

PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO - PHI

PLAN DE GESTIÓN DEL RIESGO

2. CONOCIMIENTO DEL RIESGO

2.2.1 Metodología para la identificación del riesgo

MARZO, 2022

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

DESTINATARIO	No. DE COPIAS
EPM	Documento original

ÍNDICE DE MODIFICACIONES

ÍNDICE DE REVISIÓN	CAPÍTULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

TÍTULO DEL DOCUMENTO:		PLAN DE GESTIÓN DEL RIESGO – CONOCIMIENTO DEL RIESGO				
DOCUMENTO No.:						
APROBACIÓN	NÚMERO DE LA REVISIÓN		0	1	2	3
	RESPONSABLE DE LA ELABORACIÓN	Nombre:	Consortio Generación Ituango			
		Firma:				
		Fecha:	15/03/2022			
	RESPONSABLE POR REVISIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	Nombre:	B. Hernández A.			
		Firma:				
		Fecha:	15/03/2022			
	Vo. Bo. DIRECTOR DEL PROYECTO	Nombre:	L. F. Restrepo			
		Firma:				
		Fecha:	15/03/2022			

TABLA DE CONTENIDO

2	CONOCIMIENTO DEL RIESGO	5
2.1	ESTABLECIMIENTO DEL CONTEXTO	5
2.2	VALORACIÓN DEL RIESGO	5
2.2.1	Metodología para la identificación del riesgo	5

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1	Parámetros de entrada para la aplicación del modelo de zonificación regional de amenaza por movimientos en masa superficiales.....	11
Tabla 2-2	Clasificación de la amenaza en función de la probabilidad anual de falla.	13
Tabla 2-3	Resumen coeficientes de variación según referencias (parte 1).....	14
Tabla 2-4	Resumen coeficientes de variación según referencias (parte 2).....	15
Tabla 2-5	Aceleraciones espectrales PGA horizontales y verticales.	18
Tabla 2-6	Aceleraciones para sitios donde no aplica el estudio de amenaza de PHI, según los municipios de localización y Tr de 475 años.....	19
Tabla 2-7	Listado de taludes y sus correspondientes periodos de retornos para análisis sísmico.....	19
Tabla 2-8	Valores del coeficiente de importancia I, para un sismo base de diseño con Tr de 475 años.	22
Tabla 2-9	Clasificación de los perfiles de suelo para un Tr de 475 años.....	23
Tabla 2-10	Valores de Fa (factor de amplificación para periodos cortos) según el tipo de suelo, para análisis con periodo de retorno de 475 años, en zonas donde aplica el estudio I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001.	24

0

Tabla 2-11 Coeficiente sísmico para el análisis pseudo-estático de taludes, con un Tr de 475 años.	25
Tabla 2-12 Clasificación Rock Mass Rating, RMR.	30
Tabla 2-13 Número de Resistencia Ms para suelos granulares.	34
Tabla 2-14 Número de Resistencia Ms para suelos cohesivos.	35
Tabla 2-15 Resistencia de la masa de roca.	36
Tabla 2-16 Conteo de discontinuidades (Jc).	37
Tabla 2-17 Número de discontinuidades.	37
Tabla 2-18 Rugosidad de las paredes de las discontinuidades.	38
Tabla 2-19 Alteración de las paredes de las discontinuidades.	38
Tabla 2-20 Determinación de Js.	39
Tabla 2-21 Ponderación de factores de la clasificación morfométrica.	43
Tabla 2-22 Asignación del índice de compacidad.	43
Tabla 2-23 Clasificación de pendientes.	44
Tabla 2-24 Clasificación de la precipitación.	44
Tabla 2-25 Clasificación de las coberturas del suelo.	45
Tabla 2-26 Clasificación de la geomorfología.	46
Tabla 2-27 Clasificación del material superficial.	46
Tabla 2-28 Ponderación de factores de susceptibilidad por avenidas torrenciales.	47
Tabla 2-29 Asignación del índice de amenaza por avenida torrencial.	47
Tabla 2-30 Ubicación de estaciones de caudal consideradas.	51
Tabla 2-31 Categorización simplificada de la amenaza hidráulica por inundación.	54
Tabla 2-32 Métricas hidráulicas y sus respectivas puntuaciones.	60
Tabla 2-33 Puntajes utilizados para la profundidad relativa.	61
Tabla 2-34 Puntajes del IIH para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos.	61
Tabla 2-35 Formato de tabla de caracterización de las zonas que se deben analizar.	75

Tabla 2-36	Determinación del Nivel de Deficiencia (ND).....	77
Tabla 2-37	Determinación del Nivel de Exposición (NE).....	77
Tabla 2-38	Determinación del Nivel de Probabilidad (NP).....	78
Tabla 2-39	Significado de los diferentes niveles de probabilidad.....	78
Tabla 2-40	Valores de referencia MESERI	79
Tabla 2-41	Impacto de afectación por nube de vapor tóxica en las personas.	81
Tabla 2-42	Niveles de consecuencias para nubes de vapor tóxico.	82
Tabla 2-43	Nivel definido para el análisis de nube potencialmente inflamable:.....	83
Tabla 2-44	Impacto de la radiación térmica en las personas.....	83
Tabla 2-45	Impacto de la radiación térmica en los equipos y estructuras.	83
Tabla 2-46	Nivel definido para el análisis de radiación térmica:.....	84
Tabla 2-47	Efectos de la sobrepresión en las personas, equipos e infraestructura..	84
Tabla 2-48	Nivel definido para el análisis de sobrepresión.	85
Tabla 2-49	Resultados para análisis de homogeneidad de la serie.	92
Tabla 2-50	Valores máximos y mínimos anuales de caudal – Estación Puerto Valdivia [2623704].	94
Tabla 2-51	Elementos usados en el cálculo de vulnerabilidad.....	95
Tabla 2-52	Determinación de nivel de consecuencias.....	98
Tabla 2-53	Rangos de frecuencia para categorizar el riesgo.	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1	Metodología de espacialización y zonificación de la amenaza por movimientos en masa de acuerdo con valores de FS y PF.	8
Figura 2-2	Esquema representativo para el modelo de estabilidad de laderas.	9

Figura 2-3 Probabilidad de falla cuando estabilidad es dada por el factor de seguridad.	17
Figura 2-4 Probabilidad de falla cuando estabilidad es dada por una función de desempeño.	17
Figura 2-5 Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g para un Tr de 475 años.	21
Figura 2-6 Coeficiente de amplificación Fa del suelo para la zona de periodos cortos del espectro, para un Tr de 475 años.	24
Figura 2-7 Casos históricos de subsidencias en el mundo en túneles durante excavación.	27
Figura 2-8 Método de estabilidad del frente.	28
Figura 2-9 Diagrama de estabilidad.	31
Figura 2-10 (a) Representación esquemática de un modelo numérico conceptual de una mina y (b) Ratas de propagación para cuatro diferentes casos comparados con el método empírico de Laubscher	32
Figura 2-11 Umbrales de erosión.	40
Figura 2-12 Metodología para el análisis de Amenaza por Avenidas Torrenciales. .	42
Figura 2-13 Ubicación general de los tramos de estudio.	50
Figura 2-14 Localización de las 24 estaciones utilizadas en el complemento hidrológico.	51
Figura 2-15 Categorías de severidad del flujo.	54
Figura 2-16 Curva de duración de caudales de las estaciones de estudio.	56
Figura 2-17 Ubicación de los tramos de estudio junto con las secciones batimétricas levantadas para la realización de los diferentes estudios del PHI	58
Figura 2-18 Estado de las descargas del proyecto al 04 de febrero de 2.022.	65
Figura 2-19 Análisis de frecuencia para eventos máximos anuales y trimestrales en el sitio de presa.	66
Figura 2-20 Nivel en el río Cauca a la altura de las descargas del proyecto vs el caudal descargado desde el embalse.	67
Figura 2-21 Esquema de ubicación de las zonas de análisis de la información satelital	69

Figura 2-22	Estaciones de caudal estudiadas y zona de interés.	70
Figura 2-23	Dominio del modelo hidráulico que comprende la zona desde el sitio de presa hasta Nechí, y zonas de interés que van desde el sitio de presa hasta Caucasia.	71
Figura 2-24	Selección del químico utilizado ALOHA.	86
Figura 2-25	Selección de condiciones atmosféricas ALOHA.	86
Figura 2-26	Resumen de datos de entrada ALOHA.	86
Figura 2-27	Definición del tanque de almacenamiento y caracterización del evento ALOHA.	86
Figura 2-28	Resultados Radiación térmica ALOHA.	86
Figura 2-29	Serie de caudales medios – Estación Puerto Valdivia [2623704].	91
Figura 2-30	Series de caudales máximos y mínimos anuales promedios diarios - Estación Puerto Valdivia [2623704].	92

1 INTRODUCCIÓN

2 CONOCIMIENTO DEL RIESGO

2.1 ESTABLECIMIENTO DEL CONTEXTO

2.2 VALORACIÓN DEL RIESGO

2.2.1 Metodología para la identificación del riesgo

Atendiendo a los criterios de riesgo definidos en el numeral 2.1.4, se lleva a cabo la valoración del riesgo. En primer lugar, se realiza una caracterización de todas las amenazas y los escenarios de riesgo del proyecto. Luego, se llevan a cabo análisis de vulnerabilidad por cada amenaza y finalmente, se realiza el análisis del riesgo mediante la integración de los análisis de amenaza y vulnerabilidad.

A continuación, se describe la metodología llevada a cabo para la estimación de cada variable, considerando las particularidades de cada una de las amenazas identificadas.

2.2.1.1 Caracterización de la amenaza

A continuación, se describe la metodología empleada para zonificar las amenazas identificadas en el proyecto, tanto endógenas como exógenas.

2.2.1.1.1 Caracterización de amenaza sísmica

De acuerdo con el Boletín 148 del ICOLD (2016), los parámetros para el análisis sísmico de presas incluyen aceleraciones máximas del terreno, aceleraciones espectrales e historias de aceleración, desarrolladas bien sea para un análisis determinístico (DSHA, por sus siglas en inglés) o para un análisis probabilístico (PSHA, por sus siglas en inglés).

La evaluación de la amenaza sísmica del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI) parte de la recopilación de información sobre la sismicidad histórica, la geología sísmica y la tectónica en la zona de estudio, lo cual permite obtener un catálogo con información homogenizada y con cubrimiento temporal uniforme de los registros sísmicos y un catálogo de fallas sísmicas caracterizadas desde el punto de vista geográfico, geométrico y de actividad. La caracterización de cada falla básicamente incluye información sobre su ubicación espacial, así como información sismológica tal como la tasa de actividad (λ_0) relación entre generación de magnitudes (β) y la magnitud última.

Del catálogo de fallas y el catálogo homogenizado de registros sísmicos se obtiene una base de datos sismológicos confiable, que permite incluir en los análisis de amenaza sísmica la contribución de la sismicidad de fondo y para fallas donde no se poseen estudios sismológicos puntuales, inferir sus parámetros con base en la actividad sísmica regional.

Considerando que, por la naturaleza aleatoria del fenómeno, la amenaza sísmica no puede asignarse a una fuente sísmica única, por lo tanto, en los análisis efectuados se integra el aporte que la sismicidad hace en cada una de las fallas. Este hecho obliga a realizar consideraciones probabilísticas para tener en cuenta este aspecto.

La evaluación de la amenaza sísmica se realizó en términos probabilísticos bajo la simplificación de un modelo Poissoniano a partir de la formulación de Cornell (1968) y McGuire (1978). Este proceso permite combinar el aporte realizado por las diferentes clases de fuentes: cercanas, lejanas, profundas y locales.

Teniendo en cuenta que el PHI se encuentra en un ambiente tectónico complejo, donde se tienen diferentes fuentes sísmicas (identificadas y descritas en el Numeral 2.4 del documento I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001) que poseen un alto nivel de incertidumbre respecto a su tasa de actividad y a la magnitud máxima de ellas (ver Apéndice A.2 Caracterización de fuentes sísmicas – Información complementaria en anexos del documento I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001), no es apropiado realizar un Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica (DSHA, por sus siglas en inglés). Un DSHA es apropiado en sitios donde se tiene un número muy limitado de fuentes sísmicas y las mismas se encuentran plenamente identificadas, como es el caso de los límites de las placas.

Considerando lo anterior, el presente estudio se realizó usando el modelo probabilístico de la amenaza sísmica con base en los siguientes argumentos:

- En general las fallas que se encuentran alrededor del proyecto son de actividad moderada a muy baja, con grandes diferencias en el orden de magnitud de sus tasas de deslizamiento (*Slip Rate* – SR). Realizar un tratamiento adecuado de la incertidumbre que tienen las fallas en su nivel de actividad, por medio de un PSHA, es más apropiado que simplemente declarar que la falla es activa como lo asumiría un DSHA.
- Es extremadamente difícil e incierto considerar un valor único de magnitud máxima (MCE) en un entorno donde se tienen fallas con tasas de actividad moderada a muy baja, donde no se tendría certeza si el valor de magnitud asignado es conservador, poco conservador o es aproximadamente el correcto. Un PSHA permite incluir la incertidumbre en la magnitud máxima de las sismofuentes.
- Además, como se indica en el Numeral 3.5.1 del documento I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001 (ver en anexos), el Boletín 148 del ICOLD (2016) permite el uso de PSHA o DSHA para definir los criterios de diseño sísmico. En particular, este boletín no indica el uso ineludible de un DSHA ni el espectro envolvente de ambos métodos.

El detalle de la metodología empleada para el desarrollo del análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés) del PHI, se presenta en los numerales 3, 3.1, 3.2 y 3.3 del informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001.

2.2.1.1.2 Caracterización de amenaza por movimientos sísmicos inducidos por el embalse

La metodología empleada para el análisis de la sismicidad desencadenada por el embalse (también llamada sismicidad disparada), se basa en las recomendaciones del Boletín 137 del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 2011) (ICOLD, por sus siglas en inglés). De acuerdo con ICOLD (2011), la naturaleza de los sismos desencadenados por embalses, en cada caso específico, debe evaluarse en comparación con los casos conocidos del mismo fenómeno, y en ese sentido, el despliegue de una red de monitoreo sísmica local, adaptada a las condiciones del sitio y que sea activada al menos al inicio de la construcción de las obras, es un requisito necesario para cada gran presa ubicada en un área tectónicamente activa, como es el caso del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI).

De acuerdo con lo anterior, desde julio del 2016 el PHI monitorea la actividad sísmica en la zona del embalse y fuera de él, por medio de una red sismológica local, compuesta por 12 estaciones (de las cuales 11 se encuentran funcionando actualmente), con el fin de monitorear la actividad sísmica de la zona de influencia del proyecto antes, durante y después del llenado del embalse.

A raíz de los sucesos que comenzaron el día 28 de abril de 2018, la red local se complementó con ocho estaciones sismológicas instaladas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) desde junio de 2018 (actualmente propiedad de EPM), con el fin de analizar con mayor detalle todos los procesos y eventos acontecidos en la zona de las obras principales del proyecto, ya que son fenómenos de difícil caracterización con la red sismológica local dada la distancia de los sensores a las obras. Adicional a lo anterior, a partir de la conformación del Centro de Monitoreo Técnico (C.M.T) localizado en los campamentos de EPM, se realiza un monitoreo las 24 horas del día de los fenómenos asociados al estado actual del proyecto y la actividad sísmica cercana y lejana que es detectada por las redes existentes.

2.2.1.1.3 Caracterización de amenaza por movimientos en masa

Para las evaluaciones de estabilidad y la amenaza por movimientos en masa, los criterios de análisis y metodologías empleadas son aplicados a nivel regional (análisis regionales) y para cada uno de los sitios inestables puntuales (análisis locales).

A. Análisis regionales

En los análisis regionales se realizó una zonificación de amenaza por movimientos en masa en laderas naturales, considerando diferentes escenarios de lluvia y sismo como factores

7

detonantes. A continuación, se presenta la metodología y base conceptual para la evaluación de amenaza por movimientos en masa según Factor de Seguridad (FS) y Probabilidad de Falla (PF) (Figura 2-1).

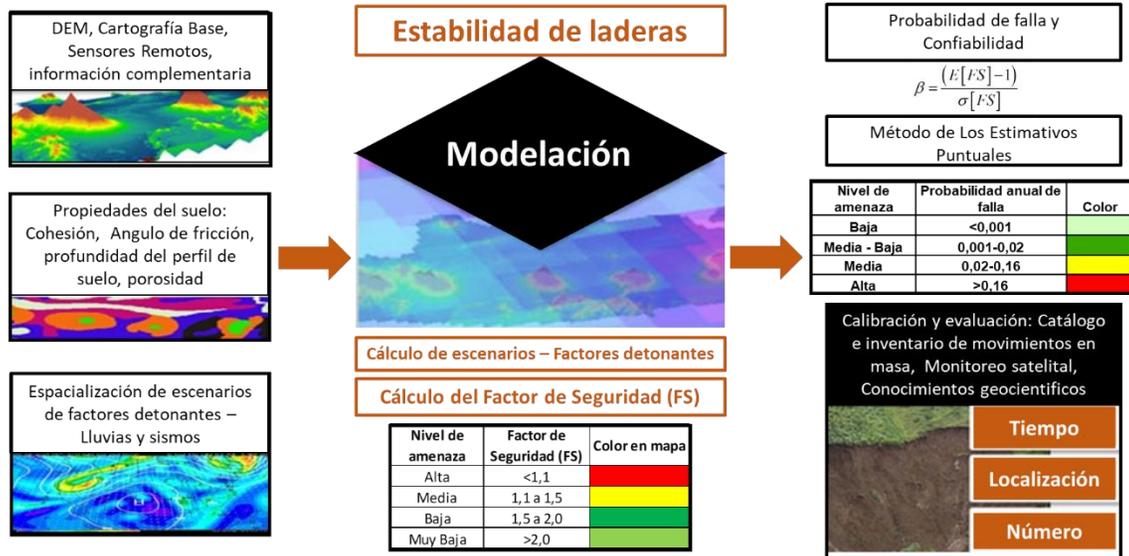


Figura 2-1 Metodología de espacialización y zonificación de la amenaza por movimientos en masa de acuerdo con valores de FS y PF.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

El análisis está enfocado a deslizamientos superficiales según los resultados de la caracterización geológico-geotécnica de las unidades litológicas presentes en un área de estudio.

1) Definición del modelo de estabilidad de laderas

Los procesos de remoción en masa o deslizamientos superficiales de suelo son detonados por una compleja interacción de múltiples factores, incluyendo los detonantes dinámicos (lluvia y sismo) y las condiciones variables del terreno. Para la evaluación de estabilidad de ladera por medio de un modelo determinístico, se aplica la metodología presentada por Liao, y otros (2010) que corresponde a un modelo de base física para movimientos en masa inducidos por lluvia denominado SLIDE (*Slope – Infiltration – Distributed Equilibrium*), el cual integra el modelo de estabilidad simplificado del talud infinito con un modelo de infiltración de lluvia (Figura 2-2).



Figura 2-2 Esquema representativo para el modelo de estabilidad de laderas.

Fuente: Modificado de Liao et al. (2010).

El enlace entre la precipitación y la expresión final del FS es compatibilizado en una fórmula matemática simplificada (Liao, y otros, 2010) (Ecuación 1):

$$FS = \frac{\cot \beta \cdot \tan \phi \cdot [\Gamma + m_t \cdot (n_w - 1)] + C \cdot \Omega}{\Gamma + m_t \cdot n_w}$$

$$\Gamma = G_s \cdot (1 - n) + n \cdot S_r$$

$$n_w = n \cdot (1 - S_r)$$

$$\Omega = \frac{2}{\sin 2\beta \cdot H \cdot \gamma_w}$$

Ecuación 1 Factor de seguridad en relación con la precipitación

Fuente: (Liao, y otros, 2010)

Donde:

- β = Angulo de pendiente [°]
- H = Espesor de suelo susceptible a deslizarse [m]
- ϕ = Angulo de fricción [°]
- C = Cohesión [kPa]
- G_s = Gravedad específica [Adimensional]
- n = Porosidad [Adimensional]
- S_r = Grado de saturación [%]
- m_t = Fracción de suelo con determinado espesor (H) que se satura por infiltración [Adimensional]

Las funciones gamma (Γ) y omega (Ω) son propuestas por el autor del método y sirven para introducir, de manera compacta, las variables que representan las propiedades del suelo: peso específico, porosidad, grado de saturación; y por otro lado las variables geométricas: pendiente y espesor de suelo deslizante.

Montrasio & Valentino (2008) expresaron el parámetro m_t como un espesor adimensional que representa la parte saturada de la capa de suelo, variando de 0 a 1. También, mediante la Ecuación 2 consideraron una precipitación discreta (con determinada duración en horas o minutos) que cae sobre la superficie de suelo que se quiere modelar, entendiendo la porción o celda del talud infinito como un tanque de equilibrio hídrico que toma en consideración, de manera simultánea, tanto la ganancia de agua por la infiltración de lluvia y percolación, así como la pérdida de agua debido al flujo y la evapotranspiración a través de la celda.

$$\begin{cases} m_1 = 0 \\ O_t = K \cdot \sin \beta \cdot m_t \cdot H \cdot \cos \beta \cdot \Delta t \\ \Delta m_t = \frac{(I_t - O_t)}{n \cdot H \cdot (1 - S_r)} \\ m_{t+1} = m_t + \Delta m_t \end{cases}$$

Ecuación 2 Cálculo de la salida de agua en una porción finita

Fuente: (Montrasio & Valentino, 2008)

Donde:

- Δt = Intervalo de tiempo
- m_1 = Valor inicial de m (puede ser cero o adoptar un valor inicial conocido)
- m_t = Valor de m en cada paso de tiempo
- O_t = Salida de agua de una porción finita de una pendiente de longitud finita
- I_t = Intensidad de la lluvia [mm/h, mm/min]
- K = Permeabilidad del suelo [m/s]

Los parámetros de entrada para la aplicación del modelo se establecen según la caracterización geológica y geotécnica de la zona de estudio. Los escenarios de precipitación, como factor detonante, están representados por la variable de intensidad de la lluvia (I_t), de acuerdo con un análisis estadístico de intensidades máximas que permita obtener curvas indicativas de las intensidades asociadas a diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones de eventos de precipitación para aplicar el cálculo del balance hídrico en el modelo. Dichas curvas son conocidas como curvas de Intensidad Duración Frecuencia (IDF).

La inclusión del factor detonante sismo se realiza mediante la introducción de la aceleración sísmica en las ecuaciones del modelo, con el objetivo de obtener un análisis pseudo-estático evaluando en un escenario determinado, asociado a la ocurrencia de un sismo con un periodo de retorno determinado. Para definir el escenario de sismo como factor detonante, se tiene en

cuenta el sismo de diseño determinado para las excavaciones superficiales según la NSR-10 (Título A de la NSR-10).

2) Definición parámetros de entrada

Para la aplicación de la metodología es preciso conocer la configuración geológica y geomorfológica de la zona de estudio, las propiedades del terreno, los parámetros de resistencia y la caracterización geomecánica de los suelos, además del comportamiento de los factores detonantes (lluvia y sismo) de acuerdo con los periodos de retorno establecidos (Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Parámetros de entrada para la aplicación del modelo de zonificación regional de amenaza por movimientos en masa superficiales.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Variación		
			Temporal	Espacial	Escenario
Propiedades del terreno					
Ángulo de la pendiente	β	Grados (°)		x	
Espesor de suelo	H	m		x	
Espesor en función de la intensidad de la lluvia	m	Adimensional	x	x	x
Propiedades de los suelos					
Angulo de fricción del suelo	ϕ	Grados (°)		x	
Cohesión del suelo	C	KPa		x	
Gravedad específica	Gs	Adimensional			
Porosidad	n	Adimensional		x	
Grado de saturación	Sr	%		x	
Peso específico del agua	γ_w	kN/m ³			
Permeabilidad	K	m/s		x	
Propiedades de la lluvia					
Intensidad de la lluvia	It	mm/h	x	x	x
Duración de la lluvia	t	h	x	x	x
Periodo de retorno	Trl	años	x	x	x
Propiedades de los sismos					
Aceleración sísmica	Aa	PGA			x
Periodo de retorno	Trs	años			x

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Propiedades del terreno como el ángulo de la pendiente y el espesor de suelo, se generan como insumos temáticos de tipo raster por medio de herramientas SIG para la espacialización de datos, basadas en modelos físico-matemáticos y aplicación de álgebra de mapas a partir de un Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM).

Los parámetros de resistencia de cohesión (c) y ángulo de fricción (φ), así como las propiedades geomecánicas de los suelos deben ser definidas a partir de la información primaria y secundaria con la que se cuenta para zona de estudio.

Por su parte, es importante definir el espesor del suelo susceptible a deslizarse, ya que diversos fenómenos hidrogeomorfológicos tales como deslizamientos, flujos de detritos e inundaciones, dependen directamente de la distribución espacial del espesor de los suelos. La evaluación de dicho espesor, susceptible a deslizarse o a desprenderse se vuelve esencial ante el análisis de problemas que involucran procesos hidrológicos desarrollados en laderas, así como en la propia estabilidad de taludes (Montoya-Botero E. , 2018; Tromp-Van Meerveld & McDonnell, 2006).

El espesor del suelo susceptible a deslizarse o desprenderse, se obtiene mediante un modelo que se basa en el comportamiento del suelo frente a las pendientes del terreno, teniendo en cuenta que cuanto más plana sea una región mayor será la acción de la depositación y acumulación de material no consolidado, a medida que el ángulo de inclinación aumenta menor será la tasa de acumulación (Montoya-Botero, Azevedo, Souza, De Souza, & Aristizabal, 2015). El modelo o la cuantificación del suelo susceptible a deslizarse están representados por la siguiente ecuación:

$$Z_s = (Z_{s_{max}} - Z_{s_{min}}) * \left\{ \left[1 - \frac{1}{\tan(\theta_{lim})} \tan\theta \right] * [\tanh(a * x)] \right\} + Z_{s_{min}}$$

Ecuación 3 Cálculo del espesor del suelo susceptible a deslizarse

Dónde:

- Z_s = Espesor del suelo resultante susceptible a deslizarse [m]
- $Z_{s_{max}}$ = Espesor de suelo máximo sin consolidar previsto en el área de estudio [m]
- $Z_{s_{min}}$ = Espesor de suelo mínimo sin consolidar observado en el área de estudio [m]
- θ = Valor de la pendiente en la ladera [°]
- θ_{lim} = Valor de pendiente estipulado como límite de influencia para la alteración de la capa de suelo (para valores mayores a esta pendiente, no hay formación de suelo) [°]
- a = Parámetro adimensional que controla la curvatura del terreno (calibrado para la región de trabajo) [Adimensional]
- x = Distancia horizontal de un punto considerado al drenaje más cercano [m]

El análisis de estabilidad se realiza para cada celda o píxel del DTM de la zona de estudio mediante la integración de los parámetros establecidos, por medio de un algebra de mapas para la obtención Factores de Seguridad (FS), con la ayuda de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3) Zonificación de amenaza según valores de PF

De acuerdo con la probabilidad de falla anual definida en el numeral de criterios de riesgo, se clasifica o categoriza la amenaza. Para esto, se estableció según los valores obtenidos de PF, teniendo en cuenta la categorización sugerida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en la “Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa” (SGC, 2014), la clasificación propuesta en las guías y directrices para la evaluación del riesgo (ANCOLD, 2003; Whitman, 1984), y *Australian Geomechanics Society* (AGS) en el documento “*Landslide Risk Management Concepts and Guidelines*” (AGS, 2000).

Tabla 2-2 Clasificación de la amenaza en función de la probabilidad anual de falla.

Nivel de amenaza	Probabilidad anual de falla	Color
Baja	<0,001 (0,1%)	Verde claro
Media - Baja	0,001-0,02 (0,1%-2%)	Verde oscuro
Media	0,02-0,16 (2%-16%)	Amarillo
Alta	>0,16 (>16%)	Rojo

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

B. Análisis locales

Por otro lado, los análisis locales tuvieron en cuenta el inventario de movimientos en masa activos en el área de influencia del PHI y el nivel de importancia y criticidad de estos, además de los estudios previos para la caracterización de escenarios de amenaza, se seleccionaron algunos sitios inestables particulares para la definición de un nivel de amenaza asociado a su probabilidad de ocurrencia.

Por temas de seguridad para el personal del proyecto y/o temporalidad de los movimientos, para algunos sitios de interés no se cuenta con información geológica y de caracterización geotécnica suficiente para la ejecución de análisis cuantitativos; por lo anterior, para estos sitios se definió una probabilidad de falla de manera semicuantitativa, con base en los informes de monitoreo de radar, los análisis geomorfológicos y geotécnicos del área afectada.

Para los sitios que si tienen información de caracterización geológica y geotécnica, el desarrollo de los análisis de estabilidad se realizó de manera cuantitativa por medio del método de equilibrio límite. Para la aplicación de este método, se deben considerar algunos elementos preliminares de base para la definición de los parámetros geotécnicos, los cuales se listan a continuación:

- Recopilación, generalización y homogenización de información técnica de los estudios realizados en el marco de factibilidad, diseños, construcción y actividades socio-ambientales del Proyecto Hidroeléctrico Ituango.
- Características físicas de los materiales y condición de saturación y/o presencia de agua.
- Definición de las secciones más críticas y representativas del fenómeno.

A continuación, se describen los parámetros geotécnicos requeridos para el tipo de análisis que se va a ejecutar, teniendo en cuenta el enfoque de equilibrio límite para la estabilidad de taludes en suelo y roca.

4) Análisis de estabilidad considerando una superficie de falla “semicircular”

- Para la estabilidad global de taludes en roca se requiere del cálculo de los diferentes parámetros de clasificación del macizo tales como el GSI (Geological Strength Index GSI), el peso unitario (γ), valor de la resistencia a la compresión simple (σ_i), el grado de alteración (D), la cohesión del material rocoso (C), el ángulo de rozamiento (Φ), el módulo de elasticidad (E_m). Estas variables alimentan los parámetros asociados al criterio generalizado de Hoek y Brown (Hoek, Carranza y Corkum, 2002): m_i , s , a , σ_i . En cuanto a la afectación del macizo por la voladura D, se toma un valor igual a cero ya que estos taludes son naturales.
- Para la estabilidad de taludes en suelo se requieren los siguientes parámetros: el peso unitario (γ), cohesión (c) y ángulo de fricción (Φ), parámetros asociados al criterio de Mohr-Coulomb.

Para la evaluación probabilística de taludes se debe tener en cuenta los rangos de variación de los parámetros geomecánicos de los materiales, los cuales pueden ser estimados a partir de revisión bibliográfica donde se mencionan valores típicos de coeficientes de variación (ver Tabla 2-3 y Tabla 2-4).

Tabla 2-3 Resumen coeficientes de variación según referencias (parte 1).

Parámetro	Coeficientes de variación según Referencias							
	Referencia [1]			Referencia [2]			Referencia [3]	
	COV	Distribución	Correlación	COV	Distribución	Correlación	COV	Distribución
ϕ				10,0%	Normal /Beta	con c (-0,5)	10,0%	Beta
c				13,0%	Normal /Lognomal		20,0%	Lognormal
GSI	10,0%	Lognormal	con σ_i (+/- 0,75)	10,0%	Normal /Beta			
m_i	12,5%	Lognormal		12,5%	Normal /Lognomal			
σ_i	25,0%	Lognormal						
D	10,0%	Lognormal						

¹ Standards COV. Mao N, Al-Bittar T, Soubra A-H. (2012). Probabilistic analysis and design of strip foundations resting on rocks obeying Hoek-Brown failure criterion. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 49 (2012) 45-58.

² Lü Q, Low B K. (2011). Probabilistic analysis of underground rock excavations using response surface method and SORM.

³ Massih D, Soubra A. (2008). Reliability-based analysis of strip footings using response surface methodology. Internation Journal of Geomechanics Vol8 No 2.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Tabla 2-4 Resumen coeficientes de variación según referencias (parte 2).

Propiedades o Resultados In situ	Coefficiente de variación V (%)	Fuente
Peso unitario (γ)	3-7%	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Peso unitario sumergido (γ_b)	0-10%	Lacasse y Nadin (1997)
Ángulo de fricción efectivo (ϕ')	2-13%	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistencia no drenada (S_u)	13-40%	Harr (1984), Kulhawy (1992), Lacasse y Nadin (1997), Duncan (2000)
Índice de Compresión (C_c)	10-37%	Harr (1984), Kulhawy (1992), Duncan (2000)
Presión de pre consolidación (p_p)	10-35%	Harr (1984), Kulhawy (1992), Lacasse y Nadin (1997), Duncan (2000)
Coefficiente de permeabilidad de arcilla saturada (k)	68-90%	Harr (1984), Duncan (2000)
Coefficiente de permeabilidad de arcilla parcialmente saturada (k)	130-240%	Harr (1984), Benson et al. (1999)
Coefficiente de consolidación (c_v)	33-68%	Duncan (2000)
Número de golpes en el ensayo de penetración estándar (N)	15-45%	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Ensayo de penetración por cono eléctrico (q_c)	5-15%	Kulhawy (1992)
Ensayo de penetración por cono mecánico (q_c)	15-37%	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Ensayo de resistencia por punta con dilatómetro (q_{DMT})	5-15%	Kulhawy (1992)
Ensayo de resistencia al corte no drenado con valeta (S_v)	10-20%	Kulhawy (1992)

Fuente: Duncan J, (2000).

5) Cálculo de probabilidades de falla

Para la estimación de las probabilidades de falla, se considera la metodología de Monte Carlo. Dentro de la simulación de MonteCarlo se aplican principalmente dos procedimientos: MonteCarlo Crudo o muestreo por Hipercubo Latino (Beck, 2012) menciona que la simulación por MonteCarlo Cruda se basa en la generación de n_{s_i} muestras para x_i variables aleatorias. Cada muestra contiene n números aleatorios u_k generados con distribución uniforme entre 0 y 1. Este procedimiento implica la determinación de la inversa de la función de distribución acumulada de:

$$x_k = F_X^{-1}(u_k)$$

Ecuación 4 Inversa de la función de distribución

Los números aleatorios son generados a partir de algoritmos recursivos, y las muestras no deben presentar ninguna tendencia, es decir, es necesario que sean totalmente independientes y uniformes.

Para la definición de la probabilidad de falla es utilizada una función indicadora $I[x]$ que indica cuales puntos evaluados sobre una ecuación de estado límite (término explicado al final de esta sección), pertenecen a un dominio de falla D_f .

$$I[x] = 1 \rightarrow x \in D_f$$

$$I[x] = 0 \rightarrow x \notin D_f$$

Ecuación 5 Función indicadora de probabilidad de falla

Así, la probabilidad de falla es el valor esperado de la función indicadora sobre todo el dominio de falla Ω :

$$P_f = \int_{\Omega} I[x] f_x(x) dx \equiv E[I[x]]$$

Ecuación 6 Probabilidad de falla

Con una muestra de tamaño finito, un estimador sin tendencia de la probabilidad de falla es:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{n_{si}} \sum_{i=1}^{n_{si}} I[x_i] = \frac{n_f}{n_{si}}$$

Ecuación 7 Estimador de la probabilidad de falla

Donde n_f son los puntos dentro del dominio de falla y n_{si} el número total de simulaciones.

Según (Beck, 2012) el muestreo por hipercubo latino está formulado para recrear todo el dominio de la distribución, reduciendo el número de iteraciones respecto a las que son necesarias mediante la utilización del MonteCarlo crudo.

Cuando se calcula la función de densidad de probabilidad de un modelo que representa la estabilidad de un sistema, producto de una simulación previa mediante el algoritmo de MonteCarlo (implementado en diferentes herramientas), la probabilidad de falla será calculada como se explica a continuación. Si la estabilidad de un sistema es $FS = \text{Resistencia/Solicitud}$, se debe buscar la probabilidad de que FS tome valores menores que 1 como es mostrado en la Figura 2-3. Alternativamente, si la estabilidad de un sistema es dada por una función de estado límite o de desempeño $G = \text{Resistencia-Solicitud}$, se debe buscar la probabilidad de que G sea menor que 0, tal y como se presenta en la Figura 2-4.

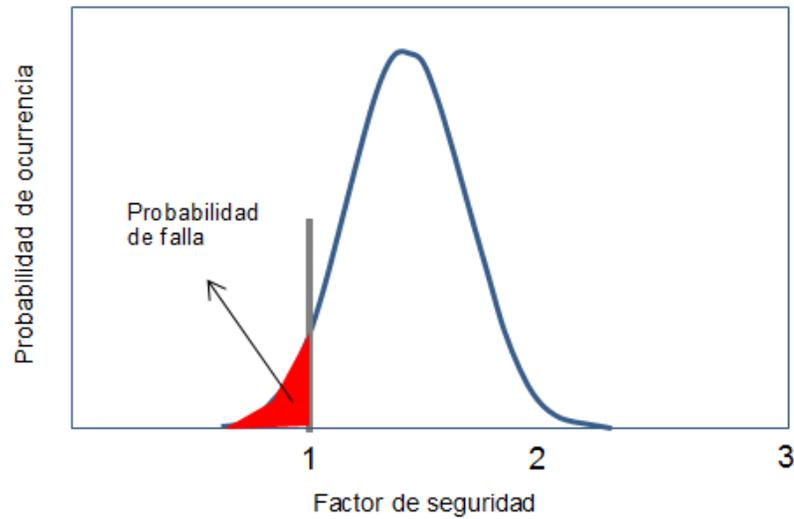


Figura 2-3 Probabilidad de falla cuando estabilidad es dada por el factor de seguridad.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

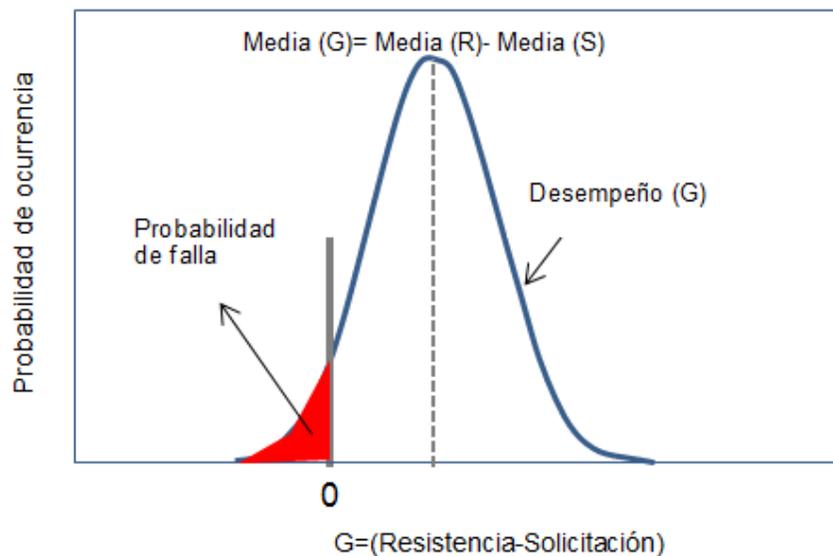


Figura 2-4 Probabilidad de falla cuando estabilidad es dada por una función de desempeño.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

6) Procedimiento para la evaluación de estabilidad en condición sísmica de taludes

A continuación, se presentan las aceleraciones de diseño, definiciones de periodos de retorno, criterios de desempeño y paso a paso para la evaluación de la seguridad sísmica de los taludes

mediante el enfoque pseudo-estático (para mayor detalle consultar el informe “I-2194-PHI-010-GEO-DEG-TMCS-001_Rev3” dispuesto en los anexos).

Períodos de retorno y su correspondiente aceleración de diseño para taludes

Las aceleraciones de diseño se definen con base en el nivel de criticidad y riesgo que representaría una eventual inestabilidad en los taludes, para el sistema de producción de energía y para la seguridad de la presa. Es necesario aclarar que, Colombia no cuenta con una legislación puntual sobre el diseño de taludes para proyectos hidroeléctricos, por tanto, en este documento se provee una interpretación del diseñador sobre los criterios de diseño aplicables, teniendo en cuenta su experiencia, los diseños que han sido aprobados durante el proceso de licenciamiento del PHI y algunas consideraciones estipuladas en normativas internacionales.

Para ello se tiene en cuenta las disposiciones que constan en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10, el cual ha sido formulado para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, lo que corresponde a un sismo con periodo de retorno (Tr) de 475 años. Esta probabilidad excedencia y vida útil se relaciona con el nivel de riesgo considerado en las evaluaciones de seguridad sísmica.

El periodo de retorno de 475 años se asocia a los taludes donde se emplazan todas las estructuras auxiliares del complejo hidroeléctrico de Ituango, así como para los taludes de conectividad vial y zódmes.

Los taludes en I-2194-PHI-010-GEO-DEG-TMCS-001s de las estructuras auxiliares son definidos en conformidad con el ICOLD 148, en donde se solicita un Tr igual al del código de diseño del país en cuestión. Esas zonas son: taludes para los pozos de presión, para los accesos a casa de máquinas, para las estructuras de captación, entre otras. Para estos mismos taludes, el nivel de sollicitación se podrá modificar de acuerdo con la importancia de cada estructura, siguiendo la definición del coeficiente de importancia dado en el Título A de la misma NSR-10.

En la Tabla 2-5 se presentan los periodos de retorno con su correspondiente aceleración pico PGA, extraídos del informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001 (ver en los anexos), para los sitios en que este es aplicable. De igual manera, en la misma tabla se establece la relación entre la aceleración vertical y horizontal y su impacto en el correspondiente valor de aceleración vertical. La relación entre la aceleración vertical y horizontal se calculó con base en la metodología de Gülerce y Abrahamson (2011) a partir del espectro horizontal.

Tabla 2-5 Aceleraciones espectrales PGA horizontales y verticales.

Relaciones V/H para PGA (0,01 s)			
Tr (años)	a _H media (g)	V/H*	av(g)
475	0,17	0,70	0,12

*Relación V/H obtenida a partir de Gülerce y Abrahamson (2011).

En los sitios donde no es aplicable los resultados del informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001, se tienen los siguientes valores de Aa (ver Tabla 2-6). En estos casos, la relación de la aceleración

vertical con la horizontal estará entre 0,5 y 1,0, de conformidad con lo indicado en el numeral H.7.1.2 del Título H de la NSR-10. La Tabla 2-6 ha sido tomada del mapa presentado en el Título A- Figura A.2.3-2 y Apéndice A-4.

Tabla 2-6 Aceleraciones para sitios donde no aplica el estudio de amenaza de PHI, según los municipios de localización y Tr de 475 años.

Municipio	Aa(g)
Ituango	0,20
Briceño	0,15
Toledo	0,15
San Andrés de Cuerquia	0,15
Yarumal	0,15
Valdivia	0,15
Santafé de Antioquia	0,20
Buriticá	0,20
Olaya	0,15
Liborina	0,15
Sabanalarga	0,20
Peque	0,20

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

En general, todos los taludes donde se emplazan las obras principales del proyecto deberán cumplir con:

- Un factor de seguridad (FS) mínimo de 1,5 en el caso estático.
- Un factor de seguridad (FS) mínimo de 1,05 en el caso pseudo-estático para el sismo de diseño, basados en el mismo periodo de retorno de la NSR-10 o su correspondiente modificación, de acuerdo con el nivel de importancia de cada talud.

En la Tabla 2-7 se listan los taludes por analizar y los periodos de retorno a considerar según la importancia de estos.

Tabla 2-7 Listado de taludes y sus correspondientes periodos de retornos para análisis sísmico.

Talud	Periodos de retorno base (años) ⁴
Desviaciones	475 – 2.500 - 10.000
Romerito	475 – 2.500
Vertedero	475- 2.500- 10.000
Cuenco	475- 2.500- 10.000

⁴ Todos los taludes son diseñados para un periodo de retorno base de 475 años. Se citan periodos superiores para aquellos sitios que serán sometidos a análisis especializados dado su nivel de importancia.

Talud	Periodos de retorno base (años) ⁴
Portal túnel acceso a casa de máquinas	475
Vertiente norte margen derecha	475
Subestación eléctrica	475
Estructuras de salida - Descargas	475- 2.500- 10.000
Ticuitá	475
Humagá	475
Margen izquierda presa	475- 2.500-10.000 ⁵
Helipuerto (Villa Luz)	475 - 10.000
km 0+900	475 - 10.000
Bolivia	475
CAV	475

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

Es importante mencionar que en la Tabla 2-7 se presentan los periodos de retorno utilizados para el análisis sísmico de los taludes verificados en el marco del informe “I-2194-PHI-010-GEO-DEG-TMCS-001_Rev3” (ver en los anexos). En este documento, se van a abordar los taludes correspondientes al Talud de las desviaciones, Helipuerto (Villa Luz), km 0+900, Romerito, La Honda, y Sitio 7, teniendo en cuenta las aceleraciones para un periodo de retorno de 475 años; los demás sitios que ya se han analizado en el marco del desarrollo del proyecto pueden ser consultados en el “I-2194-PHI-010-GEO-DEG-TMCS-001_Rev3”.

7) Procedimiento de análisis para taludes en condición sísmica

a) Establecer nivel de importancia de cada talud

El nivel de importancia de los taludes del PHI se establece considerando el nivel de riesgo que representaría una potencial falla en los mismos para el sistema de producción de energía y para la seguridad de la presa, y por ende para las comunidades aledañas.

b) Ajuste de la aceleración para taludes diseñados con base en el periodo de retorno de 475 años

Las aceleraciones horizontales del terreno en roca, dependiendo del periodo de retorno o criticidad de la estructura, han sido dadas en la Tabla 2-5 y Tabla 2-6. Las correspondientes a un periodo de retorno base de 475 años, deberán ser ajustadas en función de la metodología que se establece en el título A y H de la NSR-10 para los análisis pseudo-estáticos, considerando la importancia de la estructura y el tipo de suelo, tal y como se describe a continuación.

⁵ Los análisis para Tr de 10.000 años del talud de cierre de la presa con margen izquierda, se encuentra en el informe de la presa I-2194-PHI-041-GEO-IFP-001 del año 2021.

La aceleración máxima del terreno (a_{max}) se calcula para un periodo igual a cero, siguiendo la misma formulación presentada en el numeral H.5.2.5 y Figura A.2.6-1 de la NSR-10 (Figura 2-5):

$$a_{max} = A_a F_a I$$

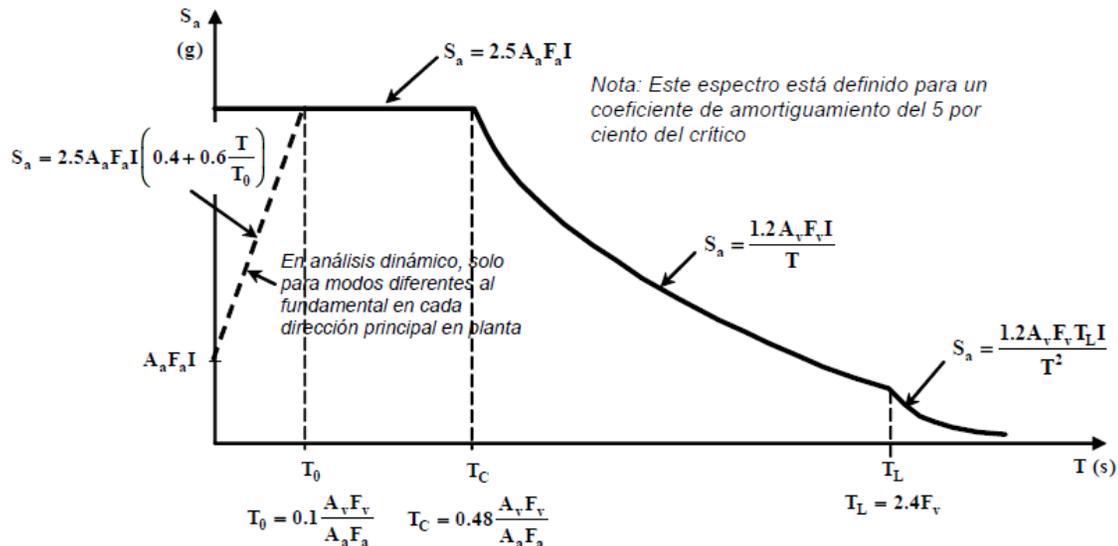


Figura 2-5 Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g para un Tr de 475 años.

Fuente: NSR-10 Título A (2010), Figura A.2.6-1.

El significado de cada coeficiente en la anterior ecuación se describe a continuación:

A_a = coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva en roca. En este caso se usará la aceleración extraída del análisis PHSA de PHI para un periodo de retorno de 475 años, es decir, 0,17 g según la Tabla 2-5, en los sitios donde es aplicable los resultados del informe I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001. Vale la pena aclarar que el PGA del estudio sísmico particular para el proyecto es de orden similar al estipulado inicialmente por la NSR-10, ya que para el municipio de Ituango se espera un A_a de 0,20 g y para el municipio de Briceño de 0,15 g, siendo un límite geográfico entre ambos municipios el río Cauca (la mayor parte de las obras principales están en la margen derecha, municipio de Briceño).

Para taludes del proyecto que estén por fuera de la zona de obras principales y/o por fuera del radio de aplicación del estudio particular de sitio del PHI, se deberán usar los valores de A_a correspondientes a cada municipio (Toledo, San Andrés de Cuerquia, Yarumal, Valdivia, Santa Fe de Antioquia, Buriticá, Olaya, Liborina, Sabanalarga y Peque), según el Apéndice A-4 del Título A “Valores de A_a , A_v , A_e , A_d y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos” y Figura A.2.3-2 del mismo título (mapa de zonificación para el A_a).

F_a = coeficiente de amplificación por efectos de sitio con base en los perfiles de suelo definidos en el Título A (Tabla A.2.4-1).

I = coeficiente de importancia para los diferentes grupos de uso. Este coeficiente permite es considerar, para edificaciones de los grupos II, III; IV, una aceleración con una probabilidad menor de ser excedida que aquella del 10% en un lapso 50 años. En especial, en este coeficiente se tiene en cuenta los taludes donde se alberga obras reunidas en el concepto de “centrales de operación y control de línea vitales de energía eléctrica, agua”, entre otras, contempladas en el grupo IV. Los coeficientes para modificar las aceleraciones en roca por coeficiente de importancia se muestran en la Tabla 2-8.

Tabla 2-8 Valores del coeficiente de importancia I , para un sismo base de diseño con T_r de 475 años.

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia, I
IV	1,50
III	1,25
II	1,10
I	1,00

Fuente: NSR-10 Título A (2010), Tabla A.2.5-1.

Por ejemplo, la aceleración pico en roca calculada en el estudio de amenaza de PHI para un periodo de retorno de 475 años es 0,17 g. Un ajuste en la misma, por un coeficiente de importancia máximo de 1,5, da una aceleración en roca de 0,26 g lo que a su vez corresponde, aproximadamente, a una probabilidad de excedencia inferior al 5% en un rango de 50 años, algo así como un periodo de retorno de 1.000 años.

Los criterios para la definición de tipos de terreno considerando el valor de velocidad de onda de corte, resistencia a la penetración estándar y resistencia no drenada, según aplique, ponderando los valores en los primeros 30 m del perfil de suelo, se presentan en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9 Clasificación de los perfiles de suelo para un Tr de 475 años.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w $\geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Fuente: (NSR-10, 2010), Tabla A.2.4-1.

Con base en la clasificación del tipo de suelo, se escoge posteriormente el valor de Fa para la aceleración de diseño. La Figura 2-6 es la base para estimar los valores de Fa que se muestran en la Tabla 2-10.

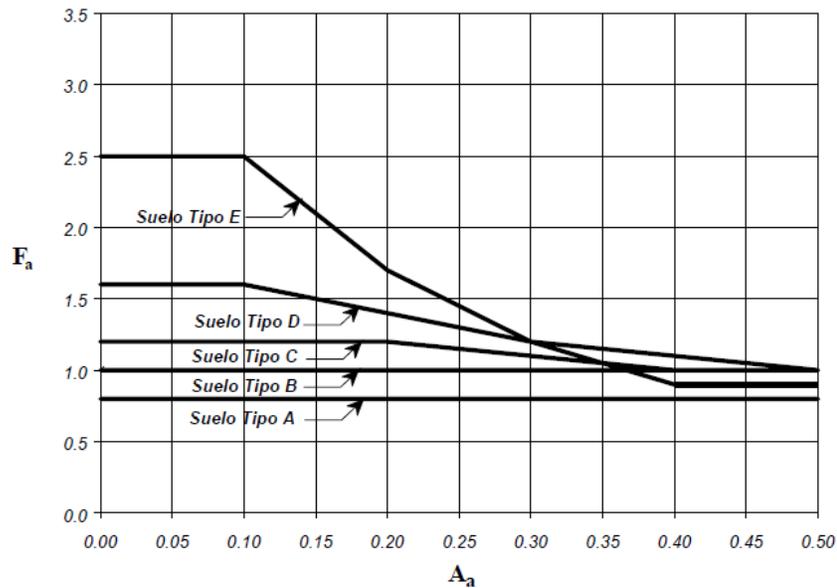


Figura 2-6 Coeficiente de amplificación F_a del suelo para la zona de periodos cortos del espectro, para un T_r de 475 años.

Fuente: NSR-10 Título A (2010), Figura A.2.4-1.

Tabla 2-10 Valores de F_a (factor de amplificación para periodos cortos) según el tipo de suelo, para análisis con periodo de retorno de 475 años, en zonas donde aplica el estudio I-2194-PHI-010-GEO-EAS-001.

Tipo de suelo	F_a (T_r 475 años)
A	0,8
B	1,0
C	1,2
D	1,5
E	1,9

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

El coeficiente aceleración horizontal K_{st} y vertical que se debe ingresar finalmente en el programa de equilibrio límite (Slide de Rocscience®) para el análisis pseudo-estático, debe considerar adicionalmente lo estipulado en el Título H, numeral H.5.2.5 (ver Tabla 2-11). En consecuencia, el K_{st} y $K_{st,vertical}$ de los análisis pseudo-estáticos debe ser calculado como:

$$K_{st} = 0,8 - 1,0 \times a_{m\acute{a}x} \quad (1.20)$$

$$K_{st_vertical} = \text{Factor } V/H \times K_{st}$$

Ecuación 8 Cálculo del K_{st}

Nótese que el valor de $K_{st}/a_{m\acute{a}x}$ debe ser escogido entre 0,8 y 1,0 según la condición geológica del talud (si posee suelo, roca muy fracturada o si es todo en roca).

Tabla 2-11 Coeficiente sísmico para el análisis pseudo-estático de taludes, con un Tr de 475 años.

Tabla H.5.2-1
Valores de K_{ST}/a_{max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

Material	K_{ST}/a_{max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: (NSR-10, 2010), Tabla H.5.2-1.

- c) Ajuste de la aceleración para taludes verificados con un periodo de retorno superior a 475 años

De acuerdo con lo definido por Duncan, Wright y Brandon (2014), en los análisis pseudo-estáticos lo que se busca es representar el efecto del sismo por una fuerza estática horizontal sobre una masa potencialmente deslizante, fuerza que no varía en el tiempo y tampoco a lo largo del perfil del suelo, las cuales son algunas de las limitaciones propias de este método. Por ende, el método pseudo-estáticos sólo es aplicable a materiales donde la resistencia al corte no sea reducida en más del 15% como resultado de las cargas cíclicas, aunque otros autores han señalado hasta el 20% y/o que no se trate de materiales que sufran un aumento significativo en las presiones de poros. En este tipo de procedimientos se debe considerar que, contrario a como se asume en un análisis pseudo-estático, la aceleración del sismo en realidad si varía en cualquier instante de tiempo que dura la sacudida sísmica. Por ende, ya que el PGA ocurre en sólo un instante del tiempo, en los análisis pseudo-estáticos se usa apenas una fracción de esta.

La fracción por tomar para el caso del Tr de 475 años ya fue explicada anteriormente, según lo estipulado en la norma NSR-10. Sin embargo, para periodos de retorno superiores a 475 años no hay una norma explícita como se ha mencionado antes y, ya que a medida que aumenta la aceleración de diseño, la respuesta del talud va entrándose cada vez más en el campo no lineal, los análisis pseudo-estáticos se van volviendo más conservadores al no poder representar adecuadamente la respuesta del talud. En consecuencia, el coeficiente sísmico por escoger debe ser también inferior.

En este sentido, la fracción del PGA por aplicar en análisis con periodos de retorno superiores a 475 años puede ser 0,5 como sugiere Terzaghi (1950) para sismos catastróficos y por otros autores tales como Hynes-Griffin y Franklin 1984. Estas referencias se encuentran en Duncan, Wright y Brandon (2014).

En este caso, para los análisis pseudo-estáticos con periodos superiores a 475 años:

$$a_h \text{ para } Tr > 475 \text{ años} = 0,5 \times PGA_{Tr > 475 \text{ años}}$$

$$a_v \text{ para } Tr > 475 \text{ años} = \text{Factor } V/H \times a_h \text{ para } Tr > 475 \text{ años}$$

Ecuación 9 Análisis pseudo-estáticos con periodos superiores a 475 años

La hipótesis antes expuesta de autores tales como Hynes-Griffin y Franklin 1984 son bajo el supuesto de que el talud se desplaza menos de 1,0 m durante el sismo; esto se encuentra en Duncan, Wright y Brandon (2014). Por ende, el desplazamiento post-sismo se deberá verificar, por lo menos mediante análisis de Newmark y dependiendo del resultado de dicho análisis (valor del desplazamiento final), de la localización y uso del talud, horizontes de meteorización involucrados, entre otras, se podrá requerir un análisis de propagación mediante métodos de elementos finitos tales como Midas GTS NX. En este documento se recomienda utilizar análisis de propagación bidimensional para los taludes que son críticos para la seguridad de la Presa.

2.2.1.1.4 Caracterización de amenaza por subsidencia o hundimiento

Se pueden presentar en esencia dos escenarios distintos para un evento de subsidencia: para bajas coberturas y altas coberturas, como se describe en los siguientes numerales. Para cada uno de ellos se utilizará una metodología distinta de evaluación.

A. Subsidencia en zonas de baja cobertura

Este problema se aborda desde el punto de vista de la estabilidad del frente de excavación, que, de acuerdo con las características del material y condición geométrica del sitio, puede resultar inestable si no se consideran medidas de estabilización adecuadas durante el proceso de excavación. Entre las medidas de refuerzo para estos casos se incluyen: inyecciones de consolidación, perforaciones para drenaje, contra presión en el frente, sistemas de impermeabilización, tubos de enfilaje, pernos de enfilaje, pernos en el frente de fibra de vidrio, láminas de atizado, excavación del frente del túnel por etapas etc.

Lo anterior, basado en casos históricos de hundimientos en proyectos no mineros en donde el punto en común corresponde a un mecanismo de falla asociado a la estabilidad en el frente de excavación. En la Figura 2-7 se muestran algunos casos registrados tanto para excavación mecanizada como para excavación convencional con perforación y voladura.

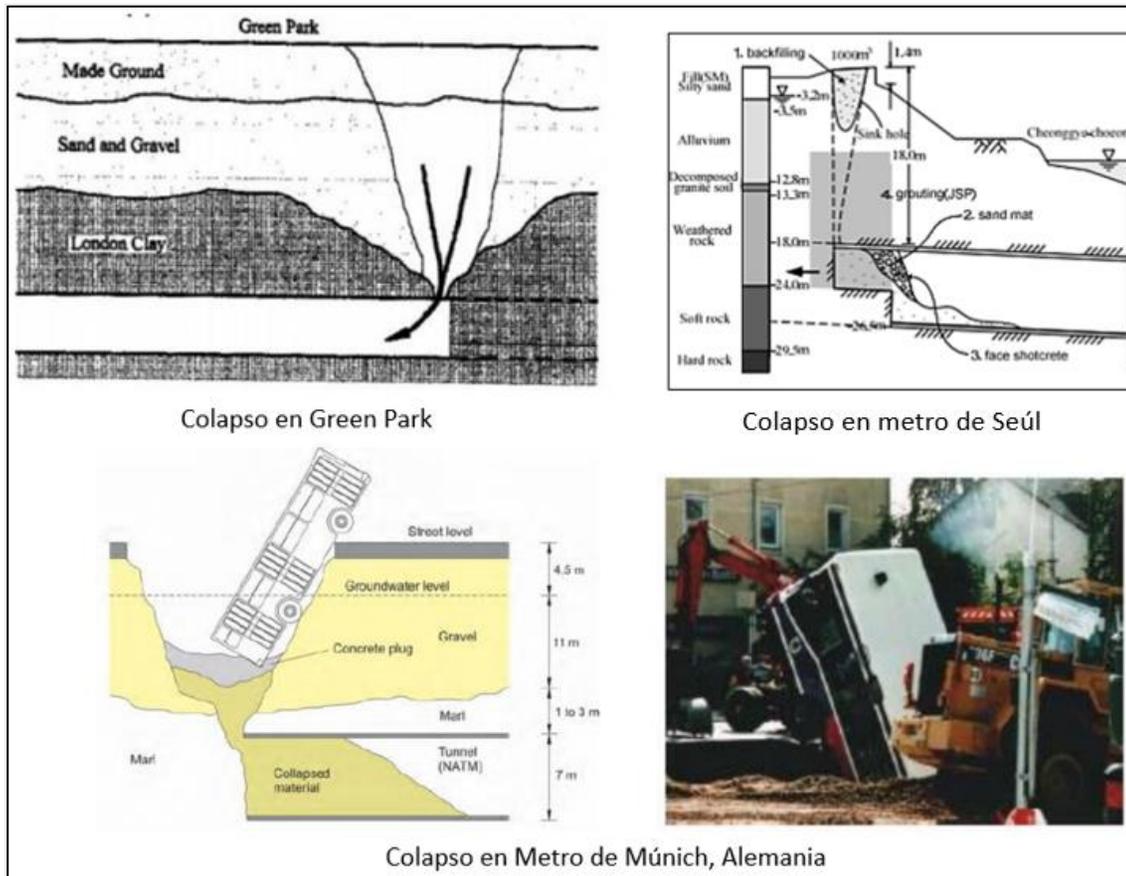


Figura 2-7 Casos históricos de subsidencias en el mundo en túneles durante excavación.

Fuente: Tomado de (ROSAS TLALOLINI, 2019).

La metodología para esta evaluación se basa en el análisis sugerido por (Anagnostou & Kovari, 1994), el cual es un método analítico soportado en el mecanismo de rotura propuesto por Horn (Li, 2009) considerando un efecto silo. El modelo de equilibrio límite de Horn, asume un mecanismo de desplazamiento a partir de una cuña prismática y una chimenea, ambas infinitamente rígidas. Además, la sección del frente se concibe en forma rectangular tal y como se esquematiza en la Figura 2-8.

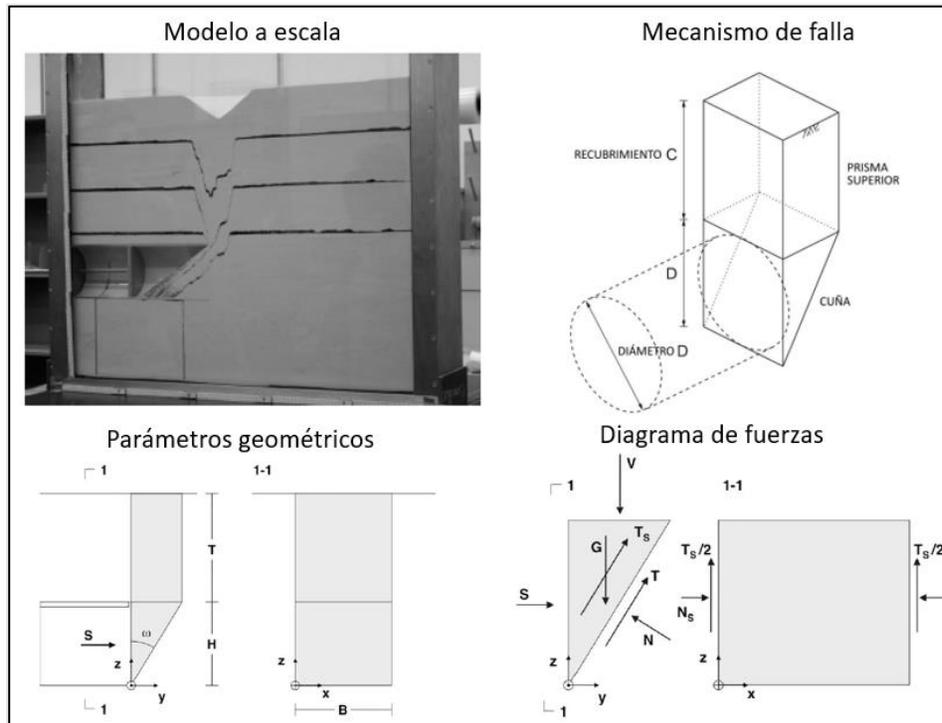


Figura 2-8 Método de estabilidad del frente.

Fuente: Tomado de (Anagnostou & Kovari, 1994).

En este modelo las fuerzas actuantes son esencialmente el peso propio de la cuña y la sobrecarga en la chimenea, y dependiendo de las condiciones estudiadas se considera la influencia del agua. En este caso las fuerzas resistentes solo se desarrollarán en la cara de la cuña en el frente de la excavación.

La ecuación que representa el empuje S indicado en la Figura 2-8 para estabilizar el frente de excavación en condición drenada se da a partir de la siguiente formula:

$$S = \frac{F \sigma_v + G}{\tan(\omega + \phi)} - \frac{T_s + c \frac{B H}{\cos \omega}}{\cos \omega (\tan \omega + \tan \phi)}$$

Ecuación 10 Empuje el frente.

Donde:

S : Empuje del frente

G : Peso de la cuña

$V: F \sigma_v =$ Carga vertical

T : Fuerza de fricción

ω : Ángulo de cuña para empuje máximo

ϕ : Ángulo de fricción

B : Ancho de la galería

H : Alto de la galería

B. Subsistencia en zonas de alta cobertura

Una de las características principales para que se presente un efecto de subsidencia con excavaciones de altas coberturas, además de lo mencionado al inicio, como las condiciones de cobertura y esfuerzos in situ, está asociado a las características del material excavado y las condiciones geométricas de la excavación, la cual para esta última deben cumplirse algunos requisitos asociados principalmente al área en planta que actúa como área libre necesaria para generar la propagación del hundimiento. Esta área se determina en función del radio hidráulico (HR) o índice de estabilidad (IS) definido como el cociente entre el área en planta y su perímetro en planta.

Por lo anterior, este tipo de evaluación y análisis es común para proyectos mineros que requieren esta clase de proceso o que de acuerdo con las dimensiones del cuerpo mineral y de su aprovechamiento, generan cavidades de grandes magnitudes que exceden la capacidad auto-portante del macizo rocoso donde se encuentran. Para obras o proyectos civiles, esta evaluación no se realiza teniendo como premisa que el diseño y necesidad de la obra, requiere de factores de seguridad adecuados y suficientes para las medidas de soporte tanto en construcción como en operación por lo que no se alcanza a desarrollar un proceso de hundimiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, para verificar la susceptibilidad al hundimiento del macizo rocoso para el Proyecto Hidroeléctrico Ituango (PHI), se utilizará esta misma metodología propuesta por (Laubscher, 1994). Para lograr esto, se requiere conocer una magnitud que se calcula a partir del método del Mining Rock Mass Rating (MRMR) y correlacionarla con radio hidráulico HR ya definido.

Respecto al método MRMR, Laubscher en el año 1977, modificó el sistema de clasificación RMR presentado por Bieniawski y propuso el Mining Rock Mass Rating, el cual fue modificado posteriormente en 1990 (Pérez, 2018). El sistema de clasificación MRMR, toma el valor básico de RMR y considera los cambios en los esfuerzos inducidos por la cavidad sobre el macizo rocoso. El RMR, está basado en la caracterización de parámetros geológicos presentes en el macizo rocoso, expresados matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$RMR = IRS + \frac{FF}{m} + 0,4 * (Macrorugosidad * Microrugosidad * Jwa * Jf)$$

Ecuación 11 Cálculo del RMR

Donde:

RMR: Rock Mass Rating

IRS: Resistencia intacta de la roca (MPa)

FF/m: Frecuencia de fracturas por metro

Jwa: Alteración de las paredes del núcleo

Jf: Relleno de la fractura

El índice RMR, es la base para poder encontrar el valor de MRMR, el cual se expresa como el valor del RMR modificado. Laubscher clasifica la calidad del macizo rocoso en las mismas 5 categorías propuestas por Bieniawski (ver Tabla 2-12).

Tabla 2-12 Clasificación Rock Mass Rating, RMR.

Rock Mass Rating (RMR)					
Categoría	Muy Pobre	Pobre	Regular	Bueno	Excelente
Rango RMR	0-20	>20-40	>40-60	>60-80	>80-100

Fuente: (Pérez, 2018)

El método MRMR, está incorporado en un diagrama con tres zonas fundamentales dentro del análisis de subsidencia definidas como: zona estable, zona de transición y zona de hundimiento, esta última definida como la zona en la cual se genera la propagación del hundimiento para determinadas combinaciones de MRMR y Radio hidráulico HR, Figura 2-9.

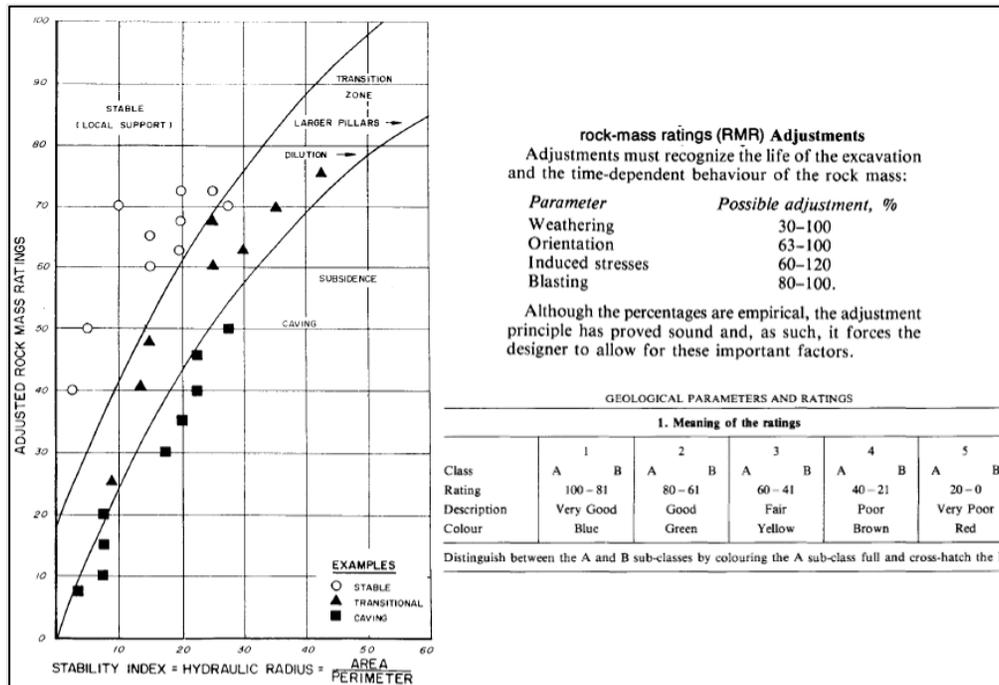


Figura 2-9 Diagrama de estabilidad.

Fuente: (Laubscher, 1994).

A continuación, a manera de ejemplo en la Figura 2-10 se presenta el resultado de un modelo numérico el cual se corrobora con el método empírico de Laubscher utilizando valores del MRMR de 52, 58, 64 y 70. Para esto se utiliza un área libre de un rectángulo de 120 x 120 m correspondiente a la huella de una mina, obteniendo un radio hidráulico de:

$$\text{Radio Hidráulico (HR)} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} = \frac{120 \times 120}{120 \times 4} = \frac{14.400}{480} = 30 \text{ m}$$

Para el caso particular del proyecto hidroeléctrico Ituango, en el caso más favorable se tienen las galerías de acceso las cuales alcanzan secciones de 3 m de diámetro equivalente; el otro extremo, el caso más desfavorable se atribuye a la caverna de casa de máquinas. Para ambos casos se obtienen los siguientes radios hidráulicos.

$$\text{Radio Hidráulico CM (HR)} = \frac{\text{Área (Longitud} \times \text{Ancho)}}{\text{Perímetro}} = \frac{240 \times 24}{(240 \times 2) + (24 \times 2)} = \frac{5.760}{528} = 10,9 \text{ m}$$

$$\text{Radio Hidráulico Galería (HR)} = \frac{\text{Área (Longitud} \times \text{Ancho)}}{\text{Perímetro}} = \frac{3 \times 100}{(100 \times 2) + (3 \times 2)} = \frac{300}{206} = 1,45 \text{ m}$$

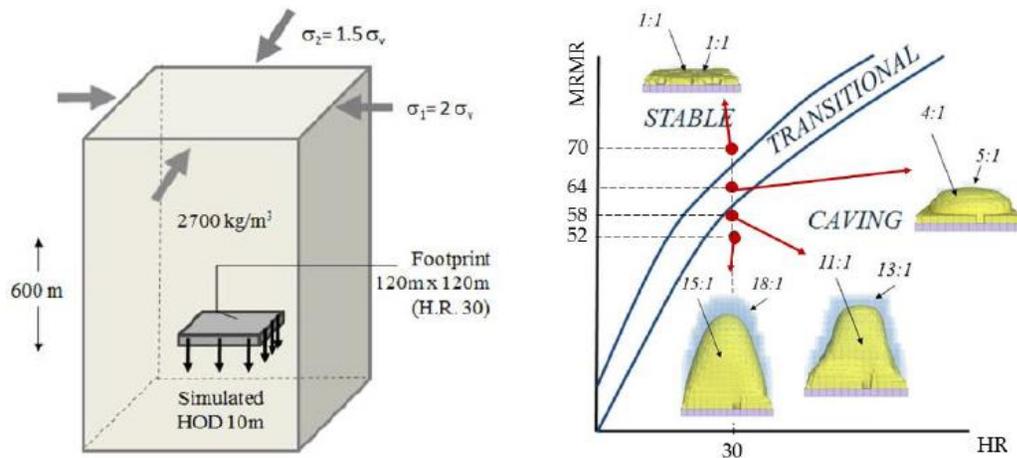


Figura 2-10 (a) Representación esquemática de un modelo numérico conceptual de una mina y (b) Ratas de propagación para cuatro diferentes casos comparados con el método empírico de Laubscher

Fuente: (Sainsbury, 2010).

2.2.1.1.5 Caracterización de amenaza por modos de falla de la presa

La amenaza por falla de la presa se evalúa a partir de la identificación de varios factores que contribuyen a la misma. Dichos factores son debidos a las condiciones estructurales de los llenos, a las condiciones de operación del proyecto (vertedero, embalse) y a otros factores externos tales como la estabilidad de los taludes aledaños.

La identificación de todos los factores que contribuyen a la inestabilidad o falla de la presa, se realiza a través de la evaluación de los modos probables de falla, PFMA por sus siglas en inglés. La evaluación de los PMFA sigue una metodología cualitativa, acreditada por entidades como la FERC (Comisión Federal Reguladora de Energía de Estados Unidos), el Banco Mundial, entre otras. El procedimiento explicado a continuación ha sido adaptado de referencias tales como FERC (2005), World Bank (2021) y el informe de modos probables de fallo de Ituango Hatch (2021).

Todo este proceso se llevó a cabo bajo la coordinación de la empresa Hatch, con la participación del dueño del proyecto (EPM) y del Asesor Consorcio Generación Ituango (CGI-Integral), involucrando personal de diferentes disciplinas quienes en mesas de trabajo (talleres) revisaron toda la información disponible. El informe completo puede ser consultado en la referencia Hatch (2021).

La identificación de los posibles modos de fallo siguió las directrices de la Comisión Federal Reguladora de la Energía (FERC) de Estados Unidos sobre el análisis de los posibles modos de fallo. Estas directrices se presentan en las “Directrices de Ingeniería para la Evaluación de Proyectos Hidroeléctricos”, Capítulo 14, Sección 14.3.3 (FERC, 2017). El proceso realizado para

Ituango, al estilo de la FERC permitió al equipo reunido realizar una lluvia de ideas sobre los PFM aplicables a la presa.

El propósito específico del PFMA, en lo que concierne a la presa y a la evaluación estricta de la amenaza, es:

- Identificar los modos probables de falla o factores que pueden contribuir a la materializar la amenaza de falla de la presa, relacionados con la operación del proyecto hidroeléctrico.
- Considerar las amenazas que pueden indirectamente afectar la presa (por ejemplo los asociados con taludes aledaños, etc.,).
- Identificar los modos probables de falla estructurales, considerando las características propias del cuerpo de la presa
- Mejorar el programa de monitoreo e inspección visual de la presa.
- Ayudar a identificar las medidas de mitigación del riesgo más efectivas, incluyendo los planes de emergencia.

En el caso específico de la presa de Ituango, la información técnica revisada correspondió a:

- Características generales del proyecto
- Procedimientos de operación
- Geología y riesgo sísmico
- Hidrología/hidráulica
- Revisión del plan de monitoreo e instrumentación
- Análisis de estabilidad de la estructura
- Características de las estructuras de descarga
- Identificación de las deficiencias
- Evaluación de los modos probables de falla e identificación de los modos potenciales

2.2.1.1.6 Caracterización de amenaza por socavación y procesos erosivos

El análisis de la erosión de los suelos y macizos rocosos es un aspecto complejo, que requiere una comparación del ataque hidráulico producido por el flujo y las propiedades físicas resistentes de los geo-materiales. Ambos pueden ser difíciles de caracterizar, lo que lleva a una incertidumbre significativa.

Los enfoques más comunes que existen hoy en día para determinar la resistencia a la erosión se basan en tecnologías que fueron creadas originalmente para la explotación y excavación en macizos rocoso y análisis de erosión en canales y esto se ha trasladado al ámbito hidráulico, lo que, en sí, constituye una limitación del método. La estimación de la resistencia de la roca ante la potencia erosiva del flujo al utilizar este tipo de metodologías se basa por un lado en el Sistema Q de Barton (Barton, Lien, & Lunde, 1974) que fue desarrollado originalmente para la caracterización del macizo rocoso para actividades de túneles en minas. Kirsten (1983) posteriormente adaptó este enfoque para establecer un índice de “ripiabilidad” que ayudó a la

diferenciación de los costos de la excavación dependiendo del grado de ripiabilidad del macizo rocoso.

Las principales propiedades del macizo rocoso que determinan el índice son: la resistencia a la compresión de la roca, el tamaño de cada bloque de roca, la alteración, la rugosidad y la orientación de la junta de la discontinuidad (Bureau of Reclamation, 2015). Para el caso de los suelos, los parámetros considerados en el análisis del potencial erosivo son: la resistencia a la compresión del suelo, la resistencia al corte entre partículas (dada por el ángulo de fricción o la cohesión) y el tamaño de las partículas.

A. Índice de erodabilidad

Una de las metodologías más utilizadas para predecir la erosión de rocas y suelos es el Método del Índice de Erodabilidad (EIM por sus siglas en inglés), propuesto por Annandale (George, 2015). Annandale presentó un método para determinar la capacidad de erosión de rocas y suelos combinando principios básicos de hidráulica con técnicas utilizadas en la ingeniería geológica para la caracterización geomecánica de los materiales. Con base en esta metodología para evaluar el potencial de erosión de suelos y macizos rocosos, se estudian las variables hidráulicas particulares presentes en cada obra o sector de análisis.

El índice de erodabilidad (K) simboliza una medida de la resistencia de un geomaterial a la erosión y esta es representada por la Ecuación 1 que emplea los siguientes parámetros: la resistencia de la masa de suelo o roca (M_s), el tamaño de partícula de suelo o de bloque de roca (K_b), la resistencia al cizallamiento de las discontinuidades o de la unión entre partículas del suelo (cohesión o fricción) (K_d) y la forma de las unidades de material y su orientación con respecto al flujo o número relativo a la estructura del terreno (J_s).

$$K = M_s K_b K_d J_s$$

Ecuación 12 Índice de erodabilidad.

La resistencia de la masa de suelo (M_s) es determinada como el producto de su resistencia a la compresión uniaxial y el coeficiente de densidad relativa, siendo este último obtenido por la división entre su densidad aparente sobre 27 kN/m^3 . Estos valores se obtienen mediante ensayos de campo a escala en los cuales se miden la densidad relativa, consistencia y dureza del material que se correlacionados con rangos de resistencia y se muestran en la Tabla 2-13 y Tabla 2-14 para suelos granulares y para suelos cohesivos, respectivamente.

Tabla 2-13 Número de Resistencia M_s para suelos granulares.

Consistencia	Identificación en perfil	Recuento de golpes SPT	Número de Resistencia (M_s)
Muy suelta	Se desmorona muy fácil cuando se raspa con el martillo geológico.	0-4	0,02
Suelta	Poca resistencia a la penetración por el extremo puntiagudo del martillo.	4-10	0,04

34

Consistencia	Identificación en perfil	Recuento de golpes SPT	Número de Resistencia (M_s)
Medio densa	Considerable resistencia a la penetración por el extremo puntiagudo del martillo	10-30	0,09
Densa	Muy alta resistencia a la penetración por el extremo puntiagudo del martillo – requiere muchos golpes del martillo para su excavación.	30-50	0,19
Muy densa	Alta resistencia a la penetración por el extremo puntiagudo del martillo – requiere herramientas mecánicas para su excavación.	50-80	0,41

Nota: Materiales granulares en los cuales el conteo de golpes SPT exceda 80 deben ser tomados como roca.

Fuente: Modificado de Annandale (1995).

Tabla 2-14 Número de Resistencia M_s para suelos cohesivos.

Consistencia	Identificación	Resistencia al corte en veleta (kPa)	Número de Resistencia (M_s)
Muy suave	La punta de la cabeza puede ser fácilmente empujada hasta el eje del mango.	0-80	0,02
suave	Fácil penetración con el dedo pulgar; el extremo puntiagudo o pico puede ser empujado de 30 a 40 mm; moldeable por dedos con alguna presión.	80-140	0,04
Firme	Hendidura con el dedo pulgar con esfuerzo; el extremo puntiagudo o pico puede ser empujado 10 mm: muy difícil de moldear con los dedos. Puede ser penetrado con una pala de mano.	140-210	0,09
Rígida	Penetración por uña del pulgar con dificultad; hendidura suave producida al empujar una punta en el suelo; no puede ser moldeado con los dedos. Requiere martillo manual para su excavación.	210-350	0,19
Muy rígida	Hendidura por uña del pulgar con dificultad; hendidura suave producida al empujar una punta en el suelo requiere herramientas mecánicas para su excavación.	350-750	0,41

Nota: Materiales cohesivos en los cuales la resistencia al corte en veleta exceda 750 kPa debe ser tomada como roca.

Fuente: Modificado de Annandale (1995).

En el caso de las rocas, M_s generalmente es relacionada con la resistencia a la compresión no confinada (UCS expresada en MPa). Cuando la resistencia UCS es mayor a 10 MPa, el M_s se expresa como:

$$M_s = C_r(UCS)$$

Ecuación 13 Resistencia a la compresión no confinada.

Donde C_r es el coeficiente de densidad relativa $\left[\frac{g\rho_r}{\gamma_{roca}} \right]$.

Cuando la resistencia es menor a 10 MPa el valor de M_s se calcula mediante la expresión:

$$M_s = (0,78)(UCS)^{1.05}$$

Ecuación 14 Resistencia a la compresión no confinada (<10MPa)

Annandale (1995) presentó una forma de asignar un valor de M_s según los datos de campo relacionados con UCS de la roca, mostrados en la Tabla 2-15.

Tabla 2-15 Resistencia de la masa de roca.

Dureza	Identificación en perfil	Resistencia a la compresión inconfiada (MPa)	Número de resistencia de la masa (M_s)
Rocas muy blandas	El material se desmorona bajo golpes firmes (moderados) con el pico del martillo y se puede pelar con un cuchillo; es demasiado difícil cortar la muestra triaxial a mano.	Menos que 1,7	0,87
		1,7 – 3,3	1,86
Rocas blandas	Simplemente se puede raspar y pelar con un cuchillo; En la muestra aparecen hendiduras de 1 mm a 3 mm con golpes firmes (moderados) con el pico del martillo	3,3 - 6,6	3,95
		6,6 - 13,2	8,39
Rocas duras	No se puede raspar ni pelar con un cuchillo; La muestra de mano se puede romper con el pico de un martillo geológico con un golpe firme (moderado).	13,2 - 26,4	17,70
Rocas muy duras	La muestra de mano se rompe con del pico del martillo con más de un golpe.	26,4 - 53,0	35,0
		53,0 - 106,0	70,0
Rocas extremadamente duras	El espécimen requiere muchos golpes con el pico del martillo geológico para atravesar el material intacto.	Mayor que 212,0	280,0

Fuente: Modificado de Annandale (1995).

El parámetro K_b o tamaño de partícula para suelos es determinado directamente por la expresión 4 y pueden obtenerse valores menores 1:

$$K_b = 1000*(D50)$$

Ecuación 15 Tamaño de partícula para suelos.

En macizos rocosos K_b se puede determinar a partir del espaciamiento de las discontinuidades o los parámetros de clasificación del macizo rocoso. La relación más simple y directa es:

$$K_b = RQD/J_n$$

Ecuación 16 K_b en macizos rocosos.

Donde RQD es el índice de calidad de la roca, un parámetro estándar en el registro del núcleo de perforación (Deere & Deere, 1988) y que puede ser definido como el número de juntas por

metro cúbico (J_c , ver Tabla 2-16); y J_n el número de discontinuidades en un macizo rocoso modificado por Annandale (2006) (Tabla 2-17). K_b varía entre 1 y 100 para macizos rocosos.

Tabla 2-16 Conteo de discontinuidades (J_c).

Número de diaclasa por metro cúbico (J_c)	Designación de la calidad del terreno (RQD)	Número de diaclasa por metro cúbico (J_c)	Designación de la calidad del terreno (RQD)
33	5	18	55
32	10	17	60
30	15	15	65
29	20	14	70
27	25	12	75
26	30	11	80
24	35	9	85
23	40	8	90
21	45	6	95
20	50	5	100

Fuente: Modificado de Annandale (1995).

Tabla 2-17 Número de discontinuidades.

Descripción de las diaclasas	Numero de discontinuidades (J_n) modificado
Intacto, ninguna o pocas juntas	1,00
Una familia de diaclasas	1,22
Una familia de diaclasas más algunas aleatorias	1,50
Dos familias de diaclasas	1,83
Dos familias de diaclasas más algunas aleatorias	2,24
Tres familias de diaclasas	2,73
Tres familias de diaclasas más algunas aleatorias	3,34
Cuatro familias de diaclasas	4,09
Más de cuatro familias de diaclasas	5,00

Fuente: Modificado de Annandale (2006).

Para obtener el parámetro K_d o resistencia entre las partículas del suelo se obtiene mediante la tangente del ángulo de fricción residual de acuerdo con la relación de Barton et al (1974):

$$K_d = \tan(\Phi_r)$$

Ecuación 17 Resistencia entre partículas del suelo.

En macizos rocosos K_d viene dado por la relación J_r/J_a , donde J_r y J_a son los números de rugosidad y alteración de la junta respectivamente, según las características de las superficies de las discontinuidades definidas por el sistema Q de Barton (Barton, Lien, & Lunde, 1974) que se muestra en la Tabla 2-18 y Tabla 2-19.

Tabla 2-18 Rugosidad de las paredes de las discontinuidades.

Separación de las diaclasas	Condición de las diaclasas	Número de rugosidad de la diaclasa
Ajustada – Contacto de la pared de roca (o contacto de la pared de roca antes de cortar 10 cm)	Discontinuo	4
	Rugoso o irregular, ondulado	3
	Suave, ondulado	2
	Slickensided ondulado	1,5
	Rugoso o irregular, planar	1,5
	Suave, planar	1,0
Abierta – no hay contacto en la pared de roca (incluso cuando está cizallada)	Slickensided , planar	0,5
	Relleno de mineral arcilloso	1,0
	Arena, grava o zona cizallada	1,0

Fuente: Modificado de Barton, Lien, & Lunde (1974).

Tabla 2-19 Alteración de las paredes de las discontinuidades.

Separación de las diaclasas	Condición de las diaclasas	Número de rugosidad de la diaclasa (J_a)
Ajustada, contacto con la pared de roca	Estrechamente curada, dura, sin relleno blando (cuarzo o epidota).	0,75
	Diaclasa con paredes inalteradas, tensión superficial solamente.	1,0
	Diaclasa con paredes suavemente alteradas, si revestimiento blando (partículas de arena).	2,0
	Revestimiento de limos o arcilla arenosa (no blandos)	3,0
	Revestimiento de minerales de arcilla blandos o de poca fricción (<1-2 mm de espesor).	4,0
Contacto con la pared de roca antes de 10 cm de cizalla	Partículas de arena (roca desintegrada libre de arcilla)	4,0
	Rellenos de minerales de arcilla, no blandos, fuertemente consolidados (<5 mm de espesor).	6,0
	Rellenos de minerales de arcilla, no fuertemente consolidados (<5 mm de espesor).	8,0
	Rellenos de arcillas expansivas (<5 mm de espesor, el J_a incrementa con el incremento del porcentaje de hinchamiento de la arcilla).	8,0 – 12,0
No hay contacto con la pared de la roca (incluso cuando esta cizallada)	Zonas o bandas de arcilla limosa o arenosa (no blandas)	5,0
	Zonas o bandas de roca triturada y arcilla fuertemente consolidadas.	6,0
	Zonas o bandas de roca triturada y arcilla, no fuertemente consolidadas.	8,0
	Zonas o bandas de roca triturada y rellenos de arcillas expansivas (el J_a incrementa con el incremento del porcentaje de hinchamiento de la arcilla).	8,0 – 12,0
	Zonas gruesas continuas o bandas de arcillas fuertemente consolidadas.	10,0
	Zonas gruesas continuas o bandas de arcillas no fuertemente consolidadas	13,0
	Zonas gruesas continuas o bandas de arcillas expansivas (el J_a incrementa con el incremento del porcentaje de hinchamiento de la arcilla).	13,0 – 20,0

Fuente: Modificado de Barton, Lien, & Lunde (1974).

La relación entre la dirección del flujo y la orientación de las discontinuidades se explica por el parámetro J_s . Esto representa la facilidad con la que el agua puede penetrar las discontinuidades y desalojar los bloques. Para determinar J_s se puede usar la Tabla 2-20, teniendo en cuenta las direcciones del flujo y el buzamiento y la dirección de buzamiento de las estructuras, así como el espaciamiento de las discontinuidades. Para el caso de los suelos J_s asume un valor de 1.

Tabla 2-20 Determinación de J_s .

Ángulo de buzamiento de la diaclasa en dirección del flujo	Buzamiento hacia abajo en la dirección del flujo Longitud del bloque/Espesor				Buzamiento hacia arriba en la dirección del flujo Longitud del bloque/Espesor			
	1:1	1:2	1:4	1:8	1:1	1:2	1:4	1:8
0	1,14	1,09	1,05	1,02	1,14	1,09	1,05	1,02
1	1,50	1,33	1,19	1,10	0,78	0,85	0,90	0,94
5	1,39	1,23	1,09	1,01	0,73	0,79	0,84	0,88
10	1,25	1,10	0,98	0,90	0,67	0,72	0,78	0,81
20	0,84	0,77	0,71	0,67	0,56	0,62	0,66	0,69
30	0,63	0,59	0,55	0,53	0,50	0,55	0,58	0,60
40	0,53	0,40	0,46	0,45	0,49	0,52	0,55	0,57
50	0,49	0,46	0,43	0,41	0,53	0,56	0,59	0,61
60	0,50	0,46	0,42	0,40	0,63	0,68	0,71	0,73
70	0,56	0,50	0,46	0,43	0,84	0,91	0,97	1,01
80	0,67	0,60	0,55	0,52	1,26	1,41	1,53	1,61
85	0,73	0,66	0,61	0,57	1,39	1,55	1,69	1,77
89	0,78	0,71	0,65	0,61	1,50	1,68	1,82	1,91
90	1,14	1,20	1,24	1,26	1,14	1,20	1,24	1,26

Fuente: Modificado de Annandale (2006).

Obtenidos los índices de erodabilidad se grafican vs las potencias de flujo que rigen en la obra a evaluar. Este conjunto de datos también permite definir la probabilidad de erosión de la roca en estudio, según lo presentado por Wibowo et al. (2005) en la , quienes hicieron una regresión logarítmica con los mismos datos analizados por Annandale (1995).

En la , de acuerdo con las recomendaciones de Oficina de Reclamación de Estados Unidos (Bureau of Reclamation, 2015) la parte superior (línea roja) representa un 99% de posibilidades de que se inicie la erosión. La parte inferior (línea verde) representa una probabilidad del 1% de que se inicie la erosión, y el medio (línea azul) representa una probabilidad del 50% de que se inicie la erosión. Por otro lado, la línea negra discontinua que se puede ver en la Figura 2-11 representan el umbral de erosión determinado por Annandale (1995; 2006), representando de esta manera la probabilidad de que se inicie la erosión, siendo entonces más probable que se presente la erosión en los puntos que se encuentran por arriba de dicha línea.

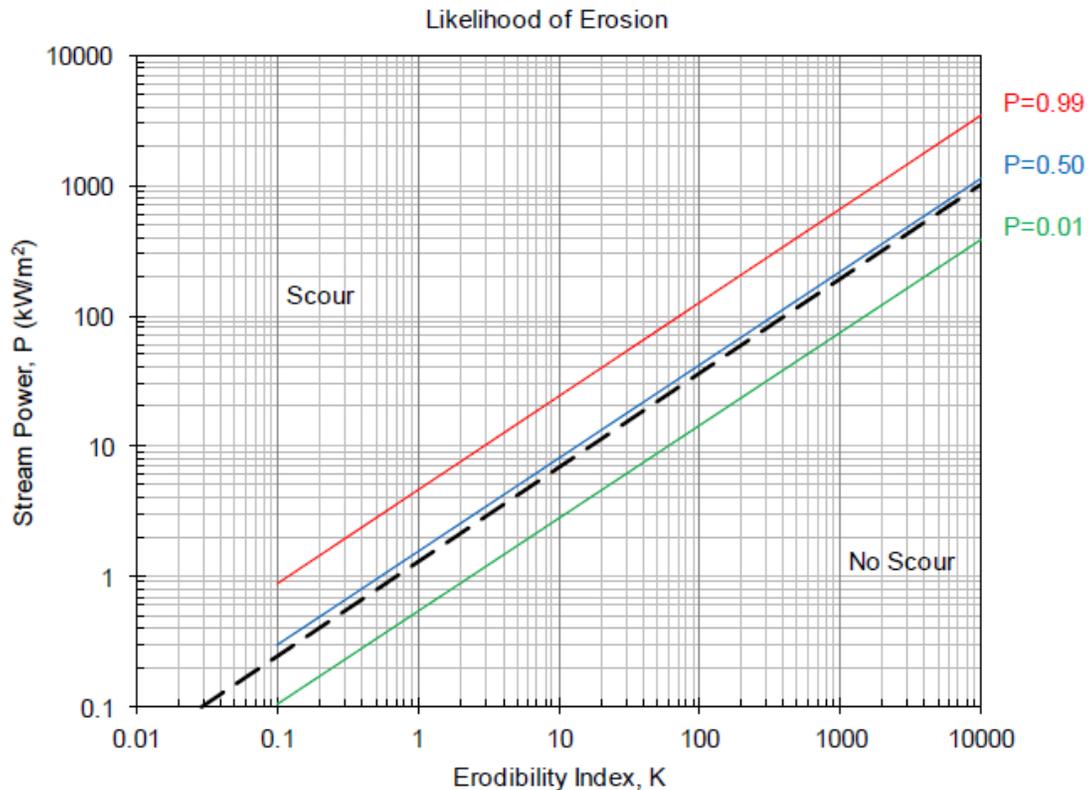


Figura 2-11 Umbrales de erosión.

Fuente: Bureau of Reclamation (2015).

B. Limitaciones del método EMI

Respecto al método de evaluación de erodabilidad “EMI” presentado anteriormente se debe precisar que se tiene dos limitaciones generales principales. En primer lugar, no proporciona una indicación de la tasa de erosión. En segundo lugar, el índice o sistema de clasificación de macizos rocosos no representa adecuadamente los mecanismos de erosión en rocas fracturadas. Muchos de los ejemplos de erosión más severos expuestos por Pells (2015), se dieron por mecanismos específicos de desprendimiento de bloques del arreglo estructural del macizo rocoso, que sólo podrían percibirse mediante consideraciones cuidadosas durante las inspecciones en los sitios, pero no están necesariamente representados por índices o sistema de clasificación de macizos rocosos.

La simplicidad y la amplia aplicabilidad a diversas condiciones de flujo hacen que el *EMI* sea particularmente atractivo para su uso en la práctica. El método, sin embargo, no está exento de limitaciones. Como su nombre lo indica, el método incorpora un índice empírico para caracterizar la roca. Adicionalmente, el *EMI* no tiene en cuenta diferentes mecanismos de

socavación, es decir, fractura frágil, falla por fatiga o desprendimiento de bloques. Esto da como resultado una evaluación más generalizada de la erosión.

Boumaiza *et al* (2017) argumentaron que la resistencia a la compresión inconfiada de la roca (UCS) podría generar un impacto no muy importante en el cambio de la clase de erodabilidad. Pells consideró que la UCS representada en el índice de *Kirsten* por el parámetro M_s , juega un papel muy limitado en la erosión de los macizos rocosos. Asimismo, en 2017 Pells et al. sostuvieron que, en el momento de su desarrollo, el parámetro RQD (designación de calidad de roca), utilizado como parte del factor K_b , se desarrolló para una aplicación específica y que este parámetro en ocasiones se aplica de manera inconsistente en la práctica.

2.2.1.1.7 Caracterización de amenaza por derrames de sustancias peligrosas

La descripción de esta amenaza comprende recorridos de campo, caracterización de 14 puntos del proyecto con presencia de sustancias peligrosas y modelaciones de flujos contaminantes.

En los recorridos de campo se identificaron los diferentes depósitos de almacenamiento de sustancias peligrosas, u otros lugares donde estas sustancias pudieran ser manipuladas. A partir de estos hallazgos, se enfocaron los análisis sobre aquellos puntos cuyo sistema de contención era insuficiente ante un eventual derrame y donde, además, se pudieran generar afectaciones sobre el recurso hídrico. Sobre estos puntos se llevó a cabo el proceso de identificación de los corredores por donde fluiría la sustancia derramada, y se definió el proceso de modelación.

Una vez definidos los sitios con susceptibilidad a generar derrames de sustancias peligrosas, y con el propósito de estimar la capacidad de asimilación del tramo, se implementó el modelo HEC-RAS, en su versión 5.0.7. Para la modelación hidráulica y de calidad del agua se analizó un escenario de contingencia, en el cual la totalidad del volumen derramado en capa sitio ingrese de manera instantánea al cuerpo de agua receptor, considerando condiciones hidrológicas máximas, medias y mínimas.

La información hidrológica utilizada en la modelación se recopiló de los estudios asociados a la OT-EGRN-006-007 (ver documentos I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-AN4-AH y I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-AN4-AH-AP6-A-F-C-Minimos). Las condiciones hidrológicas máximas y mínimas consideraron caudales con periodo de retorno de 1,01 y 2,33 años para el análisis realizado.

Es importante resaltar que no se realizaron modelaciones de vertimientos al embalse del PHI, toda vez que ninguno de los sitios de almacenamiento con posibilidad de derrame de sustancias peligrosas identificado generaba una amenaza de afectación de cauces o corrientes que llegaran hasta el embalse. Esto debido a que los sumideros impedirían que estos derrames fluyeran más allá de las zonas de contención.

A partir de los resultados obtenidos en la modelación hidráulica y de calidad del agua, se buscó determinar la longitud a partir de la cual la concentración pico de la sustancia contaminante

estuviera por debajo del 1% de la concentración pico inicial; es decir, al momento de ocurrir el derrame e ingresar de manera instantánea al cuerpo de agua receptor.

2.2.1.1.8 Caracterización de amenaza por avenidas torrenciales

Para la identificación de la amenaza ante eventos de avenidas torrenciales que presenta la zona de análisis, se utilizó la metodología propuesta en el documento *“Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimientos en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de Cocorná”* de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los ríos Negro – Nare (CORNARE) para el análisis de amenazas por avenidas torrenciales (Cornare, 2012).

De acuerdo con el estudio mencionado, es importante tener en cuenta las diferentes variables que se ven involucradas en el análisis, como lo son: clasificación morfométrica, precipitación, coberturas vegetales, material superficial o geología y geomorfología. Con base en estas variables, resulta posible determinar la amenaza por avenida torrencial en el área de interés. La Figura 2-12 da cuenta del planteamiento metodológico. Posteriormente, se realiza una descripción de las características principales de la zona de estudio, en función de algunas de las variables involucradas en el análisis.

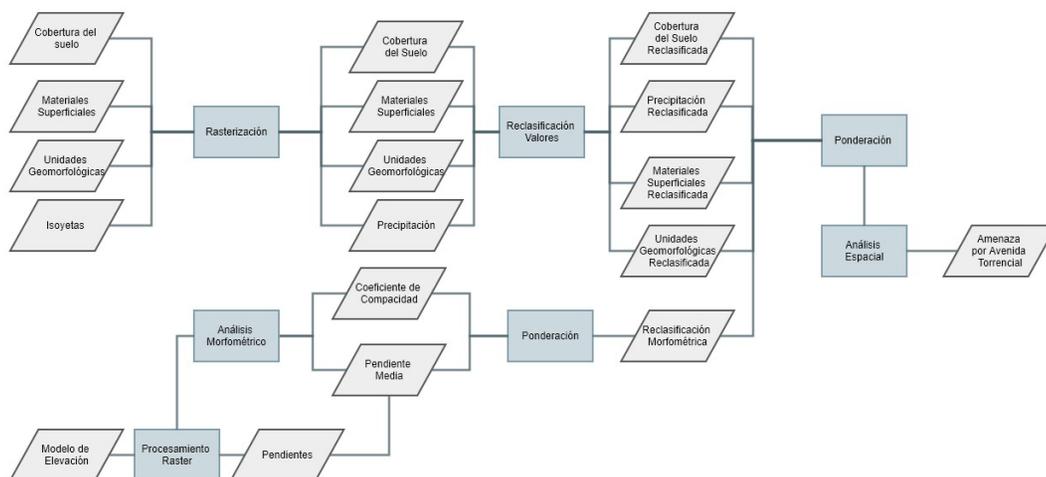


Figura 2-12 Metodología para el análisis de Amenaza por Avenidas Torrenciales.

Fuente: Integral S.A., 2022.

La clasificación morfométrica para este estudio lo componen dos factores, los cuales definen algunas de las características de forma de una cuenca torrencial. En la Tabla 2-21 se presentan los factores utilizados y la ponderación establecida en la *“Evaluación y zonificación de riesgos por avenidas torrenciales, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de Cocorná”* (Cornare, 2012).

Es importante aclarar que, para el análisis de la clasificación morfométrica de este estudio de amenaza por avenidas torrenciales, no se utilizó la variable densidad de drenaje como lo sugiere la metodología, esto debido a que, se consideró que la red de drenaje no era representativa para todas las cuencas analizadas, por lo que, el porcentaje de participación de la densidad de drenaje en la clasificación morfométrica se repartió entre las otras dos variables.

Tabla 2-21 Ponderación de factores de la clasificación morfométrica

Parámetro	Ponderación
Coeficiente de compacidad (Kc)	33,33 %
Pendiente (PM)	66,67 %

Fuente: (Cornare, 2012)

El Coeficiente de Compacidad Kc, es una relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia con la misma superficie de la cuenca. Una cuenca tiende a ser alargada si el índice de compacidad es mayor a 1.5, mientras que su forma es redonda, en la medida que el índice tiende a 1. Este factor es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca, teniendo en cuenta que aquellas cuencas con formas alargadas tienden a presentar un flujo de agua más veloz, a comparación de las cuencas redondeadas, logrando una evacuación de la cuenca más rápida, mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base. Para determinar el valor del Coeficiente de Compacidad para cada una de las cuencas se usó la ecuación:

$$Kc=0,282*PA--\sqrt{Kc=0,282*PA}$$

Ecuación 18 Coeficiente de compacidad

Donde:

Kc: Coeficiente de compacidad

P: Perímetro

A: Área

Las cuencas utilizadas en el análisis del Coeficiente de Compacidad se definieron a partir de la agrupación de tramos de drenaje, hasta un orden 2, según la delimitación de la red de drenaje realizada con el DEM. Para los tramos de la red de drenaje asociados a órdenes mayores o iguales a 3, se asignó un valor de compacidad bajo, de manera que la torrencialidad asociada a estos tramos de la red de drenaje fuera baja. En la Tabla 2-22 se presenta la clasificación y rangos establecidos por CORNARE para la variable del coeficiente de compacidad.

Tabla 2-22 Asignación del índice de compacidad.

Calificación	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alta
Intervalo	1,29-1,36	1,361-1,467	1,468-1,846	1,847-2,39	2,391-2,525
Clasificación	1	2	3	4	5

Fuente: (Cornare, 2012)

Por otro lado, para la generación del mapa de pendientes, se trabajó con un DEM de tamaño de píxel de 12,5x12,5, el cual fue descargado del satélite ALOS (*“Advanced Land Observation Satellite”*). Este temático es el que tiene mayor peso dentro del mapa de clasificación morfométrica debido que la inclinación del terreno tiene gran acercamiento con la susceptibilidad a movimiento de remoción en masa y a procesos de incisión y socavación del cauce.

La pendiente es la variable que tiene mayor ponderación para el cálculo de la clasificación morfométrica dentro del análisis de amenaza a avenidas torrenciales, debido a que este fenómeno es más propenso a que ocurra en cuencas de altas montañas, como se mencionó anteriormente. En la Tabla 2-23 presenta la clasificación de pendientes.

Tabla 2-23 Clasificación de pendientes.

Valor de pendiente en grados (°)	Clasificación	Calificación
<2,86	1	Muy baja
2,86-6,84	2	Baja
6,84-19,29	3	Media
19,29-36,87	4	Alta
36,87<	5	Muy alta

Fuente: (Cornare, 2012).

Para la determinación de la lluvia o precipitación en la zona objeto de análisis, se utilizó el temático de precipitación (precipitación media total multianual). En este análisis se trabajó con las isoyetas de precipitación media total multianual estimadas en el 2018 para el PHI. La precipitación es uno de los factores que tiene más influencia a la hora de presentarse fenómenos de avenida torrencial, por lo tanto, es una variable que presenta gran peso en la ponderación de los factores, al igual que, la clasificación morfométrica por tener involucrada la variable pendiente en su análisis (Tabla 2-24).

Tabla 2-24 Clasificación de la precipitación.

Valor de precipitación (mm)	Clasificación	Calificación
<1665	1	Muy baja
1665-2374	2	Baja
2374-3083	3	Media
3083-3792	4	Alta
3792<	5	Muy alta

Fuente: Integral S.A., 2022.

En el caso de las coberturas, este factor también tiene que ser clasificado en virtud de su mayor o menor desventaja para la ocurrencia del fenómeno analizado, según el estudio de *“evaluación y zonificación de riesgos por avenidas torrenciales y movimiento en masa y dimensionamiento en procesos erosivos en el municipio de Cocorná”* (Cornare, 2012) como se presenta en la Tabla 2-25.

Tabla 2-25 Clasificación de las coberturas del suelo.

Cobertura del suelo	Clasificación	Calificación
Afloramientos rocosos - Bosque abierto - Bosque de galería y/o ripario - Bosque denso - Bosque fragmentado-Bosque natural denso-Boque natural intervenido - Bosque ripario - Cuerpos de agua artificiales – Embalses - Ríos (50 m) - Vegetación secundaria alta - Vegetación secundaria baja - Vegetación secundaria o en transición	1	Muy baja
Áreas deportivas – Aeropuertos – Arbustal - Arbustal abierto - Arbustal denso - Arbustos matorrales – Cítricos – Caña – Café – Canales – Coca - Cultivos agroforestales - Cultivos permanentes arbóreos - Cultivos permanentes arbustivos - Cultivos permanentes herbáceos – Herbazal - Herbazal denso – Maíz - Obras hidráulicas - Otros cultivos transitorios – Papaya - Parques cementerios - Plátano y banano - Red vial y territorios asociados - Red vial, ferroviaria y terrenos asociados - Tejido urbano continuo -Tejido urbano discontinuo - Tubérculos - Vegetación esclerófila - Zonas de extracción minera - Zonas industriales o comerciales	2	Baja
Coníferas - Mosaico de cultivos - Mosaico de cultivos y espacios naturales - Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales - Mosaico de pastos con espacios naturales - Mosaico de pastos y cultivos - otros cultivos permanentes - otros cultivos transitorios - Pastos arbolados - Pastos enmalezados - Pastos enrastrados - Pastos limpios - Pastos Limpios manejados - Pastos no manejados - Plantación forestal	3	Media
Otros sitios de disposición de residuos a cielo abierto - Playas arenales dunas - Tierras desnudas y degradadas - Zonas arenosas naturales - Zonas pantanosas - Zonas quemadas	4	Alta
-	5	Muy alta

Fuente: Integral S.A., 2022.

La geomorfología que se presenta en la zona de estudio, evidencia que la mayor parte del territorio está compuesta por: Barra longitudinal, Cauce aluvial, Plano o llanura de inundación, Escarpe de erosión menor, Sierra denudada, Sierra residual, Abanico aluvial, Barra puntual, Escarpe de terraza de acumulación, Lomos, Ladera contrapendiente, Sierra, Sierra de barras estructurales, Sierra homoclinal, Sierras y lomos de presión, Escarpe de erosión mayor de altiplano, Escarpe de erosión mayor, Lomeríos poco disectados de altiplano, Montículos y ondulaciones denudacionales, Ladera ondulada, Lomeríos poco disectados, Lomo de obturación Cerro remanente o relicto, Cerro residual, Cerro residual de altiplano, Colina residual, Colina residual de altiplano, Escarpe de línea de falla, Ladera estructural, Lomeríos disectados, Lomo de falla, Lomo residual, Lomo residual de altiplano, Plano aluvial confinado, Loma denudada de altiplano, Loma denudada, Lomeríos disectados de altiplano, Escarpe facetado, Loma denudada, Lomo denudado alto de longitud larga, Lomo denudado moderado de longitud larga, Lomo denudado moderado de longitud media, Loma residual, Espolón facetado, Espolón facetado bajo de longitud corta, Espolón facetado bajo de longitud larga, Espolón facetado moderado de longitud larga, Espolón facetado moderado de longitud media, Espolón festoneado bajo de longitud larga, Espolón bajo de longitud corta, Espolón moderado de longitud larga, Espolón moderado de longitud media, Colina residual disectada,

Cono de deslizamiento indiferenciado, Cono de deyección, Cono flujos de detritos, Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional, Cono o lóbulo de flujo de detritos, Cono o lóbulo de flujo de lodo, Cono o lóbulo de Flujo indiferenciado, Ladera erosiva, Lomeríos muy disectados de altiplano, Lomeríos muy disectados, Faceta triangular, Gancho de flexión. Estas unidades presentan una clasificación con un valor entre 3 y 4. En la metodología implementada esta variable se introdujo para el estudio, ya que fenómenos como la susceptibilidad a movimientos de masa, están ligados a características del relieve. En la Tabla 2-26 se presenta la clasificación de las unidades geomorfológicas.

Tabla 2-26 Clasificación de la geomorfología.

Unidad Geomorfológica	Clasificación
Embalses	1
Terraza de acumulación subreciente, Superficie de erosión o aplanamiento de altiplano, Cima, Superficie de erosión o aplanamiento, Terrazas sobreelevadas o colgadas, Explotación minera, Terraza de acumulación, Rellenos de escombros y/o escombreras, Planicie colinada residual de altiplano, Planicie y delta lacustrino, Terraza de acumulación antigua, Terraza de erosión, Escarpe de terraza de erosión .	2
Barra longitudinal, Cauce aluvial, Plano o llanura de inundación, Escarpe de erosión menor, Sierra denudada, Sierra residual, Abanico aluvial, Barra puntual, Escarpe de terraza de acumulación, Lomos, Ladera contrapendiente, Sierra, Sierra de barras estructurales, Sierra homoclinal, Sierras y lomos de presión, Escarpe de erosión mayor de altiplano, Escarpe de erosión mayor, Lomeríos poco disectados de altiplano, Montículos y ondulaciones denudacionales, Ladera ondulada, Lomeríos poco disectados, Lomo de obturación.	3
Cerro remanente o relicto, Cerro residual, Cerro residual de altiplano, Colina residual, Colina residual de altiplano, Escarpe de línea de falla, Ladera estructural, Lomeríos disectados, Lomo de falla, Lomo residual, Lomo residual de altiplano, Plano aluvial confinado, Loma denudada de altiplano, Loma denudada, Lomeríos disectados de altiplano, Escarpe faceteado, Loma denudada, Lomo denudado alto de longitud larga, Lomo denudado moderado de longitud larga, Lomo denudado moderado de longitud media, Loma residual, Espolón faceteado, Espolón faceteado bajo de longitud corta, Espolón faceteado bajo de longitud larga, Espolón faceteado moderado de longitud larga, Espolón faceteado moderado de longitud media, Espolón festoneado bajo de longitud larga, Espolón bajo de longitud corta, Espolón moderado de longitud larga, Espolón moderado de longitud media, Colina residual disectada, Cono de deslizamiento indiferenciado, Cono de deyección, Cono flujos de detritos, Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión, Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional, Cono o lóbulo de flujo de detritos, Cono o lóbulo de flujo de lodo, Cono o lóbulo de Flujo indiferenciado, Ladera erosiva, Lomeríos muy disectados de altiplano, Lomeríos muy disectados, Faceta triangular, Gancho de flexión.	4
-	5

Fuente: Integral S.A., 2022.

La clasificación de las unidades geológicas o materiales superficiales se realizó teniendo en cuenta la Tabla 2-27.

Tabla 2-27 Clasificación del material superficial.

Material superficial	Clasificación
-	1

Batolito de Sabanalarga, Batolito Antioqueño, Liditas del Barroso, Metatonalita de Puquí, Intrusivos Neisicos Sintectónicos	2
Rocas ultramáficas, Rocas Máficas Intrusivas, Serpentinita, Complejo Básico Ultrabásico de Uré, Esquistos Cuarzo-Sericíticos + Cuarzitas), Andesita de Buriticá, Andesita Porfídica, Greenstone, Grupo Ayurá-Montebello, Anfibolitas de Puquí, Esquistos Cuarzo-Sericíticos, Neises Cuarzo Feldespáticos, Neis micáceo (Complejo de Puquí), Neises Cuarzo Aluminicos	3
Volcánico del Barroso, Formación Tarazá, Esquistos Intercalados (Intercalación de esquistos sericíticos y actinoíticos), Depósitos aluviales, Depósitos de terraza sobreelevada, Depósitos de terrazas aluviales, Sedimentos Clásticos sin Diferenciar, Formación Amagá, Gabro de Altamira, Grupo Cañasgordas, Miembro Urrao (Grupo Cañas Gordas - Formación Penderisco), Esquistos Actinolíticos y Cloríticos, Depósitos de abanico aluvial, Aluviones	4
Esquistos Cuarzo-Sericíticos (Esquistos grafiticos), Depósitos coluviales	5

Fuente: Integral S.A., 2022.

Finalmente, la Tabla 2-28 presenta los valores asociados a cada variable en la ponderación realizada con el fin de estimar la amenaza ante fenómenos de avenidas torrenciales.

Tabla 2-28 Ponderación de factores de susceptibilidad por avenidas torrenciales.

Factor	Peso factor (%)
Clasificación morfométrica	30
Geomorfología (unidades geomorfológicas)	20
Precipitación	20
Materiales superficiales	15
Cobertura vegetal	15

Fuente: (Cornare, 2012).

Con base en los resultados obtenidos es posible clasificar la amenaza por avenida torrencial en: muy baja, bajo, medio, alto y muy alto, tal y como se presenta en la Tabla 2-29.

Tabla 2-29 Asignación del índice de amenaza por avenida torrencial.

Calificación	Muy baja	Bajo	Medio	Alto	Muy alta
Valor	1	2	3	4	5

Fuente: (Cornare, 2012).

2.2.1.1.9 Caracterización de amenaza por modificaciones extremas de caudales por riesgo tecnológico

La evaluación de amenaza por fallas operativas que generan variaciones extremas de caudal se lleva a cabo para las estructuras del Vertedero, la Descarga Intermedia, Túneles de Desviación (Túnel de Desviación Derecho – TDD – y la Galería Auxiliar de Desviación – GAD –) y el cierre de los *stop-logs* en la Descarga 3 para la protección de la Casa de Máquinas. A continuación, se presenta la metodología utilizada para la caracterización de la amenaza hidráulica para cada una de estas.

A. Vertedero

1) Información base

Para realizar la caracterización de la amenaza hidráulica, se parte de la información obtenida para dar cumplimiento a la Resolución 720 del 16 mayo de 2018, Art. Primero, Numero 1, Literal I, en donde se presentan los resultados asociados al análisis del tránsito hidráulico de las crecientes generadas por una posible falla de la presa del P.H. Ituango, asociadas a la contingencia del año 2018, pero en donde también se realiza la simulación de fallas de operación con la apertura de una (1) y cuatro (4) compuertas del vertedero, durante la operación del proyecto. A continuación, se presenta – a grandes rasgos – la información utilizada para la modelación hidráulica realizada en el documento; no obstante, en el *Anexo VEC-A01_InformeHidraulico_Contingencia* se encuentra toda información de manera detallada.

Adicionalmente, como se mencionó anteriormente, para el caso de inundación durante la situación actual del proyecto, en que se evalúan los efectos asociados con el paso de una creciente con una probabilidad 2,33 años de período de retorno; se hace uso de la modelación utilizada en la Orden de Trabajo OT-CW106945-08 en donde se evaluaron los efectos de las crecientes naturales del río. Por lo cual, en el *Anexo VEC-A02_I-0010085-OT-CW106945-08_R2* se encuentra toda información de manera detallada.

Para la realización de los modelos hidráulicos, se trabajó con la información de un modelo de elevación digital (LiDAR) y su integración topo-batimétrica se realizó garantizando la congruencia entre ambas fuentes de información, mediante la metodología de Venkatesh (2008) la cual consiste en la interpolación de una superficie batimétrica (LiDAR + batimetría) realizada en el Anexo VEC-A03_I_0010085_OT_EGRN_006_007_B_A6 del *Estudio hidráulico para la delimitación de zonas inundables hacia aguas abajo del sitio de presa* –, donde se realizó una visita de reconocimiento a lo largo del río Cauca en su zona navegable, desde aguas arriba de Puerto Valdivia hasta la confluencia del río Nechí, con el fin de determinar las características del material de lecho, márgenes, orillas, zonas de diques y de desbordamientos, comprendiendo un área de análisis desde la zona donde se proyectaba el sitio de presa hasta aguas abajo de la confluencia entre los ríos Nechí y Cauca, abarcando de esta forma cerca de 214 km divididos en 9 tramos de estudio, seleccionados de acuerdo con análisis geomorfológicos. Este Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), tiene una resolución espacial de 1 m.

Adicionalmente, se realizó un acople espacial topográfico de la zona de La Mojana (suministrada por IDEAM y Fondo Adaptación), adicionando un nuevo subtramo de estudio. Este nuevo tramo abarca desde la confluencia del río Cauca con el río Nechí, hasta Magangué, incluyendo toda la dinámica cenagosa de la región, y el aporte hídrico de ríos de alta importancia como el Magdalena y el San Jorge. Por lo que los modelos actualizados para la Resolución 720 de la ANLA, abarcan el sitio de presa hasta Magangué, como se observa en la Figura 2-13.

Para la realización de los modelos hidráulicos, se trabajó con la información de un modelo de elevación digital (LiDAR) y su integración topo-batimétrica se realizó garantizando la congruencia entre ambas fuentes de información, mediante la metodología de Venkatesh (2008) la cual consiste en la interpolación de una superficie batimétrica (LiDAR + batimetría) realizada en el Anexo VEC-A03_I_0010085_OT_EGRN_006_007_B_A6 del *Estudio hidráulico para la delimitación de zonas inundables hacia aguas abajo del sitio de presa* –, donde se realizó una visita de reconocimiento a lo largo del río Cauca en su zona navegable, desde aguas arriba de Puerto Valdivia hasta la confluencia del río Nechí, con el fin de determinar las características del material de lecho, márgenes, orillas, zonas de diques y de desbordamientos, comprendiendo un área de análisis desde la zona donde se proyectaba el sitio de presa hasta aguas abajo de la confluencia entre los ríos Nechí y Cauca, abarcando de esta forma cerca de 214 km divididos en 9 tramos de estudio, seleccionados de acuerdo con análisis geomorfológicos. Este Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), tiene una resolución espacial de 1 m.

Adicionalmente, se realizó un acople espacial topográfico de la zona de La Mojana (suministrada por IDEAM y Fondo Adaptación), adicionando un nuevo subtramo de estudio. Este nuevo tramo abarca desde la confluencia del río Cauca con el río Nechí, hasta Magangué, incluyendo toda la dinámica cenagosa de la región, y el aporte hídrico de ríos de alta importancia como el Magdalena y el San Jorge. Por lo que los modelos actualizados para la Resolución 720 de la ANLA, abarcan el sitio de presa hasta Magangué, como se observa en la Figura 2-13.

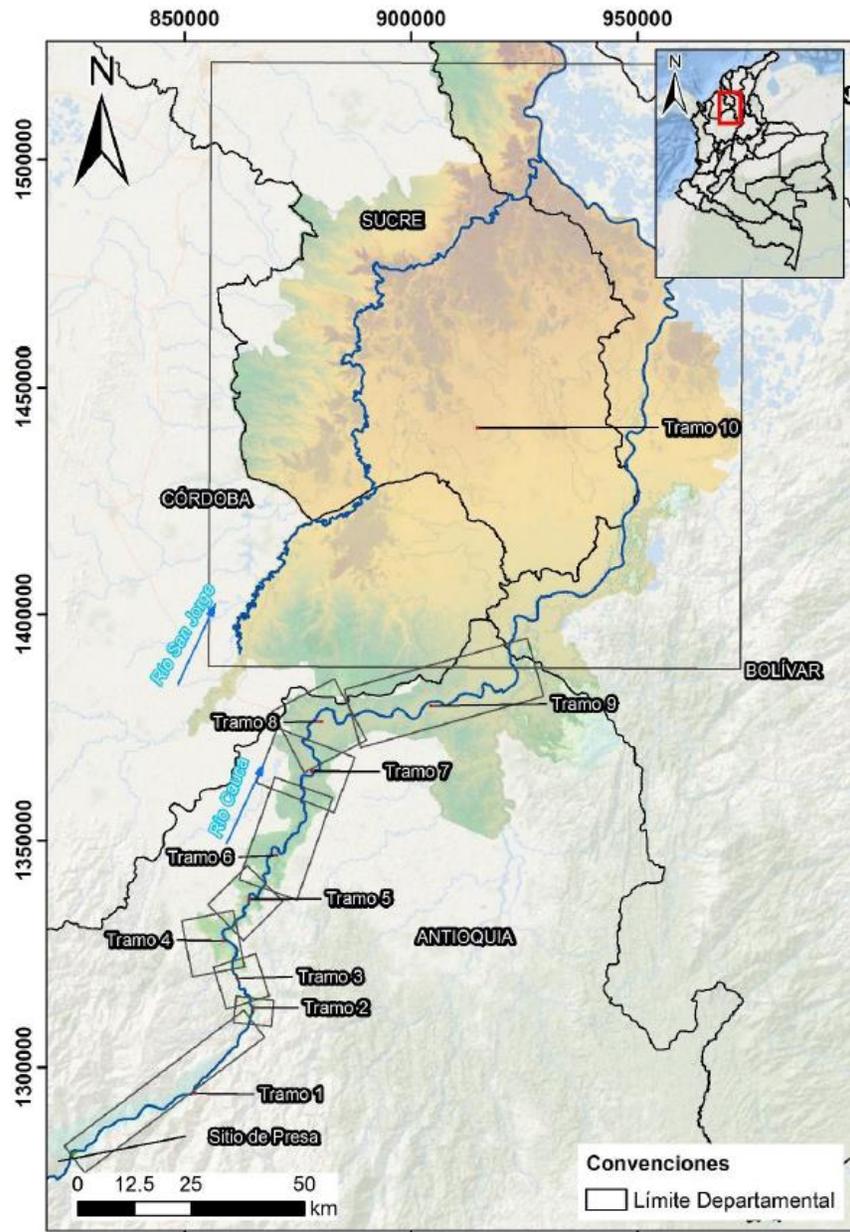


Figura 2-13 Ubicación general de los tramos de estudio.

Fuente: Integral S.A., 2.018.

Tabla 2-30 Ubicación de estaciones de caudal consideradas.

Código	Estación	Coordenadas*	
		x/este	y/norte
26187110	La Pintada	1163855.5	1125932.0
26207030	Puente Iglesias	1151967.6	1136622.3
26207080	Bolombolo	1136945.7	1151612.8
26217050	Cañafisto	1139296.3	1202916.1
26237050	Pescadero	1153177.5	1275544.4
N/A	Sitio de Presa	1156049.0	1278945.1
26237040	Valdivia	1185668.9	1297920.3
26247030	Apaví	1193133.5	1318311.5
26247020	La Coquera	1207496.8	1372714.1
25027050	Margento	1234302.5	1381051.6
25027270	Las Flores	1253598.0	1389104.3

* Sistema de coordenadas Colombia Magna Sirgas Oeste.

Fuente: Integral, 2.016.

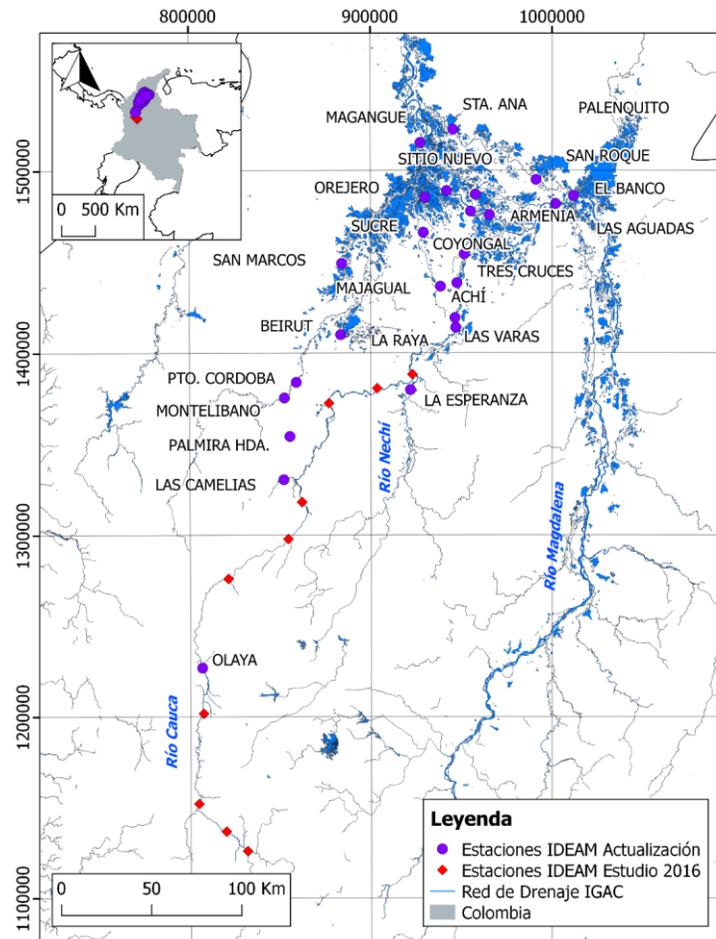


Figura 2-14 Localización de las 24 estaciones utilizadas en el complemento hidrológico.

Fuente: Integral, 2018.

2) Modelación hidráulica

Los tránsitos fueron realizados en modelos bidimensionales: (1) HEC-RAS bajo la condición de flujo no permanente para definir de manera inicial el dominio del modelo bidimensional, y (2) TELEMAC-MASCARET un modelo bidimensional (bajo aproximación de las ecuaciones de Saint-Venant mediante promedio en la vertical).

Para estos modelos no solo se consideraron las condiciones hidroclimáticas del sistema del río Cauca, sus tributarios y complejos cenagosos, sino también información de vías, diques, carreteras y centros poblados, con el fin de que los resultados obtenidos fueron de uso para la toma de decisiones. Adicionalmente, todos los análisis fueron realizados teniendo en consideración el protocolo de modelación hidrológica e hidráulica propuesto por el IDEAM en 2018.

Para determinar inicialmente el dominio total del modelo bidimensional (para garantizar que la malla cubriera toda posible zona susceptible a ser inundada), y realizar estimativos iniciales de transporte de sedimentos en el SRH-1D, se utilizaron dos programas de computación: El primero es la herramienta HEC-RAS, versión 5.0.5, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (US Army Corps of Engineers, 2016), y el HEC-Geo-RAS v-10.3 para ESRI ArcMap v.10.3, que usa la plataforma del sistema de información geográfica, con el fin de garantizar una máxima precisión y acople en los datos geométricos del modelo, tanto en el trazado horizontal como en las secciones transversales, haciendo que el modelo hidráulico definitivo represente de manera más precisa las condiciones del terreno. Adicionalmente, se utilizó el modelo SRH-1D, basado en las ecuaciones hidráulicas del modelo HEC-RAS unidimensional, al cual le fueron acopladas algunas de ecuaciones clásicas de transporte de sedimentos y otras recientemente propuestas para ríos de diversas características. Es importante mencionar que este software de evolución de lecho fue seleccionado para realizar la evaluación inicial de los efectos que tendría la rotura de presa en la zona ubicada hacia aguas abajo del sitio de presa (valoración de los procesos que podrían ocurrir sobre las laderas y lecho). En la experiencia obtenida por Integral S.A., se ha observado que los resultados arrojados por este modelo conservan relación con muchos de los procesos ocurridos en la realidad, representando de una forma adecuada las condiciones y fenómenos que se presentan de forma natural sobre diferentes cuerpos de agua (ríos, lagos o embalses).

Ahora, teniendo en cuenta la información base obtenida de los modelos unidimensionales, se realizaron los modelos bidimensionales mencionados anteriormente, donde se llevó a cabo un análisis de sensibilidad donde se realizaron una serie de simulaciones de prueba, las cuales tienen como objetivo analizar el comportamiento de los modelos ante la variación de algunos de sus parámetros base. Este ejercicio buscó principalmente identificar el rango en el que podrían encontrarse los valores de respuesta relacionadas con la hidráulica y la dinámica

sedimentológica del tramo de estudio (principalmente niveles de flujo, profundidades agradadas o degradadas).

Según los resultados obtenidos a lo largo del análisis de la influencia de los sedimentos provenientes tanto de la presa como de la desestabilización de laderas se establece, de forma conservadora, un factor de mayoración único de hidrógrafas con una magnitud de 1.15 (15% de incremento). Este factor de incremento será constante entre los casos evaluados de tránsito de hidrógrafas de rotura de presa en los cuales se considere la inclusión del efecto de los sedimentos en el análisis hidráulico.

3) Análisis de la amenaza hidráulica

A manera general, el comportamiento del flujo se puede categorizar en función de la severidad de la inundación. La severidad de la inundación se define como el producto entre la profundidad y la velocidad del flujo, y cómo estos afectan tanto a la población como a la infraestructura. Para definir los umbrales de severidad del flujo se empleó el estándar propuesto por la herramienta de definición de la amenaza de inundación -Flood Hazard Definition Tool - (FEMA, 2014).

La categorización de umbrales se realiza para un evento en específico. Este resultado se presenta en un mapa espacial para el cual se combina el efecto de la profundidad y la velocidad, así como el posible grado de afectación a personas o infraestructura. Las categorías contempladas fueron: (1) Baja, (2) Media, (3) Alta, (4) Muy Alta y (5) Extrema. Estas corresponden a las guías del Department of Environmental and Climate Change NWS, FEMA, y el U.S. Bureau of Reclamation. La clasificación se muestra en la Figura 2-15 y se presenta de manera aproximada en la Tabla 2-31.

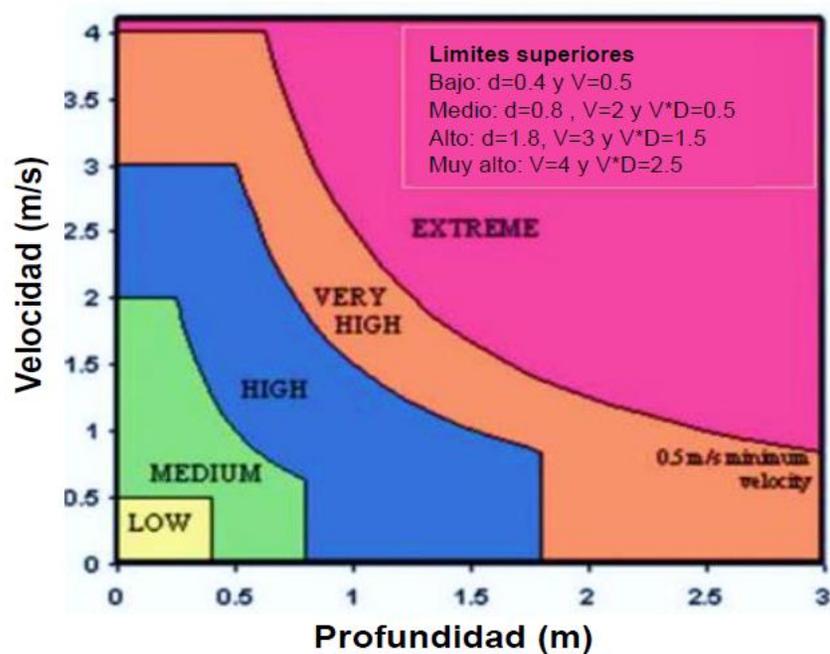


Figura 2-15 Categorías de severidad del flujo.

Fuente: modificado de (FEMA, 2014).

Tabla 2-31 Categorización simplificada de la amenaza hidráulica por inundación.

Severidad del flujo	Rango: profundidad por velocidad	Convención
Bajo	< 0,20	
Medio	0,20 – 0,50	
Alto	0,50 – 1,50	
Muy Alto	1,50 – 2,50	
Extremo	> 2,50	

Fuente: modificado por IDEAM, 2018 adaptado de FEMA, 2014.

Para la condición extrema se explica la razón por la cual, para personas, en especial niños, la limitante de velocidad es de 2 m/s para profundidades de hasta un metro. En estos valores de las variables hidráulicas la probabilidad de ser arrastrado en el proceso de movilización en zonas inundadas es alta. Respecto a la infraestructura también se considera que velocidades mayores a 1 m/s pueden generar problemas de inestabilidad y fallos estructurales (*Department of Enviromental and Climate Change NWS, 2007*).

B. Descarga Intermedia

1) Información base

Según lo mencionado, la información la información utilizada para la modelación hidráulica desarrollada en el documento, proviene de *Anexo VEC-A05_I-009007-AC-PHI-AH-CCACM-R0* con el análisis hidráulico a lo largo del río Cauca para la fase de cierre de compuertas de la casa de máquinas del proyecto hidroeléctrico Ituango, por lo que así se encuentra toda información de manera detallada.

Para la realización de los modelos hidráulicos se trabajó con la información de un modelo de elevación digital (LiDAR) y su integración topo-batimétrica se realizó garantizando la congruencia entre ambas fuentes de información, mediante la metodología de Venkatesh (2008) la cual consiste en la interpolación de una superficie batimétrica (LiDAR + batimetría) realizada en el Anexo VEC-A03_I_0010085_OT_EGRN_006_007_B_A6 del estudio hidráulico para la delimitación de zonas inundables hacia aguas abajo del sitio de presa, se realizó una visita de reconocimiento a lo largo del río Cauca en su zona navegable, desde aguas arriba de Puerto Valdivia hasta la confluencia del río Nechí, con el fin de determinar las características del material de lecho, márgenes, orillas, zonas de diques y de desbordamientos, comprendiendo un área de análisis desde la zona donde se proyectaba el sitio de presa hasta aguas abajo de la confluencia entre los ríos Nechí y Cauca, abarcando de esta forma cerca de 214 km divididos en 9 tramos de estudio, seleccionados de acuerdo con análisis geomorfológicos. Este Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), tiene una resolución espacial de 1 m.

Para el análisis realizado, los caudales a lo largo del río Cauca fueron afectados mediante cada uno de los aportes que realizan los principales afluentes en la zona de estudio. Para estimar dichos incrementos de caudal, se recurrió al estudio de actualización hidrológica Anexo VEC-A04_I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-A4, el cual fue presentado al ANLA en el año 2016., donde se presentó la información hidrológica para el tramo comprendido entre el sitio de presa de la Hidroeléctrica Ituango y la estación Las Flores, ubicada en cercanías del municipio de Nechí, según lo presentado en la Tabla 2-30. En él se presentan los datos base, las metodologías y resultados de los análisis realizados a los registros de caudales y niveles del río Cauca en el tramo de interés. Adicionalmente, a partir de los datos de las estaciones de análisis, se realiza la curva de duración de caudales de cada estación (Figura 2-16).

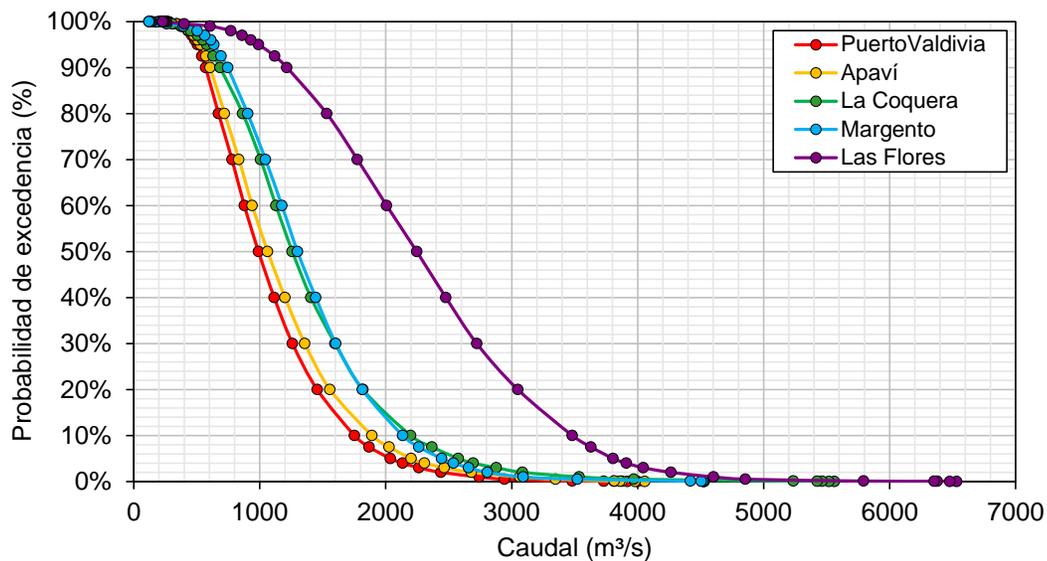


Figura 2-16 Curva de duración de caudales de las estaciones de estudio.

Fuente: Integral, 2.021.

2) Modelación hidráulica

El modelo utilizado para la caracterización hidráulica del río Cauca, corresponde al construido en el año 2017 para el estudio de reducción del caudal remanente de llenado., el cual fue concebido para el tránsito de caudales mínimos.

Para determinar los parámetros hidráulicos asociados a los diferentes casos de estudio, se utilizó el programa de cómputo HEC-RAS versión 5.0.5. Este software es desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, (USACE, 2016) y resuelve las ecuaciones de energía y momentum, por el método estándar de pasos para determinar los perfiles de flujo.

Se debe resaltar que, para dicho modelo se utilizó durante su etapa de construcción la herramienta HEC-Geo-RAS v-10.2 para ArcMap v.10.2, buscando así garantizar la máxima precisión en los datos geométricos, tanto en el trazado horizontal como en las secciones transversales.

Como resultado se obtuvo un modelo hidráulico conformado por un total de 863 secciones transversales, las cuales fueron construidas mediante el uso de información LIDAR de resolución 1x1 m y batimetrías (cada 500 m aproximadamente), la cuales fueron tomadas a lo largo del río Cauca para toda la zona de influencia del proyecto hidroeléctrico.

Es de subrayar que este modelo fue sometido a un proceso de calibración y validación, en el que fueron variados gradualmente los diferentes coeficientes de contracción y expansión de flujo, así como los valores de rugosidad de bancas y canal. Este proceso se realizó hasta

obtener niveles que fueran consistentes con los registrados en las diferentes estaciones IDEAM en la zona de estudio.

Buscando un adecuado análisis de las condiciones que se presentan de forma local a lo largo del río Cauca, el área de influencia del proyecto fue subdividida en 9 sub-tramos de estudio. Dichas áreas corresponden a las utilizadas en los anteriores estudios hidráulicos y de sedimentos para caracterizar los posibles efectos que generará el P.H. Ituango sobre la zona aguas abajo del sitio de presa por operar a largo plazo el proyecto.

Se debe destacar que la selección de los 9 sub-tramos de análisis, se basó en los anteriores estudios geomorfológicos, los cuales permitieron establecer las zonas en las que se presentaban variaciones en el comportamiento del río Cauca, tanto en su naturaleza morfodinámica como en el material presente en el lecho de este cuerpo de agua. En la Figura 2-17 se presenta la ubicación geográfica de cada uno de los sub-tramos de estudio, los cuales serán el referente para los resultados que se expondrán más adelante y que son producto la de caracterización hidráulica realizada para la zona de estudio vía modelación numérica.

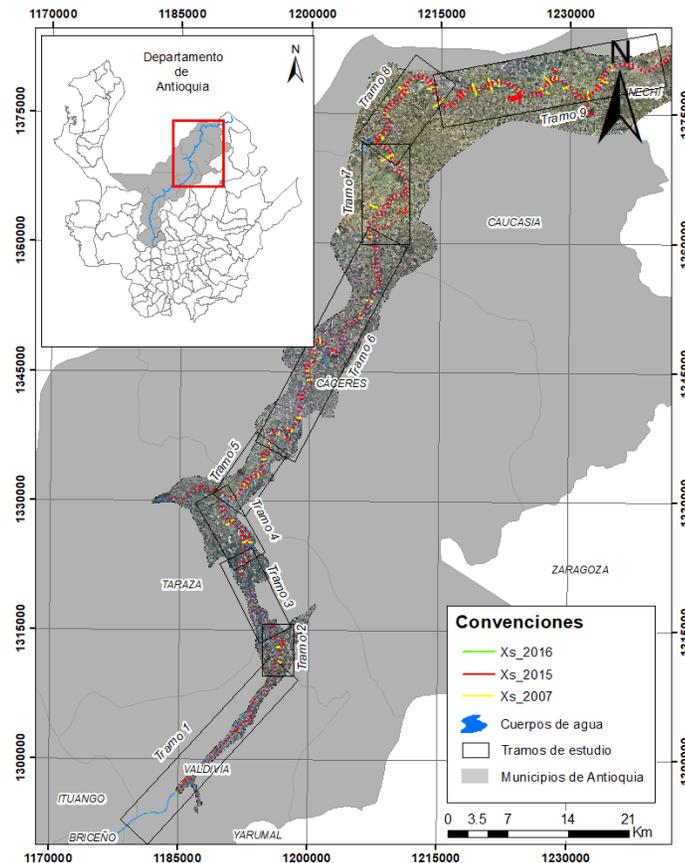


Figura 2-17 Ubicación de los tramos de estudio junto con las secciones batimétricas levantadas para la realización de los diferentes estudios del PHI

Fuente: Integral S.A. 2017.

3) Estimativo del índice de integridad de hábitat (IIH)

En este capítulo se presentan todos los procedimientos adelantados para la estimación del Índice de Integridad del Hábitat (IIH).

Desde el punto de vista hidráulico se evaluaron cuatro métricas: profundidad relativa (Ecuación 19), ancho relativo (Ecuación 20), diversidad de hábitats (Ecuación 21) y variabilidad de la corriente (Ecuación 22), que determinarán la disponibilidad de hábitat.

- **Profundidad Relativa (PR):** Por definición, corrientes anchas y someras proveen poco hábitat y se calientan excesivamente. Un valor alto de esta métrica corresponde a sitios menos apropiados para el desarrollo de la biota. (ANLA, 2013). Está definida como la relación entre el ancho medio de la superficie del agua y la profundidad media.

$$PR = \frac{\text{Ancho medio de la superficie del agua}}{\text{Profundidad media}}$$

58

Ecuación 19 Profundidad relativa.

- **Ancho Relativo (AR):** Para esta métrica valores bajos corresponden con menor alteración entre la zona riparia y el río. Por lo tanto, esta relación se hace mayor en sitios más desfavorables para la biota. (ANLA, 2013). Para este caso, está dado por la relación entre el ancho de la creciente de 2,33 años de periodo de retorno (T_r) y el ancho de la lámina de agua.

$$AR = \frac{\text{Ancho medio de la planicie inundable}}{\text{Ancho medio de la base del canal}}$$

Ecuación 20 Ancho relativo.

- **Diversidad de Hábitats (DH):** A mayor diversidad de hábitat (flujo uniforme) mejor desarrollo de los distintos grupos de organismos. (ANLA, 2013). Relación entre profundidad del flujo y profundidad normal.

$$DH = \frac{\text{Profundidad real del flujo}}{\text{Profundidad normal del flujo}}$$

Ecuación 21 Diversidad de hábitats.

- **Variabilidad de la Corriente (VC):** Una mayor variabilidad de la velocidad de la corriente ofrece mejores oportunidades para el desarrollo de una biota más diversa. (ANLA, 2013). establecida como la relación entre la velocidad promedio máxima y la velocidad media.

$$VC = \frac{\text{Velocidad promedio máxima}}{\text{Velocidad media}}$$

Ecuación 22 Variabilidad de la corriente.

La estimación de las métricas relacionadas con el IIH requirió inicialmente de la caracterización hidráulica de la zona de estudio para todo el rango de condiciones hidrológicas que se presentan de forma natural en el río Cauca. Para ello fueron transitados en el modelo hidráulico una serie de caudales, los cuales abarcaron todo el rango de valores estimados para

las curvas de duración de las estaciones *IDEAM* ubicadas en el tramo de estudio: (1) Puerto Valdivia, (2) Apaví, (3) La Coquera y (4) Margento (ver Figura 2-16).

Una vez terminada la caracterización hidráulica de cada sub-tramo, se depuraron los resultados obtenidos en el modelo, con el fin de representar adecuadamente el comportamiento de las variables hidráulicas. El procedimiento de depuración resultó fundamental ya que se logró estimar una función para cada variable hidráulica, a partir de la cual se representó su comportamiento medio dentro del amplio rango de caudales analizados en cada sub-tramo. Las funciones generadas son entonces el punto de partida para el cálculo de las métricas que componen el IIH. En los casos en donde fue necesario, se definieron funciones compuestas (hasta dos y tres funciones para definir el comportamiento medio de la variable de interés).

Para cada sub-tramo se tienen valores máximos, medios y mínimos de caudal, asociados a descargas de 35 m³/s y para el mes de enero (mes en época de estiaje según las condiciones hidrológicas de la zona del proyecto) durante dos periodos climatológicos: (1) periodo climatológico neutro y (2) fase cálida del ENSO. A cada uno de estos caudales se le realizó el cálculo de las cuatro métricas de tipo hidráulico.

El caudal de 35 m³/s, se contrastó con caudales mínimos del río Cauca con Tr de 2;33 años y Tr de 50 años para la condición sin proyecto. Para todos los escenarios planteados, se llevó a cabo la estimación de las métricas hidráulicas del IIH, partiendo de las condiciones medias de las variables hidráulicas asociadas a cada tramo.

A continuación, la Tabla 2-32 presenta las puntuaciones establecidas por la ANLA para cada métrica ligada al componente hidráulico, y en la Tabla 2-33 los puntajes utilizados para la profundidad relativa.

Tabla 2-32 Métricas hidráulicas y sus respectivas puntuaciones.

Métrica	Puntaje 0	Puntaje 0,5	Puntaje 1
Profundidad Relativa	>200	5 - 50	<5
Ancho Relativo	<2	2 - 5	>5
Diversidad de Hábitats	<0,2	0,2 - 4	>4
Variabilidad de la Corriente	<1,2	1,25 - 1,5	>1,5

Fuente: modificado de ANLA, 2.013.

En el caso particular de la profundidad relativa, existe un rango de valores entre 50 y 200 al que no le corresponde ningún puntaje (ver Tabla 2-32). Para efectos de este estudio se realizó una interpolación de tipo lineal para los valores pertenecientes a este rango, asignándoles una puntuación intermedia entre 0,5 (para valores cercanos a 50) y 0 (para valores cercanos a 200). A continuación, la Tabla 2-33 presenta las puntuaciones determinadas para la profundidad relativa, tomando en cuenta el rango para el cual no se tiene una puntuación establecida según la metodología.

Tabla 2-33 Puntajes utilizados para la profundidad relativa.

Rango	Puntaje
>200	0
200-170	0,05
170 - 140	0,1
140 - 110	0,2
110 - 80	0,3
80 - 50	0,4
50 - 5	0,5
<5	1

Fuente: Integral S.A., 2.017.

De acuerdo con el puntaje obtenido con el IIH (Tabla 2-32 y Tabla 2-33), la integridad del hábitat se clasifica como se muestra a continuación (ver Tabla 2-34).

Tabla 2-34 Puntajes del IIH para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos.

Puntaje del IIH		Interpretación	Implicaciones ecológicas
Puntaje	Clasificación*		
0 – 0,2		Pobre integridad de hábitat	Hábitat inapropiado para el desarrollo de la biota o que genera comunidades de baja diversidad y reducida abundancia.
0,21 – 0,5		Baja integridad de hábitat	Las condiciones del hábitat son poco apropiadas para el desarrollo de los organismos.
0,51 – 0,8		Moderada integridad de hábitat	Las condiciones del hábitat aseguran un aceptable funcionamiento de los organismos.
0,8 – 1		Alta integridad de hábitat	Hábitat con muy buenas condiciones para la biota, que estimula el establecimiento de comunidades diversas y bien representadas.

* Clasificación de colores establecida para el informe, según el puntaje de IIH.

Fuente: modificado de ANLA, 2.013.

C. Destaponamiento del TDD y GAD

1) Información base

Según lo mencionado, para realizar la caracterización de la amenaza hidráulica, se parte de la información obtenida para dar cumplimiento a la Resolución 720 del 16 mayo de 2018, Art. Primero, Numero 1, Literal I, en donde se presentan los resultados asociados al análisis del tránsito hidráulico de las crecientes generadas por eventual destaponamiento súbito de los túneles de desviación del P.H. Ituango. A continuación, se presenta – a grandes rasgos – la información utilizada para la modelación hidráulica realizada en el documento; no obstante, en

el Anexo VEC-A01_AnexoInformeHidraulico_Contingencia se encuentra toda información de manera detallada.

A continuación, se presenta – a grandes rasgos – la información utilizada para la modelación hidráulica realizada en el documento; no obstante, en el Anexo VEC-A01_AnexoInformeHidraulico_Contingencia se encuentra toda información de manera detallada.

Para la realización de los modelos hidráulicos, se trabajó con la información de un modelo de elevación digital (LiDAR) y su integración topo-batimétrica se realizó garantizando la congruencia entre ambas fuentes de información, mediante la metodología de Venkatesh (2.008) la cual consiste en la interpolación de una superficie batimétrica (LiDAR + batimetría) realizada en el Anexo VEC-A03_I_0010085_OT_EGRN_006_007_B_A6 del estudio hidráulico para la delimitación de zonas inundables hacia aguas abajo del sitio de presa, se realizó una visita de reconocimiento a lo largo del río Cauca en su zona navegable, desde aguas arriba de Puerto Valdivia hasta la confluencia del río Nechí, con el fin de determinar las características del material de lecho, márgenes, orillas, zonas de diques y de desbordamientos, comprendiendo un área de análisis desde la zona donde se proyectaba el sitio de presa hasta aguas abajo de la confluencia entre los ríos Nechí y Cauca, abarcando de esta forma cerca de 214 km divididos en 9 tramos de estudio, seleccionados de acuerdo con análisis geomorfológicos. Este Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), tiene una resolución espacial de 1 m.

Adicionalmente, se realizó un acople espacial topográfico de la zona de La Mojana (suministrada por IDEAM y Fondo Adaptación), adicionando un nuevo subtramo de estudio. Este nuevo tramo abarca desde la confluencia del río Cauca con el río Nechí, hasta Magangué, incluyendo toda la dinámica cenagosa de la región, y el aporte hídrico de ríos de alta importancia como el Magdalena y el San Jorge. Por lo que los modelos actualizados para la Resolución 720 de la ANLA, abarcan el sitio de presa hasta Magangué, como se observa en la Figura 2-13.

En el Anexo VEC-A04_I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-A4 del informe de hidrología, se presentó la información hidrológica para el tramo comprendido entre el sitio de presa de la Hidroeléctrica Ituango y la estación Las Flores ubicada en cercanías del municipio de Nechí. En él se presentan los datos base, las metodologías y resultados de los análisis realizados a los registros de caudales y niveles del río Cauca en el tramo de interés, el cual fue complementado con los registros hidrológicos de 24 estaciones con el objetivo de complementar la caracterización hidrológica realizada del sistema hídrico aguas abajo del proyecto, considerando adicionalmente otras corrientes de interés (río Magdalena, río Nechí, río San Jorge, entre otros).

Por lo cual, a las 10 estaciones analizadas (ver Tabla 2-30) en la orden de trabajo OT 06–07 (Integral, 2016) se le adicionaron 24 estaciones, tal como se muestra en la Figura 2-14 donde se

evidencian la totalidad de las estaciones tenidas en cuenta durante el análisis. Para el análisis de caudales y niveles se contó con las series de valores medios diarios desde 1984 hasta 2014 (31 años).

2) Modelación hidráulica

Los tránsitos fueron realizados en el modelo bidimensional HEC-RAS bajo la condición de flujo no permanente para definir de manera inicial el dominio del modelo bidimensional.

Para este modelo no solo se consideraron las condiciones hidroclimáticas del sistema del río Cauca, sus tributarios y complejos cenagosos, sino también información de vías, diques, carreteras y centros poblados, con el fin de que los resultados obtenidos fueron de uso para la toma de decisiones. Adicionalmente, todos los análisis fueron realizados teniendo en consideración el protocolo de modelación hidrológica e hidráulica propuesto por el IDEAM en 2018.

Para determinar inicialmente el dominio total del modelo bidimensional (para garantizar que la malla cubriera toda posible zona susceptible a ser inundada), se utilizaron dos programas de computación: El primero es la herramienta HEC-RAS, versión 5.0.5, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (US Army Corps of Engineers, 2016), y el HEC-Geo-RAS v-10.3 para ESRI ArcMap v.10.3, que usa la plataforma del sistema de información geográfica, con el fin de garantizar una máxima precisión y acople en los datos geométricos del modelo, tanto en el trazado horizontal como en las secciones transversales, haciendo que el modelo hidráulico definitivo represente de manera más precisa las condiciones del terreno.

Ahora, teniendo en cuenta la información base obtenida de los modelos unidimensionales, se realizó el modelo bidimensional mencionado anteriormente, donde se llevó a cabo un análisis de sensibilidad donde se realizaron una serie de simulaciones de prueba, las cuales tienen como objetivo analizar el comportamiento de los modelos ante la variación de algunos de sus parámetros base. Este ejercicio buscó principalmente identificar el rango en el que podrían encontrarse los valores de respuesta relacionadas con la hidráulica y la dinámica sedimentológica del tramo de estudio (principalmente niveles de flujo, profundidades agradadas o degradadas).

3) Análisis de la amenaza hidráulica por inundación

A manera general, el comportamiento del flujo se puede categorizar en función de la severidad de la inundación. La severidad de la inundación se define como el producto entre la profundidad y la velocidad del flujo, y cómo estos afectan tanto a la población como a la infraestructura. Para definir los umbrales de severidad del flujo se empleó el estándar propuesto por la herramienta de definición de la amenaza de inundación *-Flood Hazard Definition Tool - (FEMA, 2014)*.

La categorización de umbrales se realiza para un evento en específico. Este resultado se presenta en un mapa espacial para el cual se combina el efecto de la profundidad y la

velocidad, así como el posible grado de afectación a personas o infraestructura. Las categorías contempladas fueron: (1) Baja, (2) Media, (3) Alta, (4) Muy Alta y (5) Extrema. Estas corresponden a las guías del *Department of Environmental and Climate Change NWS, FEMA, y el U.S. Bureau of Reclamation*. La clasificación se muestra en la Figura 2-15 y se presenta de manera aproximada en la Tabla 2-31.

Para la condición extrema se explica la razón por la cual, para personas, en especial niños, la limitante de velocidad es de 2 m/s para profundidades de hasta un metro. En estos valores de las variables hidráulicas la probabilidad de ser arrastrado en el proceso de movilización en zonas inundadas es alta. Respecto a la infraestructura también se considera que velocidades mayores a 1 m/s pueden generar problemas de inestabilidad y fallos estructurales. (*Department of Environmental and Climate Change NWS, 2007*).

D. Inundación de la casa de máquinas por la descarga 36

A continuación, se realiza un recuento de la información disponible y se define la probabilidad de la amenaza con base en la metodología de EPM para la ocurrencia del riesgo. La mancha de afectación en este caso se encuentra relacionada con el nivel en el que se encontrarían las cavernas en caso de inundación; no obstante, aguas abajo no se tendría mancha de afectación dado que la amenaza a las poblaciones aguas abajo se encuentra relacionada con el que proyecto – con la inundación del complejo – se pondría nuevamente en contingencia, generando retrasos en las actividades desarrolladas y en la puesta en operación.

1) Información base

Es de señalar que con el evento de destaponamiento del Túnel de Desviación Derecho (TDD) el pasado 12 de mayo del 2018 se generó un fenómeno de agradación del lecho del río Cauca, alzando el nivel de piso unos 20 m de altura por encima del nivel original. Este fenómeno ha alterado considerablemente los niveles del río en la zona de la descarga, haciendo que las protecciones de estas estructuras ante el paso de crecientes sean más altas, en cota, con relación a la que se tenían antes de la contingencia.

En ese sentido, para estas nuevas condiciones del río en la zona de las descargas y para evitar la inundación del complejo de cavernas se establecieron tres tipos de estructuras de protección asociadas a diferentes crecientes del río:

- **Dique o jarillón de protección** ubicado a la salida de las Descargas N°1, N°2 y N°3 con cresta a la cota 232,5 m.s.n.m., diseñado para contener los niveles esperados del río ante una creciente de 2,33 años de período de retorno. No obstante, aunque el dique pueda proteger para el nivel del río cuando se descarga la creciente, el enrocado utilizado no es suficiente para soportar las velocidades asociadas a dicho caudal; por lo que es posible que se presente erosión con el paso de la creciente incluso menor a la mencionada. En la zona de la ventana de construcción, el jarillón (o dique de protección) se encuentra en la cota 228,0 m.s.n.m.

- **Murete fundado en roca y vaciado en concreto** dispuesto en las Descargas N°1, N°2 hasta la cota 238 m.s.n.m y en la descarga N°3 hasta la cota 235,0 m.s.n.m., diseñado para resistir ante una creciete de 500 años de período de retorno. En la sección de la Descarga N°3 donde el muro no quedó fundado en roca se abrió un acceso a la casa de máquinas.
- **Muro de protección en concreto reforzado** dispuesto a la salida de la Descarga N°3 para darle seguridad al acceso generado para entrar al complejo, diseñado para un período de retorno de 25 años. En dicho muro se lleva la cresta hasta la cota 231,0 m.s.n.m. y se extiende hasta la Descarga N°4.

En la Figura 2-18 se muestra una fotografía del estado actual de las descargas con sus respectivas estructuras de protección, teniendo en cuenta la cota de diseño, más no la cota a la que se encuentran actualmente.



Figura 2-18 Estado de las descargas del proyecto al 04 de febrero de 2.022.

Fuente: modificado de fotografía EPM, 2022.

Dado que, como se mencionó anteriormente, la Descarga N°3 tiene un acceso al complejo de cavernas en el Anexo VEC-A08_I-2194-PHI-060-AGU-PAP-001, *Protocolo de alertas para protección por inundación de la casa de máquinas*, se presenta el protocolo de alertas que actualmente se encuentra definido para la protección por inundación de la Casa de Máquinas, con el propósito de anticiparse a la creciete y tener el tiempo suficiente para realizar el cierre del portal de la Descarga N°3 y proveer las medidas de seguridad necesarias para los trabajadores y las instalaciones del P.H. Ituango.

2) Información hidrológica

En cuanto a la información hidrológica se tiene, ente otros, el análisis de frecuencia para eventos máximos anuales y para cada trimestre (ver Figura 2-19); el cual, como se sabe, está asociado a los dos periodos de estiaje (E-F-M y J-A-S) y las dos épocas de caudales más altos (A-M-J y S-O-N).

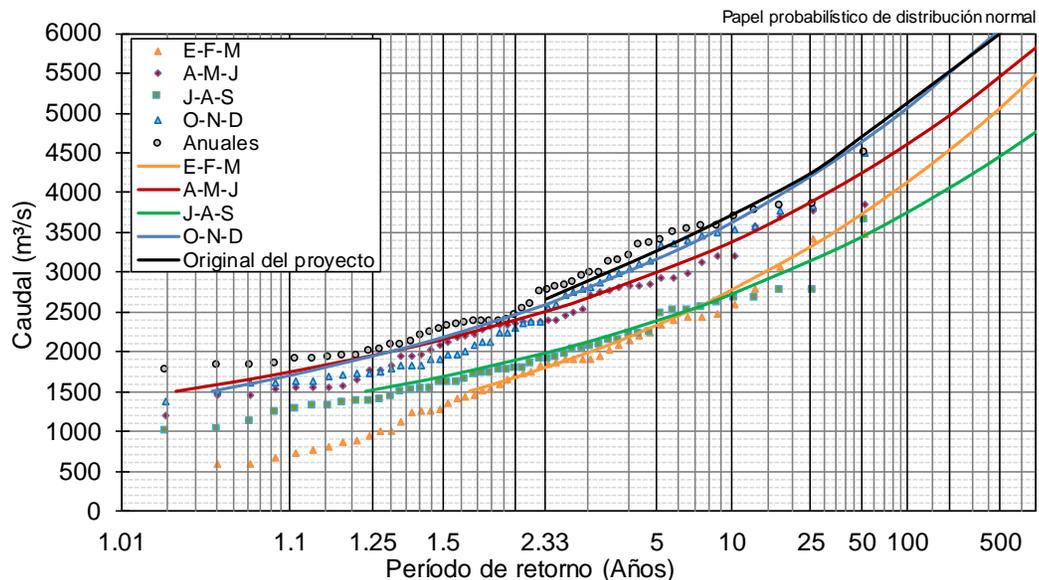


Figura 2-19 Análisis de frecuencia para eventos máximos anuales y trimestrales en el sitio de presa.

Fuente: Integral S.A.

Durante el período de contingencia – y hasta el momento – se han realizado lecturas del nivel del río, con frecuencia hasta de 2 horas, con los que es posible construir una curva nivel del río vs caudal descargado.

En la Figura 2-20 se presenta la variación de los niveles en las descargas respecto al tiempo; donde se puede observar que los niveles en el río responden al caudal descargado desde el embalse. Adicionalmente, se observa un proceso erosivo leve donde para un mismo caudal se registraron niveles diferentes en las descargas, principalmente a la altura de las Descargas N°1 y N°2.

Con base en los registros del nivel del agua a lo largo del río Cauca en la zona de las descargas del proyecto y algunos estimativos hidráulicos, en la Figura 2-20 se presenta la relación entre el nivel en el río en las descargas Vs. el caudal evacuado desde el embalse. En línea azul y púrpura sombreadas se muestra la tendencia que podrían tener los niveles en la Descargas N°1 y N°4 respectivamente, en caso de presentarse una creciente en el río; con esta información es

posible estimar el nivel máximo al que llegaría el río durante el paso de una creciente de 2,33, 25 y 500 años de período de retorno, crecientes para las cuales se realizó el diseño de la protección de casa de máquinas. Vale la pena señalar que la tendencia de estas curvas de caudal Vs. nivel fue comparada con las curvas generadas a partir de modelaciones hidráulicas del río – realizadas con el software HEC-RAS – con el fin de tener referencias sobre su tendencia teórica.

Actualmente las estimaciones de las tendencias de los puntos se ven un poco desplazadas; esto se debe a que, de manera natural, el río ha ido recuperando lentamente sus niveles en el lecho con el funcionamiento continuo del vertedero. No obstante, teniendo en cuenta que pronto deben comenzarse a realizar todas las actividades relacionadas con la recuperación del lecho del río Cauca, estas tendencias se irán actualizando una vez se les dé continuidad a los trabajos.

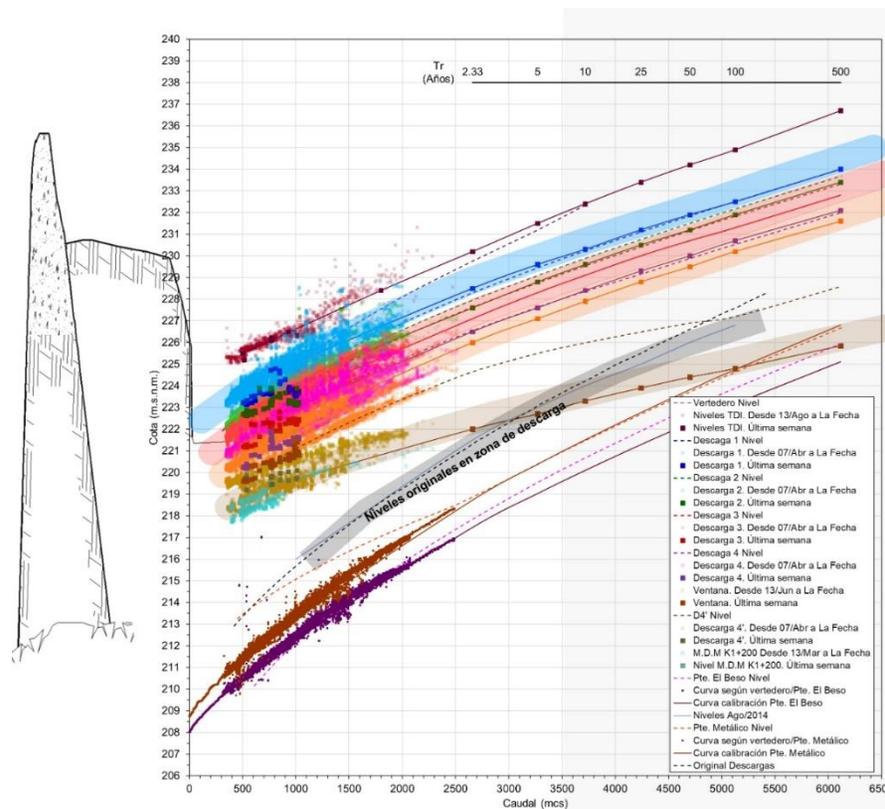


Figura 2-20 Nivel en el río Cauca a la altura de las descargas del proyecto vs el caudal descargado desde el embalse.

Fuente: Integral S.A., 2022.

2.2.1.1.10 Caracterización de amenaza por fenómenos climáticos extremos: Crecientes y sequías (Río Cauca)

A continuación se presenta la metodología de evaluación de la amenaza por condiciones climáticas extremas, ya sea aumentos o disminuciones de caudal, asociados con el comportamiento hidrológico natural de la cuenca del río Cauca, evaluando eventos de crecientes naturales y eventos de sequía.

A. Eventos de crecientes naturales del río Cauca

A continuación, se presenta la metodología utilizada para la caracterización de la amenaza hidrológica por crecientes naturales del río Cauca aguas abajo del proyecto.

1) Información base

Para realizar la caracterización de esta amenaza se revisó la aplicabilidad conforme a los objetivos planteados, de la información utilizada en estudios previos. En ese sentido, se parte de la información obtenida para dar cumplimiento al contrato OT-CW-106945-08 en donde se realizaron los cálculos de profundidad, velocidad y amenaza hidráulica por inundación asociados a la evaluación de los efectos hidráulicos aguas abajo del proyecto y los escenarios de riesgo de la contingencia; y donde, además, se evaluaron las crecientes naturales del río, como se verá más adelante.

A continuación, se presenta – a grandes rasgos – la información utilizada para la modelación hidráulica realizada en el documento mencionado; no obstante, en el Anexo CCE-A03_I-0010085-OT-CW106945-08_R2 se encuentra toda información de manera detallada.

Para la realización de los modelos hidráulicos, se trabajó con la información de un modelo de elevación digital (DEM 1x1), al cual se le realizó la validación de la información topobatemétrica, usando la técnica de interpolación biónica, y una validación morfológica del cauce principal, a partir de un análisis temporal empleando mosaicos de imágenes satelitales como se muestra en la Figura 2-21, donde no se evidenciaron cambios significativos en las zonas de Puerto Valdivia, Caserío el Quince-Doce, Cáceres, Caucasia y Nechí más allá de la evolución morfológica del cauce, algunas barras y el cambio de forma de algunas islas del cauce principal.

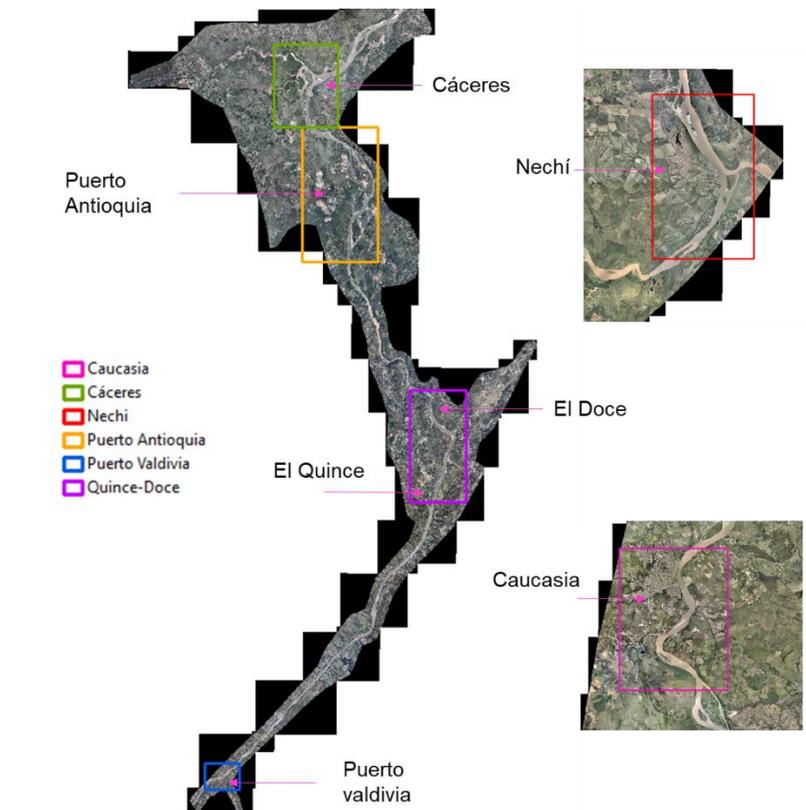


Figura 2-21 Esquema de ubicación de las zonas de análisis de la información satelital

Fuente: Integral S.A., 2020.

Adicionalmente, se actualizó el eje del río Cauca, considerando las profundidades máximas y el centro del canal, y se realizó una reproyección de las abscisas del eje presentado, permitiendo ubicar 22 cauces tributarios del río Cauca, edificaciones como el caserío de El Jardín del Municipio de Cáceres, cinco (5) estructuras de puentes que cruzan el río Cauca y algunas obras de control como diques. Estos procesos se describen a detalle en el Anexo CCE-A03_I-0010085-OT-CW106945-08_R2.

En el Anexo CCE-A04_I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-A4 del informe de hidrología de la orden de trabajo OT 06-07, se presentó la información hidrológica para el tramo comprendido entre el sitio de presa y la estación Las Flores, ubicada en cercanías del municipio de Nechí, como se muestra en la Figura 2-22. La información hidroclimatológica analizada fue obtenida de los registros históricos del IDEAM y complementadas con registros suministrados por EPM, dicha información comprende registros de caudales y niveles de las estaciones hidrométricas descritas en la Tabla 2-30.

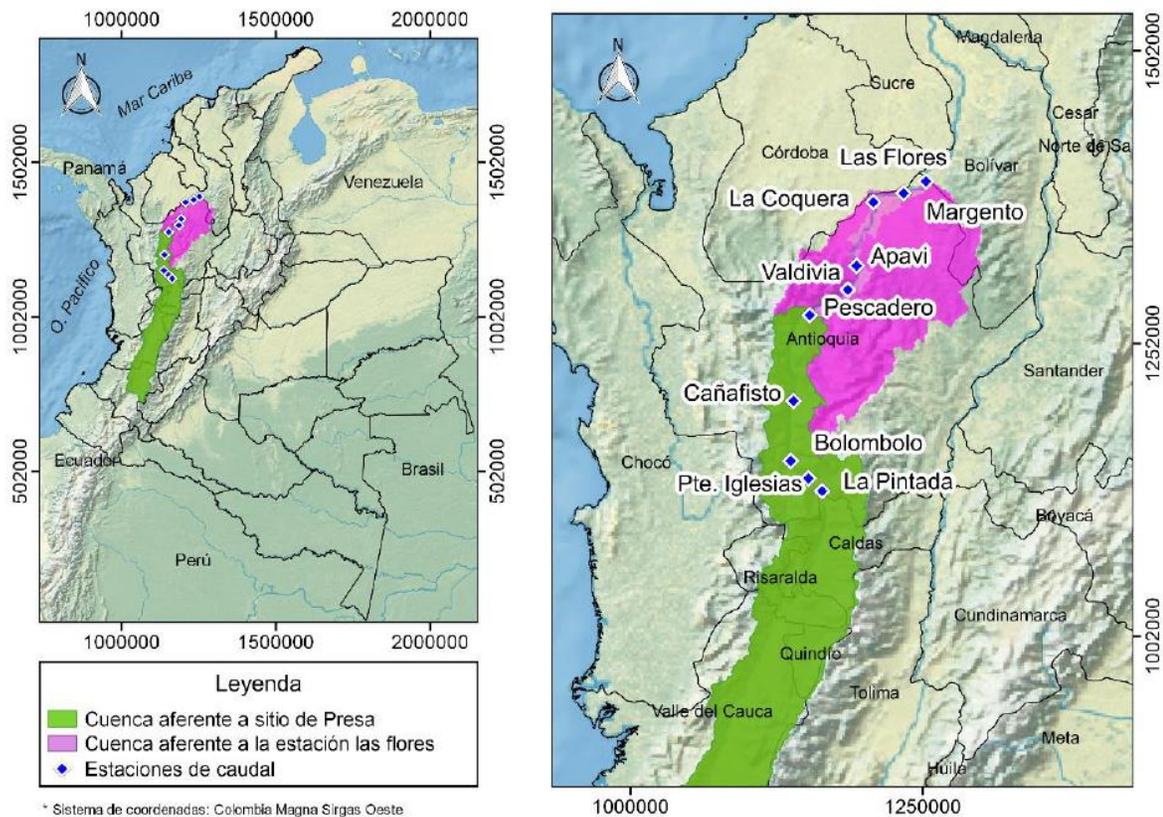


Figura 2-22 Estaciones de caudal estudiadas y zona de interés.

Fuente: Integral S.A., 2016.

En el caso de las crecientes de diseño para el sitio de presa se llevó a cabo la revisión de la información disponible en estudios anteriores y se realizó una actualización de los estimativos, donde se hizo uso de la información suministrada entre EPM y el IDEAM de los registros de la estación Puerto Valdivia, siendo la estación de caudal más cercana al proyecto y con mayor número de registros (desde el año 1.960). A partir de estos datos se estimaron las crecientes en el proyecto, realizando un análisis de frecuencia de máximos con ajuste normal (ver Figura 2-19).

Adicionalmente, los caudales utilizados como condición de frontera a lo largo del río para cada periodo de retorno analizado, fue tomada del Anexo hidrológico, del documento CCE-A04_I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-A4 (Integral S.A., 2017). Los caudales de los tributarios se estimaron indirectamente con la diferencia entre sus estaciones más cercanas y subdividiendo de forma ponderada ese caudal en función del área de su cuenca correspondiente. Esto significa que los valores presentados no fueron resultado de un proceso de medición o aforos.

2) Modelación hidráulica

Los tránsitos fueron realizados en el modelo HEC-RAS bajo la condición de flujo no permanente para definir de manera inicial el dominio del modelo bidimensional. El dominio de los modelos comprende desde el sitio de presa hasta aguas abajo del municipio de Magangué incluyendo 22 afluentes del río Cauca, localizados en el área de estudio (Ver Figura 2-23); no obstante, para el análisis de crecientes, solo se hizo uso de la información hasta el río Nechí y solo para los análisis de casos contingentes se utilizó toda el área mencionada.

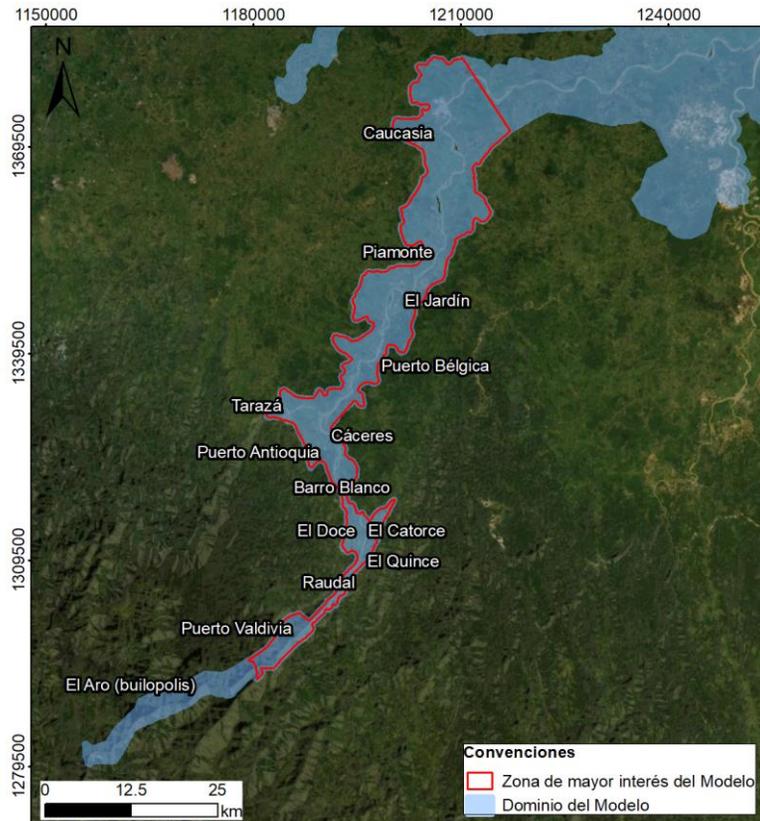


Figura 2-23 Dominio del modelo hidráulico que comprende la zona desde el sitio de presa hasta Nechí, y zonas de interés que van desde el sitio de presa hasta Caucasia.

Fuente: Integral S.A., 2020.

Para este modelo no solo se consideraron las condiciones hidroclimáticas del sistema del río Cauca, sus tributarios y complejos cenagosos, sino también información de vías, diques, carreteras y centros poblados, con el fin de que los resultados obtenidos fueron de uso para la toma de decisiones. Adicionalmente, todos los análisis fueron realizados teniendo en consideración el protocolo de modelación hidrológica e hidráulica propuesto por el IDEAM en 2018.

El modelo HEC-RAS 2D opera utilizando la metodología de elementos finitos sobre una malla estructurada o no-estructurada, y el presente estudio, se usó una malla no estructurada, ya que con esta se obtiene mayor discretización numérica del comportamiento del flujo; la malla cuenta con diferentes tamaños de celdas, para los sectores comprendidos desde sitio de presa hasta Puerto Valdivia, desde Puerto Valdivia hasta el sector del Cinco y desde el sector del Cinco hasta Nechí; para los tributarios del río Cauca, un tamaño de celda de 10 m y para las zonas de las planicies de inundación se utilizó la metodología del índice de convergencia de malla (GCI) propuesto por Roache (Roache & et. al., 2009) para estimar el tamaño de celda.

Para obtener la rugosidad detallada en el área de estudio, se utilizó inicialmente la clasificación del uso del suelo de Corine Land Cover 2010-2012, en el cual se relacionan los valores de la rugosidad de Manning con los campos de la capa del Corine Land Cover. Posteriormente se discretizó el cauce del río Cauca tomando como referencia la sectorización de tramos presentada en el anexo hidráulico de la orden de trabajo 06-07 presentado en el anexo CCE-A06_I_0010085_OT_EGRN_006_007_B_A6 (Integral S.A., 2017), debido a que este no presenta la misma rugosidad a lo largo del dominio.

3) Análisis de la amenaza

Dentro del análisis de la amenaza por inundación, se considera que el comportamiento del flujo se puede categorizar en función de la severidad de la inundación. La severidad de la inundación *se define como el producto entre la profundidad y la velocidad del flujo*, y cómo afectan estos tanto a la población como a la infraestructura. Para definir los umbrales de severidad del flujo se empleó el estándar propuesto por la herramienta de definición de la amenaza de inundación -*Flood Hazard Definition Tool* - (FEMA, 2014). La categorización de umbrales se realiza para un evento en específico.

Este resultado se presenta en un mapa espacial para el cual se combina el efecto de la profundidad y la velocidad, así como el posible grado de afectación a personas o infraestructura. Las categorías contempladas fueron: (1) Baja, (2) Media, (3) Alta, (4) Muy Alta y (5) Extrema. Estas corresponden a las guías del *Department of Environmental and Climate Change NWS*, *FEMA*, y *el U.S. Bureau of Reclamation*. La clasificación se muestra en la Figura 2-15 y se presenta de manera aproximada en la Tabla 2-31.

Para la condición extrema se explica la razón por la cual, para personas, en especial niños, la limitante de velocidad es de 2 m/s para profundidades de hasta un metro. En estos valores de las variables hidráulicas la probabilidad de ser arrastrado en el proceso de movilización en zonas inundadas es alta. Respecto a la infraestructura también se considera que velocidades mayores a 1 m/s pueden generar problemas de inestabilidad y fallos estructurales (Department of Environmental and Climate Change NWS, 2007).

B. Eventos de sequía naturales en el río Cauca

Para la evaluación de este escenario se tiene en cuenta el modelo realizado para caudales mínimos durante contingencia, en el cual se realizó el análisis hidráulico a lo largo del río Cauca en que se cierran las compuertas de la Casa de Máquinas (conducciones N°1 y N°2) para dar continuidad a la descarga del flujo por el vertedero y poder iniciar todas las actividades relacionadas con la recuperación del proyecto. A continuación, se presenta – a grandes rasgos – la información utilizada para la modelación hidráulica realizada en el documento; no obstante, en el *Anexo CCE-A07_I-009007-AC-PHI-AH-CCACM-RO* con el análisis hidráulico a lo largo del río Cauca para la fase de cierre de compuertas de la casa de máquinas del P. H. Ituango, se encuentra toda información de manera detallada.

Para el análisis, se tuvo en cuenta el caudal remanente ante el cierre de una compuerta de casa de máquinas, en una cota inferior a la del vertedero, que simularía las condiciones de disminución del flujo durante una sequía con caudal de 450 m³/s (caudal remanente de llenado del embalse), con una probabilidad de ocurrencia de un 60% del tiempo durante caudales bajos.

1) Información base

Según lo mencionado, la información la información utilizada para la modelación hidráulica desarrollada en el documento, proviene de *Anexo VEC-A07_I-009007-AC-PHI-AH-CCACM-RO* con el análisis a lo largo del río Cauca para la fase de cierre de compuertas de la casa de máquinas del P. H. Ituango, por lo que así se encuentra toda información de manera detallada.

Para la realización de los modelos hidráulicos se trabajó con la información de un modelo de elevación digital (LiDAR) y su integración topo-batimétrica se realizó garantizando la congruencia entre ambas fuentes de información, mediante la metodología de Venkatesh (2008) la cual consiste en la interpolación de una superficie batimétrica (LiDAR + batimetría) realizada en el *Anexo CCE-A06_I_0010085_OT_EGRN_006_007_B_A6* del estudio hidráulico para la delimitación de zonas inundables hacia aguas abajo del sitio de presa, se realizó una visita de reconocimiento a lo largo del río Cauca en su zona navegable, desde aguas arriba de Puerto Valdivia hasta la confluencia del río Nechí, con el fin de determinar las características del material de lecho, márgenes, orillas, zonas de diques y de desbordamientos, comprendiendo un área de análisis desde la zona donde se proyectaba el sitio de presa hasta aguas abajo de la confluencia entre los ríos Nechí y Cauca, abarcando de esta forma cerca de 214 km divididos en 9 tramos de estudio, seleccionados de acuerdo con análisis geomorfológicos. Este Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), tiene una resolución espacial de 1 m.

Para el análisis se realizado, los caudales a lo largo del río Cauca fueron afectados mediante cada uno de los aportes que realizan los principales afluentes en la zona de estudio. Para estimar dichos incrementos de caudal, se recurrió al estudio de actualización hidrológica *Anexo CCE-A04_I-0010085-OT-EGRN-006-007-B-A4*, el cual fue presentado al ANLA en el año 2.016,

donde se presentó la información hidrológica para el tramo comprendido entre el sitio de presa de la Hidroeléctrica Ituango y la estación Las Flores, ubicada en cercanías del municipio de Nechí, según lo presentado en la Tabla 2-30. En él se presentan los datos base, las metodologías y resultados de los análisis realizados a los registros de caudales y niveles del río Cauca en el tramo de interés. Adicionalmente, a partir de los datos de las estaciones de análisis, se realiza la curva de duración de caudales de cada estación (ver Figura 2-16).

2) Modelación hidráulica

El modelo utilizado para la caracterización hidráulica del río Cauca, corresponde al construido en el año 2.017 para el estudio de reducción del caudal remanente de llenado., el cual fue concebido para el tránsito de caudales mínimos.

Para determinar los parámetros hidráulicos asociados a los diferentes casos de estudio, se utilizó el programa de cómputo HEC-RAS versión 5.0.5. Este software es desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers*, (USACE, 2.016) y resuelve las ecuaciones de energía y momentum, por el método estándar de pasos para determinar los perfiles de flujo.

Se debe resaltar que, para dicho modelo se utilizó durante su etapa de construcción la herramienta HEC-Geo-RAS v-10.2 para ArcMap v.10.2, buscando así garantizar la máxima precisión en los datos geométricos, tanto en el trazado horizontal como en las secciones transversales.

Como resultado se obtuvo un modelo hidráulico conformado por un total de 863 secciones transversales, las cuales fueron construidas mediante el uso de información LIDAR de resolución 1x1 m y batimetrías (cada 500 m aproximadamente), la cuales fueron tomadas a lo largo del río Cauca para toda la zona de influencia del proyecto hidroeléctrico.

Es de subrayar que este modelo fue sometido a un proceso de calibración y validación, en el que fueron variados gradualmente los diferentes coeficientes de contracción y expansión de flujo, así como los valores de rugosidad de bancas y canal. Este proceso se realizó hasta obtener niveles que fueran consistentes con los registrados en las diferentes estaciones IDEAM en la zona de estudio. Adicionalmente, todos los análisis fueron realizados teniendo en consideración el protocolo de modelación hidrológica e hidráulica propuesto por el IDEAM en 2.018.

Buscando un adecuado análisis de las condiciones que se presentan de forma local a lo largo del río Cauca, el área de influencia del proyecto fue subdividida en 9 sub-tramos de estudio. Dichas áreas corresponden a las utilizadas en los anteriores estudios hidráulicos y de sedimentos para caracterizar los posibles efectos que generará el P.H. Ituango sobre la zona aguas abajo del sitio de presa por operar a largo plazo el proyecto.

Se debe destacar que la selección de los 9 sub-tramos de análisis, se basó en los anteriores estudios geomorfológicos, los cuales permitieron establecer las zonas en las que se presentaban variaciones en el comportamiento del río Cauca, tanto en su naturaleza

morfodinámica como en el material presente en el lecho de este cuerpo de agua. En la Figura 2-17 se presenta la ubicación geográfica de cada uno de los sub-tramos de estudio, los cuales serán el referente para los resultados que se expondrán más adelante y que son producto la de caracterización hidráulica realizada para la zona de estudio vía modelación numérica.

2.2.1.1.11 Caracterización de amenaza por incendios y explosiones en instalaciones

Para la determinación de las amenazas asociadas a incendio y explosión se ha llevado a cabo un reconocimiento y evaluación de los peligros – *Hazard Evaluation*, la cual parte de la identificación y caracterización de sitios del proyecto mediante trabajo de campo y labores de oficina.

A. Visita a sitios y levantamiento de información

La información que se levantó de cada sitio para realizar su caracterización se descarga en la Tabla 2-35.

Tabla 2-35 Formato de tabla de caracterización de las zonas que se deben analizar.

Ítem	Descripción
ID	Para identificar el ID del sitio se utilizó el listado de sitios de riesgos identificados previamente en el proyecto.
Características	Verificación de las labores allí realizadas, rutinas de mantenimiento y estado de los equipos. Señalización de áreas, orden y aseo. Identificación de los elementos de protección, señalización e identificación de cada uno de los elementos disponibles. Identificación del escenario más probable de incendio, verificación del método de generación del incendio.
Registro Fotográfico	Se presenta un registro fotográfico general del sitio.
Escenario probable de incendio y explosión	Se describe el escenario probable de incendio teniendo en cuenta la configuración del sitio y la figura del árbol de decisiones.

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

B. Determinación del mecanismo de desarrollo del evento analizado

Si bien no se ha identificado un evento de incendio y explosión dentro del proyecto en las zonas de almacenamientos de explosivos, se realiza una consulta de eventos relacionados con el fenómeno analizado. El propósito de esto es determinar la secuencia de eventos que da a lugar a un posible incendio o explosión y, adicionalmente, determinar la probabilidad de ocurrencia.

Los explosivos representan un riesgo permanente para las personas y el entorno, si no se emplean con precaución y conocimiento; y cumpliendo a cabalidad cada una de los lineamientos y exigencias normativas para prevenir y controlar los accidentes por este tipo de materiales.

En todo caso, es importante tener en cuenta que las consecuencias de un accidente con explosivos son muy graves ya que no sólo afectan a la persona causante de una falla o error, sino también a las personas que puedan estar en el área, además de equipos e instalaciones que le rodean.

C. Probabilidad de ocurrencia del evento

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento, se utilizará la metodología planteada en la Guía técnica GTC 45 (ICONTEC, 2012).

$$NP = ND \times NE$$

Ecuación 23 Nivel de probabilidad de ocurrencia

Donde:

NP: Nivel de probabilidad

ND: Nivel de deficiencia

NE: Nivel de exposición

1) Determinación el nivel de deficiencia (ND)

Para la determinación del nivel de deficiencia, el cual corresponde a una magnitud que se puede determinar mediante la tabla, pre-establecida por la guía (ICONTEC, 2012). De acuerdo con lo anterior, se evidencia que en la mayoría de los casos, las explosiones están relacionadas con omisiones a los protocolos de seguridad y a las precauciones que se deben tener a la hora de manipular los explosivos.

Para determinar el ND se utilizará la Tabla 2-36.

Tabla 2-36 Determinación del Nivel de Deficiencia (ND).

Nivel de Deficiencia	Valor ND	Significado
Muy Alto (MA)	10	Se ha(n) detectado peligro(s) que determina(n) como posible la generación de incidentes o consecuencias muy significativas, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes respecto al riesgo es nula o no existe, o ambos.
Alto (A)	6	Se ha(n) detectado alguno(s) peligro(s) que pueden dar lugar a consecuencias significativa(s), o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es baja, o ambos.
Medio (M)	2	Se han detectado peligro que pueden dar lugar a consecuencias poco significativas o de menor importancia, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es moderada, o ambos.
Bajo (B)	No se Asigna Valor	No se ha detectado consecuencia alguna, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es alta, o ambos. El riesgo está controlado.

Fuente: Modificado de Guía Técnica Colombiana GTC 45.

Para asignar un valor de deficiencia la GTC 45 brinda las siguientes equivalencias:

Para un nivel de deficiencia MUY ALTO (MA) se le asignara un valor de 10, para un nivel ALTO (A) se le asignara un valor de 6, para un nivel MEDIO (M) se le asignará un valor de 2 y para un nivel BAJO (B) no se le asignara ningún valor.

2) Determinación del nivel de exposición (NE)

Es la exposición que se tiene a ese peligro durante la jornada laboral, para esto la guía brinda una tabla que permite determinar el valor del mismo. Para determinar el NE se utilizará la Tabla 2-37.

Tabla 2-37 Determinación del Nivel de Exposición (NE).

Nivel de Exposición	Valor NE	Significado
Continua (EC)	4	La situación de exposición se presenta sin interrupción o varias veces con tiempo prolongado durante la jornada laboral.
Frecuente (EF)	3	La situación de exposición se presenta varias veces durante la jornada laboral por tiempos cortos.
Ocasional (EO)	2	La situación de exposición se presenta alguna vez durante la jornada laboral y por un periodo de tiempo corto.
Esporádica (EE)	1	La situación de exposición se presenta de manera eventual.

Fuente: Modificado de Guía Técnica Colombiana GTC 45.

3) Determinación del nivel de probabilidad

Una vez designado el valor para el nivel de deficiencia (ND) y para el nivel de exposición (NE) se procede a determinar el nivel de probabilidad, y consiste en determinar el valor de la intersección dada en una tabla por los valores de exposición y deficiencia y puede calcularse conforme se expone en la Tabla 2-38.

Tabla 2-38 Determinación del Nivel de Probabilidad (NP).

Nivel de Probabilidad		Nivel de Exposición (NE)			
		4	3	2	1
Nivel de Deficiencia (ND)	10	MA-40	MA-30	A-20	A-10
	6	MA-24	A-18	A-12	M-6
	2	M-8	M-6	B-4	B-2

Fuente: Modificado de Guía Técnica Colombiana GTC 45.

En la Tabla 2-39, se presenta el significado de los niveles de probabilidad.

Tabla 2-39 Significado de los diferentes niveles de probabilidad

Nivel de probabilidad	Valor de NP	Significado
Muy Alto (MA)	Entre 40 y 24	Situación deficiente con exposición continua, o muy deficiente con exposición frecuente. Normalmente la materialización del riesgo ocurre con frecuencia.
Alto (A)	Entre 20 y 10	Situación deficiente con exposición frecuente u ocasional, o bien situación muy deficiente con exposición ocasional o esporádica. La materialización del riesgo es posible que suceda varias veces durante la vida útil del proyecto.
Medio (M)	Entre 8 y 6	Situación deficiente con exposición esporádica, o bien situación mejorable con exposición continuada o frecuente. Es posible que suceda alguna vez durante el año.
Bajo (B)	Entre 4 y 2	Situación mejorable con exposición ocasional o esporádica, o situación sin anomalía destacable con cualquier nivel de exposición. No es esperable que se materialice el riesgo, aunque puede ser concebible.

Fuente: Integral S.A., adaptada de la GTC 45, 2012

D. Validación del nivel de peligro por medio del método MESERI

El método simplificado para la evaluación de riesgo/peligro de incendio - MESERI pertenece al grupo de los métodos de evaluación de riesgos conocidos como «de esquemas de puntos» que se basan en la consideración individual, por un lado, de diversos factores generadores o agravantes del riesgo de incendio, y por otro, de aquellos que reducen y protegen frente al riesgo. Una vez valorados estos elementos mediante la asignación de una determinada puntuación se trasladan a una fórmula del tipo: $R = X/Y$ o bien $R = X \pm Y$

Donde X es el valor global de la puntuación de los factores generadores o agravantes. Y el valor global de los factores, y R es el valor resultante del riesgo de incendio, obtenido después de efectuar las operaciones correspondientes.

En el caso del MESERI este valor final se obtiene como suma de las puntuaciones de las series de factores agravantes y protectores, de acuerdo con la fórmula:

$$R = 5/129 X + 5/30$$

Ecuación 24 Obtención del valor de peligro

Este método evalúa el riesgo de incendio considerando los factores:

- Que hacen posible su inicio: por ejemplo, la inflamabilidad de los materiales dispuestos en el proceso productivo de una industria o la presencia de fuentes de ignición.
- Que favorecen o entorpecen su extensión e intensidad: por ejemplo, la resistencia al fuego de los elementos constructivos o la carga térmica de los locales.
- Que incrementan o disminuyen el valor económico de las pérdidas ocasionadas: por ejemplo, la destructibilidad por calor de medios de producción, materias primas y productos elaborados.
- Que están dispuestos específicamente para su detección, control y extinción: por ejemplo, los extintores portátiles o las brigadas de incendios.

La consideración de estos grupos de factores permite ofrecer una estimación global del riesgo de incendio. Su simplicidad radica en que solo se valoran los factores más representativos de la situación real de la actividad inspeccionada de entre múltiples que intervienen en el comiendo, desarrollo y extinción de los incendios.

El análisis de riesgos por el Método MESERI entrega cuatro niveles de referencia presentados en la tabla mostrada a continuación:

Tabla 2-40 Valores de referencia MESERI

Valor de peligro	Calificación del peligro	Observación
Inferior a 3	Muy Alto	Las condiciones del sitio requieren medidas urgentes de mitigación del riesgo
Entre 3 y 5	Alto	Se deben ajustar algunas medidas para dar disminuir el nivel de riesgo.

Valor de peligro	Calificación del peligro	Observación
Entre 5 y 8	Medio	El riesgo se puede atender con las medidas de mitigación implementadas.
Superior a 8	Bajo	El nivel de riesgo es muy bajo, no hay riesgo de incendios ni de explosiones.

Fuente: Método MESERI

E. Definición de niveles de afectación

A continuación se definen los niveles de afectación generales, los cuales son implementados de acuerdo al escenario que sea analizado. Es importante anotar que los niveles de afectación definidos a continuación corresponden a eventos en los cuales el equipo o componente se sale de los límites tolerables de operación o, dado el caso, en situaciones en las cuales ocurra un daño o ruptura.

1) Nube de vapor tóxica (*vapor cloud*)

EL nivel de afectación de nube tóxica mide el radio de afectación que se daría en el caso de se tenga una fuga del componente analizado en la atmósfera. Estos niveles de afectación se miden en los siguientes límites o niveles:

AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*) Niveles de guía de exposición aguda, estima la concentración a la cual la mayoría de las personas empezaran a experimentar efectos a la salud si son expuestos a un químico peligroso por periodo de tiempo específico. Los tres niveles de AEGL están desarrollados para cinco periodos de tiempo: 10 minutos, 30 minutos, 60 minutos, 4 horas y 8 horas.

ERPG (*Emergency Response Planning Guidelines*) Guías de planeación de respuestas a emergencias, estima las concentraciones a las cuales la mayoría de las personas empiezan a experimentar efectos en la salud, si son expuestos a concentraciones peligrosas de químicos durante 1 hora.

PAC (*Protective Action Criteria for Chemicals*) Criterios de acciones de protección para químicos, es una base de datos que utiliza un sistema de jerarquía de organización de los tres niveles de exposición públicos: AEGL, ERPG y TEEL. Por lo anterior, no tiene valores propios para cada uno de los rangos y escoge su valor de acuerdo con lo siguiente:

1. Valor máximo de AEGL para 60 minutos.
2. Valor intermedio de AEGL para 60 minutos.
3. Valores de ERPG.
4. Valores de TEEL.

TEEL (*Temporary Emergency Exposure Limits*) Límites de exposición temporales de emergencias, es una guía que está diseñada para predecir la respuesta de los miembros de un público general a diferentes concentraciones de un químico durante la respuesta de emergencia a un incidente.

IDHL (*Immediately Dangerous to Life and Health limits*) Límites inmediatamente peligrosos para la vida y a salud, fue desarrollado por el Instituto nacional para la salud y seguridad ocupacional de los Estados Unidos (NIOSH). Definen como inmediatamente peligroso para la vida y la salud, cualquier situación “que presente un peligro de exposición o concentración de contaminantes tóxicos cuando la exposición es tal que cause la muerte o efectos adversos en la salud o evite que una persona pueda escapar de dicho ambiente”. Los límites IDHL representan la concentración de químicos en el aire a los cuales los trabajadores adultos pueden ser expuestos sin sufrir efectos a la salud.

A continuación, se presentan los rangos o niveles definidos para cada uno de estos estándares:

Tabla 2-41 Impacto de afectación por nube de vapor tóxica en las personas⁶.

AEGL	3	Es la concentración en el aire (expresada en ppm o mg/m ³) de una sustancia por encima de la cual se predice que la población general, incluidos los individuos susceptibles, podrían experimentar efectos riesgosos para la vida o la muerte.
	2	Es la concentración en el aire (expresada en ppm o mg/m ³) de una sustancia por encima de la cual se predice que la población general, incluidos los individuos susceptibles, podrían experimentar efectos irreversibles o serios, efectos a la salud adversos por periodos largos de tiempo e incapacidad para escapar.
	1	Es la concentración en el aire (expresada en ppm o mg/m ³) de una sustancia por encima de la cual se predice que la población general, incluidos los individuos susceptibles, podrían experimentar un malestar notable, irritación o ciertos efectos asintomáticos. En todo caso, los efectos no son deshabilitantes y son reversibles desde que se detiene la exposición.
ERPG	3	Es la máxima concentración de aire bajo la cual las personas podrían estar expuestas durante 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos potencialmente mortales.
	2	Es la máxima concentración de aire bajo la cual las personas podrían estar expuestas durante 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos o síntomas irreversibles y otros síntomas graves para la salud o síntomas que pudieran afectar la capacidad de un individuo de tomar medidas de protección.
	1	Es la máxima concentración de aire bajo la cual las personas podrían estar expuestas durante 1 hora sin experimentar efectos adversos leves a la salud sin percibir un olor claramente definido.
PAC	3	N/A
	2	N/A
	1	N/A
TEEL	3	Es la concentración en el aire (expresada en ppm o mg/m ³) de

⁶ Tomado del manual de usuario de ALOHA.

		una sustancia por encima de la cual se predice que la población general, incluidos los individuos susceptibles, cuando se exponen durante más de una hora, podría experimentar efectos adversos a la salud que sean potencialmente mortales.
	2	Es la concentración en el aire (expresada en ppm o mg/m ³) de una sustancia por encima de la cual se predice que la población general, incluidos los individuos susceptibles, cuando se exponen durante más de una hora, podrían experimentar daños irreversibles o graves de larga duración, efectos adversos a la salud o capacidad de escapar limitada.
	1	Es la concentración en el aire (expresada en ppm o mg/m ³) de una sustancia por encima de la cual se predice que la población general, incluidos los individuos susceptibles, cuando se exponen durante más de una hora, podrían experimentar malestar, irritación o ciertas molestias o efectos asintomáticos. Sin embargo, estos efectos son no incapacitantes y son transitorios y reversibles al terminar la exposición.
IDHL	3	N/A
	2	N/A
	1	N/A

Fuente: Manual de usuario de ALOHA

De acuerdo con la tabla anterior, se han definido los siguientes niveles de consecuencia para las nubes de vapor tóxica.

Tabla 2-42 Niveles de consecuencias para nubes de vapor tóxico.

Nivel de consecuencia	Color identificación	AEGL	ERPG	PAC	TEEL	IDHL
Alto		3	3	3	3	3
Medio		2	2	2	2	2
Bajo		1	1	1	1	1

Fuente: Manual de usuario de ALOHA

2) Nube potencialmente inflamable (*flash fire*)

El área potencialmente inflamable está delimitada por el nivel más bajo de explosividad (LEL) y el nivel más alto de explosividad (UEL). Estos límites, representan los porcentajes de concentración de combustible en el aire.

De acuerdo con lo anterior, se han definido los siguientes niveles de interés para las nubes de gas potencialmente inflamables:

Tabla 2-43 Nivel definido para el análisis de nube potencialmente inflamable⁷:

Nivel de consecuencia	Color identificación	Valor
Alto		100% LEL
Medio		60% LEL
Bajo		10% LEL

Fuente: Manual de usuario de ALOHA

3) Radiación térmica

El nivel de radiación térmica mide los riesgos asociados a un incendio en los cuales podrían existir riesgos. A continuación, se presentan los niveles en los cuales se pueden evidenciar efectos sobre las personas y sobre los equipos o estructuras:

Tabla 2-44 Impacto de la radiación térmica en las personas⁸.

RADIACIÓN TÉRMICA (kW/m ²)	EFFECTOS EN LAS PERSONAS
1.5	Sin daño. Seguro para el público en general y para el personal que está quieto.
2.5	Intensidad tolerable durante 5 min. Dolor severo por encima de los 5 min de exposición.
3	Intensidad tolerable para el personal de emergencia no frecuente durante 30 min.
5	Dolor por exposición de 20 s. Quemadura de primer grado. Intensidad tolerable para el personal de emergencia frecuente.
9.5	Quemadura de segundo grado después de 20 s.
12.5 - 15	Quemadura de primer grado después de 10 s. 1% de mortalidad en 1 min.
25	Lesión significativa en 10 s. 100% de fatalidad en 1 min.
35 – 37,5	1 % de mortalidad en 10 s.

Fuente: LaChance, J., Tchouvelev, A., Engebo, A., 2010

Tabla 2-45 Impacto de la radiación térmica en los equipos y estructuras⁹.

RADIACIÓN TÉRMICA (kW/m ²)	EFFECTOS EN LOS EQUIPOS Y ESTRUCTURAS
5	Ruptura de vidrios (30 min exposición).

⁷ Tomado del manual de usuario del ALOHA.

⁸ Tomado de LaChance, J., Tchouvelev, A., Engebo, A., 2010. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. Int. J. Hydrogen Energy 36, 2381–2388.

⁹ LaChance, J., Tchouvelev, A., Engebo, A., 2010. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. Int. J. Hydrogen Energy 36, 2381–2388.

RADIACIÓN TÉRMICA (kW/m²)	EFFECTOS EN LOS EQUIPOS Y ESTRUCTURAS
8 - 12	Intensidad de radiación suficiente para causar un efecto dominó (> 30 min exposición) Ignición de vegetación – incendios forestales (10 min exposición)
10 - 20	Ignición de hidrocarburos combustibles (1 min exposición) Fusión de plásticos (exposición de 30 min). Fallo de estructuras excepto hormigón (exposición de 20 min). Degradación del aislamiento del cable (exposición > 30 min).
25 - 32	Deformación del acero (exposición > 30 min). Ignición de madera (exposición de 15 min)
35 - 37.5	Equipo de proceso y daño estructural (exposición > 30 min)
100	Colapso de la estructura de acero (exposición > 30 min).
200	Fallo de la estructura de hormigón (exposición de 30 min).

Fuente: LaChance, J., Tchouvelev, A., Engebo, A., 2010

Por anterior, se han definido los siguientes niveles de análisis para radiación térmica:

Tabla 2-46 Nivel definido para el análisis de radiación térmica:

Nivel de consecuencia	Color identificación	Valor
Alto		10 kW/m ²
Medio		5 kW/m ²
Bajo		2 kW/m ²

4) Sobrepresión

La sobrepresión es el nivel sobre el cual puede existir un riesgo asociado a una explosión. Este nivel de daño se puede materializar sobre las personas, equipos e infraestructura. Se han definido los siguientes niveles de afectación por sobrepresión, el cual es el nivel en el que se miden los riesgos asociados a las explosiones. Este nivel de daño se puede materializar sobre las personas, equipos e infraestructuras (Tabla 2-47).

Tabla 2-47 Efectos de la sobrepresión en las personas, equipos e infraestructura.

Sobrepresión (psi)	Tipo de Daño
0.03	Rotura ocasional de cristales grandes sometidos a tensiones.
0.04	Ruido fuerte. Rotura de cristales por onda sonora.
0.1	Rotura de cristales pequeños sometidos a tensión
0.3	Límite de proyectiles. 95% de probabilidades de no sufrir daños importantes. Daños menores a techos de casas. Rotura del 10% de los cristales.
0.5-1.0	Destrucción de ventanas, con daño a los marcos.
0.7	Daños estructurales menores en las casas.
1.0	Daños reparables a edificios, daños a la fachada; 1% de ruptura del tímpano, y afectación por proyectiles.
1-2	Fallo de paneles y mamparas de madera, aluminio, etc.
2	Colapso parcial de paredes y techos de casas.
2-3	Destrucción de paredes de cemento de 20 a 30 cm. de grosor.
2.4	Umbral (1%) de ruptura de tímpano.
2.5	Destrucción del 50% de la obra de ladrillo en edificaciones.
3-4	Ruptura de tanques de almacenamiento.
5-7	Destrucción prácticamente completa de casas.
7	Vuelcan vagones de tren cargados.

84

Sobrepresión (psi)	Tipo de Daño
7-8	Rotura de paredes de ladrillo de 20 a 30 cm de grosor.
10	Probable destrucción total de edificios. Máquinas pesadas (3,500 Kg) desplazadas y fuertemente dañadas
12.5	90% de probabilidad de ruptura de tímpano.
14.5	Umbral 1% de probabilidad de muerte por hemorragia pulmonar.
25.5	90% de probabilidad de muerte por hemorragia pulmonar.
280	Formación de cráter

Por lo anterior, se han definido los siguientes niveles de sobrepresión (Tabla 2-48):

Tabla 2-48 Nivel definido para el análisis de sobrepresión.

Nivel de consecuencia	Color identificación	Valor
Alto		8 psi
Medio		3.5 psi
Bajo		1 psi

F. Método de análisis para el cálculo de las consecuencias

En esta etapa se realiza una evaluación del radio de afectación por los riesgos analizados en el programa ALOHA 5.4.7 (*Areal Locations of Hardous Atmospheres*), desarrollado por la NORA (*National Oceanic and atmospheric administration*) y la EPA (*Enviromental Protection Association*), el cual es un programa de modelación que estima zonas de riesgos asociados a la liberación de químicos peligrosos, incluyendo nubes de vapor tóxicos, incendios y explosiones.

ALOHA puede predecir las tasas a las que los gases pueden escapar hacia la atmósfera de las tuberías de gas rotas, los tanques con fugas y los charcos que se evaporan. Entonces, puede predecir cómo una nube de gas peligroso podría dispersarse en la atmósfera después de una liberación química accidental.

ALOHA modela la dispersión de una nube de gas contaminante en la atmosfera y presenta un diagrama que muestra una visión desde arriba de la zona en la que predice que las concentraciones de gas alcanzaran niveles peligrosos. El diagrama se llama la huella de la nube. Para obtener el trazado de una huella, primero hay que identificar una concentración límite de una sustancia contaminante aérea, usualmente aquella concentración por encima de la cual el gas puede representar un riesgo para la gente. Este valor se llama Nivel de Preocupación (NP). La huella representa el área dentro de la cual se predice que la concentración a ras del suelo de un gas contaminante excederá de su Nivel de Preocupación (NP) en algún momento después de empezar una descarga.

A continuación, se presenta una secuencia típica del desarrollo del cálculo en el software ALOHA:

Paso 1: Selección del químico utilizado:

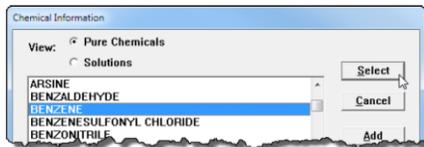


Figura 2-24 Selección del químico utilizado ALOHA.

Paso 2: Selección de condiciones atmosféricas:

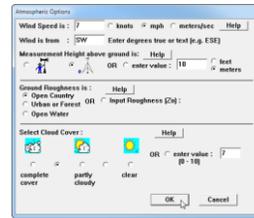


Figura 2-25 Selección de condiciones atmosféricas ALOHA.

Paso 3: Resumen de datos de entrada:

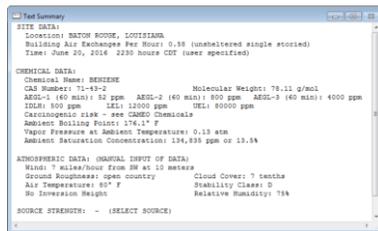


Figura 2-26 Resumen de datos de entrada ALOHA.

Paso 4: Definición del tanque de almacenamiento y caracterización del evento:

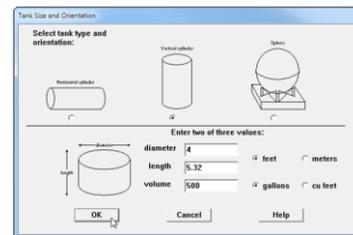


Figura 2-27 Definición del tanque de almacenamiento y caracterización del evento ALOHA.

Paso 5: Ejemplo Resultados Radiación térmica

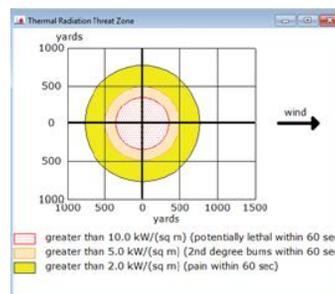


Figura 2-28 Resultados Radiación térmica ALOHA.

2.2.1.1.12 Caracterización de amenaza por incendios forestales

Para la evaluación de la amenaza de incendios y definir la probabilidad de ocurrencia se tuvo en cuenta factores que fueron el punto de partida para generar la zonificación de la amenaza, los cuales presentan las características propias del territorio y confieren mayor o menor probabilidad de ser afectadas por incendios. Lo anterior, acorde con los lineamientos del “Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal” (IDEAM, 2011).

Los factores que se consideran en este protocolo son: Susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios (tipo, carga y duración de combustibles), accesibilidad, factores climáticos (temperatura, precipitación, vientos y radiación solar - los dos últimos dependen de la disponibilidad de información que se tenga en la Corporación), relieve (pendiente) e histórico (frecuencia de incendios) (IDEAM, 2011).

A. Factores de amenaza por incendios forestales

1) Área de estudio

La definición de la escala de trabajo y el área de estudio en la espacialización del riesgo de incendios, son pasos importantes a la hora de hacer el proceso de zonificación, no obstante, es indispensable tener en cuenta la disponibilidad de la información, ya que esta condiciona en gran medida la metodología a emplear.

La evaluación del riesgo por incendios forestales puede ser abordada desde diferentes escalas espaciales, para el presente caso de estudio, la escala y resolución espacial está definida a nivel local y regional, es decir que plantea un análisis de tipo semidetallado a detallado.

Para definir el área de estudio de la amenaza por incendios forestales, se tuvo en cuenta elementos como: la susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios, factores climáticos, eventos históricos, relieve (pendientes), accesibilidad.

2) Susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios

La susceptibilidad de la cobertura vegetal, se analiza mediante la identificación y valoración de la condición pirogénica de la vegetación, según lo propuesto en el modelo de combustibles desarrollado para Colombia por Páramo, 2007.

El modelo de combustibles representa la condición pirogénica de la vegetación colombiana, aspecto clave en la evaluación del comportamiento de nuestros ecosistemas frente al fuego, tanto en el inicio de un incendio, como en la modelación del comportamiento del fuego, en caso de presentarse eventos de esta índole.

El modelo de combustibles desarrollado se estructuró mediante una clasificación jerárquica, conformada por los siguientes factores: Tipo de combustible vegetal predominante por bioma y ecosistema, duración en horas de cada tipo de combustible y carga total de combustibles (IDEAM, 2011).

Una vez asignadas las respectivas calificaciones y generados los mapas de tipo, duración y carga de combustibles, se procede a la realización del producto entre cada uno de ellos (álgebra de mapas); el resultado obtenido se agrupa posteriormente en 5 categorías mediante una distribución de frecuencias y a cada grupo se le asignó una calificación que varía entre susceptibilidad muy baja (rango menor) a susceptibilidad muy alta (rango mayor), mediante la siguiente ecuación (Ecuación 25):

$$SUSC= CAL(tc) + CAL(dc) + CAL(ct)$$

Ecuación 25 Susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios

Donde:

SUSC: Susceptibilidad de la vegetación (susceptibilidad bruta)

CAL(tc): Calificación por tipo de combustible

CAL(dc): Calificación de la duración de los combustibles

CAL(ct): Calificación de la carga total de combustibles

3) Factores climáticos

El clima es uno de los factores de fundamental importancia en la generación y la propagación de los incendios forestales ya que determina la duración y la severidad de las estaciones secas y calurosas en un área geográfica determinada, lo cual influye directamente sobre la humedad y la cantidad de combustible presente, ya que la humedad hace que la vegetación sea más o menos resistente a la afectación del fuego, lo que conlleva a que exista una mayor disponibilidad de combustible de fácil ignición y con mayor probabilidad de ser afectado por el fuego, razones que posicionan las condiciones climáticas como factor de utilización indispensable para la evaluación de la amenaza.

Los factores climáticos de mayor influencia en la generación y propagación de incendios forestales y que se consideran en esta propuesta, son la temperatura media multianual y la precipitación media multianual, bajo condiciones normales y bajo la incidencia de anomalías climáticas como el Fenómeno del Niño (IDEAM, 2011).

4) Eventos históricos

Para el análisis del factor histórico de la ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio, se tuvieron en cuenta los datos proporcionados por la NASA por medio de la herramienta del Sistema para el monitoreo de puntos de calor sobre la superficie detectados satelitalmente (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/country/>).

Los puntos de calor detectados por sensores satelitales son una aproximación a la ocurrencia de incendios. En la mayoría de los casos estos puntos identifican fuegos en áreas con algún tipo de vegetación, pero también pueden ser llamas por combustión de gases, tormentas eléctricas,

etc. Existe un vínculo entre la ocurrencia de incendios y el cambio de cobertura terrestre, en especial con la deforestación, por lo que se procedió a hacer la comparación del punto suministrado por la herramienta y la cobertura vegetal de este punto.

Se definieron dos categorías de las probables causas que originaron los incendios detectados en el área.

- **Naturales:** Aunque el ser humano es el principal responsable de los incendios forestales, no significa que la naturaleza no tenga incidencia en su desarrollo. La caída de un rayo de larga duración a la Tierra trae consigo chispas, suficientes para encender un combustible. Las largas sequías favorecen las condiciones para el desarrollo de un incendio forestal pues estimula la combustión. El calor intenso, aunado a una sequía, puede secar la vegetación y ésta ser un potencial combustible. En todos estos casos el factor determinante es la temperatura o las altas temperaturas en adición a los vientos, lo que propicia que se expandan las chispas y por ende el fuego.
- **Antrópicas:** La mayoría de estas causas tienen que ver con el descuido o la irresponsabilidad. Algunas de éstas son las fogatas, los cigarrillos que se tiran sin estar apagados, las quemaduras agrícolas que se salen de control, los fuegos artificiales e incluso incendios provocados. En otras ocasiones, la disposición inadecuada de residuos sólidos.

Para determinar el factor histórico se procederá a calcular el índice de frecuencia de los incendios por medio de la siguiente Ecuación 26 (IDEAM, 2011).

$$Frecuencia = \frac{1}{a} \sum_{1}^{a} ni$$

Ecuación 26 Frecuencia de incendios

Dónde:

Fi: Frecuencia de incendio

a: Número de años

ni: Número de incendios de cada año

5) Relieve (pendientes)

La propagación del fuego aumenta con el ángulo que ofrece la superficie, la propagación a favor de la pendiente es rápida y peligrosa. Los incendios no ocurren al azar, sino que son más frecuentes en ciertas posiciones topográficas. Con el propósito de incorporar este factor en la

evaluación de la amenaza, es pertinente elaborar un mapa de pendientes a partir de la elaboración de un modelo digital del terreno (IDEAM, 2011).

6) Accesibilidad

Expresada como la densidad vial, este factor se considera parte de la amenaza, debido a que es fundamental en la generación de la probabilidad de que la población pueda llegar a las áreas forestales y generar focos de incendio (IDEAM, 2011).

B. Cálculo de la amenaza por incendios forestales

Las variables anteriormente descritas se relacionan a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Amenaza} = \text{susceptibilidad de la vegetación} \times (0,17) + \text{precipitación} \times (0,20) + \text{temperatura} \times (0,20) + \text{pendientes} \times (0,07) + \text{frecuencia} \times (0,10) + \text{accesibilidad} \times (0,10) + \text{vientos} \times (0,10) + \text{radiación solar} \times (0,07)$$

Ecuación 27 Amenaza por incendios forestales.

Una vez realizada la respectiva suma ponderada, se realiza una distribución de frecuencias en cinco rangos, categorizando el grado de amenaza entre “muy baja” (rango menor) a “muy alta” (rango mayor), considerando las categorías intermedias “baja”, “moderada” y “alta”, respectivamente (IDEAM, 2011).

2.2.1.1.13 Caracterización de amenaza por emergencia sanitaria y orden público

Para la caracterización de amenazas por emergencia sanitaria y orden público se consideraron las instalaciones o infraestructura del proyecto que podría presentar la amenaza, así como los reportes de eventos relacionados a emergencias sanitarias previas o alteraciones de orden público y social durante las diferentes etapas constructivas del proyecto. Posteriormente, se realizó la caracterización de la amenaza y su naturaleza, la cual permite determinar las características y extensión espacial de la afectación de estas (expresada como un mapa de espacialización) identificada para el estado actual del PHI.

2.2.1.1.14 Caracterización de amenaza por cambio climático

Para esta caracterización fueron considerados los registros de caudal de la estación Puerto Valdivia [2623704], propiedad del IDEAM, para un periodo comprendido entre enero de 1965 y diciembre de 2021 (Tabla 2-50). La Figura 2-29 presenta la serie de caudales para la estación mencionada.

Es de señalar que la serie de caudales de la estación Puerto Valdivia ha sido objeto de identificación de *outliers*, tendencia y cambios en la media. Además, el IDEAM ha podido en todo momento verificar la confiabilidad de los registros, si se tiene en cuenta que tanto aguas arriba como aguas abajo de la estación Puerto Valdivia existen otras estaciones hidrométricas que permiten hacer comparaciones y correcciones en los registros, de ser necesario.

De igual forma, es importante tener presente que los registros de esta estación reflejan, no solo el efecto del cambio climático (de tipo atmosféricos); sino también todo lo sucedido en la cuenca relacionado con los cambios de cobertura, manejo de zonas indudables o de regulación, y demás afectaciones antrópicas que inciden en el comportamiento de caudales en una cuenca como esta.

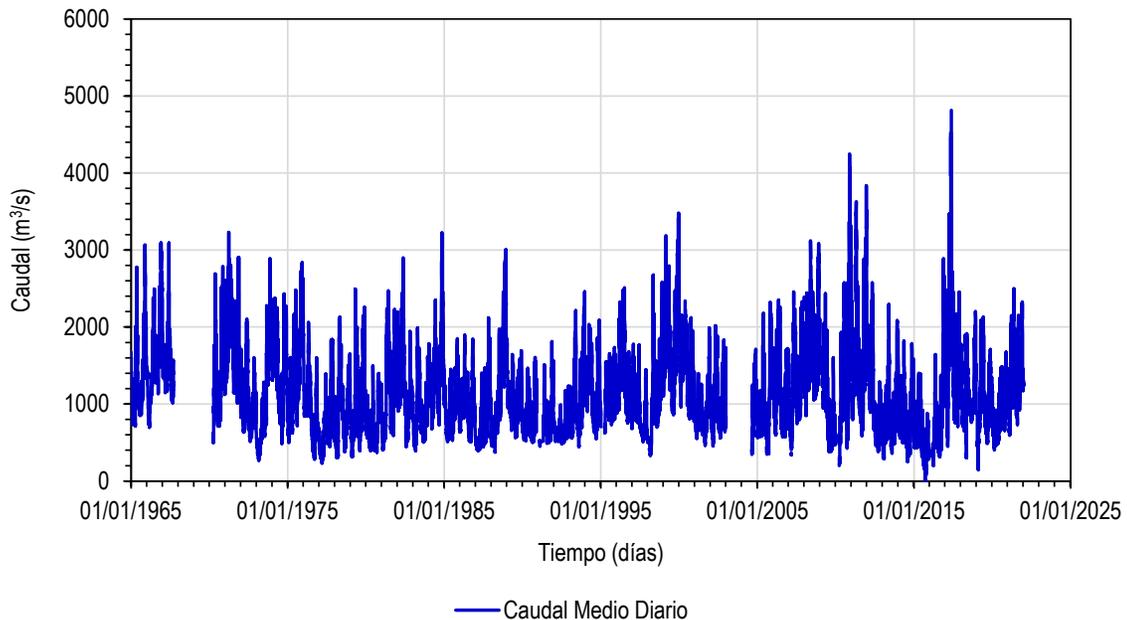


Figura 2-29 Serie de caudales medios – Estación Puerto Valdivia [2623704].

Fuente: Integral S.A., 2022.

El concepto de estacionariedad se refiere a que las propiedades de las series no varían con respecto al tiempo. Significa lo anterior, que la distribución de probabilidad de una serie en un instante de tiempo fijo o una posición fija es la misma para todos los instantes de tiempo o posiciones. En consecuencia, parámetros tales como la media y la varianza (o la desviación estándar), no varían a lo largo del tiempo.

Para la serie de caudales de la estación Puerto Valdivia, la prueba estadística de Von Neumann da cuenta de que la serie hidrológica no presenta homogeneidad; siendo lo anterior un indicador de que esta puede presentar cambios en la media. La Tabla 2-49 presenta los resultados asociados a la aplicación de la prueba de Von Neumann. Cabe resaltar que, según el estadístico “N” de Von Neumann, una serie es homogénea cuando su valor es mayor o igual a 2.

Tabla 2-49 Resultados para análisis de homogeneidad de la serie.

Prueba de Von Neumann	
¿Es Homogéneo?	Estadístico N
FALSO	0,08288102

Fuente: Integral S.A., 2022.

En este sentido, se presentan las series de caudales máximos diarios anuales y caudales mínimos anuales para la Estación Puerto Valdivia, en la Figura 2-30. La Tabla 2-50 presenta tabulados los valores a partir de los cuales se construye la Figura 2-30. Las series anuales, tanto de máximos como de mínimos, se obtienen a partir de los datos medios diarios presentados en la Figura 2-29. Tanto para caudales máximos como para caudales mínimos se consideraron, en total, 53 años de registros.

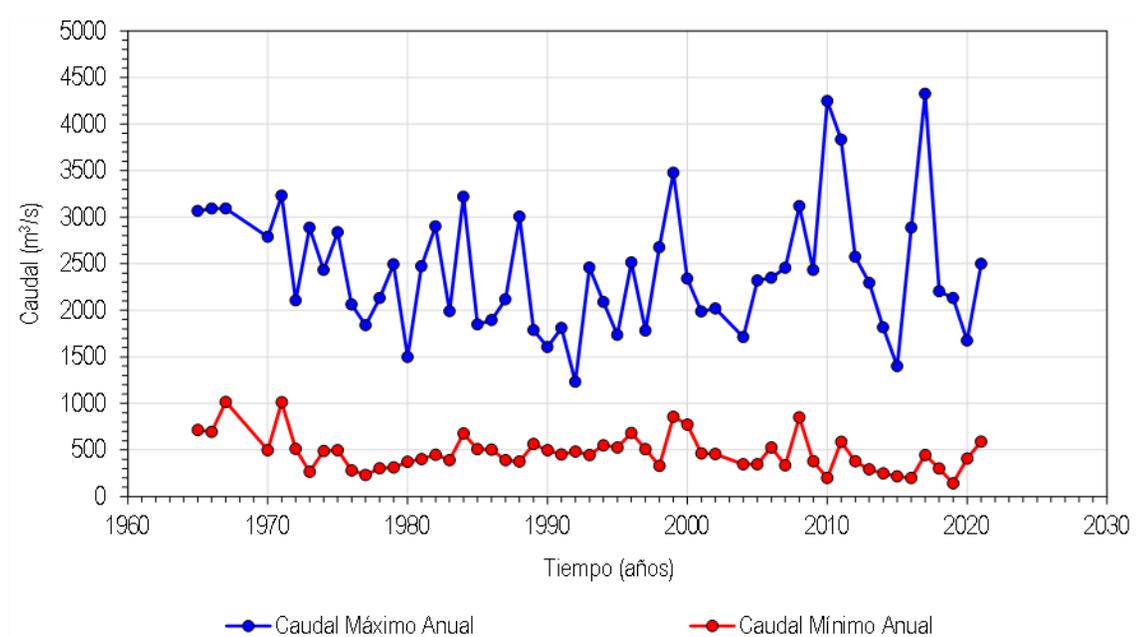


Figura 2-30 Series de caudales máximos y mínimos anuales promedios diarios - Estación Puerto Valdivia [2623704].

Fuente: Integral S.A., 2022.

Con la información anual generada a partir de la serie diaria de caudal, se realizaron entonces los correspondientes análisis de frecuencias de caudales máximos y caudales mínimos. Cabe resaltar que el análisis de frecuencia se realizó en 2 vías: por un lado, se analizaron las series anuales completas, y por otro lado se tuvieron en cuenta ventanas móviles para diferentes intervalos de tiempo. Esto con el fin de estimar las posibles variaciones en cuanto a eventos máximos y mínimos se refiere. Para el análisis de frecuencias de la serie completa, se consideraron las distribuciones de probabilidad Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Gumbel y Log-Gumbel.

Para el análisis por ventanas móviles, en el caso particular de este estudio, se definieron intervalos de 10, 20 y 30 años. De igual forma, y para abarcar la totalidad de los datos (54 años), las diferentes ventanas de tiempo se plantearon en dos sentidos. En primer lugar, se tomó el primer dato de la serie (1965), y las ventanas móviles se definieron desde este dato en adelante (1965, 1966, 1967...). Este enfoque se definió como “progresivo”. Por otro lado, se tomó el último dato de la serie (2021), y las ventanas móviles se definieron desde este dato hacia atrás (2021, 2020, 2019...). Este enfoque se definió como “regresivo”. Cabe resaltar que, para los análisis con ventanas de tiempo móviles, fueron consideradas únicamente las distribuciones de probabilidad que presentaran un buen ajuste con respecto a los registros máximos y mínimos.



Tabla 2-50 Valores máximos y mínimos anuales de caudal – Estación Puerto Valdivia [2623704].

Año	Caudal Máximo (m ³ /s)	Caudal Mínimo (m ³ /s)
1965	3065	714
1966	3093	696
1967	3093	1017
1968		
1969		
1970	2788	498
1971	3230	1012
1972	2104	512
1973	2887	266
1974	2431	488
1975	2837	499
1976	2062	282
1977	1839	232
1978	2131	303
1979	2493	312
1980	1498	372
1981	2474	402
1982	2900	450
1983	1989	392
1984	3220	677
1985	1848	509
1986	1893	504
1987	2117	390
1988	3006	376
1989	1788	563
1990	1605	497
1991	1810	453
1992	1232	484
1993	2458	446
1994	2087	551
1995	1735	528
1996	2512	682
1997	1780	510
1998	2675	330
1999	3478	857
2000	2339	773
2001	1988	464
2002	2018	456
2003		
2004	1712	346
2005	2319	346
2006	2349	527
2007	2456	336
2008	3119	850
2009	2433	378

Año	Caudal Máximo (m ³ /s)	Caudal Mínimo (m ³ /s)
2010	4247	199
2011	3833	588
2012	2574	379
2013	2294	292
2014	1817	250
2015	1400	217
2016	2886	199
2017	4324	447
2018	2203	300
2019	2132	143
2020	1674	408
2021	2499	591

Nota: celdas vacías corresponden a años sin registros o valores anómalos detectados en la serie.

Fuente: Integral S.A., 2022.

2.2.1.2 Análisis de vulnerabilidad

Para el análisis de vulnerabilidad, se partió de la identificación de los elementos expuestos definidos por los términos de referencia y la metodología general para la elaboración de estudios ambientales de la ANLA, tal como se aprecia en la Tabla 2-51.

Tabla 2-51 Elementos usados en el cálculo de vulnerabilidad.

Categorías de elementos expuestos	Elementos expuestos
Asentamientos humanos	Viviendas aisladas, centros nucleados, campamentos
Infraestructura pública	Carreteras, caminos puentes, garruchas, líneas vitales (Líneas de transmisión, oleoductos, poliductos, subestaciones de energía), equipamientos, infraestructura del proyecto, etc.
Infraestructura productiva	Áreas de pesca, plantaciones forestales, actividad comercial, actividades pecuarias, Títulos mineros en etapa de explotación y minería de hecho
Cultivos de pancoger	Plátano, maíz, frutales, entre otros
Bienes de interés cultural	Sitios de alto valor patrimonial histórico, arqueológico, artístico y cultural
Empresas que manejen sustancias peligrosas	Estaciones de combustible, oleoductos, subestaciones, almacenamiento de abonos y sustancias para el control de plagas
Sitios de captación de agua	Pozos, bocatomas, sistemas de riego
Áreas ambientalmente sensibles	Áreas protegidas y áreas ambientalmente sensibles, ecosistemas acuáticos (ciénagas y cuerpos de agua con algún grado de protección)

Fuente: Consorcio Generación Ituango, 2022.

El análisis de los elementos expuestos obedece a criterios relacionados con su ubicación en zonas de incidencia potencial de las amenazas consideradas en el análisis, la susceptibilidad intrínseca a ser afectados por una magnitud estimada de la amenaza y la posibilidad de las comunidades para atender, asumir, recuperarse y adaptarse ante grandes variaciones en sus condiciones normales de vida, producto de un desastre.

Por tanto, los elementos expuestos se obtuvieron como resultado de superponer los mapas de amenazas con la cartografía temática disponible para el PHI complementada con fuentes secundarias (estaciones hidrometeorológicas IDEAM, coberturas de vegetación del Fondo de Adaptación, cartografía base del IGAC, áreas de protección regional de Corpomojana y Corantioquia, áreas de protección nacional de ANLA, entre otros), incluyendo criterios como presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza, entre otros.

Para esto se consideró la exposición de los núcleos poblacionales, entendiendo estos como los lugares donde habitan grupos de personas ya sea en un espacio definido (casco urbano, núcleo poblado, caserío, etc.) o población dispersa en las veredas de diferentes municipios de la zona de estudio. Así como los campamentos dispuestos para el proyecto.

Asimismo, se consideró la infraestructura del proyecto, líneas vitales y a las líneas de servicios (como estructuras de servicios de energía, acueducto, alcantarillado, sitios para disposición de residuos sólidos, sitios para el manejo aguas residuales y sitios de suministro de combustible, infraestructura vial, etc.), con mayor exposición a las amenazas analizadas. Así mismo, se incluye la infraestructura social y de servicios existentes relacionado con los equipamientos de servicios que son vitales para la vida comunitaria y a los que por derecho constitucional se les debe garantizar el acceso permanente, en términos del número de estructuras que prestan algún tipo de servicio social (educación, salud, recreación, etc.). Esta información se gestionó con los EOT y los resultados obtenidos de las consultas hechas a las fuentes oficiales.

Se evalúa también la infraestructura productiva como áreas de pesca, tierras de uso agropecuario y/o pecuario, plantaciones forestales, actividad comercial, títulos mineros, entre otras, que puedan verse afectadas en su función social, así como el impacto de áreas en las cuales los grupos humanos presenten una mayor dependencia de los recursos naturales que se puedan ver afectadas ante los eventos amenazantes analizados. La importancia de este criterio radica en que las actividades económicas en las zonas del río, riberas, ciénagas, caños y escenarios rurales son fundamentales para la subsistencia de toda la comunidad. Por estos, se tomaron en cuenta las coberturas y usos del suelo. Se consideran también los cultivos de pancoger.

De la misma forma, se analizan elementos asociados con sitios de captación de agua, los cuales incluyen pozos, bocatomas y sistemas de riego.

Igualmente, se tomaron en cuenta los ecosistemas estratégicos (como áreas protegidas, ecosistemas acuáticos y terrestres) que puedan verse afectados por la manifestación de las amenazas evaluadas, para ser clasificados en áreas ambientalmente sensibles teniendo como guía los lineamientos generales para la definición de áreas y ecosistemas estratégicos en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (Fondo Adaptación, 2015).

Adicionalmente, para conocer las condiciones socioeconómicas de la zona se revisó el promedio del puntaje del Sisbén III, el cual es un índice de estándar de vida, así como el Índice de Necesidades Básicas (NBI) del DANE. En concreto, el índice NBI es una medida de incidencia de la pobreza, según esta metodología, se definen como pobres todas las personas que habitan en vivienda con una o más de las siguientes características: i. Viviendas inadecuadas para habitación humana en razón de los materiales de construcción utilizados. ii. Viviendas con hacinamiento crítico. (Más de tres personas por cuarto de habitación). iii. Vivienda sin acueducto o sanitario iv. Viviendas con alta dependencia económica (más de tres personas por miembro ocupado) y el jefe hubiera aprobado como máximo dos años de educación primaria. v. Viviendas con niños entre 6 y 12 años que no asistieran a la escuela. De lo anterior se infiere que entre mayor sea el índice, peor son las condiciones de la población.

Respecto a la capacidad de respuesta de la población, se revisaron criterios de ahorro y capacidad de endeudamiento y capacidad de adaptación y respuesta o resiliencia de ecosistemas. Por ello, se revisó la evaluación del desempeño fiscal¹⁰ de los entes territoriales (departamentos y municipios) del Departamento Nacional de Planeación-DNP, el cual toma en cuenta seis variables: 1) autofinanciamiento de gastos de funcionamiento; 2) respaldo del servicio de la deuda; 3) dependencia de transferencias y regalías; 4) generación de recursos propios; 5) magnitud de la inversión, y 6) capacidad de ahorro. La metodología de evaluación del DNP establece cinco (5) rangos de clasificación de las entidades territoriales que van de cero a cien puntos, donde cero es el menor y cien el mayor, los cuales agrupan a los municipios y departamentos de acuerdo al índice sintético de desempeño logrado en el periodo evaluado, los cuales clasifican a los gobiernos sub nacionales entre las más débiles o las más avanzadas de acuerdo con el lugar que ocupen en la evaluación fiscal, de la siguiente forma: Solvente: > a 80; Sostenible: >70 y <80; Vulnerable: >60 y <70; Riesgo: >40 y <60; Deterioro: < a 40.

También, se revisó la existencia e implementación de planes estratégicos que contemplen gestión del riesgo, tales como POT, Plan de desarrollo, POMCA, Estudios de riesgo (vulnerabilidad y amenaza), PGAR, etc.

2.2.1.2.1 Vulnerabilidad por incendios y explosiones en instalaciones

La vulnerabilidad de los elementos expuestos por incendios y explosiones en instalaciones y sus escenarios de riesgo, se determina con base en sus posibles consecuencias sobre la infraestructura o proceso, personal en área de afectación probable, medios de vida y servicios ecosistémicos. Esto se lleva a cabo para cada uno de los sitios considerados en la caracterización de la amenaza que contengan y manejen sustancias peligrosas, material detonante y explosivo.

¹⁰ Departamento Nacional de Planeación, “Evaluación del desempeño fiscal de los entes territoriales,” 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/programas/desarrollo-territorial/evaluacion-y-seguimiento-de-la-descentralizacion/Paginas/desempeno-fiscal.aspx>

Cada sitio se clasifica en uno de los niveles de consecuencias presentados en la Tabla 2-52.

Tabla 2-52 Determinación de nivel de consecuencias

Nivel de consecuencias	NC	Significado			
		Infraestructura o procesos <i>(Infraestructura pública, infraestructura productiva, bienes de interés cultural, empresas e infraestructura que manejen sustancias peligrosas, sitios de captación de agua)</i>	Personas en área de afectación probable <i>(Asentamientos humanos)</i>	Medios de vida <i>(Cultivos de pancoger)</i>	Servicios ecosistémicos <i>(Áreas ambientalmente sensibles)</i>
Extremadamente grave - EG	100	Daños o pérdidas entre el 75% y el 100% de la infraestructura y/o los procesos	Lesiones temporales, permanentes y/o la muerte	Daños o pérdidas parciales o totales a recursos materiales e intangibles y actividades necesarias para ganarse la vida	Alteración intensa y extendida del funcionamiento de los ecosistemas
Muy Grave - MG	60	Daños entre 50% y el 75% de la infraestructura y/o los procesos	Lesiones o enfermedades graves irreparables (incapacidad permanente parcial o invalidez)	Daños / pérdidas parciales o totales en activos	Alteración leve y extendida del funcionamiento de los ecosistemas
Grave - G	25	Daños 25% - 50% de la infraestructura y/o los procesos	Lesiones o enfermedades con incapacidad laboral temporal (ILT)	Sin consecuencias	Sin consecuencias
Leve - L	10	Daños entre 0 y 25% de la infraestructura y/o los procesos	Lesiones o enfermedades que no requieren incapacidad	Sin consecuencias	Sin consecuencias

Fuente: Integral S.A., 2021, adaptado de la GTC 45, 2012

2.2.1.2.2 Vulnerabilidad por incendios forestales

De acuerdo con la propuesta del IDEAM, (2011) la vulnerabilidad frente a incendios forestales se evalúa a partir de las variables de población, protección de infraestructura e instalaciones, actividades económicas, patrimonio natural, histórico y cultural, la acción institucional, así como algunos aspectos territoriales. Para esto, se analizan las siguientes vulnerabilidades:

- Vulnerabilidad poblacional: relaciona los indicadores de ocupación o grado de presencia de la población, colindancia de zonas urbanizadas con zonas de amenaza alta y dispersión respecto al grado de proximidad de la población con zonas de amenaza alta.
- Vulnerabilidad territorial: se evalúa a partir de los conflictos de usos del suelo y tipos de cobertura vegetal.
- Vulnerabilidad de la infraestructura: peligro para las instalaciones, edificaciones e infraestructura.
- Vulnerabilidad patrimonial: posibles efectos sobre áreas de importancia patrimonial bien sea natural, histórico, artístico, cultura y/o religioso.
- Vulnerabilidad económica: áreas de producción de bienes y servicios que puedan verse afectados ante la ocurrencia de un incendio.
- Vulnerabilidad institucional: evalúa las debilidades institucionales frente a la atención de contingencias frente a incendios forestales.

Por tanto, el análisis de vulnerabilidad consiste en realizar la estandarización de los valores de las variables correspondientes y los análisis cartográficos mediante álgebra de mapas, aplicando la siguiente suma ponderada:

$$\text{Vulnerabilidad total} = \text{Pob}(0,31) + \text{Terr}(0,20) + \text{Inf}(0,06) + \text{Pat}(0,20) + \text{Eco}(0,18) + \text{Inst}(0,04)$$

Ecuación 28 Suma ponderada para el cálculo de la vulnerabilidad total.

Fuente: (IDEAM, 2011)

2.2.1.3 Análisis del riesgo

El análisis de riesgos se realizó a partir de la caracterización de las amenazas y escenarios de riesgo identificados, así como de los análisis de vulnerabilidad sobre los elementos expuestos. Por tanto, se establece la valoración de cada riesgo como el resultado de la interacción entre la calificación de probabilidad de ocurrencia de las amenazas y la calificación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Dicha interacción se obtiene a partir de la multiplicación de ambas variables, tal como se aprecia en la Ecuación 29:

$$\text{Riesgo} = \text{Vulnerabilidad} * \text{Probabilidad de ocurrencia}$$

Ecuación 29 Evaluación del riesgo

Fuente: Guía Metodológica para la Gestión Integral de Riesgos EPM, 2020 modificada

2.2.1.3.1 Evaluación del riesgo para incendios y explosiones en instalaciones

Para la valoración del riesgo se empleó la metodología incluida en la GTC 45, 2012¹¹ que define el riesgo como:

$$NR: NP * NC$$

Ecuación 30 Estimación del nivel de riesgo

donde,

NR: Nivel de riesgo

NP: Nivel de probabilidad

NC: Nivel de Consecuencias

2.2.1.3.2 Evaluación del riesgo para incendios forestales

El riesgo frente a incendios forestales se define como el producto ponderado de la amenaza total y la vulnerabilidad total (Ecuación 31):

$$Riesgo = Amenaza\ total * Vulnerabilidad\ total$$

Ecuación 31 Riesgo frente a incendios forestales.

Fuente: (IDEAM, 2011)

De acuerdo con el protocolo del IDEAM, (2011) la cartografía de riesgos define los escenarios de riesgo existentes, que corresponden con:

- Riesgo territorial: Áreas con características físicas y ecosistémicas definidas, que pueden verse afectadas frente a la ocurrencia de un incendio de la cobertura vegetal.
- Riesgo poblacional: Áreas con alta densidad poblacional en zonas de cobertura con alta a muy alta susceptibilidad a incendios.
- Riesgo patrimonial: Áreas con alto valor histórico y cultural en zonas de cobertura con alta a muy alta susceptibilidad a incendios.
- Riesgo económico: Áreas con alto valor productivo, que pueden verse afectadas ante la ocurrencia de un evento de incendio de la cobertura vegetal.
- Riesgo institucional: Áreas desprotegidas por la acción institucional (deficiencias en coordinación y gestión, presencia de organismos de control de incendios o existencia de equipamiento adecuado, sistemas eficientes de alertas).
- Riesgo de infraestructura: Infraestructuras que puede ser afectada por la ocurrencia de un incendio de la cobertura vegetal. Riesgo físico: Áreas con características de suelos y

¹¹ Guía Técnica Colombiana GTC 45 – Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional, 2012 (segunda actualización)

topografía que pueden verse afectadas ante un evento de incendio forestal. Riesgo ecológico: Ecosistemas que pueden verse afectados ante la ocurrencia de incendio.

- Riesgo físico: Áreas con características de suelos y topografía que pueden verse afectadas ante un evento de incendio forestal.
- Riesgo ecológico: Ecosistemas que pueden verse afectados ante la ocurrencia de incendios.

Una vez realizada esta multiplicación, se definen los rangos de frecuencia de acuerdo con la clasificación de la Tabla 2-53:

Tabla 2-53 Rangos de frecuencia para categorizar el riesgo.

Ponderación escenario de riesgo	Calificación escenario de riesgo	Categoría escenario de riesgo
Distribución de frecuencias de la suma ponderada en 5 rangos de frecuencia.	1	Muy baja
	2	Baja
	3	Media
	4	Alta
	5	Muy alta

Fuente: (IDEAM, 2011)