiento de tierra en el lago creó una ola de desplazamiento de 27 m de altura, la descarga pico GLOF en la presa alcanzó casi $10.000 m^3 /s$. Sin embargo, debido al alto francobordo, se drenó menos del 10 % del volumen del lago y el nivel del lago aumentó entre 10 y 15 m, ya que el volumen de material de derrumbe depositado en el lago



(aproximadamente 1,3 millones de m³) fue mucho mayor que el volumen de agua vertida (57.000 m³, según la simulación), los resultados del modelo muestran un buen ajuste con las observaciones, incluido el tiempo de viaje hasta el pueblo más alto.

Locales

Somos et al., (2016) en su estudio el modelado de la cadena del proceso de inundación por desbordamiento de un lago glaciar: el caso del lago Palcacocha y Huaraz Perú, el objetivo es presentar simulaciones de todos los procesos involucrados en un posible GLOF que se origina en la laguna Palcacocha. La metodología empleada es el estudio de los procesos GLOF que desencadenan por avalanchas que caen en lagos glaciares, iniciando una cadena de procesos que pueden culminar en una inundación y destrucción significativas aguas abajo, la cadena de procesos simulados incluye: (1) avalanchas sobre el lago; (2) la dinámica de los lagos como resultado del impacto de la avalancha, incluida la generación de olas, la propagación y la acumulación en los lagos; (3) simulación de morrena terminal y simulación dinámica de erosión de morrena para determinar la posibilidad de ruptura; (4) propagación de inundaciones a lo largo de los valles aguas abajo; y (5) inundación de áreas pobladas. Los resultados obtenidos de cada proceso alimentan las simulaciones de los procesos subsiguientes en la cadena, resultando finalmente en estimaciones de inundación en la ciudad de Huaraz, los resultados de las simulaciones de inundación se convirtieron en intensidad de inundación y mapas preliminares de amenaza (basados en una matriz de intensidad-probabilidad) que pueden ser útiles para la planificación y



regulación de la ciudad, tres eventos de avalancha con volúmenes que van desde $0,5$ a $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ y dos escenarios de descenso de lago de 15 y 30 m para evaluar el potencial de mitigación del nivel de amenaza en Huaraz; para los tres eventos de avalancha, los modelos hidrodinámicos tridimensionales muestran grandes olas generadas en el lago por el impacto que resultó en el desbordamiento de la morrena de represa, a pesar de las tasas de descarga muy altas (hasta $63,4 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), la erosión del desbordamiento de la ola no resultó en la falla de la morrena de represamiento cuando se simuló con un modelo hidromorfodinámico utilizando características de suelo excesivamente conservadoras que brindan muy poca resistencia a la erosión, con el nivel actual del lago, los tres eventos de avalanchas provocan inundaciones en Huaraz debido al desbordamiento de las olas, y el mapa de peligro preliminar resultante muestra un área total afectada de $2,01 \text{ km}^2$, la mayor parte de la cual se encuentra en la categoría de alto peligro, bajar el nivel del lago tiene el potencial de reducir el área afectada hasta en un 35% , lo que resulta en una porción más pequeña del área inundada en la categoría de peligro alto.

2.2 Bases teóricas

Evolución de la laguna Palcacocha

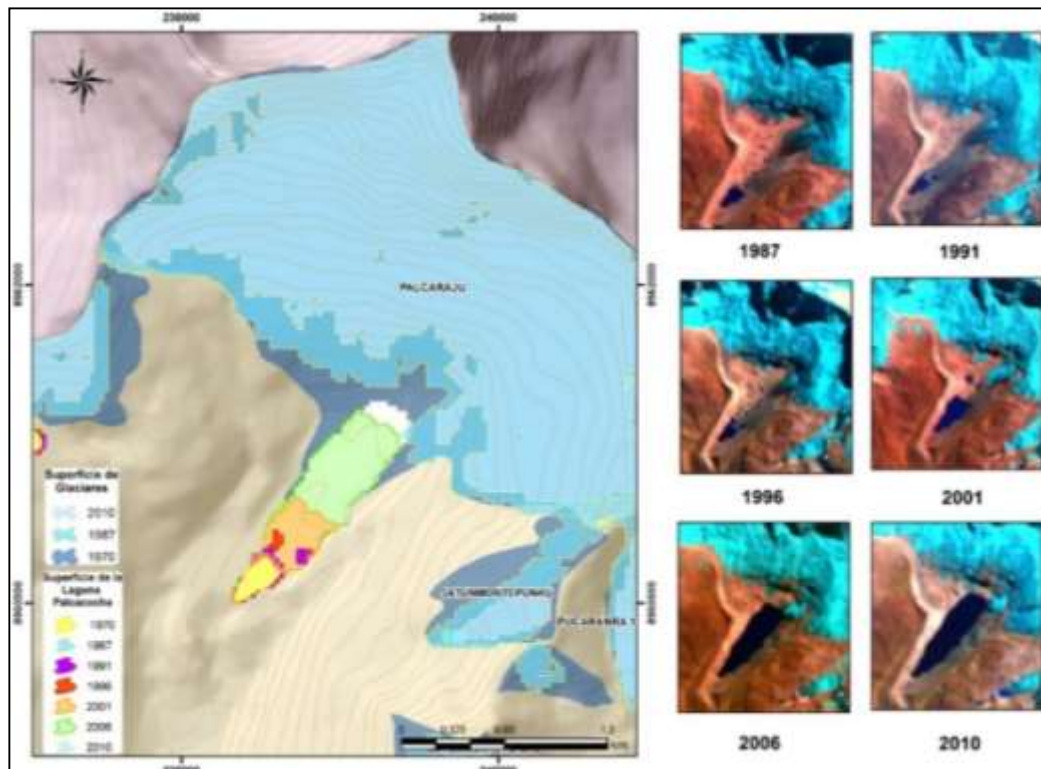
La laguna Palcacocha se originó del deshielo de la lengua glaciar de los nevados Palcaraju y Pucaranra (figura 2), presentando una evolución acelerada debido a los cambios de temperatura en forma creciente por el calentamiento global que está experimentando en la actualidad nuestro planeta. (INGEMMET, Informe Técnico N° A6631, 2013). Las morrenas

muestran el avance máximo de la lengua glaciaria, la cual experimentó una fusión formando lo que hoy se conoce como la Laguna Palcacocha. Se presume que estas morrenas fueron formadas en la pequeña era de hielo, la cual se desarrolló entre los años 1490 y 1880 D.C. (Véliz et al., 1994).

La ANA en el 2016 ha realizado la batimetría de la laguna Palcacocha y ha consolidado otras mediciones batimétricas realizadas entre los años 1974, 2009 y 2016, como se muestra en la figura 2 y en la tabla 1 y tabla 2.

Figura 2

Evolución de la laguna Palcacocha.



Fuente: ANA, 2016.

Tabla 1*Batimetría de la laguna Palcacocha en el año 2016.*

Forma	Dimensión	Unidad
Área del espejo de agua	514 157,38	m ²
Altitud del espejo de agua	4 562,88	msnm
Volumen almacenado	17 403 353,24	m ³
Profundidad máxima	71,10	m
Largo máximo	1 589,82	m
Ancho máximo	433,72	m
Coefficiente de circularidad	0,48	
Ancho medio	323,41	m
Profundidad media	33,85	m
Pendiente máxima al interior del vaso, lado posterior	32°	grados
Pendiente máxima al interior del vaso, lado frontal	53°	grados
Pendiente máxima al interior del vaso, lado derecho	48°	grados
Pendiente máxima al interior del vaso, lado izquierdo	46°	grados
Pendiente máxima del fondo de la laguna	4°	grados
Borde Libre	7,0	m

Fuente: ANA, 2016 (Batimetría 13/02/2016).

Tabla 2*Evolución de la laguna Palcacocha.*

Características físicas de la laguna Palcacocha	Batimetría año 1974	Batimetría año 2009	Batimetría año 2016	Cambio entre los años 1974 y 2016
Área del espejo de agua (m ²)	62 600	518 426	514 157	+ 451 557
Volumen almacenado (m ³)	514 800	17 325 207	17 403 353	+ 16 888 553
Profundidad máxima (m)	13	73	71	+ 58

Fuente: ANA, 2016.

Geología de la laguna Palcacocha

La laguna Palcacocha está en el circo glaciar conformado por los nevados Palcaraju y Pucaranra, donde se emplazan los glaciares que le dieron

origen debido al cambio climático (calentamiento global). De estos nevados, por desprendimiento del glaciar, se generó el gran aluvión de 1941 y por caída de morrena el pequeño aluvión del 2003. Como peligros potenciales la Autoridad Nacional de Agua ha identificado los siguientes (ANA, 2019):

Avalancha del glaciar: en el frente posterior de la laguna Palcacocha se tiene al batolito de la cordillera Blanca, con paredes verticales y luego una pendiente pronunciada, superficie sobre la cual se tiene hielo con espesores superiores a 5.00 m. Esta pendiente puede provocar en el hielo una serie de grietas que forman bloques, cuyo equilibrio es inestable y son los que pueden caer a la laguna; asimismo, se han reportado aludes de nieve y caída de pequeños bloques de hielo que provienen de los nevados Palcaraju y Pucaranra, ocasionando en algunos casos olas que pueden contribuir a la inestabilidad de las morrenas laterales y frontales (ANA, 2019).

Se tiene la presencia de hielo colgado en las partes altas de los nevados Palcaraju y Pucaranra, que pueden perder su estabilidad y caer provocando una avalancha. Al respecto, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), a través de su Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas (AEGL), ha realizado el mapeo de masas de hielo colgante y se ha estimado un volumen de 7 000 000 m³; las masas de hielo en situación colgante identificadas sobre la laguna Palcacocha se emplazan sobre un lecho rocoso, con ángulos de inclinación superiores a los 23°, que para glaciares temperados se considera una pendiente crítica (ANA, 2019).

Avalancha o caída de rocas: movimiento tipo flujo muy rápido y masivo de roca fragmentada producto de un gran deslizamiento o caída de rocas, como el que se produjo en 2003, en la morrena izquierda (ANA, 2019).

Caída de detritus o depósitos coluviales en la morena interna, que corresponde a la caída de detritos de los taludes, los cuales se acumulan al pie de las morrenas, el material es suelto, inconsolidado en una matriz limo-arenosa, contiene bloques y está en contacto con la laguna (depósito coluvial figura 9) (ANA, 2019).

Acorde con las observaciones de campo y el plano de pendientes, existirían dos zonas con peligro de avalanchas de hielo; una en el nevado Palcaraju y otra en el nevado Pucaranra; bajo las condiciones actuales, se ven estables, pero con eventos excepcionales, como: sismos, lluvias inusuales, un frente cálido, etc. podrían ocasionar caída del hielo colgado, produciendo avalanchas sobre la laguna y posteriormente generar aluviones. (ANA, 2019).

Figura 3

Amenazas de avalanchas en los nevados de Palcaraju y Pucaranra.



Fuente: ANA, 2019.

A partir de lo anterior, se ha establecido como prioridad, en función del volumen de hielo involucrado, la pendiente:

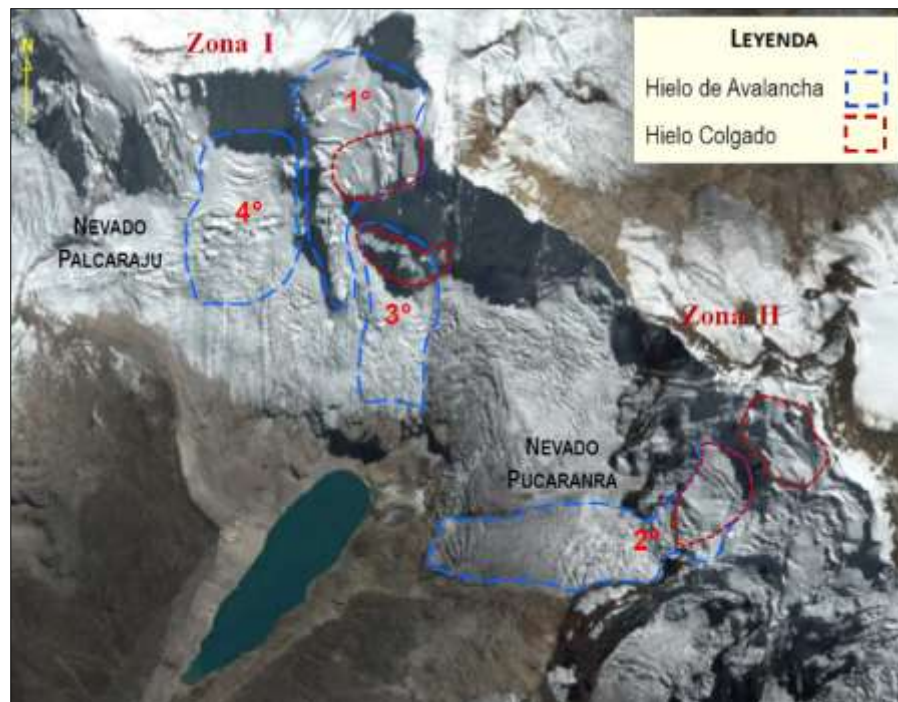
1. Ubicado en el Nevado Palcaraju, con hielo cerca de la cumbre, con una pendiente mayor a 23° , hasta mayor a 35° con hielo colgado (pendiente $> 35^\circ$). El basamento es el intrusivo félsico.
2. Ubicado en el Nevado Pucaranra, en la cabecera del glaciar, con pendiente mayor a 23° ; el basamento son las pizarras de la formación Chicama.
3. Ubicado en el Nevado Palcaraju, en la parte baja (al sur de 1°), tiene hielo colgado (pendiente $> 35^\circ$), el basamento es el intrusivo félsico.
4. Ubicado en el Nevado Palcaraju, en la parte baja (al norte de 1°), hielo con una pendiente entre 22° a 35° , el basamento es el intrusivo félsico.

A partir de lo anterior se ha estimado el volumen de agua que podría salir de la laguna, en un “nuevo aluvión”; se calcula entre 7 a 8 millones de m^3 (volumen algo similar al aluvión de 1941), desde la cota 4554 hasta la cota de 4530 msnm.



Figura 4

Laguna Palcacocha y sus zonas de amenazas.

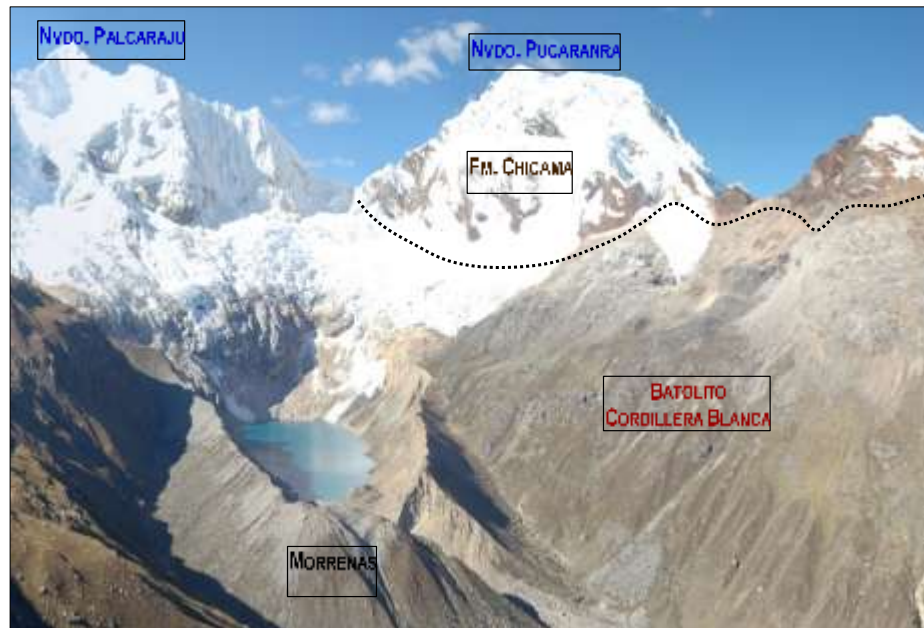


Fuente: ANA, 2019.

Como se aprecia, el basamento local de las lagunas está constituido por el Batolito de la cordillera Blanca, es un intrusivo de granodiorita - tonalita de color claro, leucócrata, constituido por cristales de plagioclasa sódica, feldespato-K, con cuarzo y láminas de biotita y muscovita en menor proporción (ANA, 2019).

Figura 5

Geología de la laguna Palcacocha.



Fuente: ANA, 2019

Las características geomecánicas indican que el intrusivo es compacto, masivo y resistente; los minerales están frescos y no presentan signos de alteración meteórica, lo que es una característica positiva de este macizo rocoso; por lo que este macizo es muy competente.

La geomorfología presenta un relieve abrupto, está representada por los glaciares, lagunas, depósitos morrénicos, depósitos fluvio-glaciares, valle glaciar y conos aluviales (ANA, 2019)

Geología vaso de la laguna Palcacocha

Está constituido por morrenas laterales y frontales; en la parte posterior afloran las rocas cristalinas del batolito, que coronan las cumbres cubiertas por los nevados de Palcaraju y Pucaranra.

Antes del aluvión de 1941, el glaciar cubría la mitad de la laguna (como se observa en la figura 6). La imagen corresponde a una fotografía tomada en 1939 por Hans Kinst & Shneider, que mostraron las fotos en un estudio de 1950, en las cuales se observa que la lengua glaciar que dio la formación de la laguna está en proceso de retroceso y formación de esta.

Figura 6

Laguna Palcacocha en el año 1939.



Fuente: Hans Kinzt & Erwin Shneider 1950.

La descarga de la laguna era por el margen izquierdo (figura 7), por donde excavó el canal), la caída de hielo del (os) glaciar(es), originó una gran ola que rompió el dique y excavó el canal de descarga. Así, gran parte del material (constituido principalmente por bloques de intrusivo) ha sido depositado en la parte exterior de la morrena (al SW), constituyendo la zona de deposición del material grueso, como se muestra en la figura 8.

Figura 7.

Laguna Palcacocha en el año 1940.



Fuente: Hans Kinzt & Erwin Shneider 1950.

Figura 8.

Depósito fluvio aluvial de la laguna Palcacocha.



Fuente: ANA, 2019.

En el valle de la laguna Palcacocha se ha observado 3 eventos de glaciación con sus respectivas morrenas (figura 9):

- **Morrena 1:** Ubicada en la parte inferior del valle, corresponde a un glaciar de baja intensidad, dentro del valle glaciar de la quebrada Cojup; es una colina suave de poca altura, cubierta por vegetación.
- **Morrena 2:** Es la que formó el vaso de la laguna Palcacocha, corresponde a una época de intensa actividad glaciar.
- **Morrena 3:** Es la última de la etapa glaciar que duró hasta después del aluvión de Huaraz (1941) y que corresponde al actual deshielo o retroceso, se observa en la parte llana (diques de seguridad) y continúa por debajo del espejo de agua de la laguna Palcacocha, como se observa en la figura 9, figura 10, figura 11, respectivamente.

Figura 9.

Geomorfología de la laguna Palcacocha.



Fuente: ANA, 2019.

Figura 10:

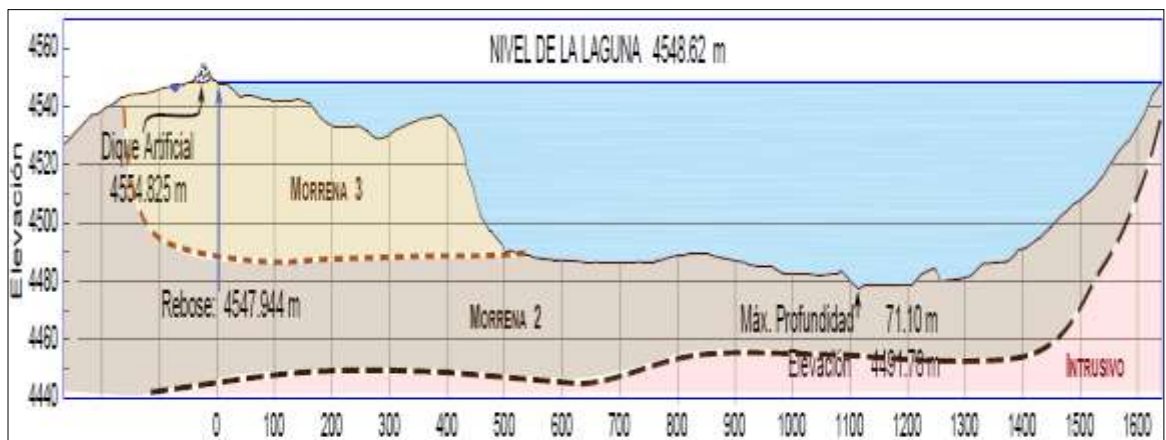
Plano batimétrico de la laguna Palcacocha.



Fuente: ANA, 2019.

Figura 11:

Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha.



Fuente: ANA, 2019.

Flujos de masas en glaciares

Los flujos son deslizamientos que adquieren grandes velocidades y que se comportan como fluidos viscosos en movimiento. Las masas se comportan como un fluido, pero su comportamiento es diferente al de los fluidos convencionales como el agua. Los deslizamientos tipo flujo (flujos de rocas

y residuos, flujos de residuos y de lodo y flujos hiperconcentrados) son fenómenos muy complejos que involucran grandes volúmenes de roca, residuos y suelo. Estos fenómenos presentan diferentes tipos de movimiento inicial (caídas, deslizamientos traslacionales, etc.) seguidos de un movimiento de flujo de fragmentos de roca o residuos con una movilidad anormal (Hungar et al., 2001).

Movimientos de masa en glaciares

Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra. Su origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la corteza terrestre y en la interfase entre esta, la hidrósfera y la atmósfera (Cárdenas et al., 2007).

Flujos de masa catastróficos

Los flujos de masa catastróficos abarcan varios procesos geomórficos que ocurren en ambientes de alta montaña y que consisten principalmente en movimientos pendiente abajo y aguas debajo de nieve, roca y escombros (Allen et al., 2017).

- **Avalanchas de roca**

Las avalanchas de roca se refieren a las fallas en los taludes del lecho rocoso que involucran flujos de alta velocidad pendiente abajo, tal como el movimiento fragmentado del material de origen, el cual se ha originado en una masa de roca intacta (Hungar et al., 2001).

- **Avalanchas de hielo y otras inestabilidades glaciares**

Las avalanchas de hielo se originan principalmente cuando el hielo se desprende: a) desde la escarpada o empinada sección frontal de un glaciar (denominada situaciones de acantilado (cliff), o b) desde un lecho de glaciar inclinado (denominada situación de rampa o losa) (Alean, 1985).

Faillietz et al., (2015) combinaron el monitoreo y modelamiento para aclarar los controles térmicos en la estabilidad glaciar, distinguiendo así tres posiciones, de las cuales es de interés para la zona que estamos en áreas de glaciares tropicales o glaciares temperados:

Lenguas glaciares temperadas, muy empinadas y sujetas a deslizamiento sobre su lecho rocoso; en cuyo caso la ruptura final se presenta directamente en el lecho rocoso, y el agua que fluye se presenta en la interfase del glaciar y el lecho rocoso. La inestabilidad resulta principalmente por los cambios rápidos en las presiones de agua subglaciar y requiere de una configuración geométrica crítica (pendiente empinada, que no tiene soporte frontal y topografía convexa del lecho).

- **Aluviones por desborde violento de lagunas glaciares (GLOFS)**

El término Aluvión por el Desborde Violento de una Laguna Glaciar (GLOF por sus siglas inglés, Glacier Lake Outburst Flood), es usado aquí para referirse a la catastrófica liberación del agua de un reservorio que ha sido formado al lado, en frente, dentro, debajo o sobre la superficie de un glaciar. Las estructuras de diques o represas que contienen el agua dentro del reservorio pueden estar compuestas

principalmente por hielo glaciario, escombros morrénicos o roca madre (Huggel et al., 2017).

- **Flujo de escombros**

Mientras los flujos de escombros se inician usualmente a partir del desborde de lagunas represadas con morrenas muy escarpadas, otros flujos de escombros sin desbordes violentos en entornos de alta montaña pueden originarse en morrenas muy empinadas, en pendientes de talud al pie de paramentos rocosos erosionados, en lenguas de glaciares de roca desestabilizados y en depósitos fluvio-glaciares dentro de cauces con bastante pendiente (Evans y Delaney, 2015).

- **Otros procesos de flujo de escombros relevantes**

Adicionalmente a los procesos descritos, existen otros varios peligros en el medio ambiente para y periglaciario de la alta montaña. La profunda deformación gravitacional de la pendiente en las paredes de las morrenas y en los escarpados flancos de la montaña, es un proceso paraglaciario gradual y frecuentemente de largo plazo, con implicaciones significativas para la infraestructura del lugar (Deline et al., 2015). Si bien las tasas de movimientos son generalmente muy bajas (centímetros a metros por año), si las condiciones de la pendiente o talud se deterioran más aún, los umbrales del factor desencadenante disminuirán dando lugar a una falla rápida catastrófica (McColl y Davies, 2013). En este contexto, los terremotos son importantes, pues constituyen un potencial detonante para todo tipo de movimiento de masa catastrófico (p. ej., Shugar et al., 2012; Van Der Woerd et al., 2004), pero también debido

a su efecto acumulativo en la estabilidad de la pendiente y en la evolución del paisaje o entorno al aumentar la erosión y la entrega de sedimentos de los sistemas de alta montaña (p. ej., Howarth et al., 2012; Schwanghart et al., 2016).

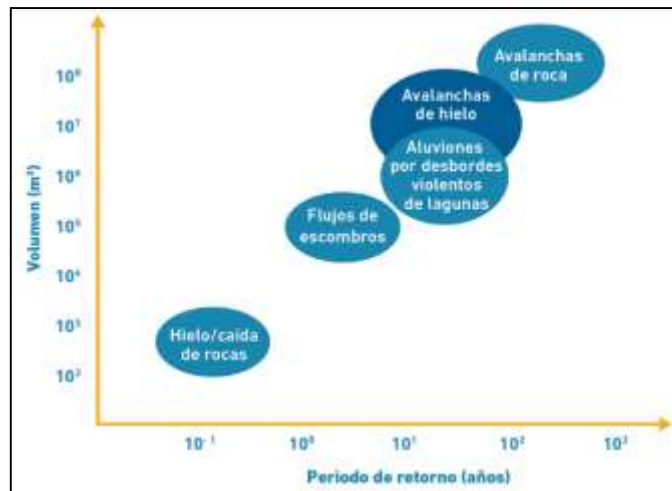
Interacción y dinámica de los procesos de flujo de masas en glaciares

1. Dimensión espacial y temporal de procesos y riesgos

Los peligros de los glaciares se caracterizan por una gran variedad de dimensiones espaciales y temporales (figura 12). En un extremo, dentro de la continuidad se presentan caídas de hielo y roca de pequeño volumen casi a diario en ambientes dinámicos de montaña, en particular durante los cálidos meses del verano, cuando las frecuencias de los eventos pueden estar estrechamente relacionadas con el calentamiento diurno y el derretimiento. Las amenazas de tales peligros están típicamente localizadas dentro del entorno de alta montaña, pero pueden ser motivo de preocupación, por ejemplo, cuando los turistas (tales como montañistas) atraviesan las rutas expuestas a dichos eventos (Temme, 2015). En el otro extremo de la continuidad, y comparativamente raro, las avalanchas de gran magnitud de hielo y/o roca tienen el potencial de alcanzar grandes distancias de recorrido y de esta manera amenazan a la gente y a la infraestructura ubicada lejos aguas abajo (Schneider et al., 2011), en particular donde estos eventos se transforman o donde se inician las cadenas de procesos (Huggel et al., 2017).

Figura 12.

Volúmenes de movimientos de masas versus períodos de retorno.



Fuente: Huggel et al., 2012.

2. Cadena de procesos de movimientos de masa glaciar

Una característica distintiva en la evaluación de los peligros del glaciar y el permafrost es la necesidad de considerar los procesos interactivos y sus impactos acumulativos aguas abajo. En efecto, algunos de los desastres más devastadores y de mayor alcance en las regiones de alta montaña han involucrado tales cadenas de proceso, comenzando como avalanchas de hielo y/o roca y convirtiéndose aguas abajo como flujos de escombros, de barro o hiperconcentrados (p. ej., Huggel et al., 2005; Lliboutry et al., 1977).

Por su parte, Worni et al. (2014) propone un boceto esquemático que muestra una típica cadena de aluvión por desborde de laguna glaciar, como resultado de un movimiento de masa inicial:

- 1) Un movimiento de masa (de hielo, roca o escombros) ingresa a una laguna violentamente.

- 2) El ingreso violento produce una onda de desplazamiento como oleajes.
- 3) Los oleajes sobrepasan el dique de contención del almacenamiento.
- 4) Los oleajes desbordantes erosionan los taludes aguas abajo de la represa.
- 5) A partir de ello, una inundación viaja río abajo a gran velocidad.
- 6) Están expuestas áreas con población e infraestructuras.

Por ello se debe considerar que las olas de desplazamiento pueden ser catastróficas con o sin erosión del área de la represa y, como tal, pueden ser una amenaza para lagunas represadas por lechos rocosos.

Figura 13

Cadena de procesos de aluvión por desborde de laguna glaciar.



Fuente: Worni et al., 2014.

3. Gestión de riesgo por amenaza de avalancha en glaciares tropicales

Los riesgos de los glaciares amenazan a las sociedades en las regiones montañosas de todo el mundo. Las inundaciones de arroyos en los lagos glaciares (GLOF, por sus siglas en inglés) representan riesgos para las poblaciones expuestas y vulnerables y pueden vincularse en parte con el cambio climático a largo plazo posterior a la pequeña edad de hielo debido a que los lagos de los glaciares están formados de forma precaria a veces

como glaciares que generalmente retrocedieron después de mediados del siglo XIX (Mark Carey et al., 2011).

Modelamiento de movimientos de masa en glaciares

Peligros glaciares por avalanchas de hielo provocan desbordes violentos de lagunas glaciares, generando amenazas importantes para las poblaciones e infraestructura en las regiones de alta montaña. Las evaluaciones de tales peligros son a menudo obstaculizadas por una comprensión incompleta de los procesos involucrados, y la naturaleza episódica y catastrófica de eventos relacionados limita la aplicación de modelos físicos básicos. En cambio, las evaluaciones son normalmente cualitativas o, en el mejor de los casos, semicuantitativas, basadas en principios glaciológicos, geomorfológicos e hidráulicos simples y de la experiencia, a partir de eventos anteriores (Costa 1988; Costa y Schuster, 1988; Haeberli et al., 1989; Dutto y Mortara, 1992; Clague y Evans, 1994). Se han realizado estudios sobre casos individuales (por ejemplo, Reynolds, 1992; Margreth y Funk, 1999; Haeberli et al., 2001). Sin embargo, una falta de referencia y materiales puede resultar en evaluaciones inconsistentes para condiciones similares en todo el mundo (Huggel et al., 2004).

El esquema de evaluación de las amenazas de avalanchas en glaciares que impactan violentamente en las lagunas de origen glaciar y que generan fuertes oleajes desbordados intempestivamente, son analizadas con la aplicación de herramientas tecnológicas. De esta manera, en la actualidad se tiene software que utilizan metodologías de elementos finitos una amplia gama de software especializados que utilizan metodología de elementos y volúmenes finitos

para la simulación de flujos geofísico. En tal sentido, en la presente investigación se utilizaron diversas herramientas tecnológicas para simular la amenaza de avalancha y sus efectos físicos.

1) Avalanchas glaciares y flujos de escombros de los desbordamientos de lagunas de origen glaciar

El esquema de evaluación de los riesgos de amenaza de avalanchas que generan peligros de los desbordamientos de lagunas de origen glaciar sigue la determinación del volumen de la laguna, la descarga, el volumen del flujo y la distancia de viaje. Las lagunas supraglaciares y proglaciares se reconocen mediante observación desde tierra o mediante cartografía basada en sensores remotos. Los cuerpos de agua subglaciares y englaciares no pueden observarse directamente, lo que requiere que se tenga en cuenta la experiencia histórica en estos casos. Después de la estimación del volumen de la laguna, se hace una distinción entre lagunas represadas por hielo, morrena y lecho rocoso, lo cual es esencial para las características del desborde violento. La formación posterior de un flujo de escombros o una ola de inundación se relaciona con el volumen del flujo, la distancia de viaje y el daño potencial. Por último, se consideran los posibles efectos secundarios y otras estrategias de evaluación (estudios de seguimiento, monitoreo). Las identificaciones de zonas agrietadas en glaciares se realizarán con el uso de herramientas tecnológicas como Google earthPro y el software SIG, las estimaciones de varios parámetros se basan en ecuaciones empíricas y valores a los que se hace referencia para dos casos, según Huggel et al. (2002).

- i.* Para la evaluación de los riesgos de avalanchas de hielo, se tiene en cuenta el tipo de glaciar como rampa o acantilado, pendiente de la superficie glaciar $> 25^\circ$ para glaciares temperados y estimación del volumen de desprendimiento glaciar.
- ii.* Para la evaluación de riesgos GLOF, conociendo los casos históricos de desbordamiento y el volumen de la laguna, se identificará el tipo de represamiento como roca, morrénico, hielo o artificial (concreto armado y/o mampostería), y la estimación de la descarga máxima por desbordamiento a consecuencia de los oleajes, distancia de recorrido, velocidad y volumen de sedimentos del flujo de escombros generado por el desbordamiento.

- **Herramienta GlabTop (topografía del lecho glaciar)**

El método se basa en una relación empírica entre el esfuerzo de cizallamiento basal promedio y el rango de elevación de los glaciares individuales, teniendo como hipótesis que la altura glaciar depende de la pendiente de la superficie: a mayor pendiente menor será la altura glaciar y viceversa. Los datos de entrada son la delimitación del área glaciar, un modelo de elevación digital y los ejes glaciares. La herramienta calcula la altura glaciar en puntos a lo largo de los ejes glaciares y luego los interpola dentro de los límites glaciares. GlabTop fue calibrada con información geométrica de paleo glaciares y validada con ecosondas de radio en glaciares contemporáneos (Linsbauer, Paul, y Haeberli, 2012).

$$h = \tau / (f \cdot \rho \cdot g \cdot \text{seno}(\alpha)) \quad (1)$$

Donde:

h: Altura glaciar (m)

τ : Esfuerzo cortante basal (Pa)

$$\tau = 0.005 + 1.598 \Delta H - 0.435 \Delta H^2$$

f: Factor de forma (0.8)

p: Densidad del hielo (900 kg/m³)

g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

α : pendiente de la superficie (grados)

ΔH : Rango de elevación del glaciar (m)

- **Modelo MSF (modified singular flow)**

Los flujos de escombros de los desbordamientos de lagunas se pueden describir como un medio que fluye desde una fuente determinada (es decir, el lago glaciar) hasta un determinado punto o área de desviación variable. Los algoritmos para transferir el flujo de forma secuencial a puntos o áreas inferiores generalmente se denominan algoritmos de enrutamiento (flujo) (Desmet y Govers, 1996). Dichos algoritmos determinan la forma en que se distribuirá el flujo de salida de un elemento o celda dado de acuerdo con ecuaciones matemáticas que representan procesos. Uno de los métodos de enrutamiento más antiguos y sencillos para especificar las direcciones de flujo es asignar el flujo de cada celda a uno de sus ocho vecinos, ya sea adyacente o diagonal, en la dirección del descenso más pronunciado. Este método, designado como D8 (ocho posibles direcciones de flujo), fue introducido por O'Callaghan

y Mark (1984) y sigue siendo uno de los más utilizados (Marks et al., 1984; Jenson y Domingue, 1988; Tarboton et al., 1991; Martz y Garbrecht, 1992). Además, se implementa en el software GIS Arc / Info (Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales, ESRI) como un estándar para el modelado de flujo hidrológico (función 'flowdirection', Jenson y Domingue, 1988), (Huggel et al., 2002).

- **Determinación del volumen de la laguna**

Una metodología de obtener el volumen de una laguna es a través de la batimetría, pocas lagunas cuentan con esta información por lo que se han desarrollado técnicas para detectar y mapear los lagos glaciares utilizando imágenes de satélite (Huggel et al., 2002). Los mapas topográficos para la derivación del área del lago a menudo no representan la situación actual y, por lo tanto, son generalmente menos apropiados. El volumen V (en m^3), de un lago glacial puede expresarse entonces en función del área A (en m^2) utilizando la relación empírica de Huggel et al. (2002):

$$V = 0.104 * A^{1.42} \quad (2)$$

Donde:

V = Volumen de laguna(m^3)

A = Área superficie de laguna o espejo de agua (m^2)

Tabla 3*Valores máximos empíricos de procesos de riesgo en Alpes Europeos.*

Magnitud del proceso	Valores empíricos		Nivel de confianza
Máximo volumen inicial, avalancha de hielo tipo rampa.	5×10^6	m^3	Medio
Máximo volumen inicial, avalancha de hielo tipo acantilado.	4×10^5	m^3	Medio
Máximo volumen de desbordamiento, laguna subglacial.	3×10^6	m^3	Bajo
Máxima descarga, laguna subglacial.	2×10^2	m^3/s	Bajo
Máxima distancia de recorrido avalancha de hielo (pendiente medio mínima).	17° (0.31)		Alto
Máxima distancia de recorrido desborde violento de laguna (flujo de escombros).	11° (0.20)		Alto
Máxima distancia de recorrido, desborde violento de laguna (sobrepaso de oleaje).	2 – 3°		Medio
Máxima generación de sedimento a lo largo del cauce del río. (grandes volúmenes de flujo de escombros por unidad de longitud).	750	m^3/m	Medio
Pendiente crítica del cauce para la erosión (flujo de escombros)	8°		Alto

Fuente: Huggel et al., 2002.

En la tabla 3 desarrollada por Huggel et al., (2002) recopiló valores relacionados con un grado cualitativo de confianza para evaluar las incertidumbres involucradas. El nivel de confianza indicado se basa en el número de eventos de los que se derivaron los valores empíricos.

- **La descarga máxima, Q_{max} probable**

Un desbordamiento violento de laguna depende en gran medida del tipo de presa o dique de contención y drenaje de regulación. Los mecanismos mecánica e hidráulicamente diferentes del drenaje de la laguna implican una distinción fundamental entre los lagos de diques de hielo, de morrenas y de dique rocoso. Para una evaluación de primer orden de la descarga máxima probable, Q_{max} (en m^3 / s), de rupturas repentinas de

represas de hielo, se propone la aplicación de la relación empírica de Haeberli (1983):

$$Q_{\max}=V/t \quad (3)$$

Donde:

V= Volumen de laguna en m³

t = Tiempo de desembalse en segundos, t = 1000 seg

Así, los desbordamientos violentos de los lagos con represas de morrenas pueden desencadenarse por desbordamientos, tubificación y filtraciones en cuerpo del dique, fallas en la pendiente corriente abajo o una combinación de ellas (Evans, 1986; Costa, 1988; Costa y Schuster, 1988; Clague y Evans, 2000). La mecánica de la formación de brechas aún no se conoce bien y los datos cuantitativos sobre las inundaciones observadas son escasos (Walder y O'Connor 1997). En este sentido, la complejidad de los procesos involucrados y las dificultades para determinar los parámetros de forma físicamente adecuada, justifican un método simple para una evaluación rápida de la descarga máxima probable (entendida como una mezcla de agua y sedimento). Así pues, para lagunas con dique morrénico Huggel et al. (2002), se recomienda la siguiente relación empírica:

$$Q_{\max}=2V/t \quad (4)$$

Donde:

V = Volumen de laguna en m³

t = Tiempo de desembalse en segundos, t=1000 seg

Para las lagunas subglaciares, Walder y Costa (1996) revisaron la relación propuesta por Clague y Mathews (1973) de la siguiente manera:

$$Q_{\max}=46(V/10^6)^{0.66} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.70$$

Donde:

Q_{\max} = Caudal máximo de descarga en m³/s

V = Parámetro de forma adimensional en m³

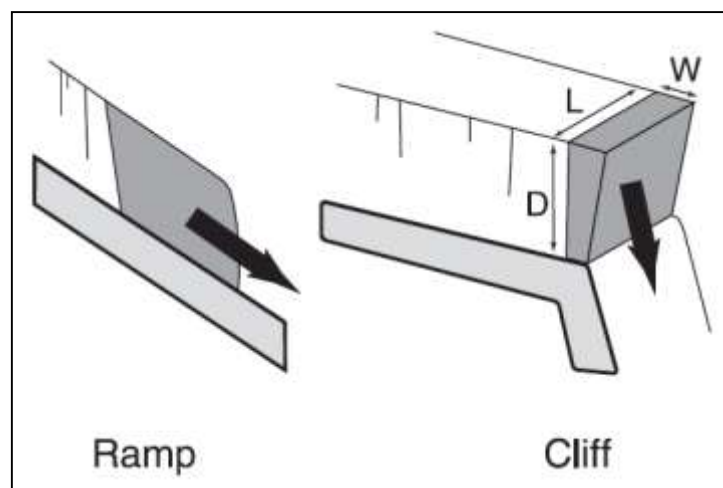
- **Volumen máximo de glaciar a desprenderse**

Los estudios exhaustivos de las avalanchas de hielo son escasos y la comprensión del proceso general es limitada. La recopilación y el análisis de datos de Alean (1985a) sigue siendo uno de la evaluación de las avalanchas de hielo de los glaciares escarpados y se basa en la experiencia empírica y la información topográfica. La clasificación de las zonas de inicio de la avalancha de hielo en un tipo de rampa y un tipo de acantilado ha demostrado ser útil para la diferenciación de situaciones peligrosas (figura 14) (Haefeli, 1966; Alean 1985a). Los glaciares de tipo acantilado se caracterizan por una marcada ruptura en la pendiente del lecho de roca y/o hielo. El desprendimiento se refiere a la extensión del flujo y la formación de grietas en lugar de a la pendiente promedio del lecho glaciar. La aparición de avalanchas de hielo en los glaciares de tipo rampa implica inestabilidades en la profundidad (interfaz hielo-roca) y valores críticos para la inclinación del lecho glaciar (Alean 1985a). Las condiciones de estabilidad y las pendientes críticas en tales casos dependen en gran medida de las condiciones de temperatura dentro y en la base del glaciar, donde la presencia de agua de deshielo provoca una reducción en la resistencia debido al aumento de la presión

de los poros y, por lo tanto, una reducción en el estrés efectivo. Una estimación similar del volumen inicial máximo probable es a menudo imposible para los glaciares de tipo rampa. Por lo tanto, las primeras estimaciones deben basarse en los volúmenes máximos observados liberados ($5 \times 10^6 \text{ m}^3$, ver tabla 4). Sin embargo, los eventos extraordinariamente grandes fuera de los Alpes europeos han superado el volumen indicado aquí en aproximadamente un orden de magnitud (por ejemplo, la avalancha de hielo y roca Kolka de 2002 en el Cáucaso ruso, Kääb et al., 2003a). En tal sentido, los tipos de avalancha en zonas de inicio con volumen potencial de inicio puede ser rompible para dos tipos de glaciares como rampa (ramp) y/o acantilado (Cliff), como lo mostrado en la figura siguiente, en la cual se muestra los dos tipos de glaciares que se desprenden para formar un deslizamiento:

Figura 14

Dimensiones de bloques en glaciares.



Fuente: Huggel et al., 2002.

Tabla 4.

Valores empíricos de volúmenes para inicio de avalanchas.

Magnitud del proceso	Valores empíricos	Nivel de confianza
Máx. Volumen inicial avalancha de hielo-tipo rampa	5.00E+06 m ³	medio
Máx. Volumen inicial avalancha de hielo-tipo acantilado	4.00E+05 m ³	medio

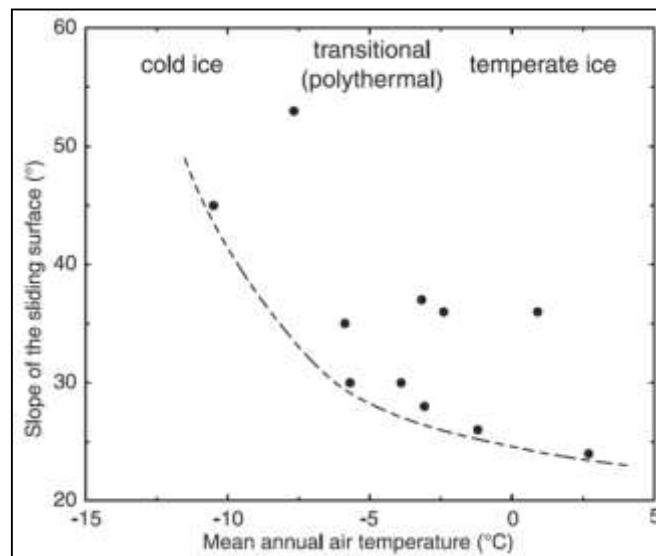
Fuente: Huggel et al., 2002.

- **Relación entre la temperatura media anual y la pendiente crítica de falla en glaciares temperados.**

Según Huggel et al. (2002), los glaciares fríos como lo polares producen avalanchas de hielo desde una pendiente mínima del lecho glaciar de 45 ° y más, mientras que los glaciares templados como los glaciares tropicales, lo hacen desde una inclinación mínima de 25 ° y más (Alean, 1985a).

Figura 15

Temperatura versus pendiente crítica de falla en glaciares.



Fuente: Huggel et al., 2002.

- **Relación descarga y volumen máximo probable de escombros por desbordamiento**

El conocimiento de la descarga máxima y la velocidad de flujo asociada son importantes al evaluar la capacidad de transporte de los alcances de los canales de flujo o de las secciones transversales críticas como, por ejemplo, debajo de los puentes. Se ha demostrado que se pueden establecer relaciones empíricas entre la descarga máxima, Q_p , de un flujo de escombros y el volumen de flujo de escombros (Hung et al., 1984; Mizuyama et al., 1992; Takahashi et al., 1994).

Los valores de descarga máxima para arrebatos causados por la ampliación progresiva y los canales de hielo se pueden calcular utilizando la fórmula totalmente empírica de Clague-Mathews (Habenerli, 1983):

$$Q_{\max} = 75*(V/10^6)^{0.67} \quad (6)$$

Donde:

Q_{\max} : Caudal máximo desborde de laguna en (m^3/seg).

V: Volumen de escombros generado por el flujo de escombros (m^3).

Mizuyama et al. (1992) describe otras relaciones empíricas para flujos de escombros de tipo granular y fangoso en Japón. Esta declaración es compatible con otras ecuaciones empíricas enumeradas en la tabla 5, que corresponde a graficar la descarga máxima (Q_p) de los flujos de escombros frente al volumen del flujo de escombros (M) (Rickenmann, 1999).

En la tabla 5 se muestran fórmulas empíricas para estimar la descarga máxima en función del volumen de flujo de escombros producto de un desbordamiento de laguna o inundación por rotura de presa. Los coeficientes de correlación R^2 son aquellos dados por los autores; "nn" indica que R^2 no se conoce y "N" es el número de eventos estudiados (Rickenmann, 1999).

Tabla 5

Fórmulas empíricas de estimación Q_{max} de desbordamiento en función volumen de escombros.

Base de datos	Fórmula	N	R^2	Fuente
Granular debris flows (Japan)	$Q_p = 0.135 M^{0.780}$	50	nn	Mizuyama et al. (1992)
Muddy debris flows (Japan)	$Q_p = 0.0188 M^{0.790}$	100	nn	Mizuyama et al. (1992)
Muddy debris flows (Indonesia)	$Q_p = 0.00558 M^{0.831}$	200	0.95	Jitousono et al. (1996)
Sakurajima volcano (Japan)	$Q_p = 0.00135 M^{0.870}$	100	0.81	Jitousono et al. (1996)
Landslide dam failures	$Q_p = 0.293 M^{0.56}$	9	0.76	Costa (1988b)
Glacial dam failures	$Q_p = 0.0163 M^{0.64}$	20	0.80	Costa (1988b)

Fuente: Rickenmann, 1999.

A partir de lo anterior, Rickenmann (1999), cita los autores de las fórmulas empíricas mostradas en la tabla 5, de las cuales la fórmula propuesta por Jitousono et al. (1996) presenta mayor coeficiente de correlación:

$$Q_p = 0.00558 * M^{0.831} \quad (7)$$

Donde:

Q_p : Descarga máxima del desborde de la laguna (m^3/s).

M : Volumen de escombros producto del flujo de escombros del desbordamiento de la laguna (m^3).

- **Relación (H) volumen de masa entrante y volumen de agua de la laguna**

Es importante para H=1:1 a 1:10, pues la laguna se puede vaciar completamente debido al desplazamiento del agua y para H=1:10 a 1:100. Así, la laguna genera desplazamiento de agua o de propagación de impacto con alta probabilidad de desbordamiento en función del borde libre y la estabilidad de la presa. El volumen de escombros es 750 m³/m (Huggel et al., 2002).

- **Determinación de la velocidad media de flujo máxima probable**

Para describir el comportamiento de flujo de los flujos de escombros se han propuesto una serie de enfoques y ecuaciones de resistencia de flujo. Para evaluar las ecuaciones constitutivas del comportamiento de corte de diferentes materiales de flujo de escombros, el conocimiento del perfil de velocidad sería muy útil (pero insuficiente). Sin embargo, tal información es muy difícil de obtener para el material de flujo real de escombros en el campo. La mayoría de las ecuaciones de flujo-resistencia, acordonadas para la velocidad media, se basan en datos empíricos de los parámetros de flujo promedio de los flujos de prototipos o en los perfiles de velocidad medida en flujos de laboratorio, en los que se han utilizado mezclas de materiales simplificadas para simular flujos de residuos. Rickenmann 1994, 1996 y 1998 propone una fórmula simplificada de la ecuación de velocidad media:

$$V = 2.1 * Q^{0.33} * S^{0.33} \quad (8)$$

Donde:

V: Velocidad media del flujo de escombros (m/s).

Q: Caudal pico del flujo de escombros (m³/s).

S: Pendiente longitudinal del cauce (m/m).

- **Distancia de recorrido del flujo de escombros máxima probable**

La distancia total de viaje L de un flujo de escombros puede ser importante para una delimitación aproximada de áreas potencialmente en peligro de extinción. De manera similar, se puede mostrar para los flujos de escombros que existe una dependencia de L en He y M. El producto de M y He puede considerarse como potencial energético del movimiento de masas (Rickenmann 1999).

$$L^* = 30(M*H_e)^{1/4} \quad (9)$$

Donde:

L*: Distancia de recorrido del flujo de escombros (m).

M*He: Energía potencial producto del volumen de escombros y la altitud del cauce (m⁴).

M: Volumen de escombros (m³).

He: Altitud máxima del cauce (m).

Huggel et al. (2002) representaron el volumen de avalancha frente a la pendiente promedio, mostrada en la figura 16 y con los datos de Körner (1983), Alean (1985a), Slupetzky (2002) obtuvo una regresión con el 95 % de intervalos de confianza.

$$\text{Tang}\alpha = 1.111 - 0.118\log(V) \quad (10)$$

$$R^2 = 0.84$$

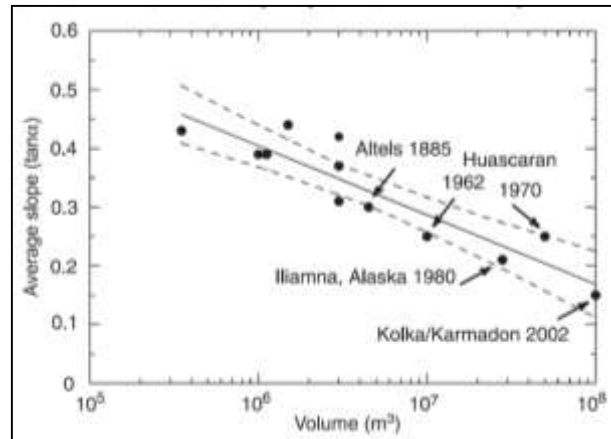
Donde:

α : Pendiente media.

V: Volumen de la avalancha de hielo proveniente del glaciar en m^3

Figura 16

Pendiente promedio y volumen de avalanchas de hielo en el mundo.



Fuente: Huggel et al. (2002)

- **Distancia de recorrido del cono aluvial máxima probable**

Para una descripción más detallada de las áreas potencialmente en peligro de extinción, se debe conocer la distancia de recorrido en el abanico aluvial que inició desde el vaso de almacenamiento hacia aguas abajo del valle. Así, L_f se define como la distancia desde el ápice del abanico hasta el punto más bajo de depósitos de escombros. A partir de consideraciones geométricas, se puede esperar que L_f dependa en cierta medida del volumen de flujo de escombros (Rickenmann, 1999).

$$L_{f*} = 15 * M^{1/3} \quad (11)$$

Donde:

L_{f*} : Ancho del abanico aluvial (m).

M: Volumen de escombros (m^3).

- **Determinación de la probabilidad de ocurrencia desborde de laguna glaciar generado por avalancha**

En casos críticos seleccionados, desafiar las mediciones en tierra (tasa de deformación del hielo) se ha logrado para la predicción de la aparición de aludes (Flotron, 1977; Iken, 1977; Röthlisberger, 1977; Lüthi y Funk, 1997). Para una aplicación más general, puede ser útil tener en cuenta que los eventos de caída de hielo más pequeños de frentes de glaciares empinados suelen ser más frecuentes que las avalanchas de hielo más grandes. Así, es posible que se aplique una relación de magnitud-frecuencia, pero las avalanchas de hielo son fenómenos raros y no hay información suficiente para el análisis que se propone una estimación bruta de la probabilidad de ocurrencia basada en cuatro indicadores:

Primero, se ha observado una tendencia a la repetición de la avalancha de hielo en la misma posición topográfica para los glaciares de tipo rampa (Röthlisberger, 1981; Alean 1985a; Funk y Minor, 2001).

Segundo, las avalanchas de hielo de los glaciares de tipo acantilado a menudo han sido precedidas por eventos de caída de hielo, con precursores más pequeños (Bieri, 1996; Margreth y Funk, 1999). Las observaciones de la actividad de caída de rocas desde zonas glaciares escarpadas también deben tomarse en consideración, ya que las fallas en las pendientes de las rocas han sido repetidas, desencadenando grandes avalanchas de hielo (Körner 1983; Käab et al., 2003a).

Tercero, las altas tasas de entrada de lluvia o agua derretida al lecho glaciar a través de la interfaz roca-glaciar y las grietas también pueden aumentar la probabilidad de falla (reducción de la fuerza en la base, Röthlisberger, 1987).

Cuarto, los patrones de grieta y su evolución temporal (si hay observaciones disponibles) pueden dar indicaciones de procesos de falla (Kääb et al., 2000).

En resumen, la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de avalanchas de hielo en la actualidad debe ser aproximativa y subjetiva, principalmente debido a los complejos procesos involucrados y a la falta de comprensión. Por ello, Huggel et al., 2002 propone una tabla para calificar cualitativamente la probabilidad de riesgo de ocurrencia de un evento GLOF de lagunas de origen glaciar:

Tabla 6

Probabilidad de ocurrencia cualitativa de riesgo en laguna de origen glaciar.

Indicador	Atributo	Probabilidad Cualitativa
Presa o dique tipo	Hielo	Alta
	Morrena	Media Alta
	Roca	Baja
Relación entre borde libre y altura de presa	Baja	Alto
	Media	Medio
	Alta	Bajo
Relación de ancho de presa a altura	pequeña, 0.1 - 0.2	Alto
	Mediana, 0.2 - 0.5	Medio
	Larga, >0.5	Baja
Olas de impacto por hielo o roca que llegan al lago frecuentemente	Frecuente, gran volumen	Alto
	Esporádico, medio volumen	Medio
	Poco probable, pequeño volumen	Baja
Eventos meteorológicos extremos	Frecuente	Alto
	Esporádico	Medio
	Poco probable	Baja

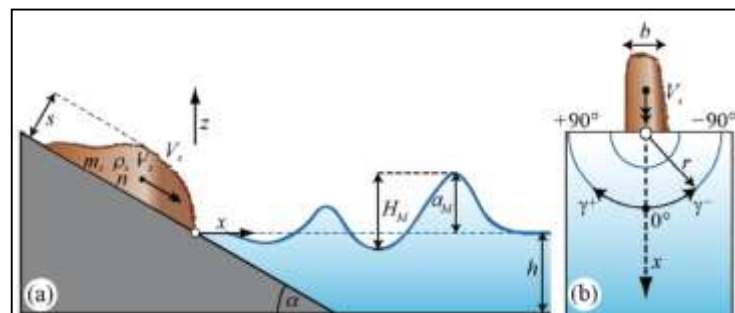
Fuente: Huggel et al., 2002.

2) Aproximaciones de las características de oleaje causadas por avalanchas

Las ondas de impulso generadas en los lagos naturales y embalses por el impacto de deslizamientos de hielo, nieve, roca o material morrénico pueden causar daños durante el impacto de las ondas como olas en las paredes laterales y el dique de contención o presa de contención. En este contexto, se debe prestar especial atención a las presas y, en particular, a las presas de terraplenes que, si se superan, puede sufrir graves daños o incluso fallar por completo. Por lo tanto, es de gran importancia que se conozca el tamaño de dichas olas y su altura de subida en la orilla o en la cara de la presa. Heller et al. (2009) aproximaron características hidráulicas importantes de una avalancha producto del deslizamiento y en la generación de un tsunami al impactar a un lago o laguna y los efectos hidráulicos de la propagación de las ondas con respecto al vaso de almacenamiento. Estas características son parámetros que definen el control de la generación de ondas de impulso en oleajes con características 2D y 3D.

Figura 17

Parámetros en la generación de ondas de impulso.

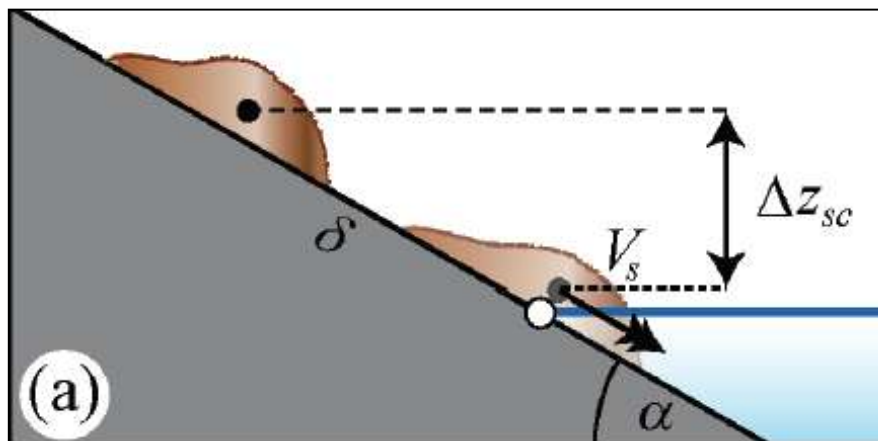


Fuente: Heller et al. (2009).

En la figura 17 se muestra el comportamiento de las ondas de impulso provocado por el deslizamiento de una avalancha de hielo, roca y/o morrena sobre la superficie de una laguna, lo cual genera olas (ondas de impulso (figura a) que se propagan de manera radial por la superficie del espejo de la laguna (figura b), la propagación de olas continúa hasta impactar con el dique de contención y taludes del vaso de almacenamiento. En la siguiente figura 18, se muestra los parámetros que definen la velocidad de impacto (V_s) en función a la pendiente de deslizamiento (α) y al desnivel de recorrido (Δz_{sc}) de un bloque de hielo (m).

Figura 18

Velocidad de impacto de deslizamiento.



Fuente: Heller et al. (2009).

✓ **Aproximación de la velocidad de la avalancha entrando a la laguna**

La velocidad de impacto del bloque de hielo V_s es la del centro de gravedad de la masa del bloque durante el impacto y puede expresarse mediante la ecuación de energía, teniendo en cuenta la fricción entre la diapositiva y la pendiente subyacente de inclinación constante (Körner 1976), representado en la siguiente fórmula:

$$V_s = \sqrt{2g\Delta z_{sc}(1 - \tan\delta \cot\alpha)} \quad (12)$$

Donde:

g = Aceleración de la gravedad; $g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$.

V_s = Velocidad de impacto de deslizamiento (m/s).

α = Ángulo de deslizamiento de impacto ($^\circ$).

δ = Ángulo de fricción del lecho dinámico ($^\circ$).

Δz_{sc} = Altura de caída desde el centro de gravedad de la masa (m).

✓ **Valores independientes de 2D y 3D**

Para el análisis de propagación de onda de oleaje en un reservorio o laguna de forma de canal (figura 16 (a)) o en un depósito o vaso de almacenamiento en forma de cuenca (figura 16.(b)), serán utilizadas las siguientes fórmulas:

Celeridad de la onda:

$$c = [g(h + a)]^{1/2} \quad (13)$$

Donde:

a = Amplitud de onda (m).

c = Celeridad de la onda (m / s).

g = Aceleración gravitacional; $g = 9.81 \text{ (m / s}^2\text{)}$.

h = Profundidad del agua quieta (m).

Amplitud de la onda:

$$a = \left(\frac{4}{5}\right) H \quad (14)$$

Donde:

a = Amplitud de onda (m).

H = Altura de la ola (m).

Parámetro del producto de impulso:

$$P = FS^{1/2}M^{1/4}\{\cos[(6/7) \alpha]\}^{1/2} \quad (15)$$

Donde:

b = Ancho del bloque (m).

F = Número de Froude; $F = V_s / (gh)^{1/2}$.

g = Aceleración gravitacional; $g = 9.81 \text{ (m / s}^2\text{)}$.

h = Profundidad de agua sin gas (en la zona de impacto de deslizamiento) (m).

M = Masa de deslizamiento relativa; $M = \rho_s V_s / (\rho_w b h^2)$

P = Parámetro del producto de impulso.

s = Espesor del bloque de hielo (m).

S = Espesor relativo del bloque de hielo; $S = s / h$

V_s = Velocidad de impacto del deslizamiento (m / s).

V_s = Volumen del bloque de hielo (m³).

α = Ángulo de impacto del deslizamiento (°).

ρ_s = Densidad de deslizamiento en masa (kg / m³).

ρ_w = Densidad del agua (kg / m³).

✓ **Parámetros para casos extremos en 2D:**

Las ecuaciones que se presentan aquí se basan en Heller (2007a). Son para el cálculo de ondas de impulso que se propagan confinadas, longitudinalmente en un reservorio, siguiendo el impacto de una masa deslizante en una dirección longitudinal. Con respecto a los efectos de las ondas de impulso en las represas, sobre todo la altura de onda “H” y la amplitud de onda “a”, son de particular importancia. Además, la

longitud de onda L y el período de onda T se toman en consideración y, de acuerdo con la teoría de la onda lineal, están conectados con la celeridad de la onda c como $L = Tc$. La altura máxima de la ola H_M en la zona de impacto de la diapositiva a menudo está formada por una pared de agua en lugar de una onda coherente como tal. Por esta razón, se hará una diferencia entre la altura máxima de onda H_M en la zona de impacto de deslizamiento y la altura de onda H en la zona de propagación de onda.

Altura máxima de onda:

$$H_M = (5/9)P^{4/5}h \quad (16)$$

Donde:

h = Profundidad de agua (en la zona de impacto de deslizamiento) (m).

H_M = Altura máxima de la ola (m).

P = Parámetro de producto de impulso.

Distancia máxima de recorrido:

$$x_M = (11/2)P^{1/2}h \quad (17)$$

Donde:

h = Profundidad de agua sin gas (en la zona de impacto de deslizamiento) (m).

P = Parámetro de producto de impulso de la ec. 2.15.

x_M = Distancia en sentido de la corriente de la amplitud de onda máxima desde la ubicación del impacto (m).

Periodo de la onda:

$$T_M = 9P^{1/2}(h/g)^{1/2} \quad (18)$$



Donde:

g = Aceleración gravitacional; $g = 9.81$ (m / s²).

h = Profundidad de agua sin gas (en la zona de impacto de deslizamiento) (m).

H_M = Altura máxima de la ola (m).

P = Parámetro de producto de impulso.

T_M = Periodo de onda de H_M (s).

Longitud de la onda:

$$L_M = T_M C \quad (19)$$

Donde:

c = Celeridad de onda solitaria (m / s).

H_M = Altura máxima de la ola (m).

L_M = Longitud de onda de H_M (m).

T_M = Periodo de onda de H_M (s).

✓ **Parámetros para casos extremos en 3D:**

Las ecuaciones para el caso 3D se basan en Heller (2007a), así como en el método de conversión de Huber y Hager (1997). Se pueden usar para analizar ondas de impulso que se propagan radial y completamente libres en un reservorio. La diferencia en el tamaño de las ondas de impulso entre los modelos 2D y 3D en la zona de impacto de deslizamiento es pequeña (Huber, 1980). Por lo tanto, la estimación de los valores máximos de altura de onda H_M en la zona de impacto de deslizamiento y el período correspondiente T_M y la longitud de onda L_M ,

también pueden determinarse a partir de las ecuaciones descritas anteriormente.

Altura de onda 3D:

$$H(r, \gamma) = (3/2)P^{4/5}\cos^2\left(\frac{2\gamma}{3}\right)(r/h)^{-2/3}h, \text{ para } h > X_M \quad (20)$$

Donde:

h = Profundidad de agua sin gas (en la zona de impacto de deslizamiento) (m).

H = Altura de la ola (m).

P = Parámetro de producto de impulso.

r = Distancia radial de la localización de impacto en base de la ola (m).

x_M = Distancia en sentido de la corriente de la amplitud de onda máxima desde el lugar de impacto (m).

X_M = Distancia relativa a la corriente de la onda máxima amplitud desde la ubicación de impacto; $X_M = x_M / h$.

γ = Ángulo de propagación de la ola ($^\circ$).

Periodo de onda:

$$T(r, \gamma) = 15\left(\frac{H}{h}\right)^{1/4}\left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} \quad (21)$$

Donde:

g = Aceleración gravitacional; $g = 9.81$ (m / s²).

h = Profundidad de agua (en la zona de impacto de deslizamiento) (m).

H = Altura máxima de ola (m).

T = Periodo de onda (s).

x_M = Distancia en sentido de la corriente de la amplitud de onda máxima desde el lugar de impacto (m).



X_M = Distancia relativa a la corriente de la onda máxima amplitud desde la ubicación de impacto; $X_M = x_M / h$.

Υ = Ángulo de propagación de la ola ($^\circ$).

Longitud de onda:

$$L(r, \Upsilon) = T(r, \Upsilon) c(r, \Upsilon) \quad (22)$$

Donde:

c = Celeridad de onda solitaria (m / s).

L = Longitud de onda (m).

r = Distancia radial de la localización de impacto en base de la ola (m).

T = Periodo de onda (s).

Υ = Ángulo de propagación de la ola ($^\circ$).

Tabla 7

Parámetros y limitaciones adimensionales en análisis de oleajes.

Parámetros dimensionales	Símbolo	Rango
Numero de Froude, deslizamiento	F	$0.86 \leq F \leq 6.83$
Espesor relativo del bloque	S	$0.09 \leq S \leq 1.64$
Densidad relativa del bloque	D	$0.59 \leq D \leq 1.72$
Volumen relativo del bloque	V	$0.05 \leq V \leq 5.94$
Masa relativa del deslizamiento	M	$0.11 \leq M \leq 10.02$
Porosidad	n	$30.7 \leq n \leq 43.3$
Ancho de deslizamiento relativo	B	$0.74 \leq B \leq 3.33$
Angulo de impacto	α	$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
Parámetro de producto de impulso	P	$0.17 \leq P \leq 8.13$
Distancia radial relativa inicio oleaje (impacto avalancha) y llegada de oleaje(dique)	r/h	$5 \leq r/h \leq 30$
Angulo de propagación de ola de inicio oleaje (impacto avalancha) y llegada de oleaje(dique)	Υ	$-90^\circ \leq \Upsilon \leq 90^\circ$

Fuente: Heller et al. (2009).



Tabla 8

Parámetros y limitaciones adimensionales en ascenso de la ola sobre el dique.

Parámetros dimensionales	Símbolo	Rango
Altura relativa de olas	H/h	$0.011 \leq H/h \leq 0.521$
Angulo de inclinación de olas	H/L	$0.001 \leq H/L \leq 0.013$
Angulo relativo	$90^\circ/\beta$	$1 \leq 90^\circ/\beta \leq 4.9$

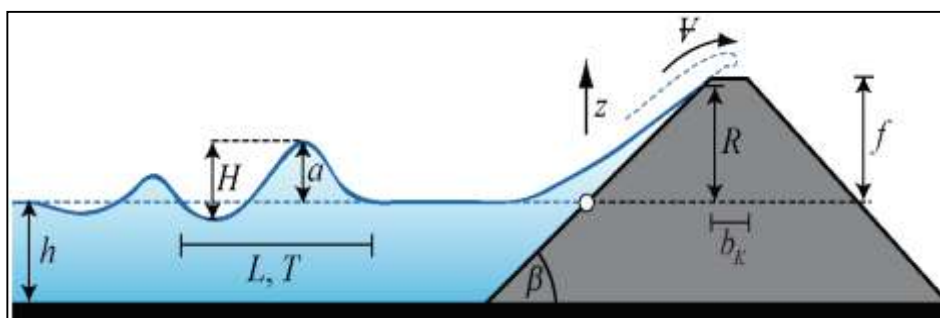
Fuente: Heller et al. (2009).

✓ **Ascenso de olas y derribo de presas.**

A diferencia de la generación de olas, las ecuaciones para el recorrido de las olas y la superación de represas se basan solo en investigaciones 2D. Los efectos 3D como la curvatura de la presa o los ángulos de impacto de onda asimétricos no se pueden tener en cuenta en general. Al contrario, deben estimarse utilizando las ecuaciones anteriores de aplicación general, una vez que se haya completado el cálculo inicial. Así, en la figura 19 se muestra el recorrido de las ondas de impulso (olas), las cuales impactan contra un dique de contención y desbordan con un ascenso (z) sobrepasando la altura del dique (R) con un volumen de agua (\forall) producto de la crecida.

Figura 19

Recorrido de la ola y el desbordamiento de la presa.



Fuente: Heller et al. (2009).

Ola de ascenso y desbordamiento:

Las siguientes ecuaciones se toman de Müller (1995)

$$R = 1.25(H/h)^{5/4}(H/L)^{-3/20}(90^\circ/\beta)^{1/5}h \quad (23)$$

Donde:

h = Profundidad del agua en calma (frente a la presa) (m).

H = Altura de la ola (frente a la presa) (m).

L = Longitud de onda (frente a la presa) (m).

R = Altura de subida (m).

β = Ángulo de aceleración igual a la pendiente de la cara de la presa ($^\circ$).

Volumen de desbordamiento de olas

$$V_0 = 1.45k(H/h)^{4/3} \left(\frac{T}{\sqrt{h/g}} \right)^{4/9} h^2 \quad (24)$$

Donde:

f = Borde libre del dique (Figura 2.18) (m).

g = Aceleración gravitacional; $g = 9.81$ (m / s²).

h = Profundidad del agua en calma (frente a la presa) (m).

H = Altura de la ola (frente a la presa) (m).

T (s) = Periodo de onda (frente a la presa).

V_0 = Volumen de desbordamiento por unidad de longitud Cresta de dique para $f = 0$ (m³ / m).

κ = Coeficiente de sobreimpresión para sobresalir; $\kappa = \kappa_q^* \kappa_b^* \kappa_w^{3/2}$

κ_b = Coeficiente de sobrecarga para el ancho de la cresta.

κ_q = Coeficiente de cobertura para el caso estable.

κ_w = Coeficiente de sobrecarga para el aumento de la energía de flujo.

Volumen de desbordamiento para borde libre >0

$$V = V_0 * (1 - f/R)^{11/5} \quad (25)$$

Donde:

f = Borde libre del dique (m).

R= Altura de subida de la ola (m).

V= Volumen de desbordamiento por unidad de longitud del dique (m³/m).

V₀= Volumen de desbordamiento por unidad de longitud del dique para f=0.

Tabla 9

Parámetros y limitaciones adimensionales del desborde de olas en el dique.

Parámetros dimensionales	Símbolo	rango
Altura relativa de olas	H/h	$0.019 \leq H/h \leq 0.488$
No linealidad	a/H	$0.59 \leq a/H \leq 0.95$
Inclinación de las olas	H/L	$0.02 \leq H/L \leq 0.023$
Periodo relativo	$T(g/h)^{1/2}$	$9 \leq T(g/h)^{1/2} \leq 21$
Celeridad onda relativa	$c^2/(gh)$	$0.83 \leq c^2/(gh) \leq 1.4$
Longitud de onda relativa	L/h	$6 \leq L/h \leq 24$
Angulo relativo	$90^\circ/\beta$	$1 \leq 90^\circ/\beta \leq 4.9$

Fuente: Heller et al. (2009).

2.3 Definición de términos

▪ **Avalancha**

Desprendimiento violento, en un frente glaciar, pendiente abajo, de una gran masa de nieve o hielo acompañado en algunos casos de fragmentos rocosos de diversos tamaños y sedimentos de diferente granulometría (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010).

- **Cambio climático**

Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo regulares (Kuroiwa Orihuchi, 2002). Variación del estado del clima inidentificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra (Barker y Ipcc, 2007).

- **Desastre natural**

El desastre se define como una interrupción severa en el funcionamiento de la sociedad. Causa vastas pérdidas humanas, materiales, ambientales, culturales, económicas, etc., además de gran sufrimiento humano. La sociedad afectada no puede seguir adelante por sus propios medios, requiere de la ayuda nacional y/o internacional. Los desastres se clasifican de acuerdo con el fenómeno causal, sea natural o antrópico (DIRDN, 1992; Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010).

- **Desglaciación**

Retroceso o disminución de la cobertura de hielo del glaciar de una montaña, producto del calentamiento global (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010).

- **Gestión de riesgo de desastres**

Es un proceso social, de naturaleza sistémica, transversal, descentralizado y participativo, de formulación y adopción de políticas, desarrollo de estrategias y acciones orientadas a evitar la generación de nuevos riesgos, reducir los riesgos de desastres existentes, garantizar una respuesta oportuna y minimizar los efectos derivados de la materialización de los riesgos, en emergencias y desastres. Por tanto, el proceso de la Gestión del Riesgo de Desastres comprende los siguientes procesos: Estimación del Riesgo, Reducción del Riesgo, Respuesta, Reconstrucción (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010).

- **Glaciar**

Masa de hielo depositado en las cimas de las montañas durante periodos climáticos glaciares. Se acumula por encima del nivel de las nieves perpetuas (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010).

- **Mitigación**

Reducción de los efectos de un desastre, principalmente disminuyendo la vulnerabilidad. Las medidas de prevención que se toman a nivel de ingeniería, dictado de normas legales, la planificación y otros, están orientados a la protección de vidas humanas, de bienes materiales y de producción contra desastres de origen natural, biológico y tecnológico (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2004).

- **Amenazas**

Es el grado de exposición de un lugar o emplazamiento de los fenómenos naturales dentro de un periodo determinado, independiente

de lo que sobre dicha ubicación o se construya (Kuroiwa, 2002).

- **Riesgos**

Es el resultado de la exposición de la construcción hecha por el hombre, con el grado de vulnerabilidad que le es inherente, frente al peligro al que se verá sometido (Kuroiwa, 2002).

- **Vulnerabilidad**

Se refiere al grado de daños que puede sufrir las edificaciones que realiza el hombre y depende de las características de su diseño, de la calidad de los materiales y de la técnica de construcción (Kuroiwa, 2002).

2.4 Hipótesis

Hipótesis general

La ocurrencia de avalancha ocasiona un riesgo físico de grado medio sobre la laguna Palcacocha de la microcuenca Paria.

Hipótesis específicas

- 1) La amenaza de avalancha está relacionada con la pendiente y con el espesor de hielo del glaciar.
2. La ocurrencia de avalancha sobre la laguna Palcacocha ocasiona riesgo físico de grado medio.
- 3.

2.5 Variables

Definición de variables

En el trabajo de investigación se han considerado las siguientes variables:

Variable independiente: Amenaza de avalancha.

Variable dependiente: Riesgos físicos en la laguna Palcacocha.

Operacionalización de variables

A continuación, se muestra en la siguiente tabla la operacionalización de las variables de investigación.

Tabla 10

Operacionalización de las variables de investigación.

Variables	Definición conceptual	Indicadores
Independiente: Amenaza de avalancha.	El cambio climático ha acelerado el retroceso de los glaciares, generando pendientes inestables en las superficies y generando zonas de agrietamiento que están en riesgo latente a desprenderse, provocando avalanchas con dirección de impacto violento hacia la laguna que provocaría grandes oleajes que desencadenarían desborde intempestivo al vaso de almacenamiento.	<ol style="list-style-type: none">1. Identificación de grietas y número de bloques a deslizarse en glaciares.2. Pendiente de la cobertura glaciar.3. Espesor de la cobertura glaciar.
Variable dependiente: Riesgos físicos en la laguna Palcacocha.	El oleaje producido impacta violentamente en el dique de contención, desbordando un gran volumen de agua y provocando una fuerte erosión superficial del dique y rotura de este, desbordando violentamente el agua almacenada y dando lugar a un flujo de escombros hacia el valle.	<ol style="list-style-type: none">1. Volumen de almacenamiento de la laguna Palcacocha.2. Altura del dique de contención de la laguna Palcacocha.3. Altura de olas de impacto que desbordan en la laguna.4. Volumen de desbordamiento de agua de la laguna.

Capítulo III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada porque, según Bunge (1971), tiene un propósito de dar solución a situaciones o problemas concretos o identificables. En este sentido, la investigación aplicada parte (por lo general, aunque no siempre) del conocimiento generado por la investigación básica, tanto para identificar problemas sobre los que se debe intervenir como para definir las estrategias de solución.

El nivel de investigación es descriptivo – correlacional. Es descriptivo porque se detalla la cadena de procesos que una amenaza de avalancha genera sobre la laguna y, sistemáticamente, involucra el riesgo físico en la microcuenca; y correlacional porque establece la relación que existen entre la amenaza de avalancha y el riesgo físico de la microcuenca Paria.

3.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es del tipo no experimental – longitudinal, porque la amenaza de avalancha y el riesgo físico son variables libres y no condicionadas por la manipulación antrópica directa de las variables climáticas.

3.3 Población y muestra

Población

Para el presente estudio se consideró como población a los glaciares de Pucaranra y Palcaraju ubicados en la cabecera de la microcuenca Paria, zona noreste del flanco occidental de la cordillera Blanca, que forman un circo

glaciar rodeando la laguna de Palcacocha y están en riesgo latente de producir avalancha de hielo y nieve sobre la laguna.

Muestra

Para el presente estudio se consideró como muestra a los glaciares Palcaraju y Pucaranra que circundan y vierten sus aguas hacia la laguna presentando glaciares colgantes en diversas zonas de agrietamiento con riesgo latente a desprenderse y amenazando con provocar avalanchas que impactarán en la laguna Palcacocha, ubicada en la cabecera de la quebrada de Cojup, microcuenca del río Paria, subcuenca del río Quillcay, provincia de Huaraz.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para recopilar la información, al realizar la investigación, se acudió a las instituciones especializadas como el ANA, la cual se describe de la siguiente manera:

- Información del inventario de glaciares y lagunas de la cordillera Blanca, subcuenca del río Quillcay.
- Información geológica, batimetría y de perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, realizado por la ANA.
- Descarga de datos DEM de la subcuenca del río Quillcay, proporcionados en la web de Vertex de 12.5 me de resolución correspondiente al satélite ALOS de la agencia japonesa, imágenes de satélite visualizado en pro Google y EarthPro de la zona de estudio y con la visualización de imágenes en Google Earth.

3.5 Plan de procesamiento y análisis de datos

Para la realización de la presente investigación, se enmarcó en la ejecución de dos etapas: recopilación de información geográfica de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra e información batimétrica de la laguna Palcacocha; y generación de datos para simular una amenaza de avalancha y sus riesgos físicos en la microcuenca, periodo 2016-2017.

Características del almacenamiento de la laguna Palcacocha.

Para conocer las características de la laguna Palcacocha se recurrió a información especializada generada por la Autoridad Nacional del Agua y así conocer los siguientes parámetros:

- ✓ Cota elevación espejo de agua de la laguna (msnm).
- ✓ Área del espejo de agua (m²).
- ✓ Volumen de la laguna (m³).
- ✓ Profundidad de la laguna (m).
- ✓ Longitud del dique al extremo máximo de la laguna (m).
- ✓ Borde libre (m).

Identificación de amenazas de avalancha sobre la laguna Palcacocha

Para la identificación de grietas con posibilidad de desprendimiento en glaciares de Palcaraju y Pucaranra, se realizó lo siguiente:

- Utilizar el software google earthPro para visualizar e identificar las zonas de agrietamiento en los glaciares.
- Con el uso del software ArcGis se delimitó los bloques para conocer sus dimensiones y posicionamiento.

Simulación de la amenaza de avalancha y su riesgo físico sobre la laguna Palcacocha.

Identificada la zona de agrietamiento y los bloques de deslizarse, se estableció los siguientes procedimientos de análisis y cálculos:

1) Simulación de amenazas de avalancha glaciar hacia la laguna Palcacocha

a) Tipo de glaciar a deslizarse:

Definiremos el tipo de glaciar a deslizarse, según la figura 14.

b) Identificación de pendiente > 25° en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra:

Se utilizó el software ArcGis y la herramienta Spatial Analyst Tools para procesar el insumo DEM y calcular la pendiente de las superficies glaciares de Palcaraju y Pucaranra y así determinar el mapa de pendiente y caracterizarlos.

c) Cálculo del espesor del glaciar con el modelo Glap-Top:

Con el modelo Glap-Top (topografía del lecho glaciar) basado en la ecuación (1) que requiere el DEM de la zona de estudio, se estimó el espesor de hielo glaciar.

d) Volumen de los bloques a deslizarse de los glaciares:

Con los resultados de la identificación y delimitación de medidas (largo y ancho) de los bloques a deslizarse, con la cuantificación de la pendiente de la superficie glaciar > 25° y con los resultados del espesor de hielo del modelo Glap-Top se determinó el volumen de hielo de los bloques en la zona de agrietamiento de los glaciares.

e) Recorrido del deslizamiento de la avalancha:

Con el uso del software ArcGis con las herramientas Spatial Analyst Tools / Distancia-distancia del camino y costo del camino, se estimó el recorrido de los deslizamientos, la longitud de la distancia inclinada del recorrido, la altitud de los centros de gravedad de cada bloque, la pendiente promedio del recorrido de los bloques de hielo con dirección a la laguna, los puntos de impacto de los recorridos de avalanchas hacia la laguna, la distancia y la dirección de los puntos de impacto hacia el dique de contención de la laguna Palcacocha.

f) Análisis de oleaje y volumen de desbordamiento de la laguna Palcacocha, producto de la avalancha:

- Cálculo de la velocidad de impacto del deslizamiento de la avalancha de hielo con la ecuación (12).
- Cálculo de la generación y propagación de olas producto del impacto de bloques de la avalancha glaciaria, utilizando las ecuaciones (14), (17), (20), (21) y (22).
- Análisis del ascenso de las olas que impactan hacia el dique, incluyendo control de limitaciones, se utilizó la ecuación (23).
- Cálculo del desbordamiento de olas sobre el dique de la laguna Palcacocha, se utilizó la ecuación (24).
- Cálculo del volumen de desbordamiento para un borde libre > 0 , se utilizó la ecuación (25).

g) Evaluación de la amenaza de avalancha

De los cálculos realizados en los puntos anteriores, se muestran resultados de análisis en mapas temáticos del proceso de avalanchas.

2) Riesgo físico sobre la laguna Palcacocha, producto de la avalancha glaciar:

a) Volumen de lago glaciar:

Para la obtención del volumen de almacenamiento de la laguna Palcacocha, se utilizó la información de la (ANA, 2016) y la fórmula (2)

b) Material de la presa o dique de contención:

Descripción del material de la presa de contención, se utilizó la información de la ANA (2016).

c) Cuantificación del oleaje, volumen de desbordamiento, máxima descarga, volumen de escombros, longitud y ancho de recorrido de los escombros:

Cuantificación de parámetros en escala máxima, promedio y mínimo del oleaje y desbordamientos: altura de oleaje, altura de ascenso de olas y volumen de desbordamiento.

Tabla 11*Características de desbordamiento de la laguna Palcacocha.*

Parámetro	Unidades	Ecuación, formula o tabla
Altura de ola	m	Tabla 9.6 y 9.7
Altura subida de ola	m	Tabla 9.6 y 9.7
Altura de desborde	m	Tabla 9.6 y 9.7
Volumen desbordamiento	m ³	Tabla 9.6 y 9.7
Máxima descarga	m ³ /s	(2.2)
Volumen de escombros	MMC	(2.6)
Volumen de escombros	m ³	(2.7)
Máximo volumen flujo escombros	m ³	750 m ³ /m
Velocidad media	m/s	(2.8)
Potencial energético de masa	m ⁴	(2.9)
Distancia recorrida	m	(2.9)
Ancho del cono aluvial	m	(2.11)
Tiempo recorrido según distancia	minuto	Distancia / velocidad

d) Evaluación del peligro aguas debajo de la laguna Palcacocha:

Utilizando la tabla 6, se determinará la probabilidad de ocurrencia de desbordamiento de la laguna Palcacocha, producto de la avalancha glaciar que generará oleajes.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Presentación de resultados

Características del almacenamiento de la laguna Palcacocha

La Autoridad Nacional de Agua, a través de la Unidad de Glaciológica y Recursos Hídricos, realizó batimetría en la laguna de Palcacocha el 2016, año en el cual se ha recopilado información importante, obteniéndose los siguientes parámetros para la siguiente investigación:

Tabla 12

Características geométricas de la laguna Palcacocha.

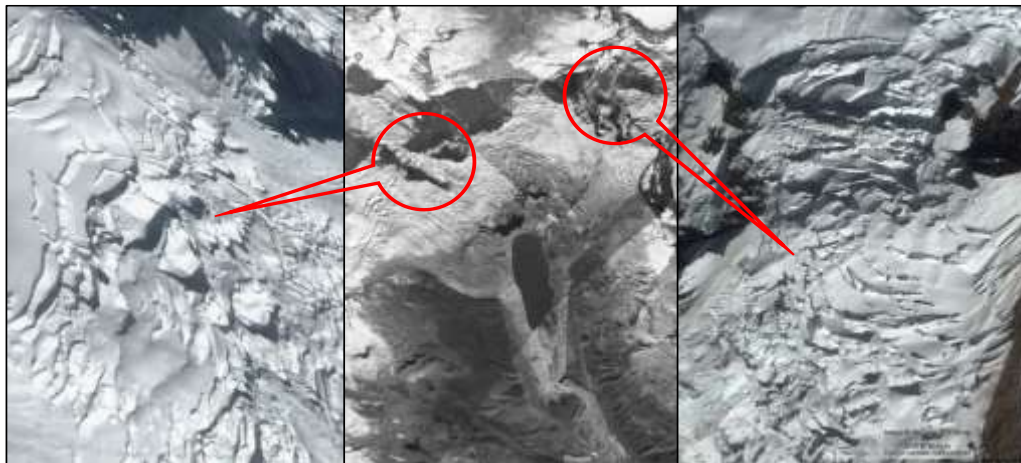
N°	Características de la laguna Palcacocha	Unidad	Valor
1	Cota elevación espejo de agua de la laguna (msnm).	m	4 562,88
2	Área del espejo de agua (m ²).	m ²	514 157,38
3	Volumen de la laguna (m ³).	m ³	17 403 353,24
5	Profundidad de la laguna (m).	m	71,10
6	Longitud del dique al extremo máximo de la laguna	m	1619
7	Borde libre	m	7

Identificación preliminar de posibles bloques de glaciares en peligro de desprendimiento hacia la laguna Palcacocha

En la figura 20 se muestra la laguna Palcacocha (al centro) y los glaciares Palcaraju (izquierda) y Pucaranra (derecha) con presencia de grietas en la superficie glaciaria que están propensas a desprenderse.

Figura 20

Glaciares agrietados sobre la laguna Palcacocha.



Fuente: imagen obtenida de google earthPro, 2019.

Figura 21

Longitud de las grietas en la superficie del glaciar Palcaraju.



En la figura 21 se muestran los bloques delimitados en función de los agrietamientos en la superficie de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.

Figura 22

Trazado de bloques en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.

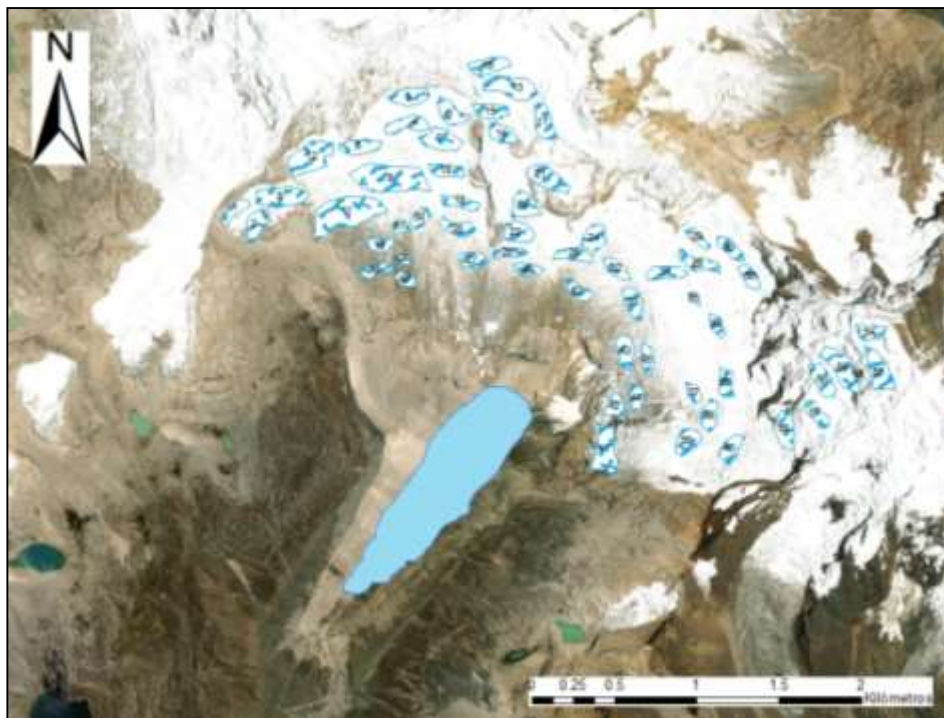


En la figura 22 se muestra los 59 bloques identificados y editados en ArcGis, para luego exportarlos en formato KML, para que sean visualizados sobre los glaciares de Palcaraju y Pucaranra en el software Google EarthPro.

En la figura 23 se muestra los 59 bloques iniciadores de avalancha provenientes de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra, con dirección hacia la laguna de Palcacocha, en los cuales se ha obtenido sus dimensiones como largo, ancho y área horizontal mostradas, cuyos resultados se muestran en la tabla 20.

Figura 23

Bloques iniciadores de avalanchas de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.



Simulación de avalancha y su riesgo físico sobre la laguna Palcacocha.

1. Simulación de amenazas de avalancha glaciar en la laguna Palcacocha.

a) Tipo de glaciar a deslizarse: glaciar tipo rampa

b) Pendiente superficial > 25°: pendiente mayores a 25°, son propensas a deslizamiento y según la caracterización de la pendiente en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra que drenan sus aguas hacia la laguna Palcacocha, resulta significativo según los resultados que se muestran en la figura 24.

Figura 24

Calificación de la pendiente glaciaria circundante a la laguna Palcacocha.

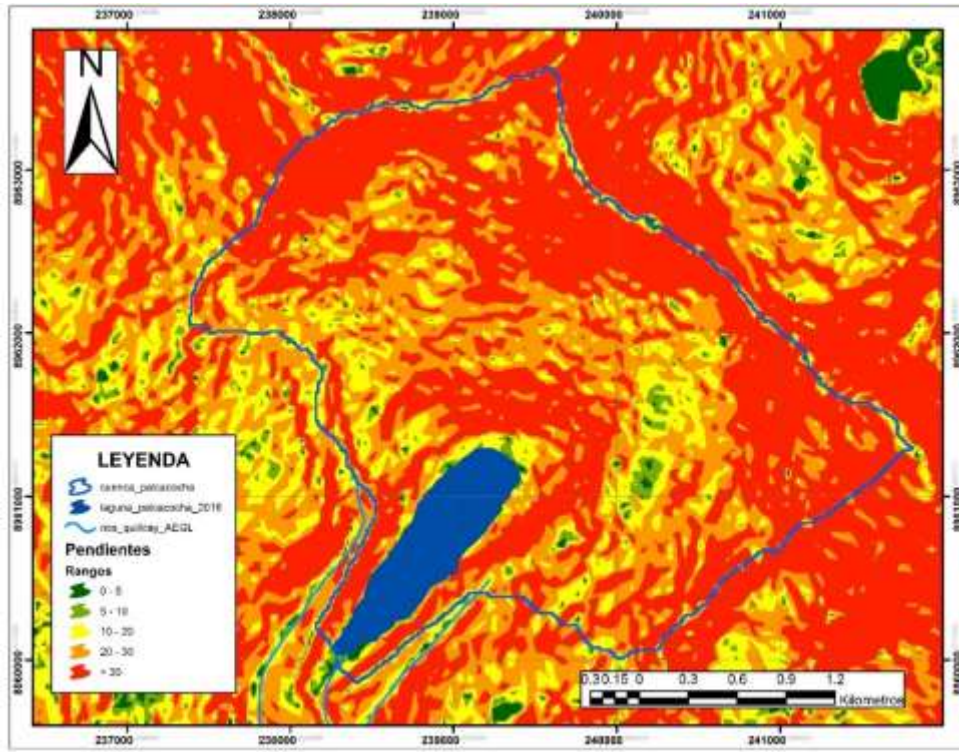
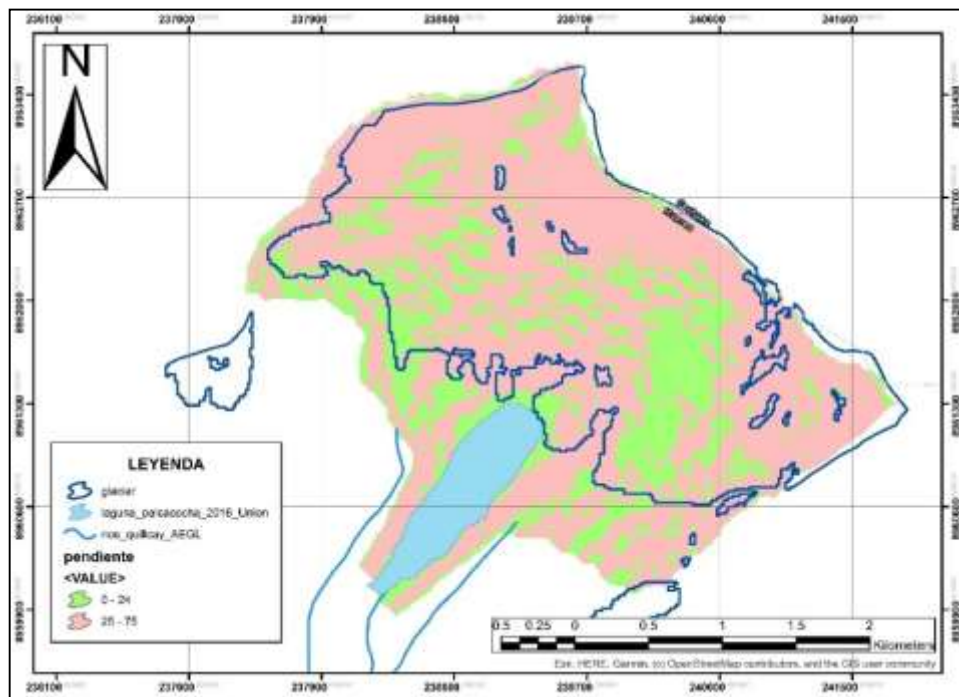


Figura 25

Clasificación de la pendiente con riesgo de avalancha glaciaria.

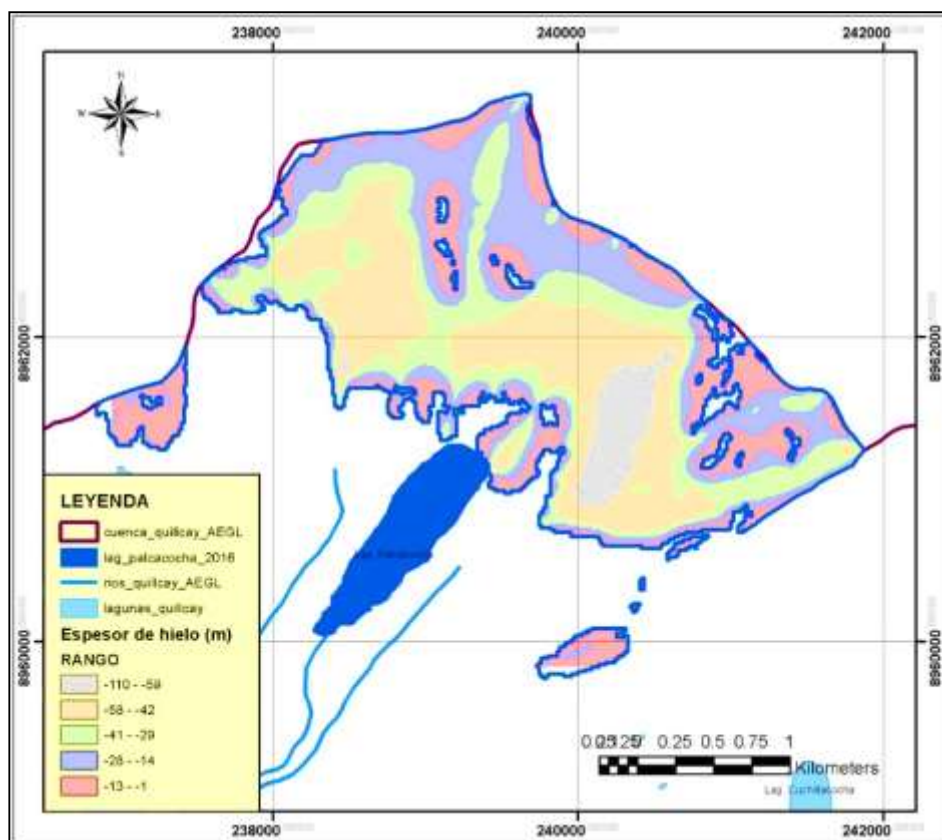


En la figura 25 se muestra el resultado del procesamiento con el software ArcGis y para obtener la pendiente en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra mayores a 25, mostrados en toda la superficie de los glaciares.

- c) **Cálculo del espesor de hielo con el modelo Glap-Top:** Aplicando el modelo Glap-Top desarrollado en el software ArcGis con la herramienta Model Builder, se aproximó el espesor de hielo en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra en función del DEM. Los resultados generados ha sido un DEM en la cual se ha editado los rangos del espesor de hielo para ser mostrados en la figura 26.

Figura 26

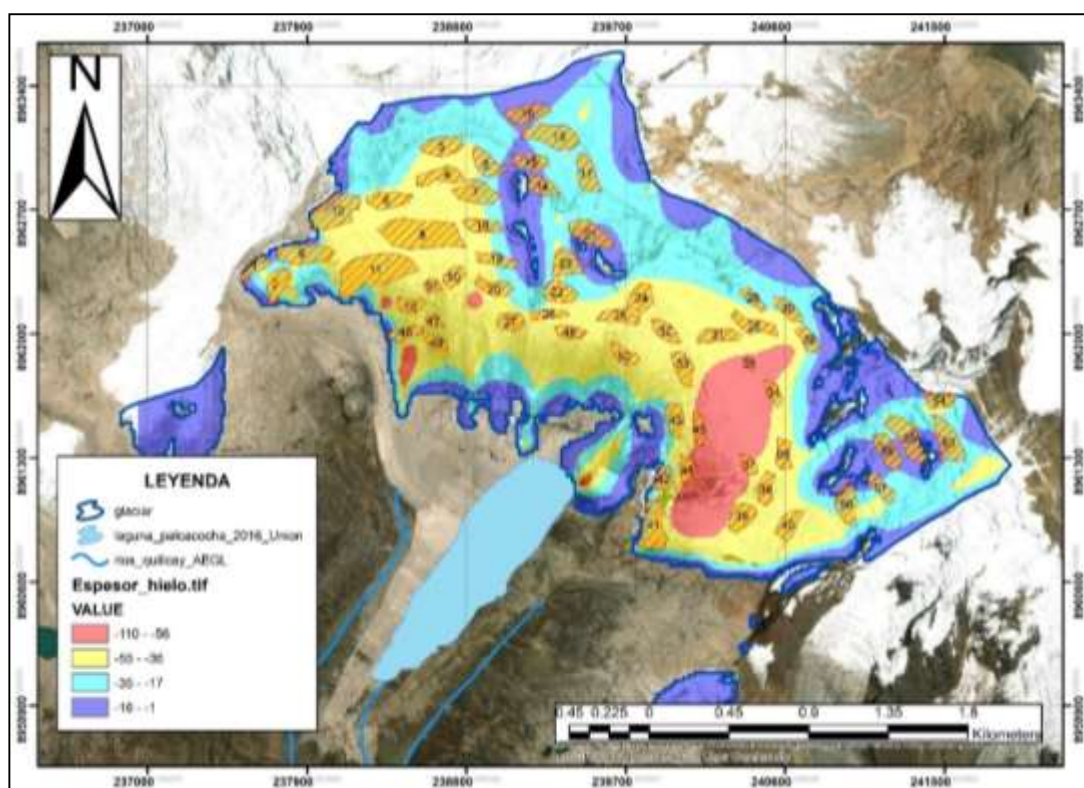
Espesor de hielo circundante a la laguna Palcacocha.



d) Volumen de los bloques a deslizarse: De los resultados obtenidos de identificar los 59 bloques iniciadores de avalancha en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra (figura 23), la caracterización de la pendiente con riesgo de avalancha glaciar (figura 24), el espesor de hielo en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra (figura 26) y las dimensiones de los 59 bloques de hielo de los glaciares de estudio (tabla 20), se ha obtenido el espesor de los 59 bloques, conociendo el volumen mostrando los resultados en la figura 27 y el detalle del volumen de los 59 bloques en la tabla 21, expresado en el anexo 02.

Figura 27

Posibles bloques de hielo que se deslizarán hacia la laguna Palcacocha.

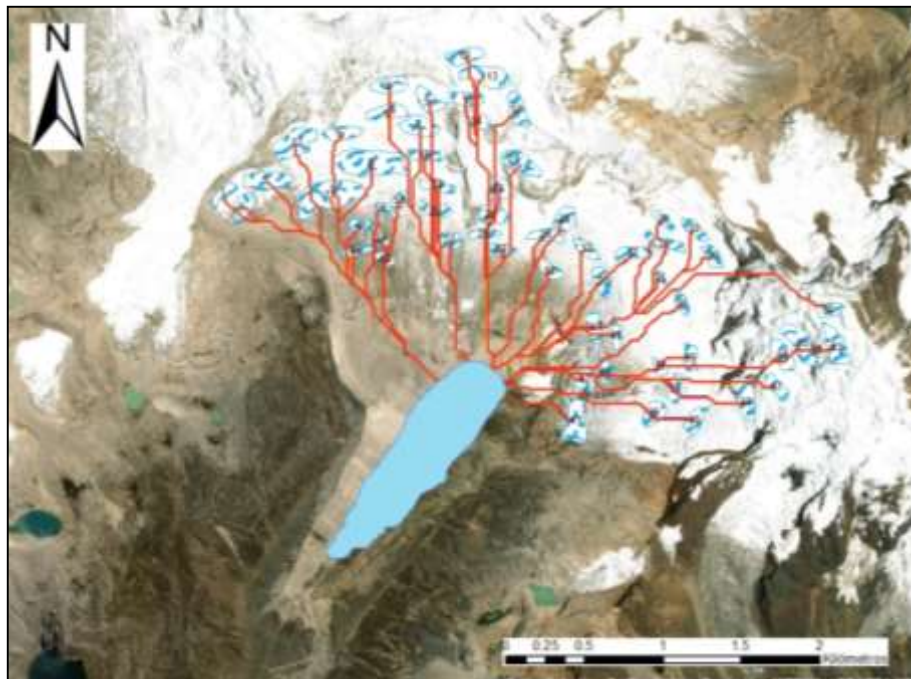


e) **Recorrido del deslizamiento de la avalancha:**

Del resultado de la obtención de bloques en polígonos e interpolados con el DEM de la zona de estudio con el software ArcGis, hemos obtenido la posible ruta de las avalanchas utilizando las herramientas Spatial Analyst Tools / Distancia-distancia del camino y costo del camino, lo cual se muestra en la figura 28.

Figura 28

Recorrido de avalancha en los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.



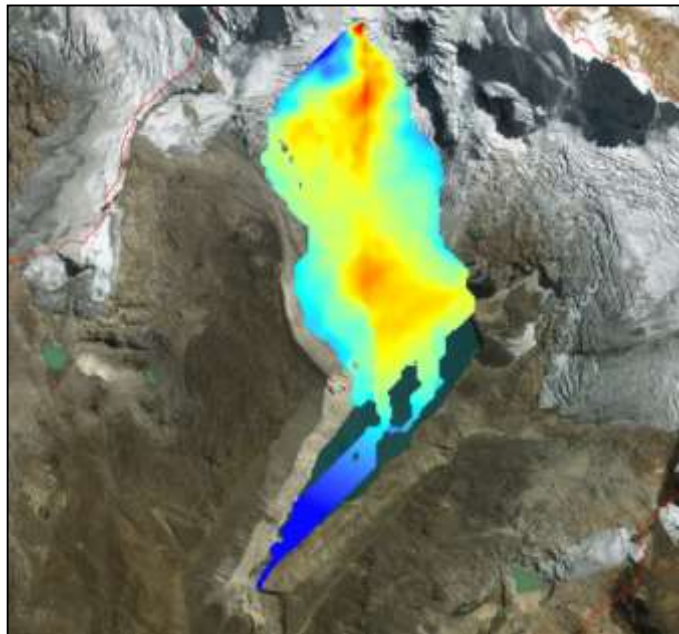
Con la información obtenida de las posibles rutas, calculamos la distancia inclinada de los polígonos, correspondiente a los recorridos de avalancha de los bloques con el software ArcGis y con la altitud del centro de gravedad de cada bloque se determina el desnivel de cada bloque, restando la altitud del espejo de agua de la laguna que es 4563 msnm. Luego hemos calculado la pendiente promedio del recorrido de la avalancha de manera similar como calcular la pendiente del cauce

en una cuenca hidrográfica; los resultados se muestran en la tabla 22, mostrada en los anexos 02.

La particularidad de los glaciares circundantes a la laguna Palcacocha como son los glaciares de Palcaraju y Pucaranra están formando un circo glaciar posicionadas en la zona noreste del flanco occidental y por la geodinámica externa que han formado naturalmente un tobogán con dirección hacia la laguna en la zona noreste que es extremo opuesto al dique de contención. Con el uso del modelo MFS, se ha modelado el recorrido de uno de los bloques que se deslizan hacia la laguna, mostrando el comportamiento a una escala desmedida de posible representación de avalancha en la figura 29 con dirección hacia la laguna Palcacocha proveniente del glaciar Palcaraju.

Figura 29

Simulación deslizamiento avalancha con el modelo MSF.



De los resultados obtenidos en la figura 28, definimos los 5 puntos en las cual las rutas de avalanchas colisionarán al borde de la laguna Palcacocha, tal como se muestra en la figura 30, los puntos definidos son B, C, D, E y F, determinándose las distancias al punto medio del dique que contiene a la laguna tal como se muestra en la figura 32. El dique de contención de la laguna Palcacocha tiene una longitud de 123 metros, mostrada en la figura 31, la cual está compuesta por gran parte de material morrénico consolidado y 02 estructuras de mampostería que revisten el talud del dique, en la cual se ha denominado el punto medio “A”, obteniendo las mediciones hacia los puntos de impacto (B, C, D, E y F) y la dirección de estos, según criterio de figura 17 (b), cuyos ángulos y distancias se muestran en la tabla 13.

Figura 30

Puntos de impacto de las rutas de avalancha hacia la laguna Palcacocha.

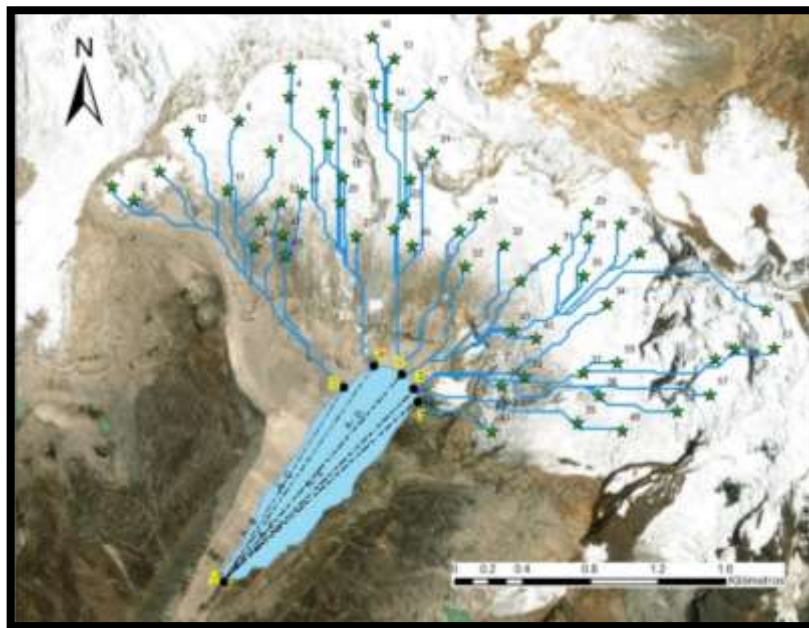


Figura 31

Dique de contención de la laguna Palcacocha.



Figura 32

Distancia puntos de impacto al dique de contención de la laguna Palcacocha.

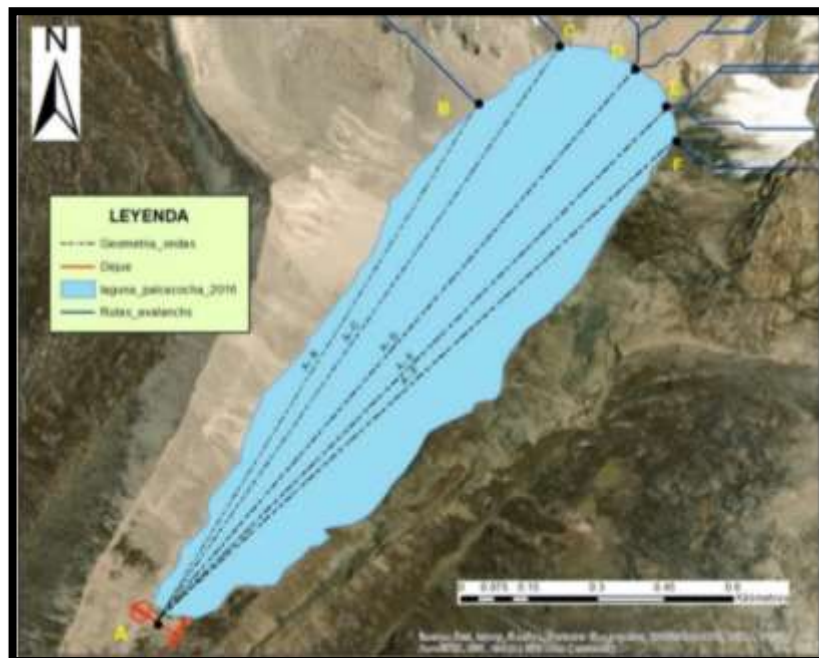


Tabla 13

Distancia y ángulos de impacto de avalanchas con dirección al dique.

N°	Distancia (m)	Tramo	Ángulo impacto (°)	Profundidad zona de impacto (m)	Profundidad zona del dique (m)
01	1620	A – D	0°	71	19
02	1344	A – B	81°	71	19
03	1549	A – C	84°	71	19
04	1561	A – F	-84°	71	19
05	1604	A - E	-86°	71	19

Se ha procesado los perfiles longitudinales de los 5 puntos donde impactarán las avalanchas, generando perfiles longitudinales mostrados en los anexos 04, en las figura 46, figura 47, figura 48, figura 49, figura 50, figura 51, figura 52 y figura 53, obteniendo la profundidad más representativa de 71 metros y la profundidad cercana al dique de 19 metros, las cuales se muestran en la tabla 13.

f) Análisis de oleaje y volumen de desbordamiento de la laguna Palcacocha producto de la avalancha.

De la información recopilada de la ANA batimetría 13/02/2016, descritas en la tabla 1, se han obtenidos parámetros para el análisis de oleaje mostrados en la tabla 14 y aplicando las fórmulas descritas en la metodología para el cálculo de la velocidad, de la altura de olas, del ascenso de las olas y del volumen de desbordamiento, se obtuvieron valores correspondientes para los 59 bloques que simularon avalanchas independientes y que colisionan a la laguna Palcacocha, evidenciándose en los anexos 03.

Tabla 14

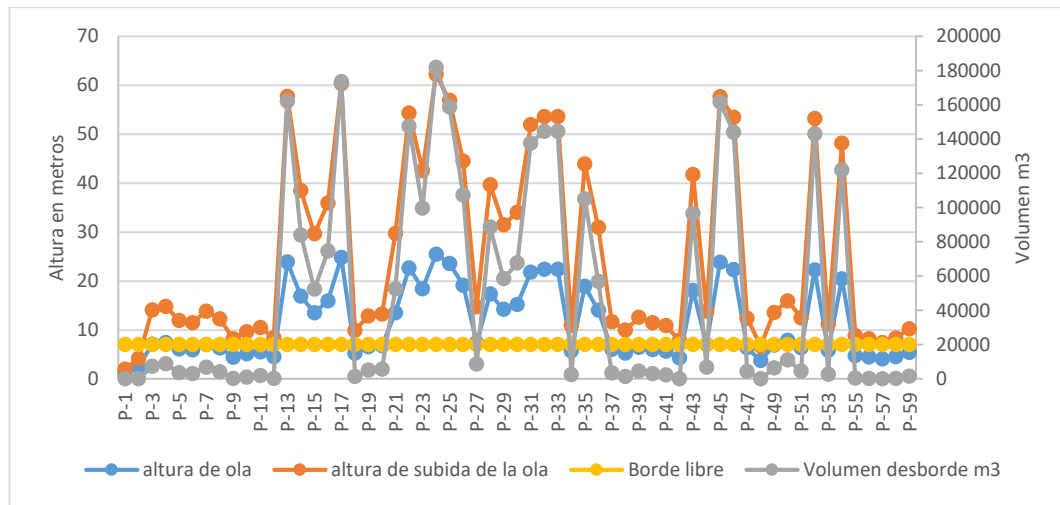
Parámetros geométricos para análisis de oleaje de la laguna Palcacocha.

N°	Parámetros geométricos de la laguna	Unidad	Valor
1	Profundidad longitudinal de laguna	m	71
2	Profundidad transversal de laguna	m	71
3	Profundidad de laguna cerca al dique	m	19
4	Ancho dique desbordamiento	m	123
5	Cresta del dique	m	5.0
6	Borde libre del dique	m	7
7	Angulo de subida del dique	°	37.87

Los resultados mostrados en los anexos 03 en la tabla 23, tabla 24, tabla 25 y tabla 26 muestran los cálculos y verificación de parámetros. Ahora bien, según las tabla 7, tabla 8 y tabla 9, además de tener en cuenta los ángulos y longitudes de impacto de la colisión de bloques con dirección hacia el dique de contención, se ha obtenido la gráfica mostrada en la figura 33 que describe los valores de altura de las olas por el talud del dique de contención, por el volumen de desbordamiento de la laguna a través del dique de contención y compararlo con la altura del borde libre que tiene el dique de contención en la laguna de Palcacocha.

Figura 33

Altura de oleaje y desbordamiento producto de las avalanchas.



Del anexo 03 se han extraído valores máximos de parámetros que determinan el inicio de cálculos como el máximo volumen del bloque de hielo proveniente de los glaciares, el máximo desnivel que tiene el centro de gravedad del bloque con el espejo de la laguna, la máxima velocidad de deslizamiento, la máxima altura de oleaje y el volumen de desbordamiento, estos valores se muestran en la tabla 15.

Tabla 15

Máximos valores en análisis de oleaje.

Bloque	Volumen (m3)	Desnivel (m)	Velocidad (m/seg)	Altura de ola	Altura de subida de la ola	Volumen corregido m3	Valores máximos
P-8	2648016	738	37.5	6.3	12.3	4203.1	Volumen de bloque glaciar
P-17	551040	1223	100.2	24.8	60.3	173511.9	Velocidad de deslizamiento
P-24	749232	683	68.6	25.5	62.3	181860.7	Altura de ola y volumen desbordamiento
P-54	304608	1435	92.3	20.5	48.2	122022.2	Altura de deslizamiento

De esta manera se recalculó el análisis de oleaje de los 59 bloques considerando que los puntos de impacto en las zonas C, D, E y F tienen un ángulo de impacto de 0° que orientan frontalmente las ondas expansivas del oleaje con el dique de contención. Los resultados de cómo influyen estas consideraciones en el análisis de altura de oleaje, en la altura de subida de olas y en el volumen de desbordamiento con respecto al borde libre mostrados en la siguiente figura y en la tabla 4.5 muestran el mayor valor que genera la altura de oleaje y el volumen de desbordamiento en el lugar de impacto D con 0°.

Figura 34

Altura de oleaje y desbordamiento con impacto frontal.

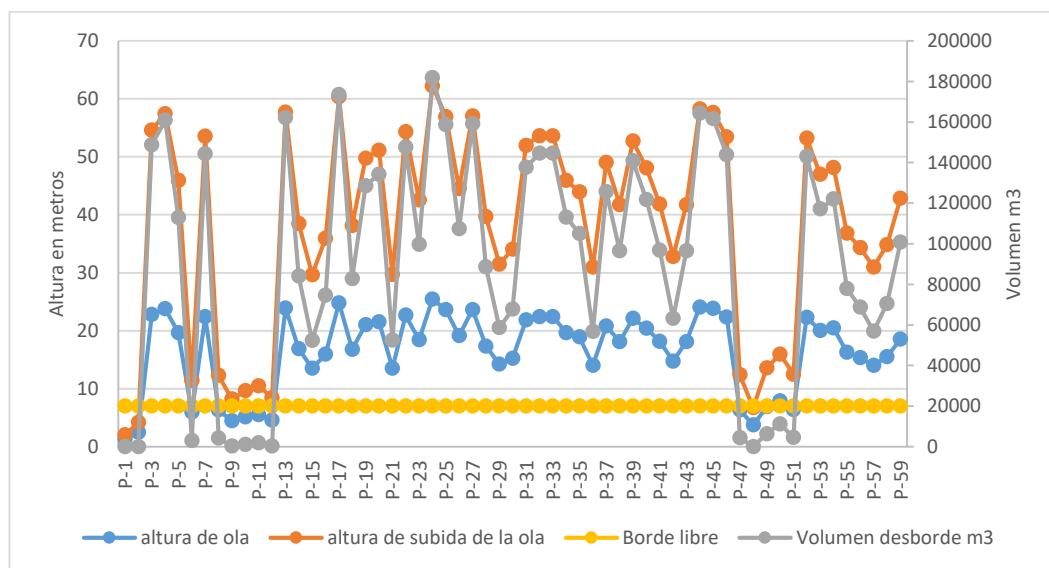


Tabla 16

Volumen máximo de desbordamiento en impacto frontal.

Bloque	Volumen (m3)	Desnivel (m)	Velocidad (m/seg)	Altura de ola	Altura de subida de la ola	Volumen corregido m3
P-24	749232	683	68.6	25.5	62.3	181860.7

En este caso se recalculó el análisis de oleaje de los 59 bloques considerando que el talud del dique para el borde libre que está en contacto con la laguna sea de 90°, esta consideración ha influenciado los valores en la altura máxima de oleaje y volumen de desbordamiento, mostrando los resultados en la tabla 17, además de presentar la figura 35 cómo se comportan los valores de la altura de ola, altura de subida de la ola y el volumen de desbordamiento.

Figura 35

Altura de oleaje y desbordamiento con dique de contención vertical.

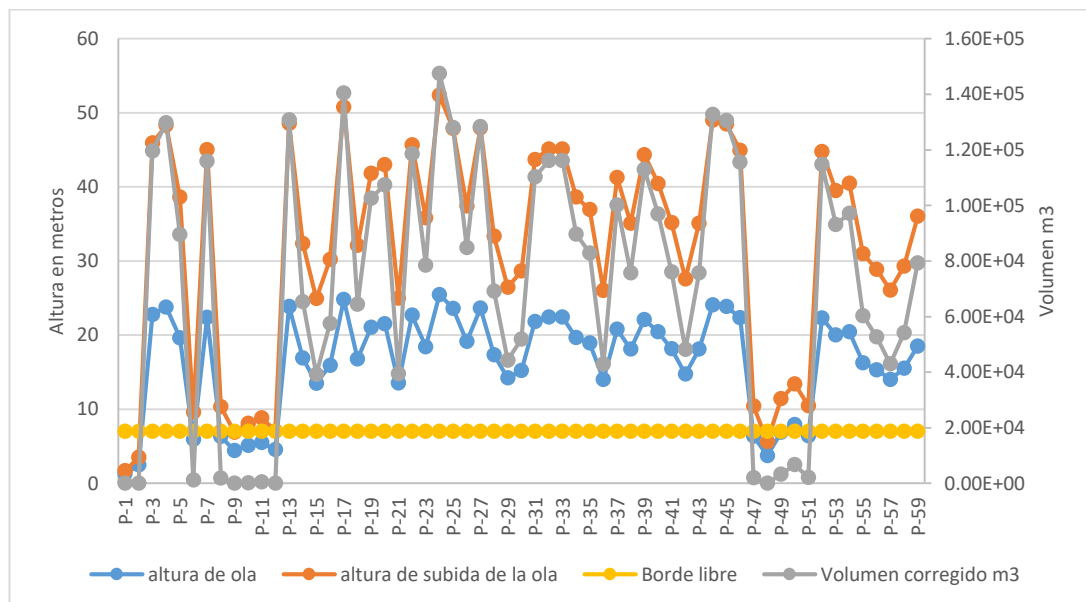


Tabla 17

Análisis de oleaje con escenario de dique de contención vertical.

Bloque	Volumen (m3)	Desnivel (m)	Velocidad (m/seg)	Altura de ola	Altura de subida de la ola	Volumen corregido m3
P-24	749232	683	68.6	25.5	52.4	147455.2

Del análisis de oleaje para talud vertical del borde libre, se calcularon varios valores de borde libre y la influencia que tiene en el volumen de desbordamiento, estimando la reducción que se obtiene cuando se incrementa el borde libre, mostrando los resultados en la tabla 18 y graficando los parámetros de borde libre y volumen de desbordamiento en la figura 36.

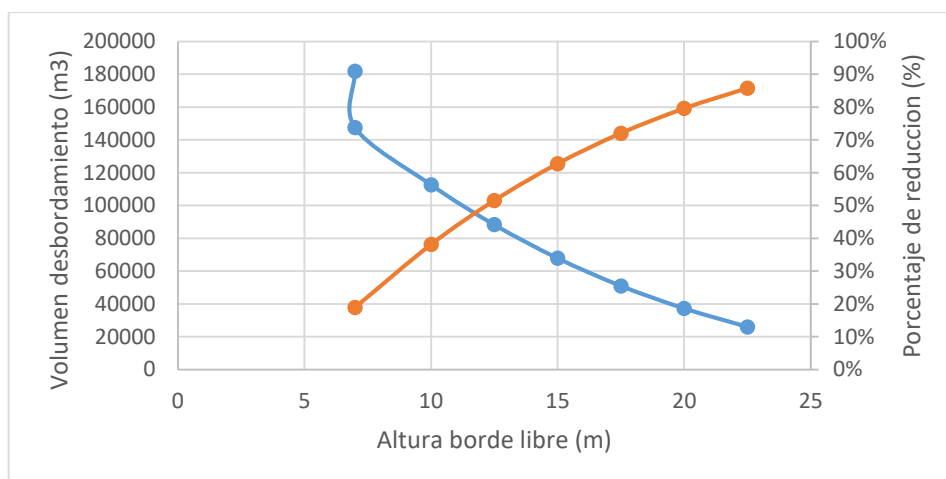
Tabla 18

Reducción volumen desbordamiento con incremento de borde libre.

Borde libre	Altura subida de ola	Volumen (m ³)	Porcentaje reducción volumen	Detalle
7	62.3	181861		condiciones normales del dique
7	52.4	147455	19%	talud borde libre vertical
10	52.7	112582	38%	talud borde libre vertical
12.5	53.2	88231	51%	talud borde libre vertical
15	54.0	67804	63%	talud borde libre vertical
17.5	55.2	50934	72%	talud borde libre vertical
20	57.5	37187	80%	talud borde libre vertical
22.5	61.8	25951	86%	talud borde libre vertical
25	74.2	15608	91%	talud borde libre vertical

Figura 36

Altura de borde libre versus volumen de desbordamiento.

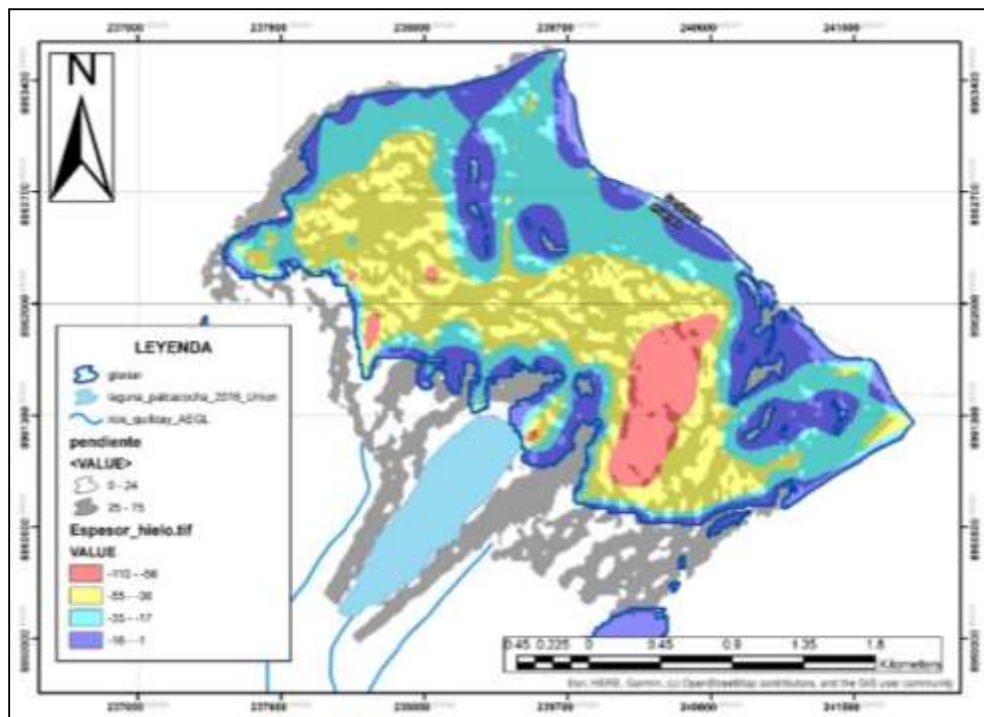


g) Evaluación de la amenaza de avalancha.

De los resultados obtenidos en los puntos 3.4.2. Identificación de amenaza de avalancha, 3.4.3. Simulación de la amenaza de avalancha y su riesgo físico sobre la laguna Palcacocha, del punto ítem 1 hasta el punto “g”, se representan en gráficos con el uso de herramientas SIG realizados con el software ArcGIS para relacionar los resultados obtenidos del modelamiento de la pendiente del glaciar, el modelamiento del espesor de hielo del glaciar y la simulación de avalanchas, obteniendo los oleajes de impacto y el volumen de desbordamiento:

Figura 37

Mapa comparación pendiente y espesor glaciar.

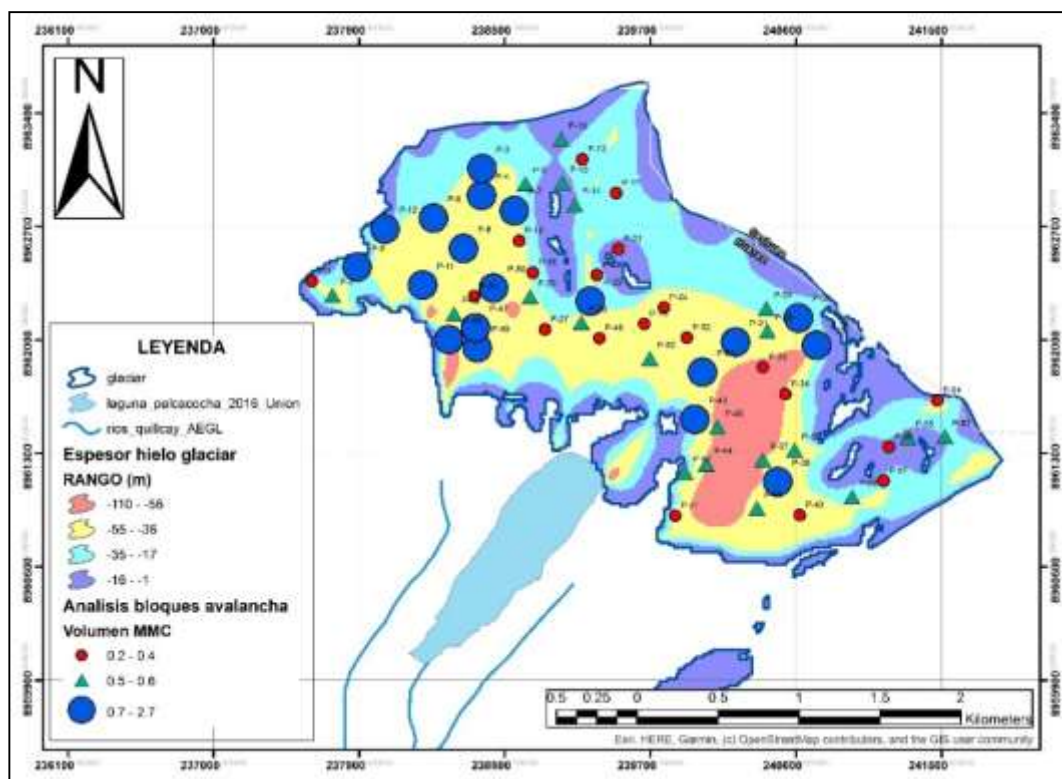


En la figura anterior se muestra los mapas de resultados de la pendiente y el espesor de hielo de los glaciares Palcaraju y Pucaranra,

visualizando las características de la pendiente $> 25^\circ$ en las zonas de mayor a menor espesor del glaciar, pues el mayor espesor de hielo en el glaciar se encuentra en el glaciar Pucaranra (derecha), pero presenta menor zona de pendiente $> 25^\circ$ a comparación con el glaciar Palcaraju (izquierda).

Figura 38

Mapa comparación espesor de hielo y volumen de bloques de hielo.

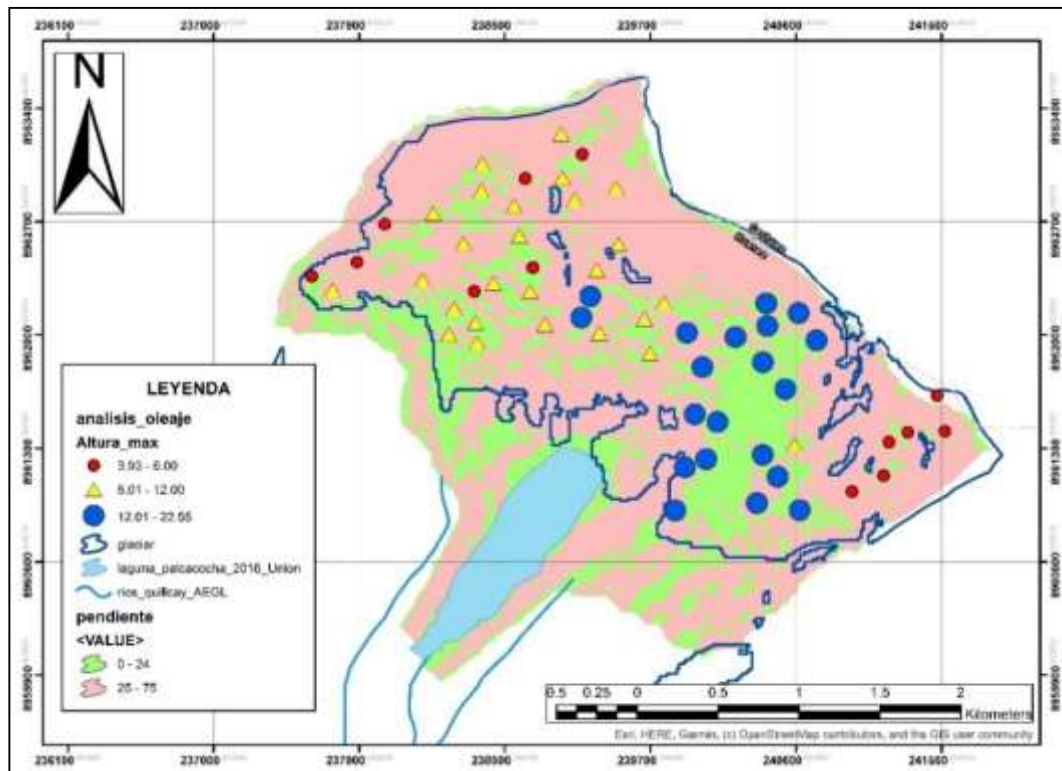


En la imagen anterior se muestra los bloques de hielo obtenidos de la tabla 21 ploteados en el mapa en función del centro de gravedad, además de superponer el espesor glaciar y se obtiene la siguiente figura 38, donde se muestra la ubicación de los mayores volúmenes de los bloques que se encuentran en el glaciar Palcaraju, seguido del glaciar Pucaranra. En la figura se muestra que, en la zona de mayor

espesor glaciar, entre los rangos de espesor de 110 a 56 metros, no se encuentran los mayores volúmenes de hielo, encontrándose en la zona de rango de 55 a 36 metros de espesor.

Figura 39

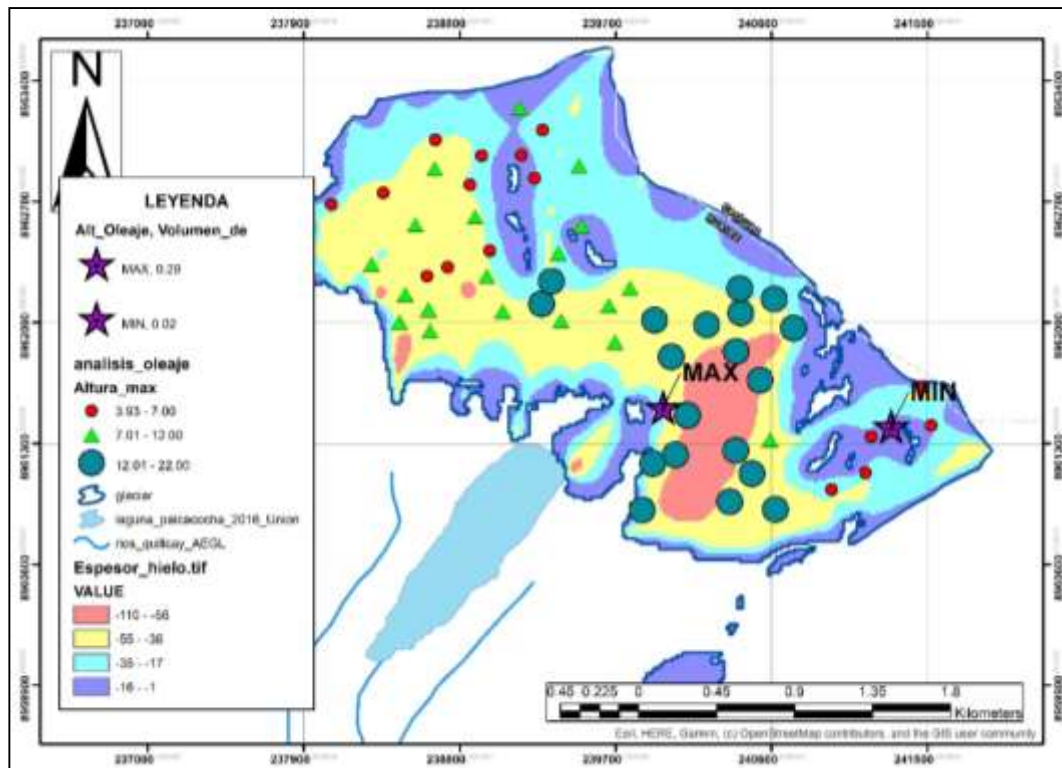
Mapa comparación pendiente y altura de oleaje generado por bloques.



En este caso se muestra los resultados obtenidos entre la altura de oleaje, producto de las avalanchas y la pendiente del glaciar, mostrando la relación en la cual la pendiente del glaciar Pucaranra y el espesor de hielo cuantificado manifiesta mayores volúmenes en los bloques de hielo y ello genera oleajes con alturas considerables, para lo cual se ha identificado los bloques que generan oleajes altos.

Figura 40

Comparación espesor glaciar y altura de oleaje generado por bloques.



Para este caso se muestra los resultados de la altura de oleaje y el mapa de espesor glaciar, mostrando que en el glaciar Pucaranra tiene los mayores espesores de hielo en la cual los generadores de oleajes grandes están en el rango de espesores de hielo entre 36 a 55 metros y algunos en el límite entre los espesores de 56 a 110 metros de espesor de hielo, y, al igual que en el gráfico figura 39, la pendiente $< 25^\circ$ ayuda a acumular nieve y así genera mayor espesor de hielo; mostrando los bloques que generan los oleajes máximos y mínimos.

2. Riesgo físico sobre la laguna Palcacocha.

a) Volumen de lago glaciar:

$V=17\ 403\ 353.24\ m^3$ (según ANA, 2016).

V= 13390283 (Volumen estimado según Huggel et al., 2002 con error de 23 %).

b) Material de la Presa o Dique de contención:

El material predominante de la presa es del tipo morrénico, producto de la formación de masas glaciares de la última edad de hielo glacial, la laguna cuenta con 02 diques artificiales cubiertos de mampostería de concreto y rocas.

c) Cuantificación del oleaje, volumen desbordamiento, máxima descarga, volumen de escombros, longitud de recorrido y ancho del cono aluvial.

En la tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 19

Caracterización del desbordamiento de la laguna Palcacocha.

Parámetro	Unidad	Max ₁	Max ₂	Prom
Altura de Ola	m	25.5	25.5	11.3
Altura subida de ola	m	62.3	52.4	25.1
Altura desborde	m	55.3	45.4	18.1
Volumen Desbordamiento	m ³	181860.7	147455.2	40000.0
Máxima descarga	m ³ /s	363.7	294.9	80.0
Volumen de escombros	hm ³	10.6	7.7	1.1
Volumen de escombros	m ³	621130.0	482593.1	100404.2
Máximo volumen flujo escombros	m ³	3856842.0	3621024.7	2445536.7
Velocidad media	m/s	5.8	5.4	3.5
Potencial energético de masa	m ⁴	863370682.8	670804387.4	139561828.6
Distancia recorrida	m	5142.5	4828.0	3260.7
Ancho del cono aluvial	m	1279.8	1176.6	697.2
Tiempo recorrido según distancia	minutos	14.8	14.8	15.4

Nota:

Max₁: Corresponde a los valores del análisis de oleaje máximos en las condiciones actuales que se encuentran la laguna de Palcacocha.

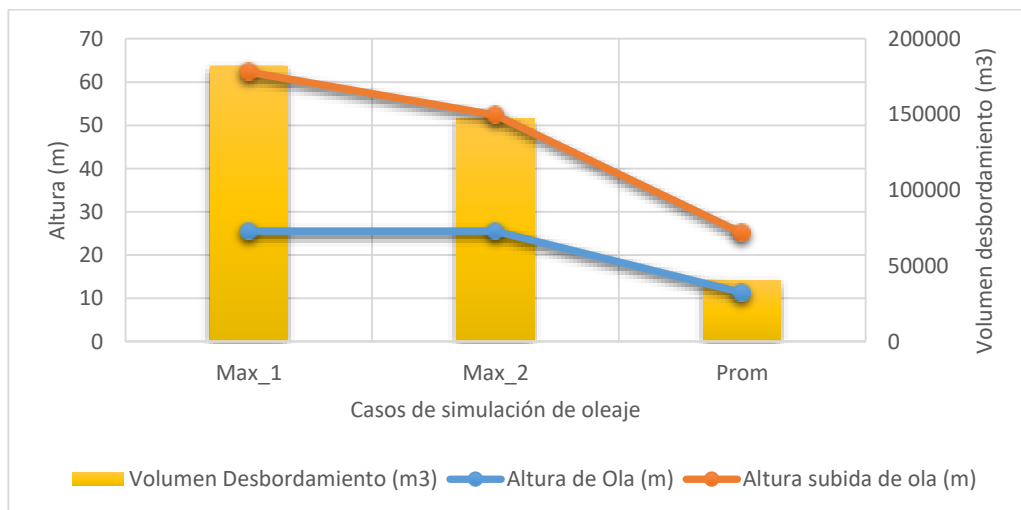
Max2: Corresponde al análisis de oleaje cuando el dique de contención es de talud vertical para condiciones de máximo oleaje y volumen de desbordamiento.

Prom: Corresponde a los valores promedio del análisis de oleaje en las condiciones reales de la laguna Palcacocha, para ello se ha tomado el valor promedio de la altura de oleaje, la subida de oleaje y el volumen de desbordamiento.

En la figura 41 se muestran los resultados del análisis de la simulación de la subida de oleaje máximo para los casos Max_1, Max_2 y promedio, comparando los resultados con el volumen de desbordamiento que genera cada caso, sobrepasando la altura de borde libre del dique de contención.

Figura 41

Oleajes y volumen de desbordamientos generados por avalanchas.

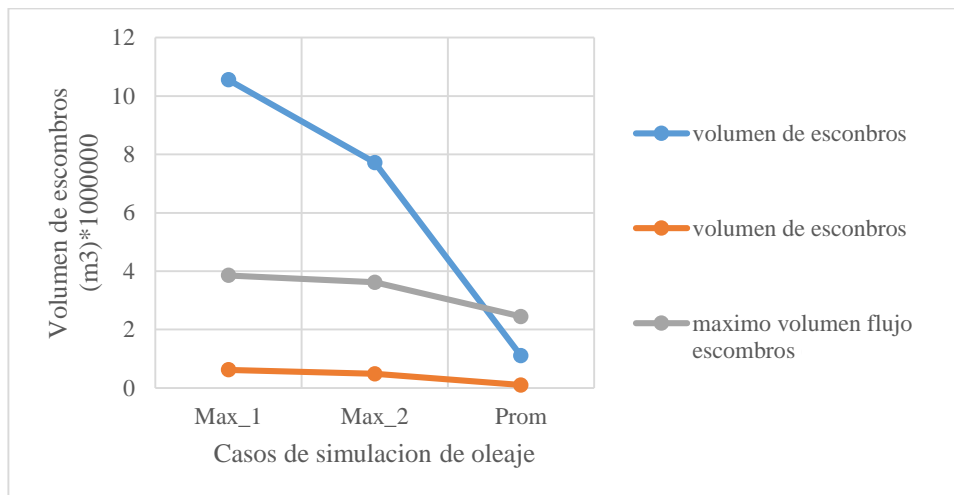


En la figura 42 se muestran resultados de la cuantificación del volumen que produce la descarga intempestiva del desbordamiento de la laguna, producto de la avalancha generada por el deslizamiento de bloque de hielo de los nevados de Palcaraju y Pucaranra, llamado también flujo de escombros que

recorrerá un curso de aguas debajo de la laguna Palcacocha por el recorrido de la quebrada de Cojup.

Figura 42

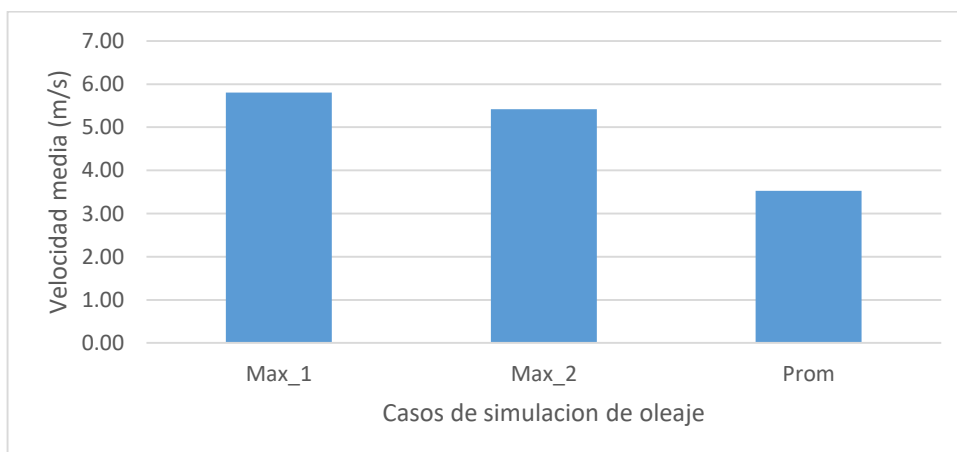
Volumen de escombros simulado y producido por desbordamiento de laguna.



En la figura 43 se muestra los resultados del cálculo la velocidad media del flujo de escombros, que se transportará con dirección al valle, producto del desbordamiento de la laguna.

Figura 43

Velocidad media del flujo de escombros.



En la figura siguiente se muestra la distancia de recorrido máximo probable del flujo de escombros y el ancho de cono aluvial o cono de deyección,

producto de la disminución de pendiente que detiene el flujo de escombros y expande en ancho los sedimentos.

Figura 44

Longitud de recorrido y ancho de cono aluvial.

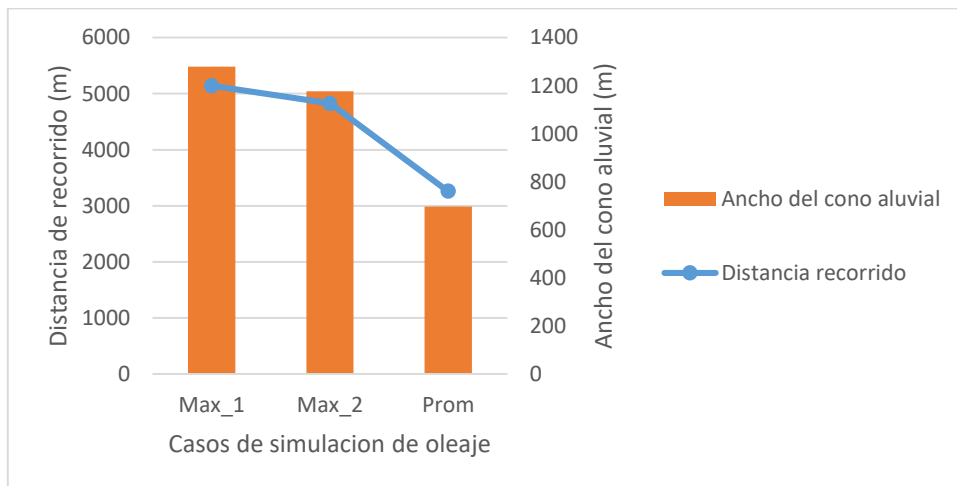
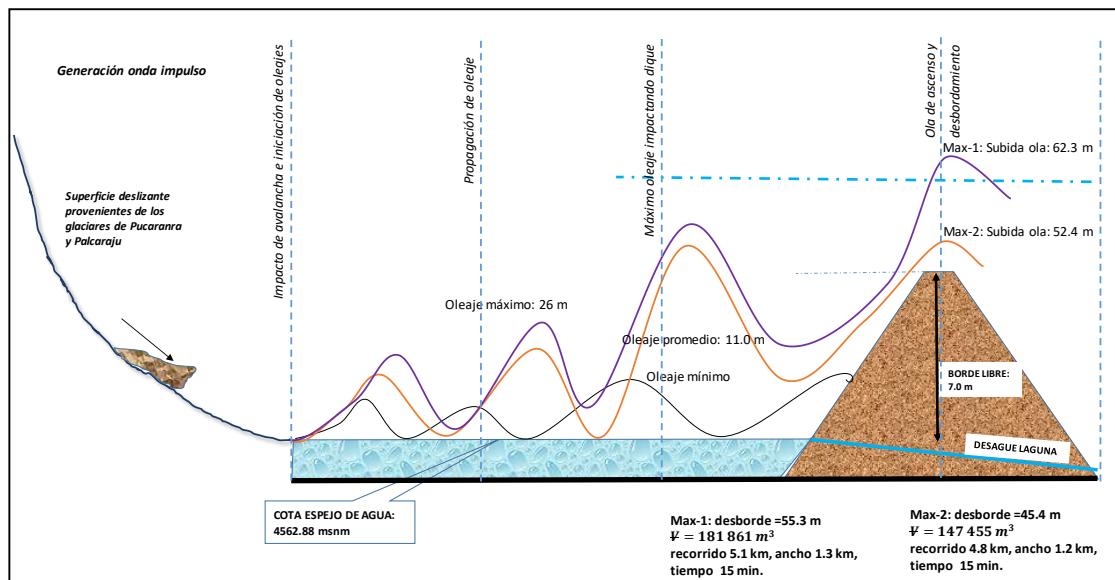


Figura 45

Croquis de la avalancha, generación de impulso y desbordamiento en la laguna Palcacocha.



En la figura 45 se ilustra gráficamente el evento de avalancha proveniente de los nevados de Palcaraju y Pucaranra que impacta violentamente en la

laguna Palcacocha, generando ondas de impulso como oleajes, mostrados en escala de Max_1 , Max_2 , promedio y mínimo que no sobrepasa el borde libre; los oleajes Max_1 y Max_2 tiene 25.5 metros de altura que sobrepasa el borde libre, pero la subida de ola de $Max-1$ es de 62.3 m y el de $Max-2$ es de 25.4, ambos desbordes generan descarga máxima descritas en la tabla 4.8.

d) Evaluación del peligro aguas abajo.

De la tabla 6, una estimación de la probabilidad de ocurrencia de un estallido de lago produce los siguientes resultados (indicador y probabilidad):

- a) Presa de morrena, probabilidad media a alta.
- b) Relación alta (la unidad o cerca) de borde libre a altura de presa, baja probabilidad.
- c) Baja relación de ancho de presa a altura de presa, baja probabilidad.
- d) Ondas de impacto esporádicas, probabilidad media.
- e) Eventos meteorológicos extremos esporádicos, probabilidad media.

Teniendo en cuenta la mediana calificación de los indicadores más importantes, a saber, la geometría del dique y el borde libre (la altura de la presa), la probabilidad general de ocurrencia de un estallido de la laguna Palcacocha es media.

4.2 Prueba de hipótesis

Se concluye que la hipótesis planteada en la presente tesis de investigación es verdadera, proyectando que la ocurrencia de avalancha ocasiona un riesgo físico de grado medio sobre la laguna Palcacocha. La investigación reforzó las hipótesis específicas planteadas de que la amenaza de avalancha está relacionada con la pendiente y con el espesor de hielo del glaciar y la ocurrencia de avalancha sobre la laguna Palcacocha ocasiona riesgo físico de grado medio. De las condiciones climáticas, topográficas y glaciológicas como el espesor de hielo de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra que generan riesgo latente de amenazas de avalanchas sobre la laguna de Palcacocha, esta laguna cuenta con dique morrénico y ofrece un grado medio de seguridad, conteniendo en parte los oleajes generados por los impactos de avalanchas, reduciendo el riesgo de amenaza de aluvión a través de flujo de escombros con dirección aguas abajo del valle.



4.3 Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación son válidos, afirmando la hipótesis de que la ocurrencia de avalancha sobre la laguna Palcacocha ocasiona riesgo físico de grado medio. La información de terreno recopilada, el uso de software, las herramientas tecnológicas y la aplicación de metodologías de cálculo han mostrado resultados satisfactorios, con una probabilidad de ocurrencia cualitativa en la tabla 6, cuyo resultado se ha obtenido de una probabilidad general de ocurrencia de un estallido de la laguna **Palcacocha siendo media**. Además de conocer los resultados en la pendiente de terreno, espesor de hielo, generación de ondas de impulso producto de los oleajes que genera la avalancha hacia la laguna Palcacocha, alturas de sobre salto y volúmenes de desbordamiento que provocan eventos GLOF; se han comparado los resultados obtenidos con resultados en condiciones de impacto frontal hacia el dique y talud vertical del borde libre.

Identificación amenazas de avalancha sobre la laguna Palcacocha.

- Con el uso del software Google EarthPro, se ha identificado 59 bloques de hielo que presentan posibilidad de desprendimiento en función de la pendiente de reposo que es mayor a 25° , según Huggel et al. (2002). Asimismo, con el uso del software ArcGis y sus herramientas de Spatial Analyst, se ha parametrizado la pendiente en la superficie glaciaria, mostrando las zonas de pendiente mayor a 25° .
- Con el uso del modelo GlapTop (Linsbauer et al., 2012), se ha estimado el espesor de hielo de los glaciares Pucaranra y Palcaraju que están drenando hacia la laguna Palcacocha, cuantificando el espesor de cada bloque de hielo; el rango de espesor de hielo ha resultado entre 0 a 110 metros mostrados en la tabla 21,



los valores obtenidos difieren aproximadamente en 30 de los obtenidos según Muñoz (2017), que ha estimado espesor de hielo entre 1 a 140 metros, indicando que el espesor de hielo del glaciar es bastante homogéneo debido a la metodología indirecta del proceso.

- De la obtención del espesor de hielo y obtenidos los resultados mostrados en la tabla 21 y figura 27, en el análisis de cada bloque para determinar el promedio de espesor de hielo, se tiene que para el bloque de hielo que genera mayor altura de oleaje, el espesor de hielo promedio es de 43, el cual está dentro del rango de 36 a 56 metros de grosor.

Amenaza de avalancha de hielo hacia la laguna Palcacocha

- La caracterización de los bloques de hielo que se deslizan (tabla 21), muestran valores de volúmenes inferiores a los 2.65 hm³ y superiores a 188 mil m³, además de tener un valor promedio de 589 mil m³ y valores de oleaje de 25.5 m como máximo y subida de olas de 62.3 metros, 11.3 metros como promedio y 1.3 metros como mínimo, valores que según el estudio Somos et al. (2016) establecieron valores de volumen de hielo entre 0.5 hm³ como pequeño, 1.0 hm³ como intermedio y 3.0 hm³ como grande y valores de oleaje de 9 metros el pequeño, 21 metros el intermedio y 42 metros el grande. En tal sentido, los valores obtenidos difieren tanto en volumen de hielo como en altura de oleaje.
- Con los resultados del modelamiento con el GlapTop (Linsbauer et al., 2012) en la figura 26, la pendiente del glaciar usó el software ArcGIS (mostrado en la figura 25) y el recorrido de los deslizamientos, teniendo referencia el modelo MSF (Huggel et al., 2002) mostrados en la figura 29 y utilizando las herramientas del ArcGIS para la rutas de impacto (figura 30) y la generación de

ondas de impulso con características 2d y 3D (Heller et al., 2009) desde la zona noreste de la laguna en contacto con el glaciar hasta el dique de contención de la misma, mostrados en la figura 32, generando las figura 37, figura 38, figura 39 y figura 40; mostrando que en pendiente $< 25^\circ$ se acumula nieve y, por ello, tiene mayor espesor de hielo, detalles que presenta el glaciar Pucaranra, pues tiene la mayor zona con grosor de hielo entre 56 a 110 metros, aunque los bloques que generan mayor oleajes se encuentren en este glaciar en las áreas de espesor de hielo entre 36 a 55 metros.

- Los bloques que generan los oleajes máximos y mínimos se encuentran en el glaciar Pucaranra en el rango de 35 a 55 metros de espesor para el bloque que genera el máximo oleaje y el bloque que genera el mínimo oleaje está en el rango de 1 a 16 metros de espesor de hielo, siendo el grosor de hielo y la pendiente $> 25^\circ$ del glaciar factores importantes en la generación de avalanchas. Otro factor es la distancia de recorrido, el bloque que genera el mínimo oleaje tiene mayor distancia inclinada que el bloque que genera mayor oleaje, evidenciando que el determinante en la altura de oleaje es el volumen de la masa glaciar.
- Se ha simulado el caso para el análisis de oleaje y desbordamiento cuando los puntos de impacto de avalanchas en la laguna generen ondas de impulso con dirección frontal de ángulo de 0° hacia el dique, pues crean alturas de olas y desbordamiento similar al caso real de la laguna, tal como se muestra en la figura 34, teniendo como altura máxima de oleaje de 25.5 metros y altura de subida de olas de 62.3 metros mostrados en la tabla 16.

- Se ha simulado el caso para el análisis de oleaje y el desbordamiento cuando el talud del borde libre que está en contacto con la laguna es de 90° o talud vertical, obteniendo resultados de altura de oleaje de 25.5 metros, subida de olas de 52.4 metros y resultando 9.9 metros en comparación con el caso actual con el que se encuentra el dique de contención de la laguna. Finalmente, el volumen de desbordamiento de 0.14 hm³ ha resultado en 19% de reducción de volumen de desbordamiento.

Riesgo físico sobre la laguna Palcacocha

- Con los resultados obtenidos en los puntos 5.1 y 5.2, se hallaron características del desbordamiento de la laguna Palcacocha en la tabla 19 en función de los datos de la tabla 21, tabla 13 y tabla 14, respectivamente, obteniendo alturas de oleaje entre 25.5, 11.3 y subidas de olas entre 62.3 y 52.4 metros que generan volúmenes de agua como los mostrados en los anexos 3 e ilustrados en la figura 45. Asimismo, con los resultados de Max-1, Max-2 y promedio se establecieron características del flujo de escombros como los mostrados en la tabla 19, teniendo resultados de altura de subida de ola en las condiciones actuales del dique de contención de 62.3 metros y en condiciones de que el talud del borde libre que está en contacto con la laguna es de ángulo vertical se tiene una altura de subida de ola de 52.4 metros que es 9.9 metros menos que el caso anterior.
- Con valores de subida de oleaje entre los 25.1, 52.4 y 62.3 metros de altura para generar volúmenes de agua a desbordar entre 0.04, 0.15 y 0.18 hm³ que son valores por debajo del mínimo volumen de 0.5 hm³ que ha considerado Somos et al., 2014, lo cual difiere en grandes volúmenes con nuestros resultados.

- De la probabilidad de estallido de la laguna Palcacocha que ha resultado media y el volumen máximo de desbordamiento estimado de 0.29 MMC, la cual en promedio tendría un recorrido de 6 Km del flujo de escombros, este escenario comparado con lo ocurrido el año 1941 en el que la laguna Jircacocha (con evidencias de agua debajo de la laguna Palcacocha), aportó con 3.3 MMC de agua para aumentar el flujo de escombros y generar doble proceso GLOF originado por la laguna Palcacocha y así desencadenar el aluvión del 13/12/1941. Como se conoce, en la actualidad la laguna Jircacocha ya no existe.



Conclusiones

- 1) En el desarrollo de la tesis se identificó y simuló amenazas de avalancha y sus riesgos físicos sobre la laguna Palcacocha, gracias al uso de herramientas tecnológicas se identificó y estudió las avalanchas y sus elementos generadores provenientes de los glaciares Palcaraju y Pucaranra que amenazan a la laguna Palcacocha, concluyendo que las avalanchas dependen de la pendiente de la superficie glaciar, con pendientes mayores a 25° y con espesor de hielo mayor a 16 metros. Así, las avalanchas impactarán en la laguna Palcacocha y generarán oleajes que influirán en el dique de contención, provocando oleajes de alturas considerables que sobrepasarán el dique con volúmenes de desbordamiento de agua, poniendo en riesgo físico el vaso de almacenamiento y el dique de contención de la laguna, provocando un desborde intempestivo de agua con rumbo al valle y con dirección agua debajo de la quebrada Cojup, obteniendo la probabilidad general de ocurrencia de un estallido de la laguna Palcacocha como probabilidad media.
- 2) En los glaciares de Palcaraju y Pucaranra existen amenazas de avalanchas que presentan peligro latente de deslizamiento de masa de hielo, producto del retroceso glaciar que expone a la superficie glaciar con pendientes superiores a los 25° , incrementando la probabilidad de desprendimiento de masas de hielo y deslizamientos hacia la laguna de Palcacocha. En tal sentido, se identificó zonas con pendiente mayores a 25° en las cuales el glaciar Pucaranra cuenta con el mayor espesor de hielo y todo ello generaría la mayor amenaza de avalanchas del glaciar hacia la laguna.



- 3) Se ha simulado diversos escenarios independientes de avalanchas y definiendo las zonas que generan mayores oleajes de impacto hacia la laguna Palcacocha, estas producirán oleajes que se propagarán con dirección al dique de contención que desborda para del agua de la laguna y así se generará un evento de flujo de escombros, erosionando el talud superior aguas abajo del dique morrénico con dirección al valle e incrementando el volumen de escombros a causa del caudal pico generado por el desbordamiento. Esto será un posible escenario de riesgo donde se deslicen varios bloques de hielo, generando mayores oleajes.
- 4) Se ha simulado escenarios Max1, Max2 y Prom basados en las alturas de oleajes desbordantes al dique, determinando que a la futura construcción de una infraestructura hidráulica de protección nueva que reemplace el dique de contención, el talud del borde libre que está en contacto con la laguna, debe de ser de talud vertical, ello genera una reducción en la subida de oleaje de 19% y reduce el volumen de desbordamiento.
- 5) Para reducir el riesgo físico en la laguna Palcacocha se debe reducir la altura del espejo de agua de la laguna, esto se reflejará en la reducción del volumen de almacenamiento y además se debe construir un nuevo dique de contención con talud vertical en la zona de contacto con la laguna para reducir el impacto de desbordamiento de los oleajes.



Recomendaciones

Considerando lo importante que tiene esta tesis en temas de gestión de riesgos de desastres en alta montaña ocasionados por eventos GLOF y los resultados obtenidos, se formulan las siguientes recomendaciones para la comunidad académica, profesionales tomadores de decisiones y diseñadores de infraestructuras hidráulicas, en el marco del cambio climático y efectos que generen riesgos en las altas montañas del Perú y así desarrollar el estado del arte con herramientas tecnológicas para la gestión del riesgo de desastres:

- 1) La laguna debe de reducirse y mantener en 11 metros el nivel del espejo de agua y la altura del dique deberá tener 7 metros, juntamente con la reducción del nivel de la laguna harían 18 metros de desnivel entre el espejo de la laguna y la corona del dique que sería un borde libre de 18 metros, además de que el talud en contacto con la laguna deberá ser vertical para que contrarreste la subida de oleaje y se tenga una reducción en el volumen de desbordamiento de aproximadamente en 45 %. El nivel del espejo de la laguna Palcacocha es de 4562.88 msnm y con la reducción de 11 metros tendría una cota de 4551.88 msnm, además de considerar la mejora de la infraestructura hidráulica de contención con talud vertical en el borde libre, aliviadero, desvío y retención de flujo de escombros.
- 2) Se debe realizar estudios de investigación para el desarrollo de modelos computacionales adecuados para simulación hidroglaciológica, hidrodinámica, hidromorfodinámica y así estimar el espesor de hielo en los glaciares tropicales del Perú, con estudios de avalanchas de hielo, rocas y morrenas hacia lagunas altoandinas, estudios de ondas de impacto o tsunamis con repercusión de

proceso GLOF y complementar con el uso de herramientas tecnológicas para agilizar la eficiencia de los procedimientos de análisis en la gestión de riesgos en alta montaña.

- 3) Se recomienda el desarrollo de estudios de investigación en simulación hidrodinámica e hidromorfodinámica con estructuras de contención de flujo de escombros en lugares donde se tiene pendiente de terreno y cauce menores a 15° , con la instalación de estructuras como pozas de decantación para retener el avance del desbordamiento de la laguna que será inicialmente agua y arrastrará material del dique morrénico y lecho del cauce. Con el estudio se conocerá el estado del arte en la simulación hidráulica de la estructura como barreras dinámicas, presas abiertas y drenes para el frenado del arrastre del flujo de escombros y transporte de grandes rocas (Mizuyama, 2008), seguido de la simulación de defensas frente a aluviones con pozas de decantadoras (Vial, 2009).



Referencias bibliográficas

- Aguilar, C. (2006). *Análisis de obras transversales no tradicionales para el control de aluviones, en la quebrada Mackay del cerro divisadero, Coyhaique, XI región*. [Memoria para optar título de ingeniero Civil. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile].
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcia283a/doc/bmfcia283a.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua (2015). *Inventario Nacional de Glaciares de la Cordillera Blanca*, 137 pp.
<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/199>.
- Autoridad Nacional del Agua (2016), *Batimetría Laguna Palcacocha*, 15 pp.
<https://hdl.handle.net/20.500.12543/518>
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, N° 4, 432 pp.*
<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=136E3036AA4FA05FE751C9EE3F2F7249>.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J. (2012). *Cambio Climático*. 112: 733.
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8>.
- Costa, JE y Schuster, RL (1988). *La formación y falla de presas naturales. Boletín de la Sociedad Geológica de América*, 100 (7), 1054-1068. DOI:
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2)
- Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. y Cochachin, A. (2014). Retiro de glaciares, desarrollo de lagos y peligros naturales asociados en Cordillera Blanca,



Perú. *Deslizamientos en regiones frías en el contexto del cambio climático*, 231-252.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-00867-7_17

Rickenmann, D. (1999). *Empirical relationships for debris flows*. *Natural hazards*, 19, 47-77. <https://doi.org/10.1023/A:1008064220727>.

Gaphaz (2017), *Evaluación de peligros por glaciares y permafrost en regiones de montaña documento técnico de orientación*. Lima, Perú, 72 pp. https://www.gaphaz.org/files/Evaluacion_peligros_glaciares_permafrost_montanas.pdf

González-Vida, J. M., Macías, J., Castro, M. J., Sánchez-Linares, C., de la Asunción, M., Ortega-Acosta, S., & Arcas, D. (2019). The Lituya Bay landslide-generated mega-tsunami—numerical simulation and sensitivity analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(2), 369-388. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-369-2019>.

Haerberli, W. (1983). *Frequency characteristics of glacier floods in The Swiss Alps*. *Annals of Glaciology*. 4. 85-90. <https://doi.org/10.3189/S0260305500005280>

Huggel, C., Kääh, A, Haerberli, W. & Krummenacher, B. (2003). *Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: Evaluation and application in the Swiss Alps*. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3, 647–662. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-647-2003>.

Huggel, C., Haerberli, W., Kääh, A., Bieri, D. & Richardson, S. (2004). *An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps*. *Canadian*

Science Publishing, 41 (6), 1068-1083.

<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t04-053>

Jaime, S. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*. 170-190.

<https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html>

Jitousono, T., Shimokawa, E., & Tsuchiya, S. (1996). Debris flow following the 1984 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 48(Special), 109-116.

https://doi.org/10.11475/sabo1973.48.Special_109

Klimeš, J., Novotný, J., Novotná, I., de Urries, B. J., Vilímek, V., Emmer, A., ... & Frey, H. (2016). Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: example from Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides*, 13, 1461-1477.

<https://doi.org/10.1007/s10346-016-0724-4>

Linsbauer, A., Paul, F., & Haeberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).

<https://doi.org/10.1029/2011JF002313>

Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J. T., Cochachin, A., & Frey, H. (2020). Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 93-114.

<https://hess.copernicus.org/articles/24/93/2020/>

- Mizuyama, T; Kobashi, S; OU, G; 1992. Prediction of debris flow peak discharge. Internationales symposium : Interpraevent. 1992, pp 99-108. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6463744>
- Montserrat, S. (2005). *Estudio experimental de obras de protección contra aluviones* [Tesis de postgrado, Universidad de Chile]. Repositorio académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102803>
- Pivalica Cisternas, DZ (2017). *Sistemas de contención de aluviones para la quebrada de Lo Cañas en la comuna de La Florida* (Tesis de doctorado, Universidad Andrés Bello). Repositorio académico de la Universidad Andrés Bello de Chile. <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/5017>
- Somos-Valenzuela, M. A., Chisolm, R. E., McKinney, D. C., & Rivas, D. (2014). *Inundation modeling of a potential glacial lake outburst flood in Huaraz, Peru*. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/27738>
- Somos-Valenzuela, M. A., Chisolm, R. E., Rivas, D. S., Portocarrero, C., & McKinney, D. C. (2016). Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2519-2543. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2519-2016>.
- Vilca, O., Mergili, M., Emmer, A., Frey, H. & Huggel, C. (2021). La cadena del proceso de inundación por desbordamiento de lagos glaciares de 2020 en

el lago Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Perú). *Deslizamientos de tierra*, 18 (6), 2211-2223.

<https://doi.org/10.1007/s10346-021-01670-0>



Anexos

Anexo 01: Fuente de información del repositorio de la Autoridad Nacional del Agua:

Batimetría de la laguna Palcacocha, realizada en febrero de 2016.
(<http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/518>).

Estado situacional de la laguna Palcacocha, marzo de 2013.
(<file:///C:/Users/Installer/Downloads/ANA0001380.pdf>).

Inventario nacional de glaciares y lagunas
(<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/199>).

Modelo digital de elevación (DEM) de la subcuenca del río Quillcay de resolución 12.5x12.5 metros (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>).

Anexo 02: Características de los bloques de hielo que colisionarán en la laguna

Tabla 20.

Dimensiones de los bloques de hielo de los glaciares de Palcaraju y Pucaranra.

Bloque	Coordenadas UTM centro de gravedad			Dimensiones de la masa (m)		Área (m ²)
	Coord Este	Coord Norte	Altitud (msnm)	Largo	Ancho	
1	237607.97	8962361.57	5309.56	199	55	11016
2	237734.88	8962276.95	5249.18	164	104	17104
3	238660.20	8963056.91	5541.50	191	102	19507
4	238656.04	8962890.79	5462.21	265	69	18281
5	238927.52	8962965.40	5545.33	210	87	18197
6	238359.20	8962751.03	5371.79	221	80	17697
7	238858.48	8962797.44	5438.63	215	111	23933
8	238544.95	8962563.94	5301.20	426	148	63108
9	237887.32	8962449.00	5293.99	272	109	29734
10	238486.34	8962161.34	5088.20	153	67	10313
11	238291.58	8962338.06	5168.93	422	155	65297
12	238059.22	8962684.13	5354.50	283	135	38286
13	239278.58	8963114.28	5797.28	287	112	32098
14	239232.77	8962835.77	5615.53	156	93	14511
15	239156.28	8962968.87	5692.88	192	82	15652
16	239147.87	8963239.99	5874.25	221	87	19205
17	239488.37	8962906.93	5786.45	205	96	19697
18	238973.53	8962415.10	5257.07	231	57	13159
19	238889.33	8962610.88	5325.77	199	66	13196
20	238957.01	8962268.19	5189.08	215	66	14187
21	239502.98	8962560.58	5496.41	230	105	24244
22	239328.89	8962238.68	5228.75	135	136	18342
23	239369.48	8962400.60	5334.68	183	108	19704
24	239784.42	8962199.81	5245.65	132	131	17299
25	239661.99	8962098.57	5175.48	232	62	14453
26	239273.35	8962107.55	5143.46	201	47	9418
27	239048.64	8962063.97	5093.42	112	112	12560
28	240423.48	8962055.63	5289.56	274	60	16563
29	240417.04	8962195.87	5350.98	159	52	8305
30	240616.16	8962136.00	5353.58	183	69	12607
31	240226.66	8961986.05	5223.89	223	67	15050
32	239925.45	8962013.60	5194.11	163	78	12704
33	240021.70	8961801.03	5113.07	187	86	16098
34	240534.80	8961665.42	5204.98	133	61	8092
35	240395.71	8961831.56	5204.31	87	38	3281
36	240726.95	8961966.57	5307.03	155	75	11620
37	240394.52	8961259.62	5098.39	111	68	7500
38	240487.79	8961124.92	5144.02	164	83	13594
39	240359.23	8960962.30	5103.60	132	132	17436
40	240623.13	8960918.47	5232.65	169	89	15123
41	239853.36	8960914.83	4913.14	280	111	30990
42	239914.10	8961184.22	4953.73	156	76	11798
43	239974.72	8961509.80	5022.33	164	103	16824
44	240045.78	8961233.57	5015.51	145	71	10345
45	240114.98	8961462.42	5082.27	170	58	9942
46	239385.27	8962010.42	5109.11	152	63	9531
47	238618.71	8962074.40	5071.98	96	46	4394
48	238453.60	8962001.75	5026.78	203	51	10313
49	238629.19	8961950.97	5025.90	112	71	7930
50	238730.22	8962319.47	5188.15	102	102	10412
51	238610.72	8962268.68	5149.91	79	80	6288
52	239696.10	8961886.41	5095.03	166	71	11719
53	241520.83	8961404.64	5980.12	266	103	27516
54	241473.13	8961625.67	5997.88	167	76	12634
55	241291.58	8961398.90	5791.67	307	99	30258
56	241175.00	8961338.58	5668.29	184	107	19733
57	241141.82	8961129.85	5582.19	189	66	12521
58	240946.90	8961032.52	5436.64	194	108	20912
59	240591.63	8961321.17	5184.28	174	68	11871

Tabla 21*Características de bloques de hielo que colisionarían con la laguna Palcacocha.*

Bloque	Dimensiones de la masa (m)			Área (m ²)	Volumen (m ³)
	Ancho	largo	espesor		
1	199	55	18	11016	198281
2	164	104	31	17104	530223
3	191	102	37	19507	721761
4	265	69	48	18281	877500
5	210	87	26	18197	473117
6	221	80	40	17697	707876
7	215	111	34	23933	813721
8	426	148	42	63108	2650539
9	272	109	27	29734	802829
10	153	68	50	10313	515625
11	422	155	39	65297	2546565
12	283	135	25	38286	957141
13	287	112	26	32098	834536
14	156	93	17	14511	246680
15	192	82	12	15652	187829
16	221	87	14	19205	268870
17	205	96	28	19697	551504
18	231	57	27	13159	355284
19	199	66	39	13196	514643
20	215	66	41	14187	581679
21	230	105	12	24244	290930
22	135	135	33	18342	605296
23	183	108	23	19704	453201
24	132	132	43	17299	743858
25	232	62	50	14453	722656
26	201	47	38	9418	357886
27	112	112	41	12560	514940
28	274	60	44	16563	728750
29	159	52	31	8305	257469
30	183	69	34	12607	428638
31	223	68	49	15050	737430
32	163	78	45	12704	571668
33	187	86	49	16098	788826
34	133	61	55	8092	445035
35	87	38	58	3281	190313
36	155	75	34	11620	395072
37	111	67	58	7500	435000
38	164	83	47	13594	638936
39	132	132	47	17436	819480
40	169	90	43	15123	650285
41	280	111	34	30990	1053673
42	156	76	26	11798	306738
43	164	103	33	16824	555178
44	145	71	58	10345	600020
45	170	59	62	9942	616390
46	152	63	46	9531	438437
47	96	46	51	4394	224085
48	203	51	29	10313	299063
49	112	71	48	7930	380660
50	102	102	50	10412	520605
51	79	79	48	6288	301834
52	166	71	46	11719	539063
53	266	104	19	27516	522799
54	167	76	24	12634	303224
55	307	98	15	30258	453870
56	184	107	15	19733	295995
57	189	66	18	12521	225377
58	194	108	22	20912	460061
59	174	68	46	11871	546044

Tabla 22

Características recorrido de los bloques que colisionarían con la laguna Palcacocha.

Bloques	Longitud horizontal (m)	Lugar impacto	Distancia inclinada (m)	Desnivel (m)	Pendiente recorrido (°)
1	1972	B	2118	747	20.20
2	1794	B	1932	686	20.35
3	1964	C	2192	979	25.58
4	1807	C	2015	899	25.56
5	1768	C	2029	982	27.73
6	1900	B	2080	809	22.28
7	1661	C	1867	876	26.88
8	1759	B	1926	738	21.96
9	1762	B	1917	731	21.85
10	1269	B	1378	525	21.84
11	1467	B	1590	606	21.84
12	1905	B	2078	792	21.82
13	1940	D	2305	1234	30.68
14	1637	D	1938	1053	31.12
15	1801	D	2134	1130	30.33
16	2076	D	2473	1311	30.38
17	1776	D	2187	1223	32.05
18	1197	C	1367	694	29.08
19	1421	C	1605	763	27.23
20	1058	C	1216	626	29.49
21	1409	D	1688	933	31.69
22	1024	D	1216	666	31.36
23	1202	D	1422	772	31.09
24	1154	D	1334	683	29.31
25	990	D	1153	612	30.45
26	876	D	1040	580	31.97
27	816	C	953	530	31.89
28	1583	D	1749	727	23.81
29	1715	D	1889	788	23.90
30	1765	D	1936	791	23.40
31	1264	D	1415	661	26.77
32	1111	D	1260	631	28.70
33	992	D	1118	550	28.20
34	1372	E	1521	642	24.19
35	1348	D	1492	641	24.62
36	1715	D	1875	744	22.74
37	1080	E	1209	535	25.36
38	1251	E	1383	581	24.07
39	1058	E	1179	541	26.28
40	1341	E	1498	670	25.61
41	522	F	607	350	33.06
42	582	E	674	391	33.21
43	759	D	867	459	30.36
44	719	E	830	453	31.23
45	912	D	1033	519	28.81
46	812	D	967	546	32.36
47	1080	B	1198	509	24.34
48	1083	B	1177	464	22.57
49	940	B	1046	463	25.36
50	1344	B	1481	625	24.18
51	1340	B	1462	587	23.00
52	829	D	969	532	31.46
53	2277	E	2772	1417	29.29
54	2497	D	2983	1435	27.56
55	2035	E	2396	1229	29.39
56	1901	E	2246	1105	28.19
57	1909	E	2210	1019	26.43
58	1755	E	1978	874	25.31
59	1293	E	1439	621	24.73

(*): desnivel medido desde el espejo de la laguna (cota 4563 msnm, según ANA, 2016)

Anexo 03: Análisis de oleaje, altura de olas y volumen desbordamiento

Tabla 23

Tabla datos de entrada y cálculo de la velocidad de caída de los bloques.

N°	Bloque	Volumen (m3)	Desnivel (m)	Angulo de deslizamiento	Lugar impacto	Angulo de impacto	longitud propagación	Profundidad máxima	Prof. Agua tranq-Dique	Velocidad (m/seg)
1	P-1	197010	747	20.2	B	81	1344	71	19.4	12.6
2	P-2	528736	686	20.35	B	81	1344	71	19.4	15.9
3	P-3	720834	979	25.58	C	84	1549	71	19.4	67.8
4	P-4	877680	899	25.56	C	84	1549	71	19.4	64.9
5	P-5	475020	982	27.73	C	84	1549	71	19.4	77.0
6	P-6	707200	809	22.28	B	81	1344	71	19.4	42.1
7	P-7	811410	876	26.88	C	84	1549	71	19.4	69.6
8	P-8	2648016	738	21.96	B	81	1344	71	19.4	37.5
9	P-9	800496	731	21.85	B	81	1344	71	19.4	36.4
10	P-10	520200	525	21.84	B	81	1344	71	19.4	30.8
11	P-11	2550990	606	21.84	B	81	1344	71	19.4	33.0
12	P-12	955125	792	21.82	B	81	1344	71	19.4	37.6
13	P-13	835744	1234	30.68	D	0	1620	71	19.4	96.7
14	P-14	246636	1053	31.12	D	0	1620	71	19.4	90.6
15	P-15	188928	1130	30.33	D	0	1620	71	19.4	91.5
16	P-16	269178	1311	30.38	D	0	1620	71	19.4	98.8
17	P-17	551040	1223	32.05	D	0	1620	71	19.4	100.2
18	P-18	355509	694	29.08	C	84	1549	71	19.4	68.6
19	P-19	512226	763	27.23	C	84	1549	71	19.4	66.2
20	P-20	581790	626	29.49	C	84	1549	71	19.4	66.2
21	P-21	289800	933	31.69	D	0	1620	71	19.4	86.7
22	P-22	601425	666	31.36	D	0	1620	71	19.4	72.5
23	P-23	454572	772	31.09	D	0	1620	71	19.4	77.5
24	P-24	749232	683	29.31	D	0	1620	71	19.4	68.6
25	P-25	719200	612	30.45	D	0	1620	71	19.4	67.6
26	P-26	358986	580	31.97	D	0	1620	71	19.4	68.9
27	P-27	514304	530	31.89	C	84	1549	71	19.4	65.7
28	P-28	723360	727	23.81	D	0	1620	71	19.4	50.0
29	P-29	256308	788	23.9	D	0	1620	71	19.4	52.6
30	P-30	429318	791	23.4	D	0	1620	71	19.4	49.7
31	P-31	743036	661	26.77	D	0	1620	71	19.4	60.1
32	P-32	572130	631	28.7	D	0	1620	71	19.4	64.4
33	P-33	788018	550	28.2	D	0	1620	71	19.4	58.9
34	P-34	446215	642	24.19	E	-86	1604	71	19.4	48.9
35	P-35	191748	641	24.62	D	0	1620	71	19.4	50.9
36	P-36	395250	744	22.74	D	0	1620	71	19.4	43.8
37	P-37	431346	535	25.36	E	-86	1604	71	19.4	49.4
38	P-38	639764	581	24.07	E	-86	1604	71	19.4	45.9
39	P-39	818928	541	26.28	E	-86	1604	71	19.4	52.8
40	P-40	654030	670	25.61	E	-86	1604	71	19.4	56.2
41	P-41	1056720	350	33.06	F	-84	1561	71	19.4	55.0
42	P-42	308256	391	33.21	E	-86	1604	71	19.4	58.4
43	P-43	557436	459	30.36	D	0	1620	71	19.4	58.4
44	P-44	597110	453	31.23	E	-86	1604	71	19.4	59.6
45	P-45	621860	519	28.81	D	0	1620	71	19.4	58.7
46	P-46	440496	546	32.36	D	0	1620	71	19.4	67.5
47	P-47	225216	509	24.34	B	81	1344	71	19.4	44.2
48	P-48	300237	464	22.57	B	81	1344	71	19.4	33.6
49	P-49	381696	463	25.36	B	81	1344	71	19.4	45.9
50	P-50	520200	625	24.18	B	81	1344	71	19.4	48.2
51	P-51	299568	587	23	B	81	1344	71	19.4	40.5
52	P-52	542156	532	31.46	D	0	1620	71	19.4	65.0
53	P-53	525616	1417	29.29	E	-86	1604	71	19.4	98.8
54	P-54	304608	1435	27.56	D	0	1620	71	19.4	92.3
55	P-55	451290	1229	29.39	E	-86	1604	71	19.4	92.4
56	P-56	295320	1105	28.19	E	-86	1604	71	19.4	83.4
57	P-57	224532	1019	26.43	E	-86	1604	71	19.4	73.2
58	P-58	460944	874	25.31	E	-86	1604	71	19.4	62.9
59	P-59	544272	621	24.73	E	-86	1604	71	19.4	50.6

Nota: Los colores grises en las celdas indican los mayores valores y en la celda ángulo de deslizamiento indican que cumplen el rango.



Tabla 24

Tabla parámetros dimensionales de verificación.

Nº	Bloque	numero de Froude, deslizamiento	espesor relativo del bloque	densidad relativa del bloque	volumen relativo del bloque	masa relativa del deslizamiento	ancho de deslizamiento relativo	parámetro de producto de impulso
1	P-1	0.48	0.3	1.7	0.20	0.33	2.8	0.18
2	P-2	0.60	0.4	1.7	0.64	1.09	2.3	0.40
3	P-3	2.57	0.5	1.7	0.75	1.27	2.7	1.90
4	P-4	2.46	0.7	1.7	0.66	1.12	3.7	2.00
5	P-5	2.92	0.4	1.7	0.45	0.76	3.0	1.58
6	P-6	1.60	0.6	1.7	0.63	1.08	3.1	1.19
7	P-7	2.64	0.5	1.7	0.75	1.27	3.0	1.86
8	P-8	1.42	0.6	1.7	1.23	2.10	6.0	1.28
9	P-9	1.38	0.4	1.7	0.58	0.99	3.8	0.83
10	P-10	1.17	0.7	1.7	0.67	1.15	2.2	0.98
11	P-11	1.25	0.5	1.7	1.20	2.04	5.9	1.08
12	P-12	1.42	0.4	1.7	0.67	1.14	4.0	0.85
13	P-13	3.67	0.4	1.7	0.58	0.98	4.0	2.09
14	P-14	3.43	0.2	1.7	0.31	0.53	2.2	1.36
15	P-15	3.47	0.2	1.7	0.20	0.33	2.7	1.03
16	P-16	3.74	0.2	1.7	0.24	0.41	3.1	1.26
17	P-17	3.80	0.4	1.7	0.53	0.91	2.9	2.19
18	P-18	2.60	0.4	1.7	0.31	0.52	3.3	1.30
19	P-19	2.51	0.5	1.7	0.51	0.87	2.8	1.72
20	P-20	2.51	0.6	1.7	0.54	0.91	3.0	1.77
21	P-21	3.28	0.2	1.7	0.25	0.42	3.2	1.03
22	P-22	2.75	0.5	1.7	0.88	1.50	1.9	1.96
23	P-23	2.94	0.3	1.7	0.49	0.84	2.6	1.51
24	P-24	2.60	0.6	1.7	1.13	1.91	1.9	2.27
25	P-25	2.56	0.7	1.7	0.61	1.05	3.3	2.06
26	P-26	2.61	0.5	1.7	0.35	0.60	2.8	1.58
27	P-27	2.49	0.6	1.7	0.91	1.55	1.6	1.99
28	P-28	1.89	0.6	1.7	0.52	0.89	3.9	1.40
29	P-29	1.99	0.4	1.7	0.32	0.54	2.2	1.09
30	P-30	1.88	0.5	1.7	0.47	0.79	2.6	1.19
31	P-31	2.28	0.7	1.7	0.66	1.12	3.1	1.87
32	P-32	2.44	0.6	1.7	0.70	1.18	2.3	1.93
33	P-33	2.23	0.7	1.7	0.84	1.42	2.6	1.93
34	P-34	1.85	0.8	1.7	0.67	1.13	1.9	1.63
35	P-35	1.93	0.8	1.7	0.44	0.74	1.2	1.56
36	P-36	1.66	0.5	1.7	0.51	0.86	2.2	1.07
37	P-37	1.87	0.8	1.7	0.77	1.31	1.6	1.74
38	P-38	1.74	0.7	1.7	0.77	1.32	2.3	1.47
39	P-39	2.00	0.7	1.7	1.23	2.09	1.9	1.88
40	P-40	2.13	0.6	1.7	0.77	1.31	2.4	1.71
41	P-41	2.08	0.5	1.7	0.75	1.27	3.9	1.44
42	P-42	2.21	0.4	1.7	0.39	0.67	2.2	1.13
43	P-43	2.21	0.5	1.7	0.67	1.15	2.3	1.48
44	P-44	2.26	0.8	1.7	0.82	1.39	2.0	2.09
45	P-45	2.22	0.9	1.7	0.73	1.23	2.4	2.09
46	P-46	2.56	0.6	1.7	0.57	0.98	2.1	1.93
47	P-47	1.67	0.7	1.7	0.47	0.79	1.4	1.29
48	P-48	1.27	0.4	1.7	0.29	0.50	2.9	0.67
49	P-49	1.74	0.7	1.7	0.68	1.15	1.6	1.43
50	P-50	1.83	0.7	1.7	1.01	1.72	1.4	1.70
51	P-51	1.54	0.7	1.7	0.75	1.28	1.1	1.30
52	P-52	2.46	0.6	1.7	0.65	1.10	2.3	1.92
53	P-53	3.74	0.3	1.7	0.39	0.67	3.7	1.67
54	P-54	3.50	0.3	1.7	0.36	0.62	2.4	1.72
55	P-55	3.50	0.2	1.7	0.29	0.50	4.3	1.28
56	P-56	3.16	0.2	1.7	0.32	0.54	2.6	1.19
57	P-57	2.77	0.3	1.7	0.24	0.40	2.7	1.07
58	P-58	2.38	0.3	1.7	0.47	0.80	2.7	1.21
59	P-59	1.92	0.6	1.7	0.62	1.05	2.5	1.51

Nota: Los colores grises en las celdas indican que cumplen el rango.



Tabla 25

Tabla análisis de altura de oleaje.

Nº	Bloque	amplitud onda	altura de ola	amplitud de ola	Periodo de la ola	Longitud de la ola	amplitud de ola máx	aceleración ola prom	tiempo de viaje de la ola	Distancia radial relativa	Altura relativa de olas
1	P-1	164.7	1.3	1.0	10.7	152.0	7.9	22.1	61	18.93	0.018
2	P-2	245.8	2.5	2.0	12.6	182.5	15.0	23.0	59	18.93	0.035
3	P-3	538.1	7.1	5.7	16.4	257.7	52.7	27.0	57	21.82	0.100
4	P-4	552.7	7.4	5.9	16.6	261.7	55.0	27.2	57	21.82	0.105
5	P-5	490.6	6.1	4.9	15.8	244.4	45.5	26.3	59	21.82	0.087
6	P-6	425.3	5.9	4.8	15.7	241.5	36.2	25.4	53	18.93	0.084
7	P-7	532.5	7.0	5.6	16.4	256.1	51.8	26.9	58	21.82	0.099
8	P-8	441.9	6.3	5.1	15.9	246.8	38.5	25.6	52	18.93	0.089
9	P-9	354.9	4.4	3.6	14.6	219.0	27.1	24.4	55	18.93	0.063
10	P-10	387.5	5.1	4.1	15.1	229.5	31.2	24.8	54	18.93	0.072
11	P-11	405.7	5.5	4.4	15.4	235.3	33.5	25.1	54	18.93	0.078
12	P-12	359.9	4.5	3.6	14.7	220.6	27.7	24.4	55	18.93	0.064
13	P-13	564.6	23.9	19.1	22.2	431.8	56.9	28.6	57	22.82	0.336
14	P-14	454.8	16.9	13.5	20.4	366.2	40.3	26.6	61	22.82	0.238
15	P-15	395.5	13.5	10.8	19.3	331.7	32.2	25.6	63	22.82	0.190
16	P-16	438.5	15.9	12.7	20.1	356.6	38.0	26.3	62	22.82	0.224
17	P-17	578.1	24.8	19.8	22.4	440.1	59.1	28.8	56	22.82	0.349
18	P-18	444.5	5.2	4.2	15.2	231.4	38.8	25.6	61	21.82	0.074
19	P-19	512.0	6.6	5.3	16.1	250.4	48.7	26.6	58	21.82	0.093
20	P-20	519.6	6.7	5.4	16.2	252.5	49.8	26.7	58	21.82	0.095
21	P-21	396.0	13.5	10.8	19.3	332.0	32.3	25.6	63	22.82	0.191
22	P-22	546.6	22.7	18.1	21.9	420.9	54.1	28.2	57	22.82	0.319
23	P-23	480.1	18.4	14.7	20.8	381.1	43.9	27.0	60	22.82	0.259
24	P-24	587.8	25.5	20.4	22.6	446.0	60.7	29.0	56	22.82	0.359
25	P-25	560.5	23.6	18.9	22.2	429.3	56.3	28.5	57	22.82	0.332
26	P-26	491.6	19.1	15.3	21.0	387.9	45.6	27.2	59	22.82	0.269
27	P-27	550.7	7.4	5.9	16.6	261.2	54.7	27.2	57	21.82	0.104
28	P-28	462.4	17.3	13.9	20.5	370.6	41.4	26.7	61	22.82	0.244
29	P-29	408.4	14.2	11.4	19.5	339.1	33.9	25.8	63	22.82	0.200
30	P-30	426.0	15.2	12.2	19.9	349.4	36.3	26.1	62	22.82	0.214
31	P-31	533.9	21.8	17.5	21.7	413.2	52.0	28.0	58	22.82	0.308
32	P-32	542.9	22.4	17.9	21.9	418.6	53.5	28.2	58	22.82	0.316
33	P-33	542.9	22.4	17.9	21.9	418.6	53.5	28.2	58	22.82	0.316
34	P-34	498.0	5.7	4.6	15.5	238.5	46.6	26.3	61	22.59	0.081
35	P-35	488.1	18.9	15.1	21.0	385.8	45.1	27.2	60	22.82	0.266
36	P-36	404.8	14.0	11.2	19.4	337.1	33.4	25.7	63	22.82	0.197
37	P-37	515.6	6.1	4.8	15.8	243.2	49.2	26.6	60	22.59	0.085
38	P-38	473.1	5.3	4.2	15.2	231.9	42.9	26.0	62	22.59	0.074
39	P-39	535.8	6.4	5.2	16.0	248.5	52.3	26.9	60	22.59	0.091
40	P-40	510.2	6.0	4.8	15.7	241.8	48.4	26.5	60	22.59	0.084
41	P-41	468.2	5.7	4.5	15.5	237.7	42.2	25.9	60	21.99	0.080
42	P-42	415.8	4.3	3.4	14.5	216.5	34.9	25.1	64	22.59	0.060
43	P-43	475.0	18.1	14.5	20.7	378.1	43.2	26.9	60	22.82	0.255
44	P-44	565.1	7.0	5.6	16.4	256.2	57.0	27.4	59	22.59	0.099
45	P-45	564.2	23.9	19.1	22.2	431.6	56.9	28.6	57	22.82	0.336
46	P-46	542.0	22.4	17.9	21.9	418.1	53.3	28.2	58	22.82	0.315
47	P-47	444.1	6.4	5.1	16.0	247.4	38.8	25.7	52	18.93	0.090
48	P-48	318.5	3.7	3.0	14.0	207.1	22.8	23.9	56	18.93	0.053
49	P-49	466.6	6.9	5.5	16.3	254.5	42.0	26.0	52	18.93	0.097
50	P-50	508.7	7.9	6.3	16.9	267.8	48.2	26.7	50	18.93	0.111
51	P-51	445.7	6.4	5.1	16.0	247.9	39.0	25.7	52	18.93	0.090
52	P-52	540.8	22.3	17.8	21.8	417.4	53.1	28.1	58	22.82	0.314
53	P-53	503.9	5.8	4.7	15.6	240.1	47.4	26.4	61	22.59	0.082
54	P-54	512.7	20.5	16.4	21.4	400.5	48.8	27.6	59	22.82	0.288
55	P-55	442.5	4.7	3.8	14.8	223.7	38.5	25.5	63	22.59	0.067
56	P-56	426.0	4.5	3.6	14.6	219.3	36.3	25.3	63	22.59	0.063
57	P-57	403.3	4.1	3.3	14.3	213.1	33.2	24.9	64	22.59	0.058
58	P-58	429.4	4.5	3.6	14.7	220.2	36.7	25.3	63	22.59	0.064
59	P-59	479.7	5.4	4.3	15.3	233.7	43.9	26.1	62	22.59	0.076

Nota: Los colores grises en la celdas $H(r, \tau)$ indican los mayores valores y los colores grises en el resto de las celdas indican que cumplen el rango.



Tabla 26

Análisis de ascenso de oleaje y volumen de desbordamiento.

Nº	Bloque	Angulo relativo	No linealidad	Periodo relativo	Celeridad onda relativa	Longitud onda relativa	altura de subida de la ola	Coef.	Coef.	Const.	volumen total m3	Volumen corregido m3
1	P-1	2	6	8	0.70	8	2.0	0.48	0.65	1.3	2102	
2	P-2	2	6	9	0.76	9	4.2	0.48	0.70	1.3	5679	
3	P-3	2	7	12	1.05	13	14.1	0.48	0.88	1.3	33219	7363
4	P-4	2	7	12	1.07	13	14.8	0.48	0.90	1.3	35836	8795
5	P-5	2	7	11	0.99	13	11.9	0.48	0.85	1.3	25645	3645
6	P-6	2	6	11	0.92	12	11.4	0.48	0.84	1.3	24179	3020
7	P-7	2	7	12	1.04	13	13.9	0.48	0.88	1.3	32267	6858
8	P-8	2	6	11	0.94	13	12.3	0.48	0.85	1.3	26890	4203
9	P-9	2	6	10	0.85	11	8.2	0.48	0.78	1.3	14774	216
10	P-10	2	6	11	0.88	12	9.6	0.48	0.80	1.3	18737	1087
11	P-11	2	6	11	0.90	12	10.5	0.48	0.82	1.3	21226	1886
12	P-12	2	6	10	0.86	11	8.4	0.48	0.78	1.3	15347	305
13	P-13	2	2	16	1.17	22	57.7	0.48	1.00	1.3	215472	162132
14	P-14	2	2	14	1.02	19	38.5	0.48	1.00	1.3	130710	84041
15	P-15	2	2	14	0.94	17	29.7	0.48	1.00	1.3	94654	52346
16	P-16	2	2	14	0.99	18	35.9	0.48	1.00	1.3	120116	74583
17	P-17	2	2	16	1.19	23	60.3	0.48	1.00	1.3	227579	173512
18	P-18	2	7	11	0.94	12	9.9	0.48	0.81	1.3	19547	1329
19	P-19	2	7	11	1.02	13	12.9	0.48	0.86	1.3	28896	5151
20	P-20	2	7	12	1.03	13	13.2	0.48	0.87	1.3	30111	5751
21	P-21	2	2	14	0.94	17	29.7	0.48	1.00	1.3	94903	52559
22	P-22	2	2	16	1.15	22	54.3	0.48	1.00	1.3	199928	147585
23	P-23	2	2	15	1.05	20	42.6	0.48	1.00	1.3	148102	99759
24	P-24	2	2	16	1.21	23	62.3	0.48	1.00	1.3	236436	181861
25	P-25	2	2	16	1.17	22	56.9	0.48	1.00	1.3	211878	158762
26	P-26	2	2	15	1.07	20	44.5	0.48	1.00	1.3	156437	107362
27	P-27	2	7	12	1.06	13	14.7	0.48	0.90	1.3	35479	8596
28	P-28	2	2	15	1.03	19	39.7	0.48	1.00	1.3	135793	88612
29	P-29	2	2	14	0.96	17	31.5	0.48	1.00	1.3	101897	58587
30	P-30	2	2	14	0.98	18	34.1	0.48	1.00	1.3	112379	67743
31	P-31	2	2	15	1.13	21	52.0	0.48	1.00	1.3	189311	137694
32	P-32	2	2	16	1.14	22	53.6	0.48	1.00	1.3	196772	144641
33	P-33	2	2	16	1.14	22	53.6	0.48	1.00	1.3	196762	144631
34	P-34	2	8	11	1.00	12	11.0	0.48	0.83	1.3	22720	2437
35	P-35	2	2	15	1.06	20	43.9	0.48	1.00	1.3	153887	105032
36	P-36	2	2	14	0.95	17	31.0	0.48	1.00	1.3	99851	56816
37	P-37	2	8	11	1.02	13	11.7	0.48	0.84	1.3	25007	3368
38	P-38	2	8	11	0.97	12	10.0	0.48	0.81	1.3	19739	1389
39	P-39	2	8	11	1.04	13	12.6	0.48	0.86	1.3	27830	4640
40	P-40	2	8	11	1.01	12	11.5	0.48	0.84	1.3	24298	3070
41	P-41	2	7	11	0.97	12	10.9	0.48	0.83	1.3	22343	2293
42	P-42	2	8	10	0.91	11	7.9	0.48	0.77	1.3	13937	112
43	P-43	2	2	15	1.04	19	41.7	0.48	1.00	1.3	144504	96490
44	P-44	2	8	12	1.08	13	13.9	0.48	0.88	1.3	32311	6881
45	P-45	2	2	16	1.17	22	57.6	0.48	1.00	1.3	215075	161760
46	P-46	2	2	16	1.14	22	53.4	0.48	1.00	1.3	196017	143937
47	P-47	2	6	11	0.95	13	12.4	0.48	0.85	1.3	27258	4373
48	P-48	2	6	10	0.82	11	6.7	0.48	0.75	1.3	11086	
49	P-49	2	6	12	0.97	13	13.6	0.48	0.88	1.3	31302	6356
50	P-50	2	6	12	1.02	14	15.9	0.48	0.92	1.3	40010	11199
51	P-51	2	6	11	0.95	13	12.5	0.48	0.86	1.3	27526	4498
52	P-52	2	2	16	1.14	22	53.2	0.48	1.00	1.3	195054	143040
53	P-53	2	8	11	1.00	12	11.2	0.48	0.83	1.3	23473	2733
54	P-54	2	2	15	1.10	21	48.2	0.48	1.00	1.3	172392	122022
55	P-55	2	8	11	0.93	12	8.8	0.48	0.79	1.3	16469	518
56	P-56	2	8	10	0.92	11	8.2	0.48	0.78	1.3	14873	230
57	P-57	2	8	10	0.89	11	7.5	0.48	0.76	1.3	12855	27
58	P-58	2	8	10	0.92	11	8.4	0.48	0.78	1.3	15189	279
59	P-59	2	8	11	0.98	12	10.2	0.48	0.82	1.3	20501	1637

Nota: Los colores grises en las celdas R y √ indican los mayores valores y los colores grises en el resto de las celdas indican que cumplen el rango.



Anexo 04: profundidad de la laguna y secciones longitudinales en puntos de impacto.

Figura 46

Perfiles longitudinales de las zonas de impacto hacia el dique de la laguna Palcacocha.

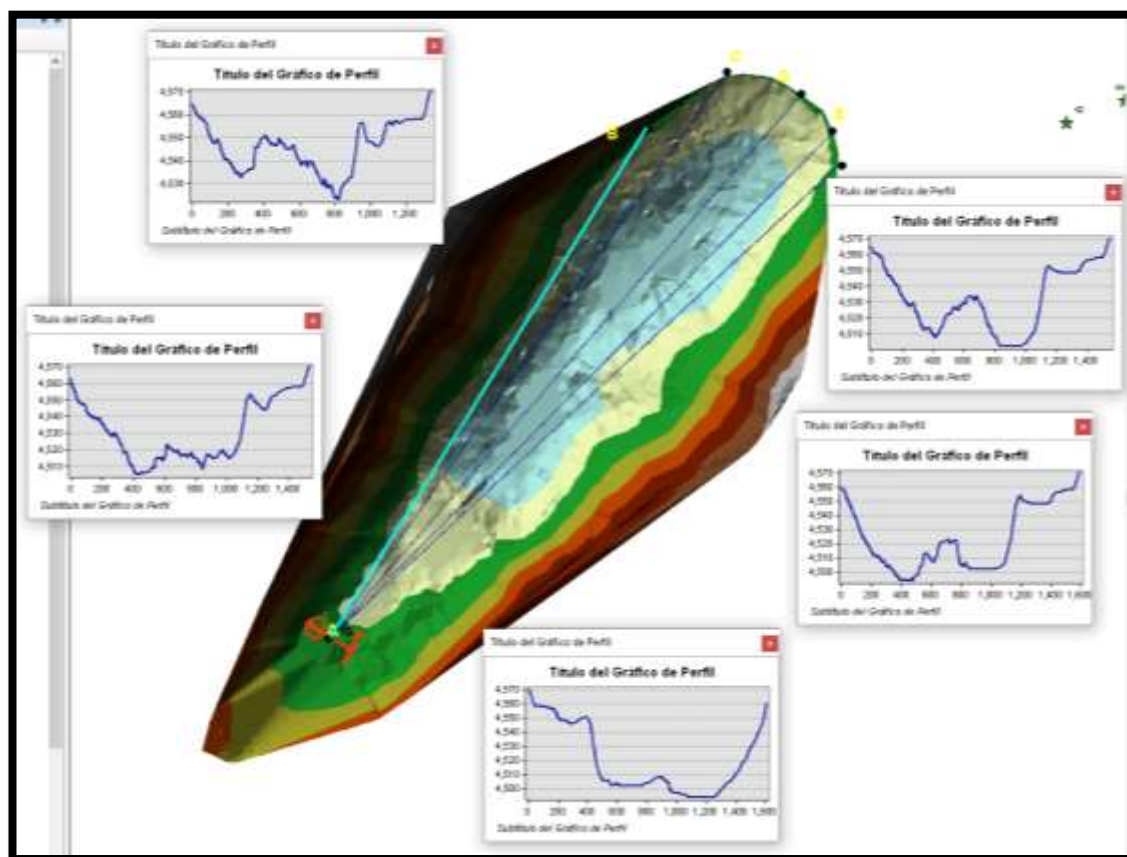


Figura 47

Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - B.

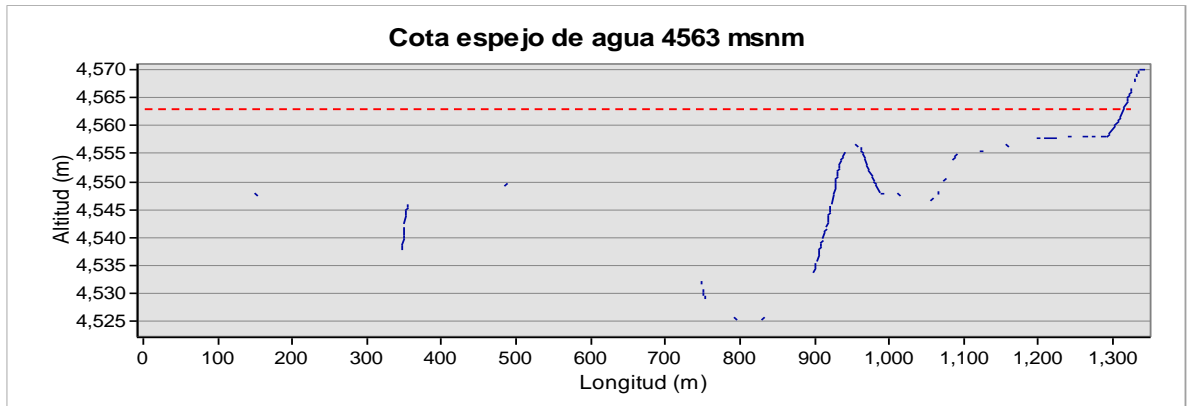


Figura 48

Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - C.

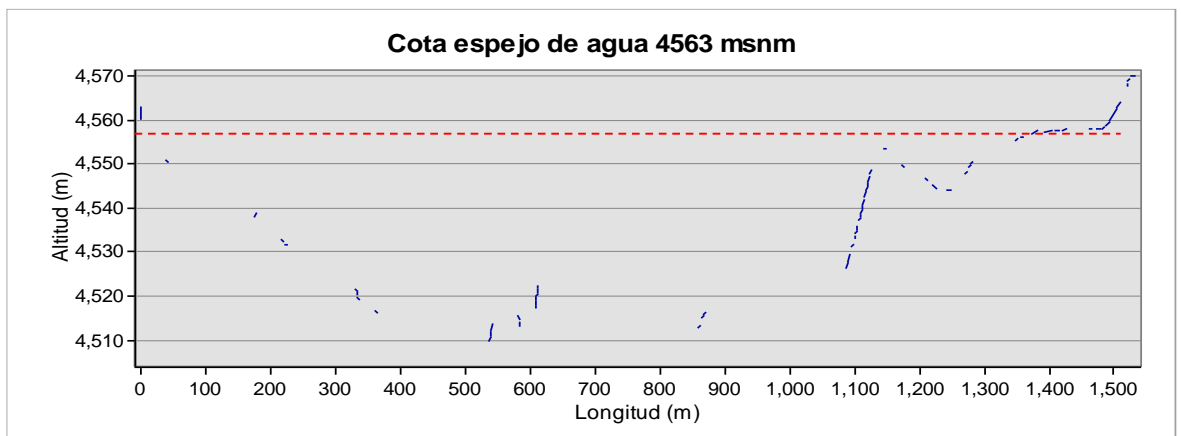


Figura 49

Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - D.

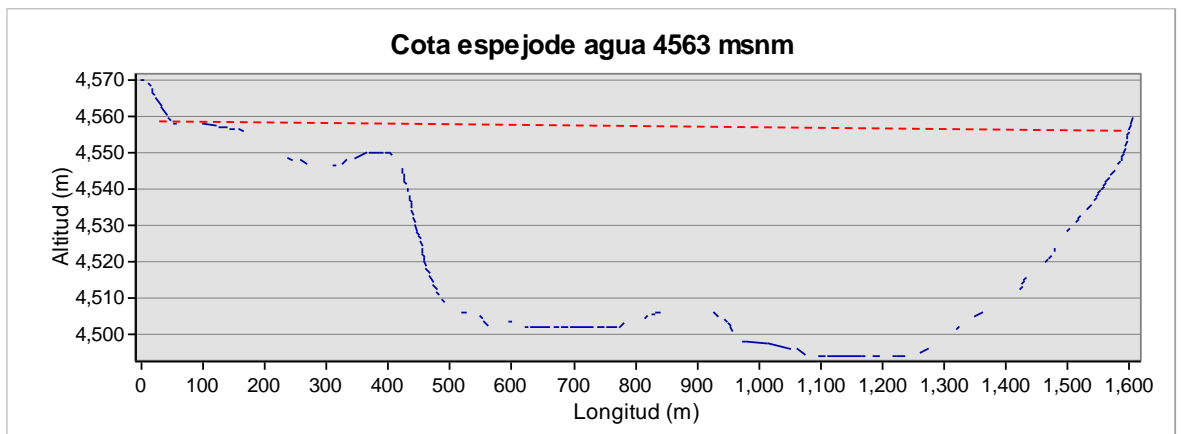


Figura 50

Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - E.

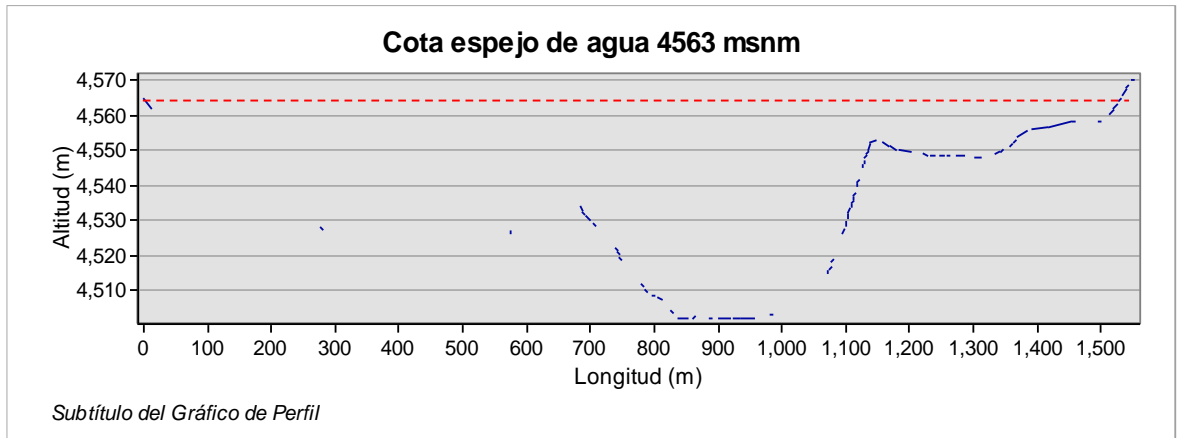
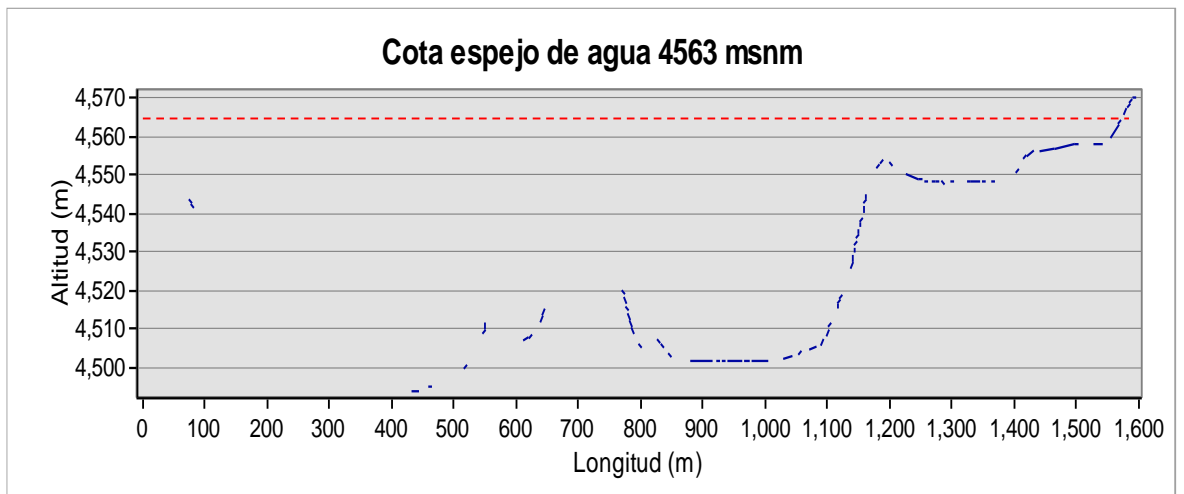


Figura 51

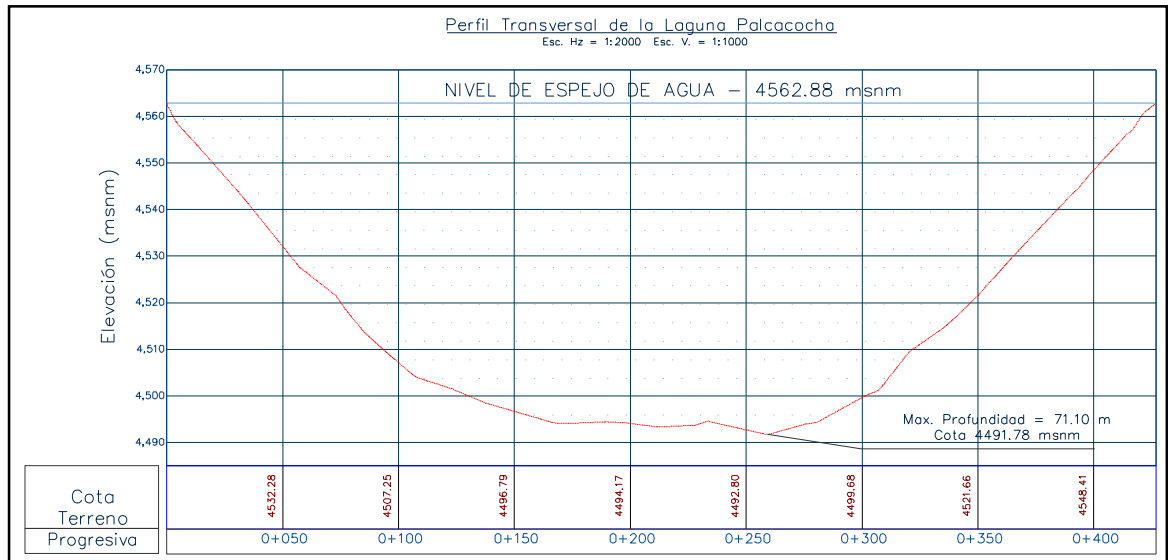
Perfil longitudinal de la laguna Palcacocha, sección A - F.



Anexo 04: Perfil longitudinal y transversal de la laguna Palcacocha

Figura 52

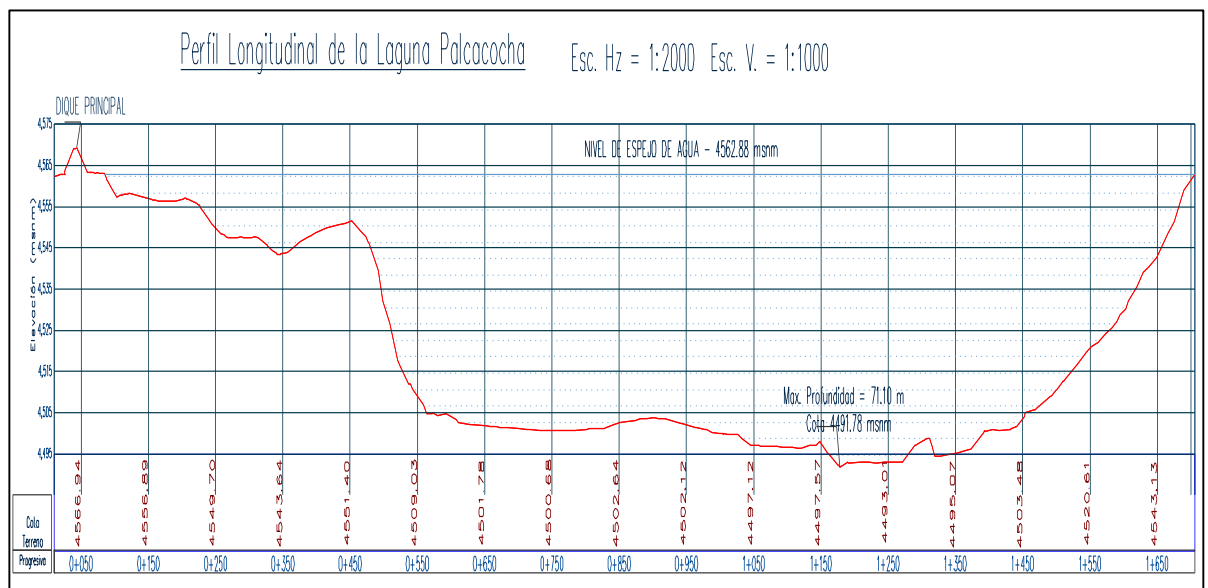
Perfil transversal de la laguna Palcacocha.



Fuente ANA (2016).

Figura 53

Perfil longitudinal laguna Palcacocha.



Fuente ANA (2016).