

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA ONDA DE AVENIDA Y
ESTIMACIÓN DEL RIESGO POTENCIAL POR ROTURA DE UNA
PRESA DE ROCKFILL
CASO DE APLICACIÓN: EL TRANQUE – CULPINA**

Por:

VICTOR DANIEL BRICEÑO AGUIRRE

**SEMESTRE II – 2025
TARIJA – BOLIVIA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA ONDA DE AVENIDA Y
ESTIMACIÓN DEL RIESGO POTENCIAL POR ROTURA DE UNA
PRESA DE ROCKFILL
CASO DE APLICACIÓN: EL TRANQUE – CULPINA**

Por:

VICTOR DANIEL BRICEÑO AGUIRRE

Proyecto de grado presentado a mi consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO” como requisito para optar el grado académico de Licenciatura de Ingeniería Civil.

**SEMESTRE II – 2025
TARIJA – BOLIVIA**

DEDICATORIA

A Dios, por el invaluable don de la vida y por permitirme compartirla con mi familia, fuente inagotable de amor, fortaleza y propósito.

A mis padres, la señora Gilda Aguirre Suárez y el señor Víctor Hugo Briceño Mogro, por ser los pilares fundamentales de este logro. Gracias por su esfuerzo incansable, su amor incondicional y su constante aliento en cada etapa de mi formación.

A mi hermano, Fabricio Briceño, por estar siempre presente con su apoyo sincero y generoso.

A Adriana Magarzo, por su compañía constante, por sostenerme en los momentos difíciles y por su apoyo incondicional a lo largo de este camino.

A mi grupo de estudio: Ríos, Echart, Luisillo y Mel, por la valiosa amistad, el compañerismo y el apoyo brindado durante esta etapa tan significativa de mi vida.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad analizar el comportamiento hidráulico ante una rotura hipotética de la represa El Tranque, ubicada en el municipio de Culpina, a aproximadamente 1.6 km aguas arriba del área urbana. Esta infraestructura posee un gran volumen de almacenamiento y desempeña un papel fundamental en la economía local, al regar cerca de 3000 hectáreas productivas.

La metodología aplicada incluyó un estudio hidrológico previo, la delimitación de la cuenca de aporte, la estimación del caudal pico de diseño, y la generación de hidrogramas mediante técnicas de laminación. Para el análisis espacial se emplearon Modelos Digitales del Terreno (MDT) procesados en ArcGIS Pro y ArcGIS 10.8.2, complementados con imágenes satelitales de Google Earth Pro para verificación topográfica y análisis visual.

La simulación de la rotura de presa se realizó mediante herramientas de modelación numérica bidimensional, utilizando los programas IBER y HEC-RAS, reconocidos por su capacidad de representar fenómenos hidráulicos complejos. Se compararon los resultados obtenidos por ambos modelos, permitiendo identificar similitudes y diferencias en cuanto a la extensión de la inundación, los caudales máximos, y la velocidad del flujo. Además, se llevó a cabo la clasificación de la presa en función de su riesgo potencial, considerando los impactos aguas abajo en caso de una falla estructural.

Este estudio busca contribuir a la comprensión del impacto potencial que implicaría una rotura de la represa El Tranque, evidenciando que un evento de este tipo podría tener consecuencias catastróficas para la población y la infraestructura del municipio de Culpina. Asimismo, permite comparar el desempeño de los modelos HEC-RAS e IBER, dos herramientas de simulación bidimensional ampliamente utilizadas, destacando su aplicabilidad en el análisis de inundaciones por rotura de presas en el contexto boliviano.

ÍNDICE.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema	1
1.1.3. Sistematización del problema	2
1.2. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	3
1.4.1. Justificación teórica.....	3
1.4.2. Justificación metodológica.....	4
1.4.3. Justificación práctica.....	4
1.5. MARCO DE REFERENCIA	4
1.5.1. Marco conceptual	4
1.5.2. Marco espacial	5
1.5.3. Marco temporal	7
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO	8
2.1. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS	8
2.1.1. Tipologías según el elemento impermeabilizador.....	8
2.1.2. Criterios de diseño y selección	8
2.1.3. Vulnerabilidades estructurales e hidráulicas	9
2.2. PRESAS DE ENROCADO (ROCKFILL).....	9
2.2.1. Configuración estructural.....	9
2.2.2. Ventajas	10
2.2.3. Desventajas y vulnerabilidades	10
2.2.4. Comportamiento frente a fallas	10
2.3. TIPOS DE FALLAS EN PRESAS	11
2.4. FALLAS EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS.....	12
2.4.1. Falla por desbordamiento (Overtopping)	13
2.4.2. Falla por erosión interna (Piping).....	14
2.4.3. Falla por Debilitamiento de la Cimentación	14
2.4.4. Otras fallas mecánicas o estructurales.....	15
2.5. INUNDACIONES.....	15

2.5.1. Clasificación según duración	16
2.5.1.1. Inundaciones rápidas o dinámicas	16
2.5.1.2. Inundaciones lentas o estáticas	16
2.5.2. Clasificación según mecanismo de generación	16
2.5.2.1. Inundaciones pluviales (RTT)	16
2.5.2.2. Inundaciones fluviales	17
2.5.2.3. Inundaciones por rotura de presa	17
2.6. MODELACIÓN HIDRÁULICA	18
2.6.1. Definición de modelo	18
2.6.2. Definición de modelo numérico	18
2.6.3. Principios básicos de modelación	18
2.7. TIPOS DE MODELOS HIDRÁULICOS	19
2.7.1. Modelos unidimensionales en régimen permanente	19
2.7.2. Modelos unidimensionales en régimen variable	20
2.7.2.1. Modelo unidimensional HEC – RAS	22
2.7.2.2. Esquema de cálculo HEC – RAS	23
2.7.2.3. Consideraciones y/o limitaciones	26
2.7.2.4. Método Local Partial Inertia (LPI)	28
2.7.2.5. Modelos comerciales	30
2.7.3. Modelos cuasi – bidimensionales	30
2.7.4. Modelos bidimensionales	31
2.7.4.1. Modelación flujo en lámina libre en aguas poco profundas con IBER	36
2.7.4.2. Modelación lámina libre en aguas poco profundas con HEC-RAS 2D	37
2.7.4.3. Módulo hidrodinámico: IBER vs. HEC-RAS 2D	38
2.7.4.4. Esquema de cálculo de IBER	39
2.7.4.4.1. Malla de cálculo IBER	39
2.7.4.4.2. Discretización en volúmenes finitos de las ecuaciones hidrodinámicas IBER	40
2.7.4.5. Esquema de cálculo de HEC-RAS 2D	43
2.7.4.5.1. Malla de cálculo HEC-RAS 2D	44
2.7.4.5.2. Ecuaciones resueltas en HEC-RAS 2D	45
2.7.4.6. Consideraciones de los Modelos Bidimensionales: IBER y HEC-RAS 2D	46
2.7.4.6.1. Ventajas del uso de modelos bidimensionales	46
2.7.4.6.2. Características destacadas de IBER	46
2.7.4.6.3. Limitaciones de IBER	47
2.7.4.6.4. Características destacadas de HEC-RAS 2D	47
2.7.4.6.5. Limitaciones de HEC-RAS 2D	48

2.7.4.6.6. Consideración final.....	48
2.8. SOFTWARE A EMPLEAR PARA EL PROYECTO	48
2.8.1. ArcGIS 10.8.2	49
2.8.2. Google Earth Pro.....	49
2.8.3. HEC-RAS 6.6.....	49
2.8.4. IBER 3.3.1.....	49
2.9. IBER vs. HEC – RAS.....	50
CAPÍTULO III: NORMATIVA APLICABLE	51
3.1. INTRODUCCIÓN.....	51
3.2. COMITÉ INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS (ICOLD).....	51
3.3. COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS (CNEGP)	52
3.4. GUÍA TÉCNICA PARA CLASIFICACIÓN DE PRESAS.....	52
3.4.1. Presas a clasificar	53
3.4.2. Criterios para la definición de categorías	54
3.4.3. Riesgo de daño en relación a daño esperado	56
3.4.4. Criterios básicos de valoración de afecciones	57
3.4.4.1. Riesgo potencial para vidas humanas. Población en riesgo	57
3.4.4.1.1. Afecciones graves a núcleos urbanos.....	57
3.4.4.1.2. Número reducido de viviendas.....	57
3.4.4.1.3. Perdida incidental de vidas humanas.....	57
3.4.4.2. Servicios esenciales	58
3.4.4.3. Daños materiales.....	58
3.4.4.4. Daños medioambientales	59
3.4.4.5. Otras afecciones.....	59
3.4.5. Escenarios de rotura	60
3.4.6. Forma y dimensiones de la brecha. Tiempos de rotura	62
3.4.6.1. Brecha y tiempo de rotura para presas de fábrica.....	62
3.4.6.2. Brecha y tiempo de rotura para presas de materiales sueltos.....	62
3.4.6.2.1. Tiempo de rotura	62
3.4.6.2.2. Forma de la brecha	63
3.4.7. Coeficientes de rugosidad	65
3.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS POR ROTURA DE PRESA .	66
3.6. ANÁLISIS DEL RIESGO.....	66
CAPÍTULO IV: ÁREA DE ESTUDIO	68
4.1. ANTECEDENTES	68
4.1.1. Inventario nacional de presas de Bolivia 2010	69

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	69
4.2.1. Cuenca de aporte	69
4.2.1.1. Clima	70
4.2.1.2. Altitud.....	70
4.2.1.3. Relieve topográfico.....	70
4.3. CARACTERÍSTICAS E INFORMACIÓN DE LA PRESA Y EMBALSE.....	71
4.3.1. Tipo de presa	71
4.3.2. Ficha técnica.....	73
4.3.3. Vertedero de excedencias.....	73
4.3.4. Información topográfica del vaso.....	75
4.3.4.1. Topobatimetría embalse El Tranque SENAMHI 2013.....	75
4.3.4.2. Topobatimetría embalse El Tranque CIAGUA 2019	76
4.4. VALLE AGUAS ABAJO	76
4.4.1. Características del río Culpina	78
4.5. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRAÚLICA	79
4.5.1. Estaciones del municipio de Culpina	79
4.5.2. Precipitaciones máximas diarias	80
4.5.3. Cobertura vegetal	82
4.5.4. Estimación de caudales máximos de crecida.....	83
4.5.5. Laminación de crecidas.....	84
CAPÍTULO V: APLICACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
5.1. CONSIDERACIONES INICIALES PARA AMBOS MODELOS	86
5.1.1. Topografía del modelo	86
5.1.2. Coeficiente de rugosidad de Manning.....	87
5.1.3. Dimensión de la brecha de rotura	88
5.1.4. Tiempos de rotura	89
5.1.5. Caudal pico de rotura	90
5.1.5.1. Caudal pico de rotura en condición sin avenida	90
5.1.5.2. Caudal pico de rotura en condición con avenida	91
5.2. MODELACIÓN DE ROTURA DE PRESA CON HEC-RAS 2D	92
5.2.1. Metodología.....	92
5.2.1.1. Pre-Proceso	93
5.2.1.2. Cálculo con HEC-RAS	99
5.2.1.3. Post-proceso.....	105
5.3. MODELACIÓN DE ROTURA DE LA PRESA CON IBER.....	107
5.3.1. Metodología.....	107

5.3.2. Creación de la geometría.....	108
5.3.3. Definición de las condiciones de contorno	108
5.3.4. Generación de la malla 2D	109
5.3.5. Asignación de los usos del suelo (coeficientes de Manning)	110
5.3.6. Definición de los datos del problema y brecha.....	111
5.3.7. Ejecución del modelo	113
5.3.8. Extracción de mapas de resultados	114
5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS POR ROTURA DE PRESA DE ROCKFILL	114
5.4.1. Comparación de resultados obtenidos con IBER y HEC-RAS	115
5.4.1.1. Comportamiento del flujo en las secciones sin avenida	115
5.4.1.2. Comportamiento del flujo en las secciones con avenida	118
5.4.2. Llanuras de inundación y distribución de velocidades	120
5.4.3. Alturas y distribución de velocidades del flujo	126
5.5. ESTIMACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN	131
5.6. CLASIFICACIÓN DE LA PRESA.....	135
5.7. OBRAS DE PROTECCIÓN Y DURABILIDAD DE LA PRESA.....	137
5.7.1. Alternativas de protección ante una posible rotura de presa	137
5.7.1.1. Vertedero de laminación.....	137
5.7.1.2. Obra de encauzamiento con muros de contención.....	138
5.7.2. Prolongación de la vida útil de la presa	140
5.7.2.1. Elevación de la corona y reubicación de la obra de toma.....	141
5.7.2.2. Construcción de un sistema de desagüe de fondo y dique de cola	141
CONCLUSIONES	142
RECOMENDACIONES	144
BIBLIOGRAFÍA	145
WEBGRAFÍA.....	148

ÍNDICE DE ANEXOS.

ANEXO 1: Datos de precipitaciones máximas diarias	149
ANEXO 2: Cálculo hidrológico y caudal máximo con HEC-HMS	152
ANEXO 3: Cálculo de laminación con HEC-HMS.....	162
ANEXO 4: Coeficientes de rugosidad de Manning.....	164
ANEXO 5: Cálculo del tiempo de rotura y dimensiones de la brecha	165
ANEXO 6: Mapas de análisis geoespacial de riesgo e inundación	168

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1: Mapa geográfico de la provincia Sud Cinti - Dpto. de Chuquisaca	6
Figura 1.2: Localización de la represa El Tranque – Culpina.....	6
Figura 2.1: Secuencia ilustrativa de rotura de presa ocasionada por Overtopping	13
Figura 2.2: Secuencia ilustrativa de rotura de presa ocasionada por Piping.....	14
Figura 2.3: Conservación de la masa y movimiento en un volumen de control.....	21
Figura 2.4: Esquema de Preissmann o de los cuatro puntos.....	24
Figura 2.5: Esquema de trabajo de Preissmann o de los cuatro puntos	25
Figura 2.6: Configuración del análisis en régimen variable o mixto para HEC–RAS	29
Figura 2.7: Definición del parámetro para el método LPI en HEC–RAS.....	30
Figura 2.8: Áreas de almacenaje conectadas entre sí en HEC–RAS	31
Figura 2.9: Representación de llanuras de inundación	31
Figura 2.10: Malla no estructurada de una balsa en IBER.....	40
Figura 2.11: Discretización de volúmenes finitos de un dominio bidimensional	42
Figura 2.12: Discretización de volúmenes finitos del caudal	42
Figura 2.13: Ejemplo de malla no estructurada en HEC-RAS 2D	44
Figura 3.1: Proceso de clasificación	61
Figura 3.2: Riesgo para vidas humanas en función del calado y la velocidad.....	67
Figura 4.1: Fotografía de la represa El Tranque hace décadas	68
Figura 4.2: Vista satelital de la cuenca de Culpina.....	70
Figura 4.3: Componentes de la represa El tranque	71
Figura 4.4: Vista de planta de la represa El Tranque.....	72
Figura 4.5: Obra de toma de la represa El Tranque	72
Figura 4.6: Vertedero de la represa El Tranque	74
Figura 4.7: El Tranque en rebalse	74
Figura 4.8: Niveles del embalse 2013 SENAMHI.....	75
Figura 4.9: Canal de obra de toma de la represa El Tranque	77
Figura 4.10: Vertedero de excedencias dirigiendo sus aguas al río Culpina	77
Figura 4.11: Zonas importantes de Culpina.....	78
Figura 4.12: Desembocadura del río Culpina Mayu.....	79
Figura 4.13: Estaciones cercanas de la cuenca de Culpina	80
Figura 4.14: Cobertura del suelo de la cuenca de Culpina (GCN250)	82
Figura 4.15: Curvas precipitación, duración y frecuencia de la estación Culpina.....	83
Figura 4.16: Hidrograma de salida para un periodo de retorno de 7.000 años	84
Figura 4.17: Hidrogramas de entrada y salida para diferentes periodos de retorno.....	85

Figura 5.1: Ráster de rugosidades.....	87
Figura 5.2: Geometría de la brecha para el escenario sin avenida.....	89
Figura 5.3: Creación de nuevo proyecto en HEC-RAS	93
Figura 5.4: Creación de terreno en HEC-RAS.....	94
Figura 5.5: Terreno de trabajo creado en RAS Mapper en vista 3D.....	94
Figura 5.6: Creación del área de almacenamiento (Storage Area)	95
Figura 5.7: Generación de malla 2D.....	96
Figura 5.8: Generación del conector hidráulico SA/2D	97
Figura 5.9: Integrar los coeficientes de rugosidades Manning	98
Figura 5.10: Generación de las propiedades hidráulicas de la malla de cálculo.....	98
Figura 5.11: Generación del conector hidráulico SA/2D en HEC-RAS.....	99
Figura 5.12: Abrir el View/Edit Geometry en HEC-RAS	99
Figura 5.13: Editor del área de almacenamiento en HEC-RAS.....	100
Figura 5.14: Definición de la estructura en HEC-RAS.....	101
Figura 5.15: Generación de la brecha de rotura en HEC-RAS	101
Figura 5.16: Configurar progresión de rotura de la brecha en HEC-RAS	102
Figura 5.17: Ingresar hidrograma de entrada en HEC-RAS	104
Figura 5.18: Ventana de ejecución de la simulación en HEC-RAS.....	105
Figura 5.19: Visualización de resultados en HEC-RAS	106
Figura 5.20: Visualización de resultados en 3D View.....	106
Figura 5.21: Exportar resultados desde RAS Mapper	107
Figura 5.22: Importar superficie de trabajo en IBER	108
Figura 5.23: Asignar entrada 2D en IBER.....	109
Figura 5.24: Asignar Salida 2D en IBER.....	109
Figura 5.25: Asignación de tamaño de malla en IBER.....	110
Figura 5.26: Malla no estructurada en la zona de estudio.....	110
Figura 5.27: Asignación de rugosidades en IBER.....	111
Figura 5.28: Configuración de la simulación. Datos	111
Figura 5.29: Configuración de la simulación. General	112
Figura 5.30: Configuración de la simulación. Resultados	112
Figura 5.31: Configuración de la brecha	113
Figura 5.32: Imagen del cómputo de la simulación	113
Figura 5.33: Grafico de la simulación en IBER.....	114
Figura 5.34: Distribución de perfiles transversales.....	115
Figura 5.35: Hidrogramas en la sección de brecha bajo condición sin avenida	116
Figura 5.36: Limnigramas en la sección de brecha bajo condición sin avenida	116

Figura 5.37: Hidrogramas en las diferentes secciones bajo condición sin avenida	117
Figura 5.38: Hidrogramas en la sección de brecha bajo condición con avenida	118
Figura 5.39: Limnigramas en la sección de brecha bajo condición con avenida.....	118
Figura 5.40: Hidrogramas en las diferentes secciones bajo condición con avenida	119
Figura 5.41: Distribución del tirante de agua en escenario sin avenida.....	121
Figura 5.42: Distribución de velocidades máximas del flujo en escenario sin avenida.....	122
Figura 5.43: Distribución del tirante de agua en escenario con avenida.....	123
Figura 5.44: Distribución de velocidades máximas del flujo en escenario con avenida.....	124
Figura 5.45: Tirante de agua – Avenida sin presa	125
Figura 5.46: Velocidades máximas del flujo – Avenida sin presa.....	125
Figura 5.47: Variación de la altura de agua en los perfiles en escenario sin avenida	127
Figura 5.48: Distribución de velocidades en los perfiles en escenario sin avenida	128
Figura 5.49: Variación de la altura de agua en los perfiles en escenario con avenida.....	129
Figura 5.50: Distribución de velocidades en los perfiles en escenario con avenida	130
Figura 5.51: Mapa de riesgo ante rotura de presa sin avenida.....	132
Figura 5.52: Mapa de riesgo ante rotura de presa con avenida.....	133
Figura 5.53: Mapa de riesgo por avenida sin presencia de presa.....	134
Figura 5.54: Localización del vertedero de laminación para atenuar la onda de rotura	137
Figura 5.55: Vista en obra del encauzamiento con muros de gaviones	138
Figura 5.56: Ubicación o trazado del encauzamiento	139
Figura 5.57: Mapa de riesgo con obras de protección	139
Figura 5.58: Ilustración de ejemplos de distribución de sedimentos en un embalse	141

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1: Tabla de diferencias IBER vs. HEC-RAS	50
Tabla 3.1: Clasificación de los daños materiales	59
Tabla 4.1: Características generales de la represa El Tranque.....	69
Tabla 4.2: Parámetros morfométricos de la cuenca Culpina	69
Tabla 4.3: Ficha técnica de la Presa El Tranque	73
Tabla 4.4: Características de la Presa El Tranque batimetría 2013.....	75
Tabla 4.5: Características de la Presa El Tranque batimetría 2019.....	76
Tabla 4.6: Estaciones cercanas de la cuenca de Culpina	79
Tabla 4.7: Precipitaciones máximas anuales en 24 horas	81
Tabla 4.8: Número de curva con información GCN250.....	82
Tabla 4.9: Resumen de caudales máximos para diferentes periodos de retorno.....	84
Tabla 4.10: Resultados de laminación	85
Tabla 5.1: Niveles y volúmenes característicos de la represa El Tranque	86
Tabla 5.2: Ancho inferior de la brecha para distintos escenarios	89
Tabla 5.3: Tiempos de rotura para diferentes escenarios.....	90
Tabla 5.4: Caudal pico de rotura en condición sin avenida	91
Tabla 5.5: Caudal pico de rotura en condición con avenida	92
Tabla 5.6: Caudales pico en condición sin avenida	117
Tabla 5.7: Caudales pico en condición con avenida	119
Tabla 5.8: Características del flujo de las secciones de estudio.....	126
Tabla 5.9: Clasificación de daños potenciales propuesta para Bolivia	131