



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUPERFICIALES E INGENIERÍA DE RÍOS

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA

SUBCOORDINACIÓN DE OBRAS Y EQUIPOS HIDRÁULICOS

CONVENIO DE COLABORACIÓN NO: 2016-B08-B08-GC-09-RF-AD-A-CC-0001

**“ESTUDIOS ESPECIALIZADOS A CINCO PRESAS DE
ALMACENAMIENTO, DERIVADORAS Y BORDOS EN ALTO
RIESGO DEL NORESTE DEL PAÍS, AÑO 2016”**

Octubre 2016



NOMBRE OFICIAL: SAN JUAN DE COYOTILLOS

NOMBRE COMÚN: SAN JUAN DE COYOTILLOS

ID 2992



MUNICIPIO DE AHUALULCO

ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

**INFORME FINAL DE LA EVALUACIÓN DEL
RIESGO Y DIAGNÓSTICO**



ÍNDICE DE CONTENIDO

EVALUACIÓN DEL RIESGO Y DIAGNÓSTICO.....	1
1. ANTECEDENTES	1
2. OBJETIVO	1
3. ALCANCE.....	1
4. METODOLOGÍA	2
5. ANÁLISIS DE RIESGO.....	7
6. DIAGNÓSTICO	42
7. ANTEPROYECTO DE ALTERNATIVA DE ATENUACIÓN DE RIESGO SELECCIONADA	43
8. REFERENCIAS	48
ANEXOS.....	50
ANEXO 1 INFORMACIÓN RECOPIADA.....	50
ANEXO 2 INFORME DE INSPECCIÓN.....	50
ANEXO 2.1 ÁLBUM FOTOGRÁFICO	50
ANEXO 3 RESULTADOS DE CAMPO Y LABORATORIO	50
ANEXO 3.1 TOPOGRAFÍA DE LA CORTINA	50
ANEXO 3.2 TOPOGRAFÍA DE CAUCE AGUAS ABAJO	50
ANEXO 3.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO	50
ANEXO 4 ANÁLISIS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS	50
ANEXO 5 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO.....	50
ANEXO 6 REVISIÓN DE ESTABILIDAD DE LA CORTINA	50
ANEXO 7 REVISIÓN FUNCIONAL Y OPERACIONAL DE LA PRESA	50
ANEXO 8 ZONAS DE PELIGRO.....	50
ANEXO 9 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	50
ANEXO 10 DISEÑO CONCEPTUAL DE MITIGACIÓN DE RIESGOS.....	50



EVALUACIÓN DEL RIESGO Y DIAGNÓSTICO

1. ANTECEDENTES

Hasta fechas relativamente recientes, la seguridad de presas y embalses se había centrado en la estructura u obra de ingeniería y con un enfoque determinista, este enfoque clásico se ha mostrado insuficiente para dar respuesta a todas las necesidades que la explotación actual de un sistema presa-embalse demanda ignorando sistemáticamente la parte probabilística de que se produzcan unas determinadas sollicitaciones sobre la estructura asociado a las consecuencias derivadas de un fallo en la seguridad. Es por ello que se ha materializado en el panorama internacional un acercamiento del campo de la seguridad de presas hacia las metodologías basadas en riesgo, en las que se combina la probabilidad de ocurrencia de eventos indeseados y sus consecuencias asociadas.

Estas técnicas integran toda la información referente a la seguridad de dichas infraestructuras y es una herramienta útil para la toma de decisiones y permite detectar aspectos débiles del sistema no siempre visibles en la práctica tradicional.

2. OBJETIVO

Determinar el grado de riesgo o potencial de daños en la zona de posible inundación aguas abajo debido a la operación, falta de mantenimiento o de cuidado de las presas, por una descarga, o por falla parcial o total de la presa.

3. ALCANCE

Realizar un dictamen para conservar y, en su caso, mejorar la seguridad de las presas por medio de instrumentos regulatorios tendientes a mitigar los posibles efectos negativos o daños a terceros debidos a una descarga de sus obras de desfogue o a su falla parcial o total que puedan provocar pérdida de vidas humanas o daño a zonas urbanas, infraestructura, y medio ambiente.

4. METODOLOGÍA

Procedimiento metodológico holístico para el análisis probabilista de la seguridad y la evaluación del riesgo de presas

El análisis probabilista de la seguridad y la evaluación del riesgo de cada presa, se efectuó en función del **procedimiento metodológico** que se presenta a continuación y considerando la literatura indicada por la CONAGUA. Así como en una amplia revisión bibliográfica y con base en los desarrollos y la experiencia de los participantes cuando se han desarrollado proyectos de evaluación del riesgo y seguridad de presas, el cual se extiende sobre diversas actividades o procesos del procedimiento, y otros más recientes o novedosos, de acuerdo con la literatura internacional especializada sobre análisis probabilista de la seguridad y evaluación del riesgo de presas y subtemas relacionados.

En la Figura 1.1, se muestra esquemáticamente el **procedimiento metodológico** que se siguió para abordar esta parte que es medular para dar cumplimiento a los trabajos que se solicitan.

La parte correspondiente a la Actividad: **Probabilidad de ocurrencia de un mecanismo de falla, a partir de las acciones hidráulicas y sísmicas**, se abordará con los siguientes procesos del Procedimiento Metodológico Holístico para el análisis probabilista de la seguridad y la evaluación del riesgo de cada presa, como se muestra en la Figura 1.1.

Revisión de la información

Se revisó la información documental disponible en el Sistema de Información de Seguridad de Presas (SISP) de la CONAGUA (<http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx>), así como otras informaciones encontradas y que tienen carácter técnico y de hemeroteca, incluyendo la información de carácter poblacional y económico, así como de la infraestructura que podría ser dañada en el caso de un problema de seguridad de presas en el caso de cada una de las cinco presas que son objeto de este trabajo. Esta información se presenta en Anexo para su incorporación en el capítulo de Recopilación de Información del Informe a CONAGUA.

Visitas de inspección de campo

Se efectuaron visitas de inspección física en campo con la finalidad de observar e identificar, medir y caracterizar todos los aspectos hidrológicos, geológicos, geotécnicos, estructurales, hidráulicos, ambientales, operacionales y funcionales, que se tienen detectados desde la revisión de la información del SISP, como aquellos que se obtuvieron gracias a las visitas de campo.

Asimismo, estas visitas de campo permitieron observar, identificar y registrar los datos necesarios, para finalmente complementar la información para la identificación y el cálculo de las consecuencias de los diferentes modos de falla de la presa.

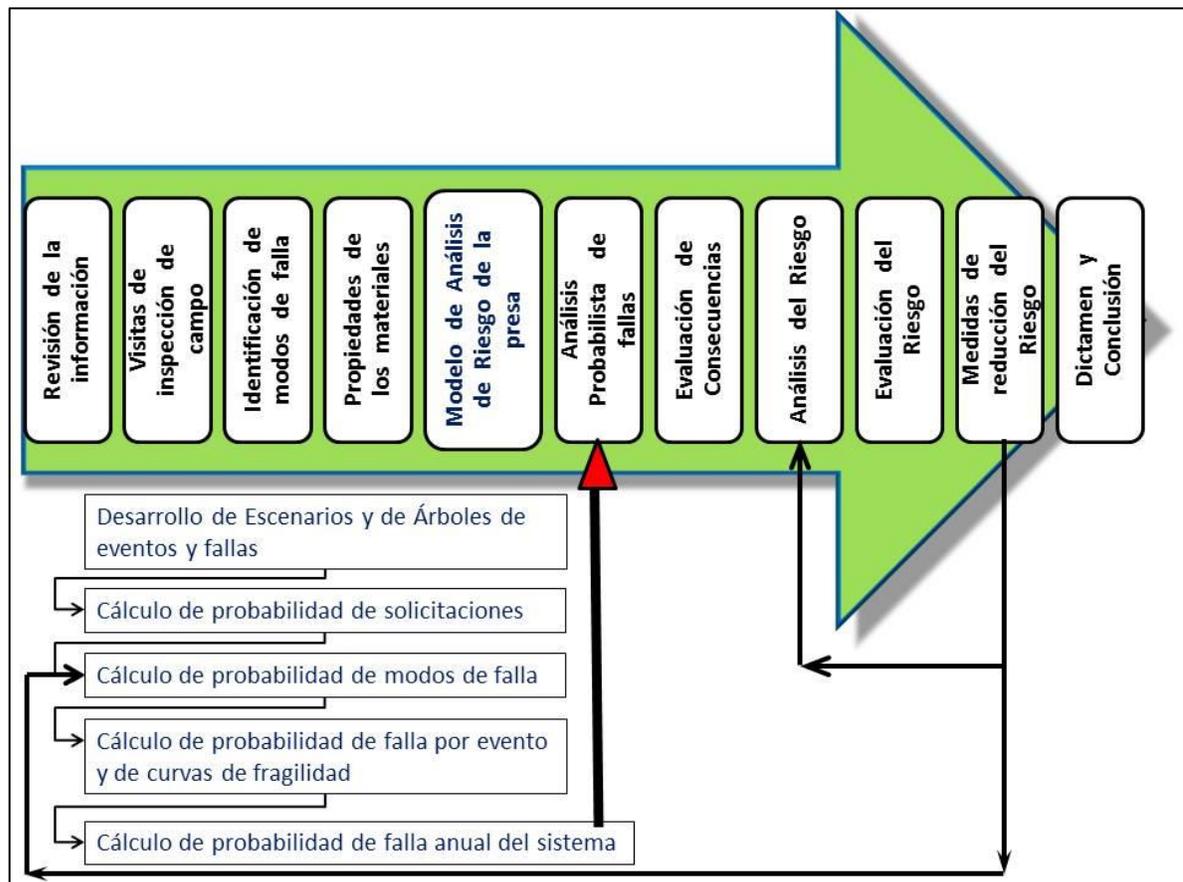


Figura 1.1 Procedimiento metodológico propuesto para hacer el análisis probabilista de la seguridad y evaluación del riesgo de las cinco presas del Noreste de México.

Árbol de eventos e identificación de modos de falla

A partir del modelo geotécnico estructural de cada cortina y, en su caso incluyendo obras auxiliares de la presa como sería el caso del vertedor para control de excedencias, de la obra de toma, las laderas de márgenes, etc., y de los resultados de los análisis geotécnico estructurales del modelo presentado en el capítulo de Revisión de la estabilidad, se identificaron los diversos modos de falla en función del tipo de estructura de que se trata, por ejemplo por estabilidad e taludes o erosión interna en el caso de la cortina de tierra, o por zonas de esfuerzos de tensión o por erosión de la cimentación y colapso parcial de la estructura en el caso de elementos de concreto o mampostería.

Se desarrolló un árbol de eventos para identificar las diferentes causas y mecanismos para configurar los modos de falla de la cortina, ya que estos modos podrían conducir a la falla de la presa.

De todos ellos, los eventos posibles en el caso concreto de la presa, aquéllos que podrían llevar a la falla de la presa, son los eventos con origen hidrológico, ya que éstos, al causar diversas condiciones de operación y flujo de agua en la masa térrea, pueden desencadenar una serie de eventos que conduzcan a un problema de desbordamiento, tubificación o inestabilidad global.

En el caso del desbordamiento, existe la posibilidad de que falle la cortina debido a inestabilidad con deslizamiento de taludes aunada a la generación de asentamientos progresivamente, conforme avanza el deslizamiento, hasta que se rompe la estabilidad y sobreviene una falla incontenible de la masa por deslizamiento con la apertura de una brecha en la cortina.

Por otra parte; los suelos de la presa son susceptibles a la erosión interna, la cual puede conducir a una falla por tubificación; con la apertura de una brecha en la cortina. Y, finalmente, la falla por deslizamiento de los taludes de la cortina debido a la combinación de las cargas hidráulicas, con las fuerzas de filtración debidas al flujo del agua en la cortina.

En la Figura 1.2, se presenta el árbol de eventos general para este trabajo.

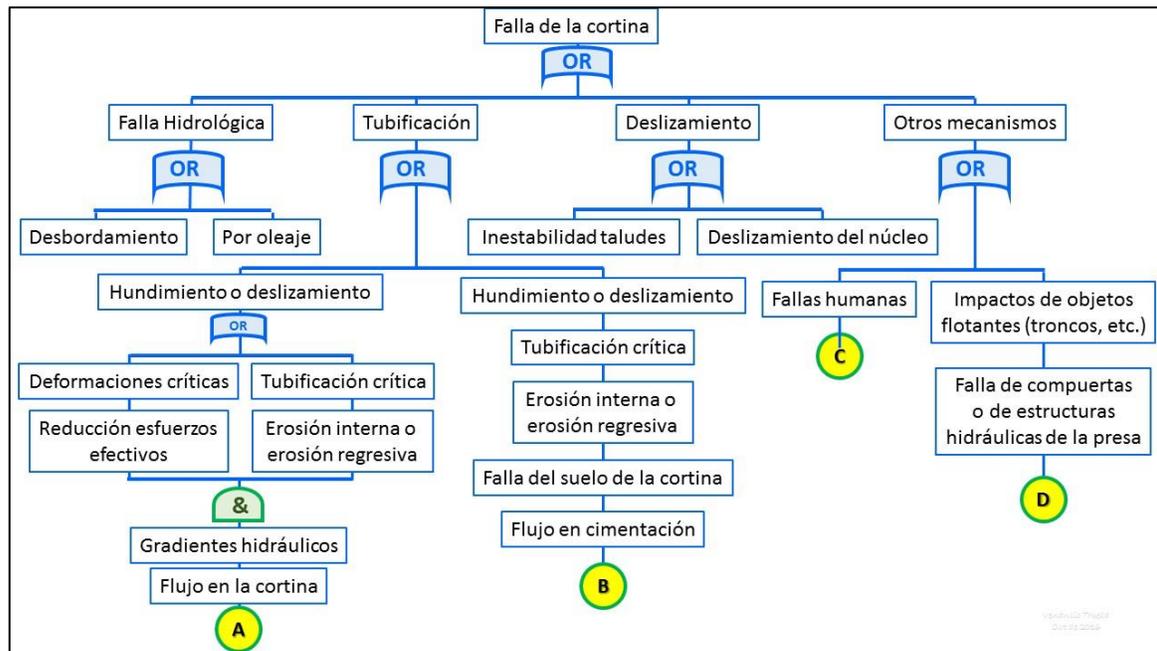


Figura 1.2 Árbol de eventos general para la presa.

Propiedades de los materiales

Para calcular las probabilidades de falla en los distintos modos y derivados de los distintos eventos o escenarios, se determinaron paquetes de las propiedades índices y mecánicas de los suelos de la cortina y del subsuelo, esto con base en los estudios de gabinete combinando la experiencia del analista con los resultados publicados en la literatura para el tipo de suelos particular, las visitas de inspección de campo y (en espera de) de los resultados de las investigaciones de campo (sondeos, PCA, etc.), y de las pruebas de laboratorio.

A esos paquetes de propiedades se les determinaron sus rangos de variación, con base en la experiencia de los analistas que participan en el desarrollo de estos trabajos y de los resultados de las inspecciones e investigaciones en campo y laboratorio.

Con la finalidad de analizar la influencia de las propiedades y poder profundizar sobre la geoestadística de las propiedades mecánicas (resistencia al esfuerzo cortante) y el peso volumétrico, de los suelos que componen la cortina, considerando que el paquete se puede presentar razonablemente bien con tres grupos de suelo, como se presentó en el modelo geométrico geotécnico estructural de la cortina en la revisión de la estabilidad para los análisis deterministas de la seguridad de la cortina. En la Figura 1.3, se presentan las distribuciones y

parámetros estadísticos de los tres grupos del paquete de suelos para efectuar los análisis probabilistas de la seguridad de esta cortina.

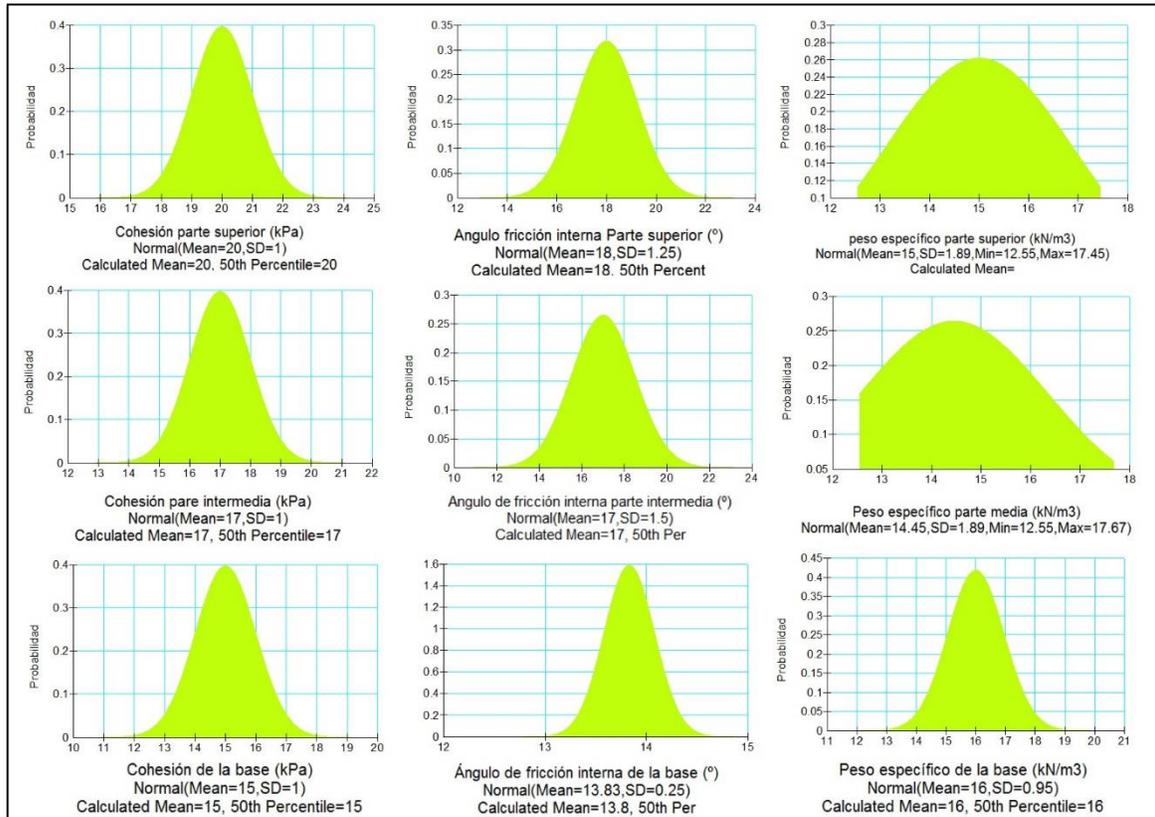


Figura 1.3 Geostatística de las propiedades de los suelos con sus distribuciones de probabilidad y parámetros de la distribución normal.

5. ANÁLISIS DE RIESGO

Análisis probabilista de fallas por tubificación

Con base en toda la información y sujeto a retroalimentación durante el desarrollo de los diferentes procesos del procedimiento en caso de que una o algunas de las medidas de reducción del riesgo lleven a replantear el modelo, como sería en el caso de cambiar algún elemento importante de la presa, se desarrolló un modelo de análisis de riesgo de la presas en lo particular.

Desarrollo del árbol de eventos y falla por tubificación

El desarrollo de escenarios mediante la técnica de árboles de eventos y fallas permitirá despiezar o descomponer los distintos casos de eventos que pueden desencadenar la falla de un elemento o del sistema completo, es decir, de la presa. Por ejemplo el caso del escenario Hidrológico podría conducir a una serie de eventos como desbordamiento, aumentos de niveles del vaso, etc., los cuales, a su vez, podrían conducir a una falla por tubificación (modo de falla por erosión interna) por aumento de las presas del agua en los poros del suelo de las cortinas de tierra o a una falla por incremento de los esfuerzos de tensión en la cortina de mampostería.

Este proceso trata del planteamiento y elaboración de los árboles de eventos y de falla para cada uno de los escenarios y para cada una de las presas.

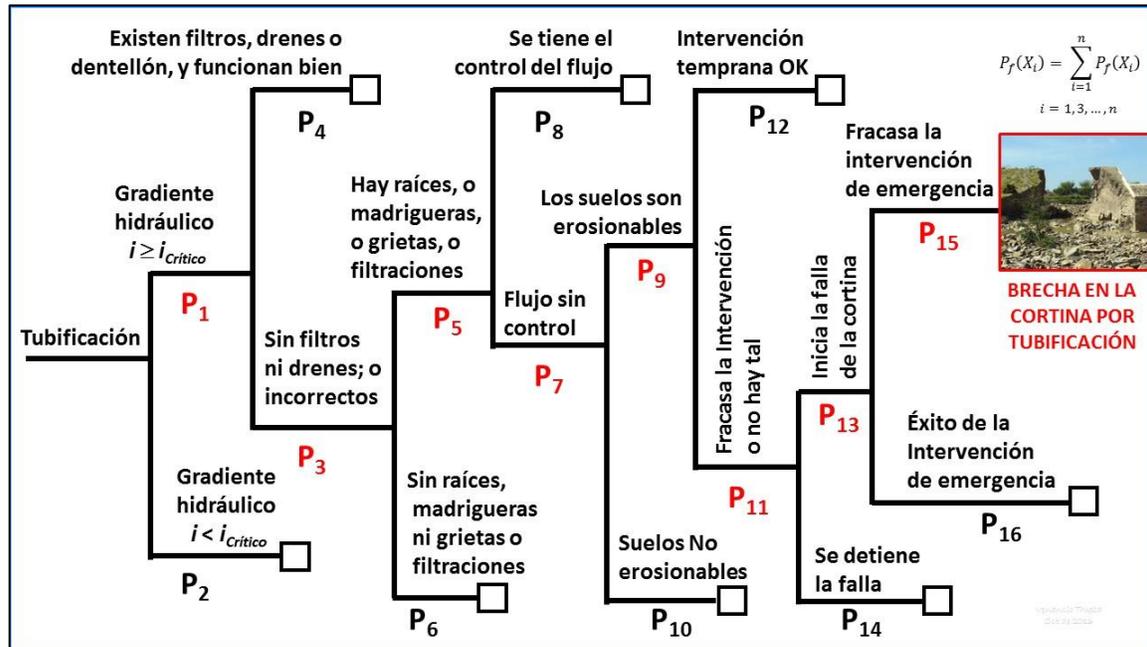


Figura 1.4 Árbol de eventos de la presa por tubificación.

Cálculo de probabilidad de solicitaciones

Para el análisis del problema de tuberización de la presa, se recurrió a los valores y rangos de las solicitaciones hidrológicas, que se presentan en el Capítulo correspondiente, y a partir de ello se eligieron las condiciones de operación de la presa que se presentan en la tabla siguiente.

Estas solicitaciones hidrológicas se han considerados cuantitativamente en el cálculo o por elementos finitos de los gradientes particularmente en la salida, y el análisis de ello para evaluar, en función del tipo de suelo de la cortina de la presa, el potencial y, en consecuencia, determinar o estimar un primer valor de la probabilidad de falla por tuberización.

Tabla 1.1 Condiciones de operación consideradas y probabilidad de ocurrencia

Operación	Prob Ocurrencia	Observaciones
Normal	3.33×10^{-1}	Nivel del agua a la cresta de vertido
Inusual	1.00×10^{-4}	Llenado total del vaso (NAME)

Inusual	6.67×10^{-3}	Vaciado rápido de la presa (6 h)
Inusual	1.00×10^{-2}	Llenado rápido de la presa (4 h)
Extrema	1.00×10^{-3}	Sismo Máximo Creíble
Inaceptable	1.00×10^{-5}	Desbordamiento de la cortina por 1 h o más

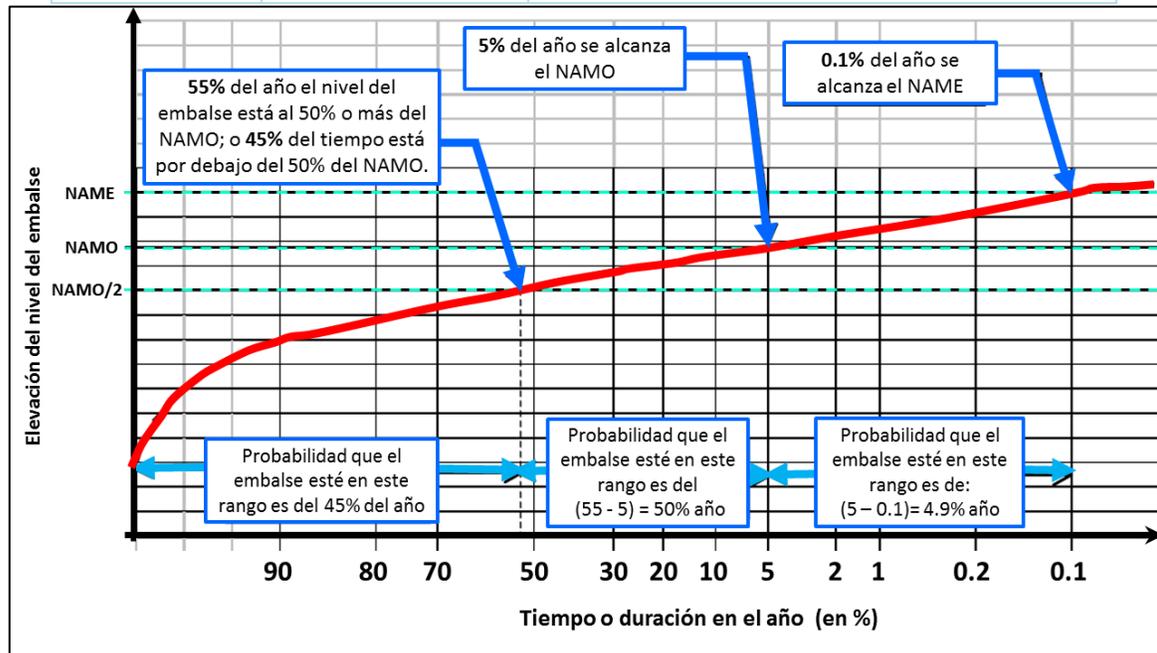


Figura 1.5 Se consideran distintos niveles del embalse, incluyendo el caso de desbordamiento que permite modelar los cambios de pendientes y pérdida de suelo de la cortina.

Cálculo de gradientes hidráulicos

Con lo anterior, se procedió a efectuar el cálculo de gradientes hidráulicos para las distintas condiciones de operación, y los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Cálculo de la probabilidad de falla por tubificación

La modelación de la permeabilidad de los suelos de los estratos que conforman la cortina de tierra, permitió cuantificar, aplicando el método analítico del cálculo por elementos finitos, determinar en cada caso el valor del gradiente de las presiones de

poro y los esfuerzos efectivos en todos los sitios de la cortina y el subsuelo, y determinar sus rangos de variación para su comparación con el gradiente crítico. De esta manera se estimaron los valores de la probabilidad de falla anual por erosión interna o tubificación. Estos valores son

Curvas de fragilidad por la probabilidad de falla por tubificación

Se presentan de manera cualitativa, ejemplos de curvas de fragilidad en función de la carga o nivel del embalse, incluyendo los casos de desbordamiento, ya que para la determinación de las curvas de fragilidad se utilizan los datos derivados de la ocurrencia de los eventos hidrológicos que podrían provocar el desencadenamiento de la falla por deslizamiento o tubificación, u otras causas, que son las fallas más frecuentes, y además, aquellas que realmente amenazan a la presa.

Así, y con base en el trabajo de Vorogushyn et al. (2009), en las siguientes figuras se ilustran los otros casos a considerar para determinar las curvas de fragilidad de la presa. En la , se muestran las curvas de fragilidad obtenidas a partir de un estudio de sensibilidad con espesor del estrato permeable, por ejemplo en la cimentación, lo cual provoca altas velocidades y gradientes hidráulicos, que arrastrarán progresivamente los suelos de la cortina, provocando la tubificación de ésta y con ello, asentamientos y pérdida de masa de suelo y resistencia al deslizamiento de taludes de la masa térrea que forma la obra de contención, así como asentamientos que podrían provocar el paso del agua sobre la cortina, haciendo el problema más complejo al provocar la erosión del respaldo aguas abajo de la cortina; y todo esto podría finalizar en el colapso de parte de la estructura y la apertura de una brecha de la cortina.

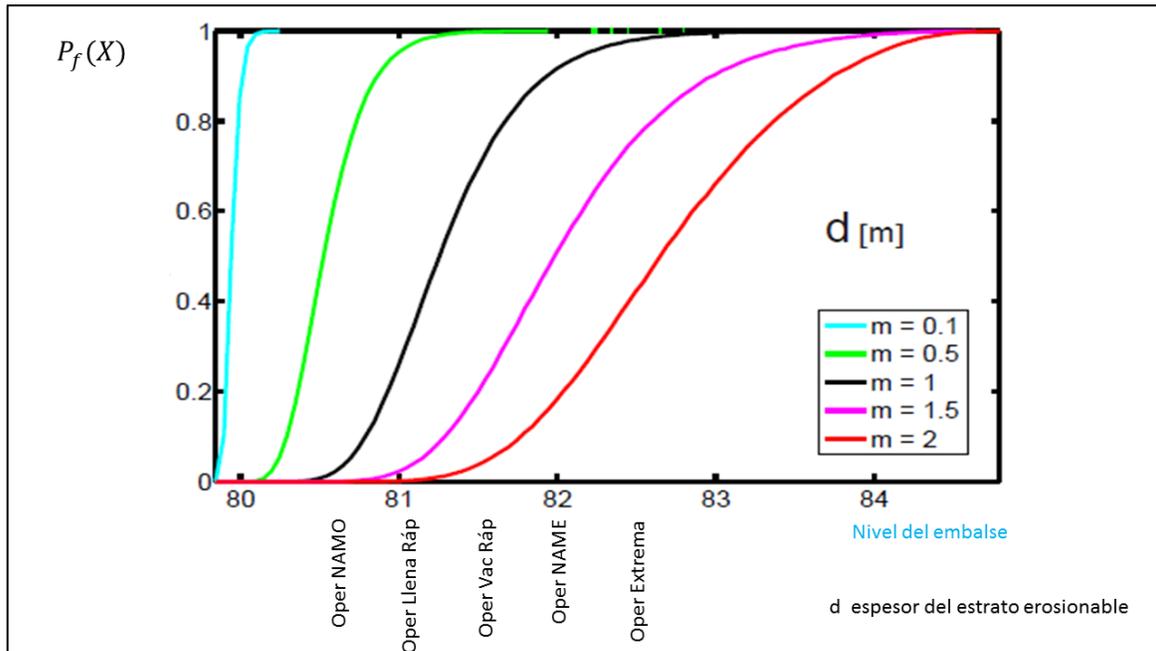


Figura 1.6 Curvas de fragilidad por la sensibilidad del espesor de suelo erosionable d .

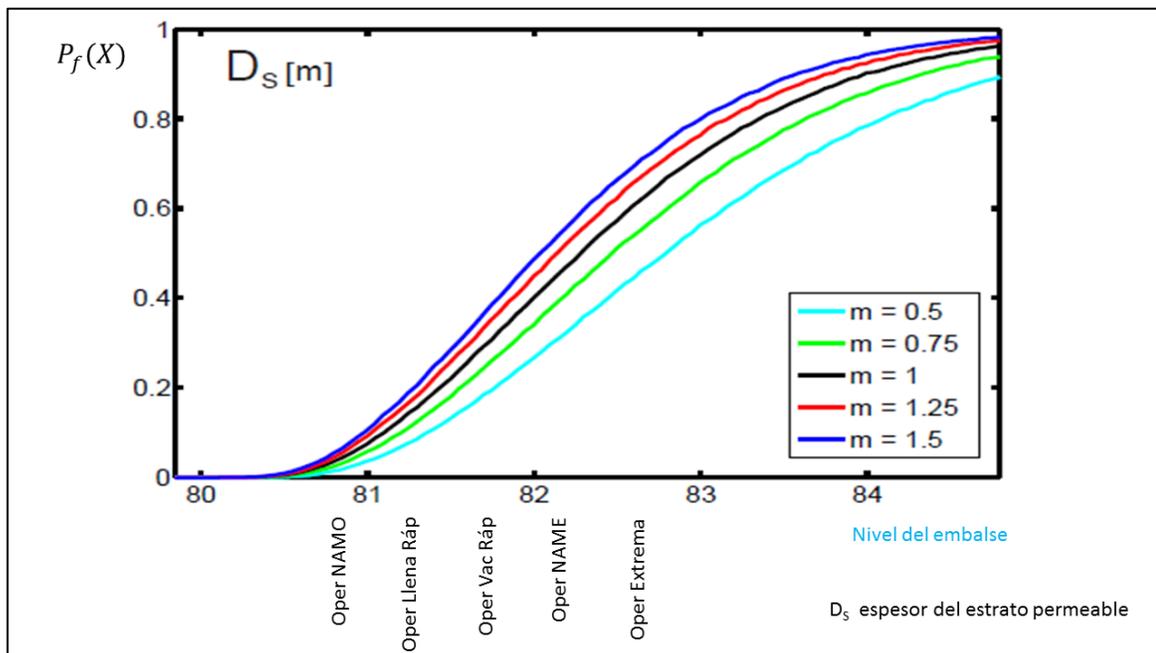


Figura 1.7 Curvas de fragilidad por la sensibilidad del espesor del estrato permeable D_s .

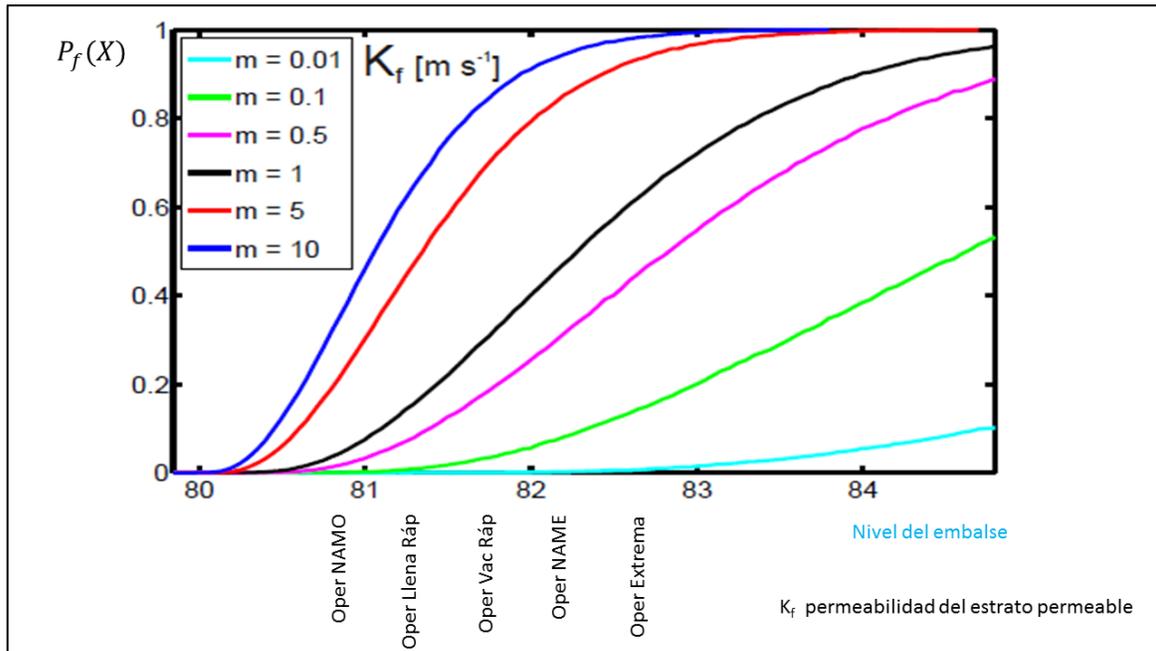


Figura 1.8 Curvas de fragilidad por la sensibilidad de la permeabilidad del suelo.

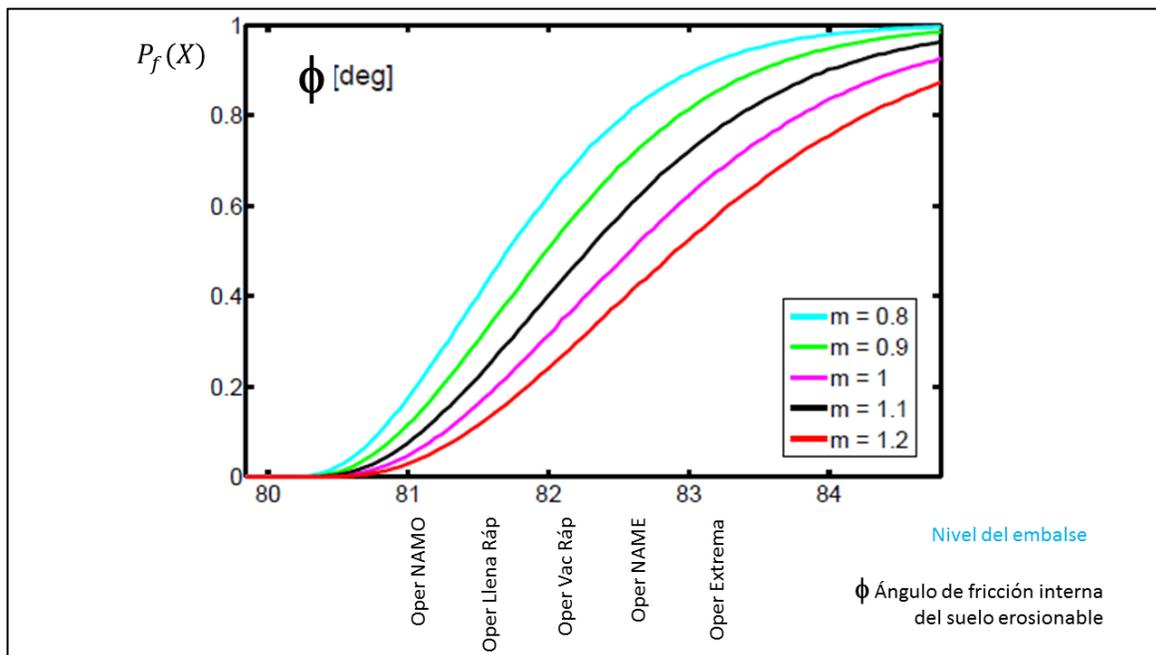


Figura 1.9 Curvas de fragilidad por la sensibilidad del ángulo de fricción interna de la cortina.

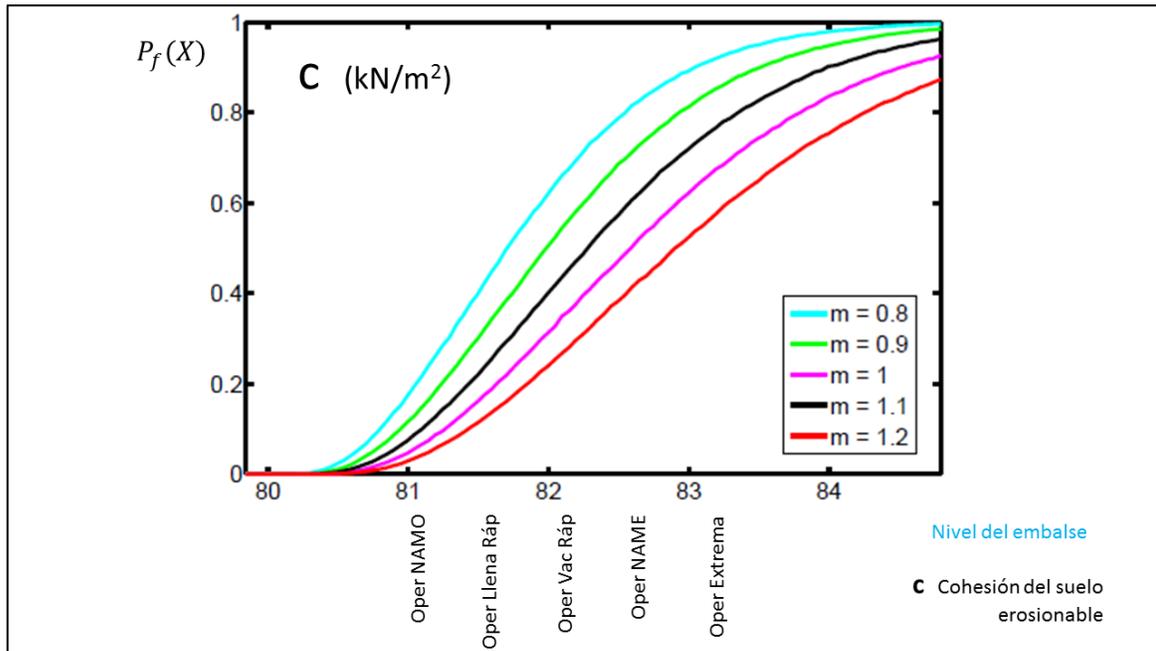


Figura 1.10 Curvas de fragilidad por la sensibilidad de la cohesión de la cortina.

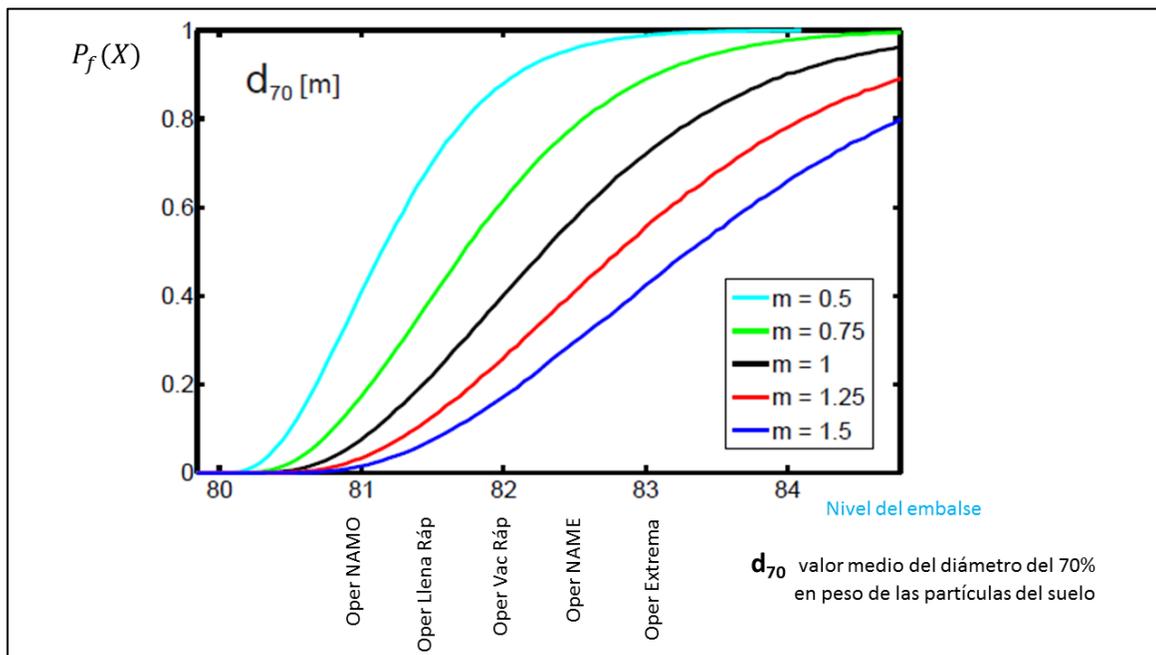


Figura 1.11 Curvas de fragilidad por la sensibilidad de la granulometría de los suelos de la cortina.

Análisis probabilista de fallas por deslizamiento

Con base en toda la información y sujeto a retroalimentación durante el desarrollo de los diferentes procesos del procedimiento en caso de que una o algunas de las medidas de reducción del riesgo lleven a replantear el modelo, como sería en el caso de cambiar algún elemento importante de la presa, se desarrolló un modelo de análisis de riesgo de la presas en lo particular.

Desarrollo del árbol de eventos y falla por deslizamiento

El desarrollo de escenarios mediante la técnica de árboles de eventos y fallas permitirá despiezar o descomponer los distintos casos de eventos que pueden desencadenar la falla de un elemento o del sistema completo, es decir, de la presa. Por ejemplo el caso del escenario Hidrológico podría conducir a una serie de eventos como desbordamiento, aumentos de niveles del vaso, etc., los cuales, a su vez, podrían conducir a una falla por tubificación (modo de falla por erosión interna) por aumento de las presas del agua en los poros del suelo de las cortinas de tierra o a una falla por incremento de los esfuerzos de tensión en la cortina de mampostería.

Este proceso trata del planteamiento y elaboración de los árboles de eventos y de falla para cada uno de los escenarios y para cada una de las presas.

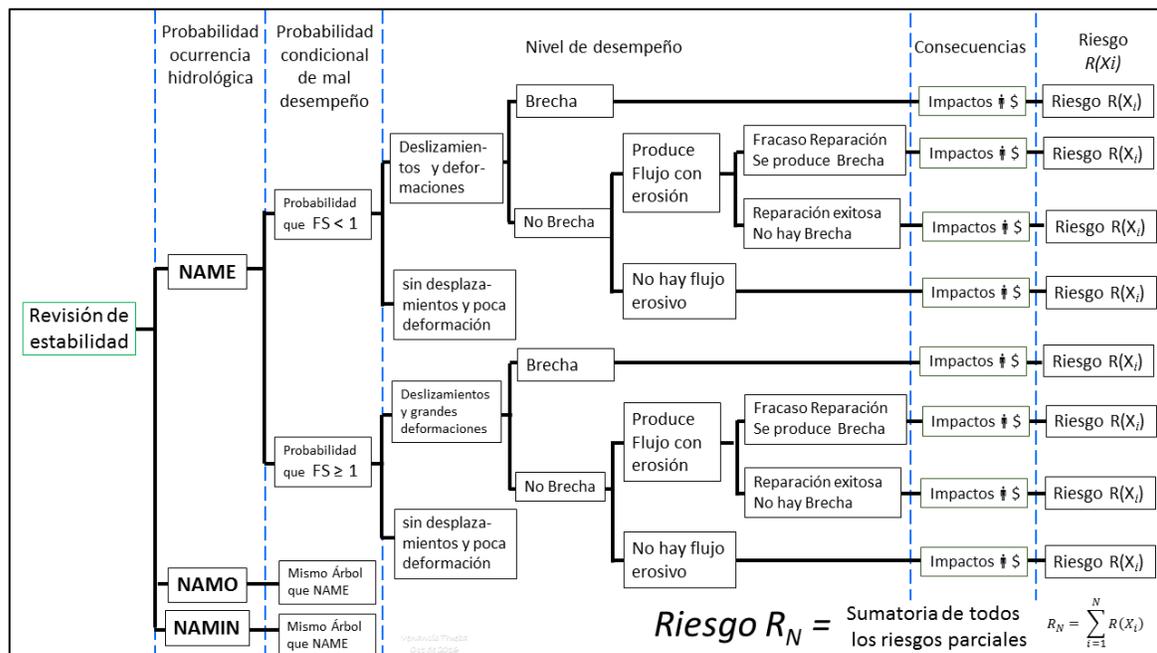


Figura 1.12 Árbol de eventos de la presa por deslizamiento.

Cálculo de probabilidad de solicitaciones

Para el análisis del problema de tubificación de la presa, se recurrió a los valores y rangos de las solicitaciones hidrológicas, que se presentan en el capítulo correspondiente, y a partir de ello se eligieron las condiciones de operación de la presa que se presentan en la tabla siguiente.

Estas solicitaciones hidrológicas se han considerados cuantitativamente en el cálculo o por elementos finitos de los gradientes particularmente en la salida, y el análisis de ello para evaluar, en función del tipo de suelo de la cortina de la presa, el potencial y, en consecuencia, determinar o estimar un primer valor de la probabilidad de falla por tubificación.

Tabla 1.II Condiciones de operación consideradas y probabilidad de ocurrencia

Operación	Prob Ocurrencia	Observaciones
Normal	3.33×10^{-1}	Nivel del agua a la cresta de vertido (NAMO)
Inusual	1.00×10^{-4}	Llenado total del vaso (NAME)
Inusual	6.67×10^{-3}	Vaciado rápido de la presa (6 h)
Inusual	1.00×10^{-2}	Llenado rápido de la presa (4 h)
Extrema	1.00×10^{-3}	Sismo Máximo Creíble
Inaceptable	1.00×10^{-5}	Desbordamiento de la cortina por 1 h o más

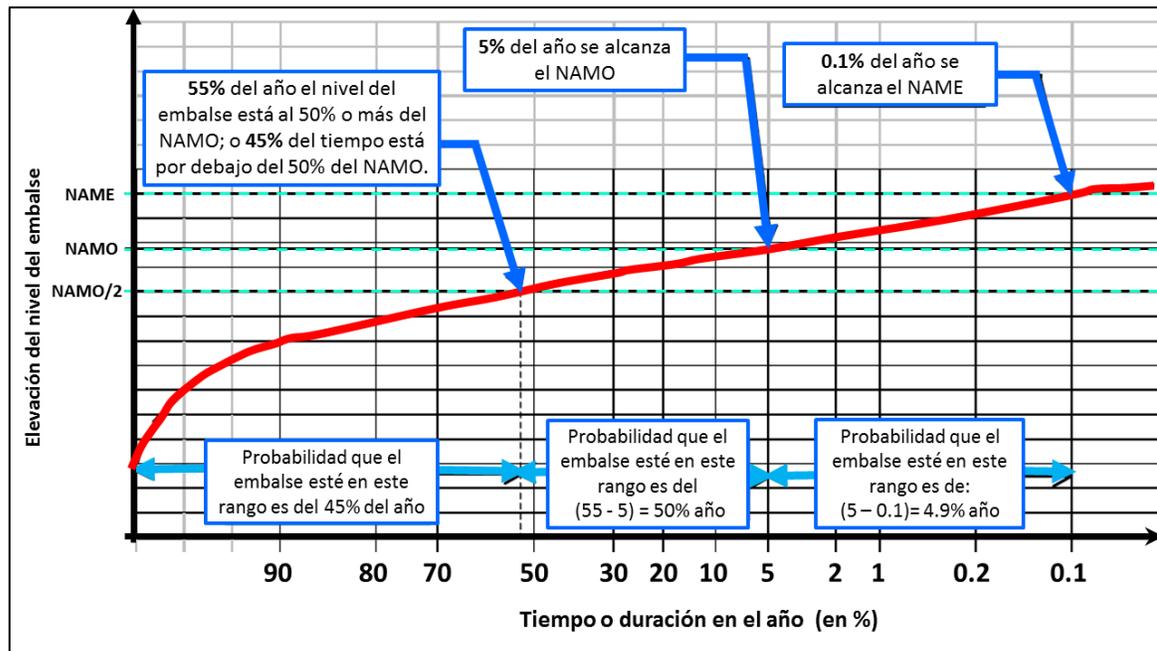


Figura 1.13 Se consideran distintos niveles del embalse, incluyendo el caso de desbordamiento que permite modelar los cambios de pendientes y pérdida de suelo de la cortina.

Análisis de sensibilidad para estudiar la estabilidad de la cortina

En adición, se efectuó un estudio geoestadístico de la seguridad de la cortina en cuanto que se hicieron paquetes considerando diez combinaciones de propiedades mecánicas para estudiar la sensibilidad de la estabilidad de los respaldos y taludes mojado y seco de la cortina, ante el cambio de las propiedades mecánicas, para todas las combinaciones posibles de dichos parámetros.

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos de ese estudio de la seguridad geotécnica estructural de la cortina en términos del análisis de estabilidad de taludes para el estudio de la sensibilidad a las propiedades mecánicas, el peso específico y las aceleraciones sísmicas. En dichas figuras se presentan en abscisas los valores de los rangos de sensibilidad de cada uno de los parámetros que se hicieron variar y que sirvieron para hacer las combinaciones y los cálculos, y en el eje de las ordenas se presenta el valor del factor de seguridad calculado para cada caso de análisis.

En la Figura 1.14 y la Figura 1.15, se presentan los resultados obtenidos en condiciones de operación normal, es decir, con el embalse a nivel del NAMO. En la

Figura 1.16 y la Figura 1.17, se presentan los resultados calculados de la sensibilidad en condiciones de operación inusual con el embalse a nivel del NAME.

En la Figura 1.18 y la Figura 1.19, se presentan los resultados en condiciones de operación inusual por vaciado rápido del vaso simulando que el nivel del embalse pasa del NAME al NAMIN por la apertura de una brecha o tubificación importante. En la Figura 1.20 y la Figura 1.21, se presentan los valores calculados en condiciones de operación inusual por llenado rápido del vaso simulando que el nivel del embalse pasa del NAMIN al NAME por presentarse una creciente muy importante que llenaría el vaso, inicialmente vacío, hasta el nivel del NAME, condición importante de analizar en el caso de esta obra construida con suelos susceptibles de sufrir erosión interna. Y, finalmente, En la Figura 1.22 y la Figura 1.23, se presentan valores de los rangos de sensibilidad de los diferentes parámetros, incluyendo la variación de las aceleraciones, horizontal y vertical, del sismo, en condiciones de operación extrema, cuando ocurre un temblor y el embalse se encuentra a nivel del NAMO.

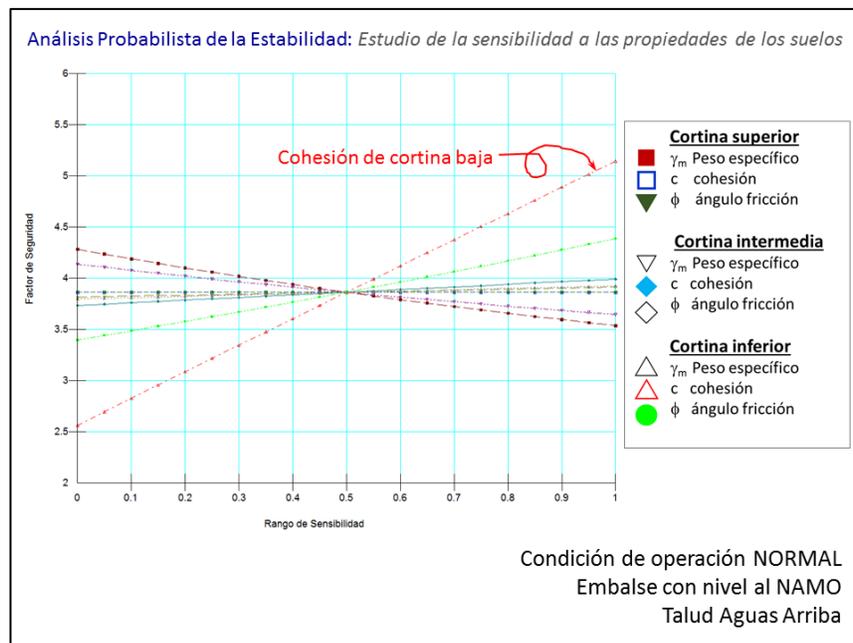


Figura 1.14 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado con el embalse al NAMO.

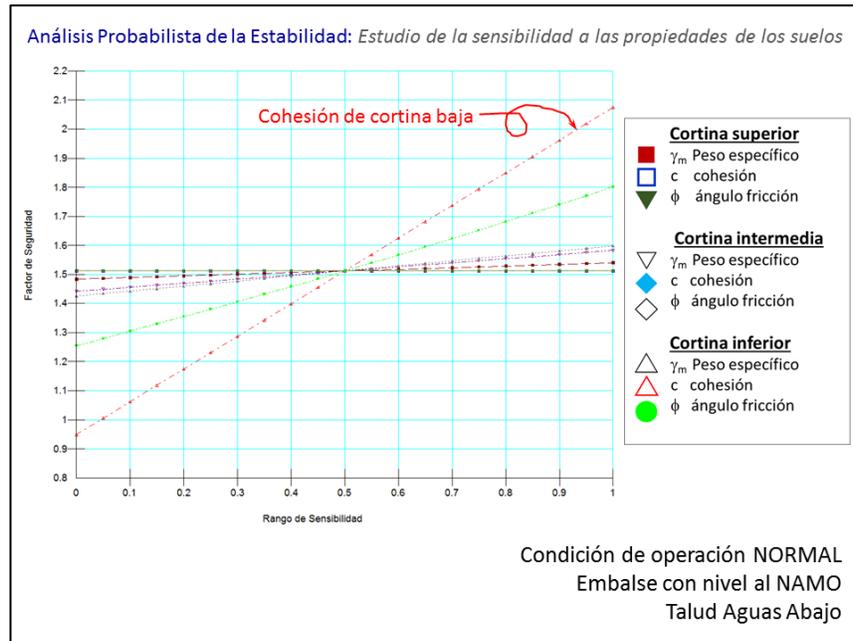


Figura 1.15 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco con el embalse al NAMO.

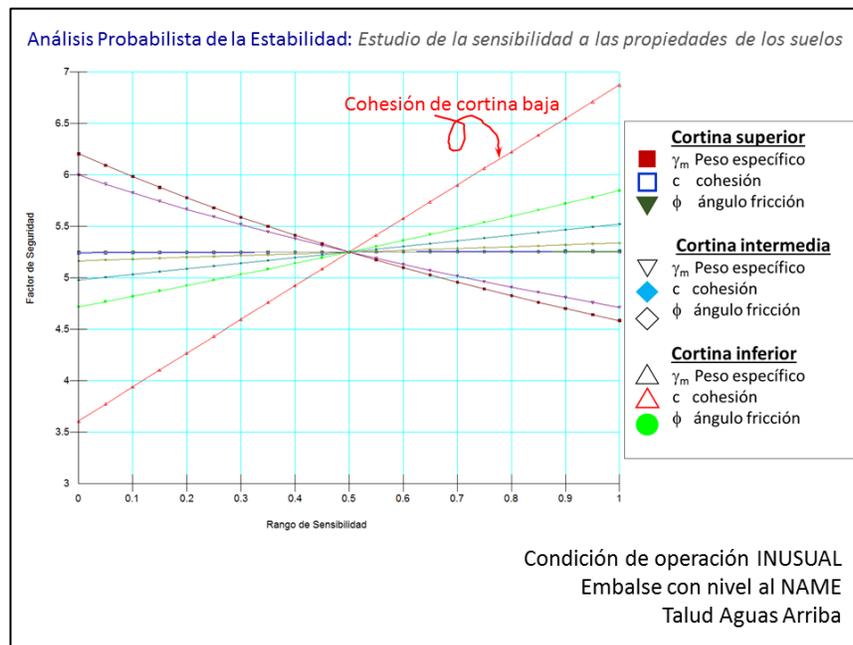


Figura 1.16 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado con el embalse lleno al NAME.

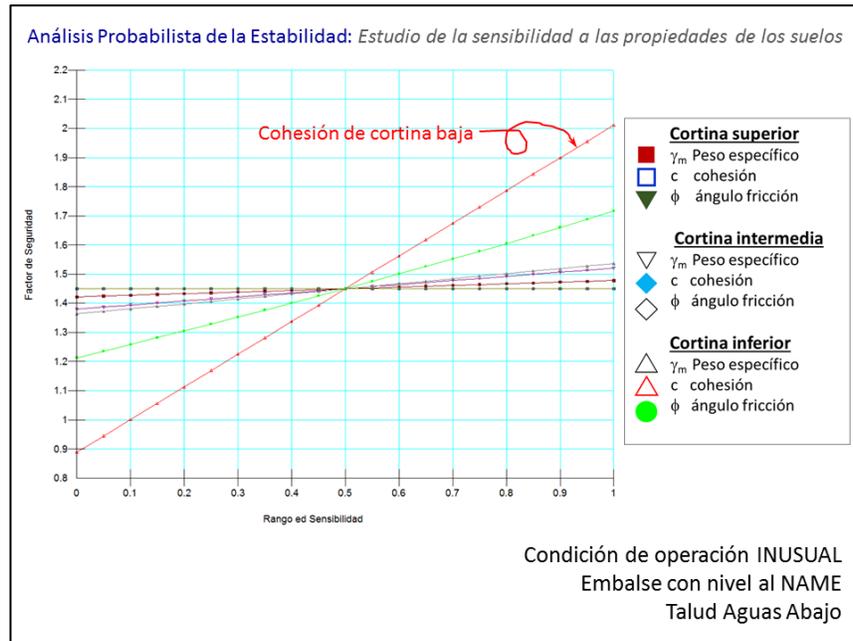


Figura 1.17 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco con el embalse lleno al NAME.

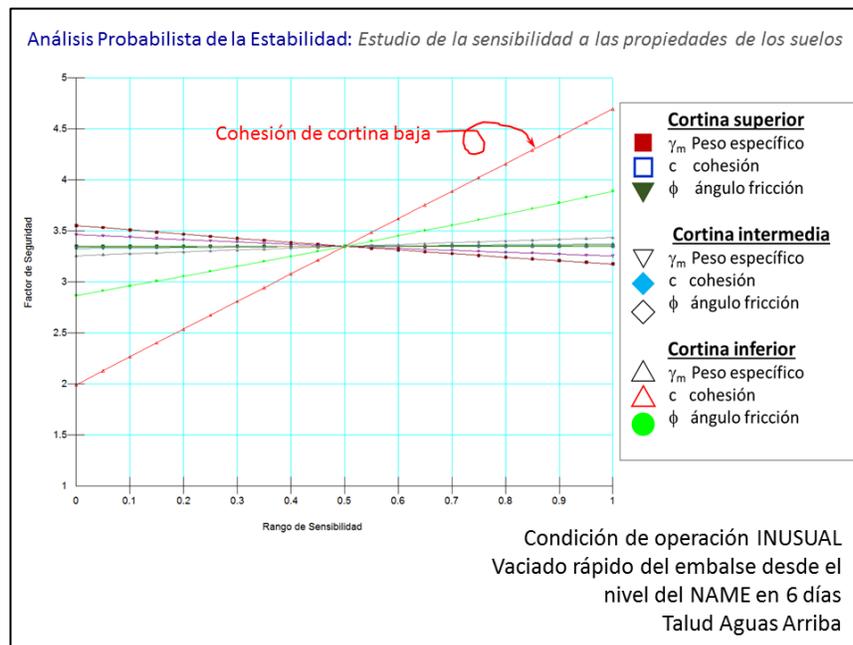


Figura 1.18 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado durante un vaciado rápido.

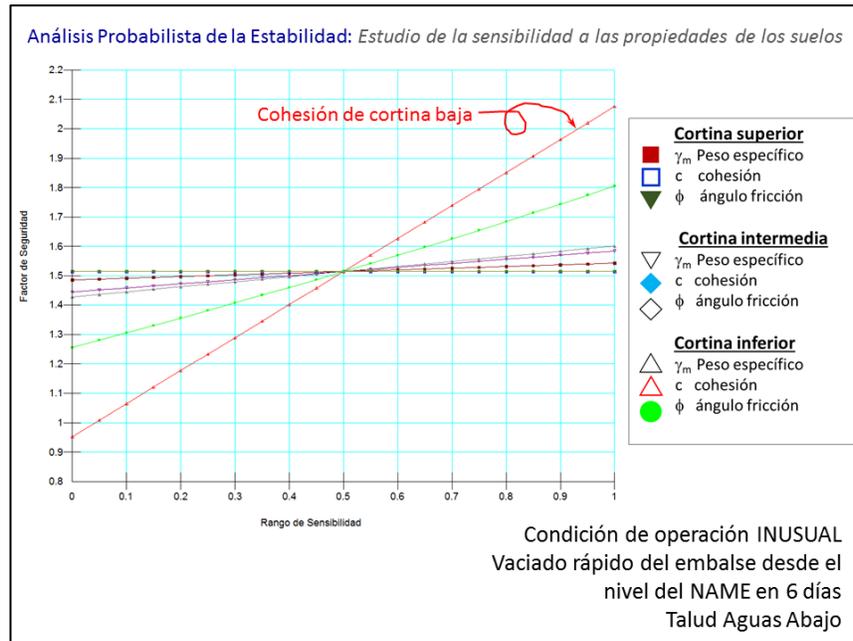


Figura 1.19 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco durante un vaciado rápido.

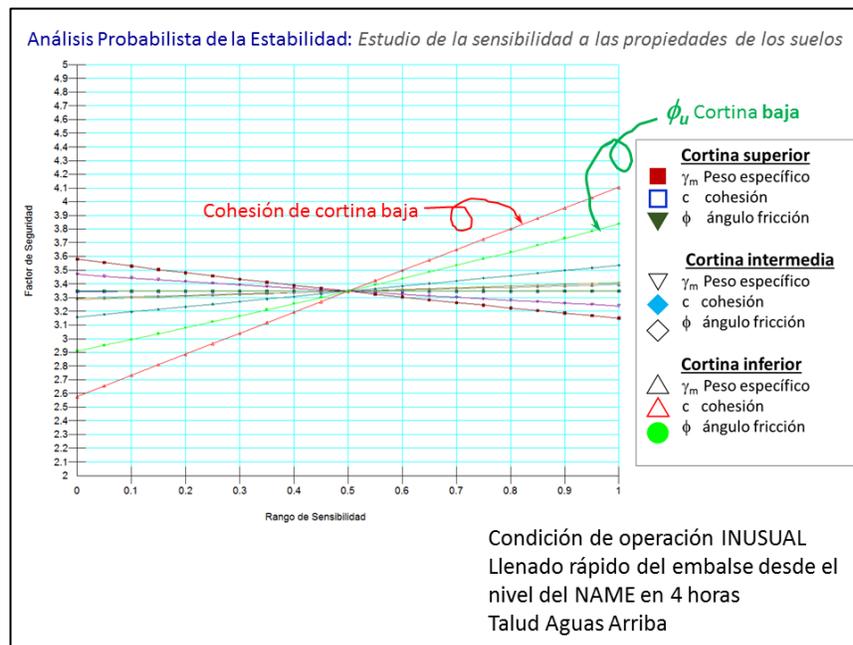


Figura 1.20 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado durante un llenado rápido.

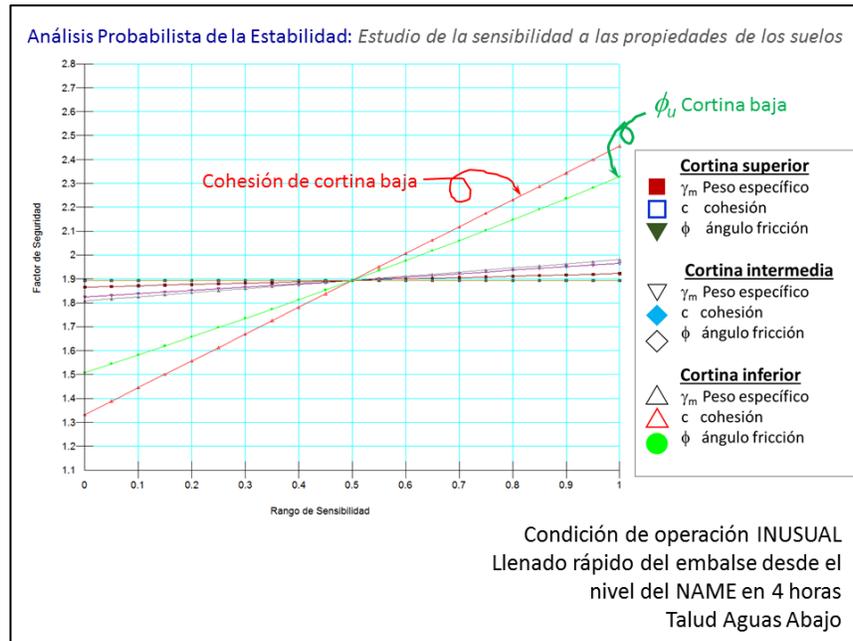


Figura 1.21 Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco durante un llenado rápido.

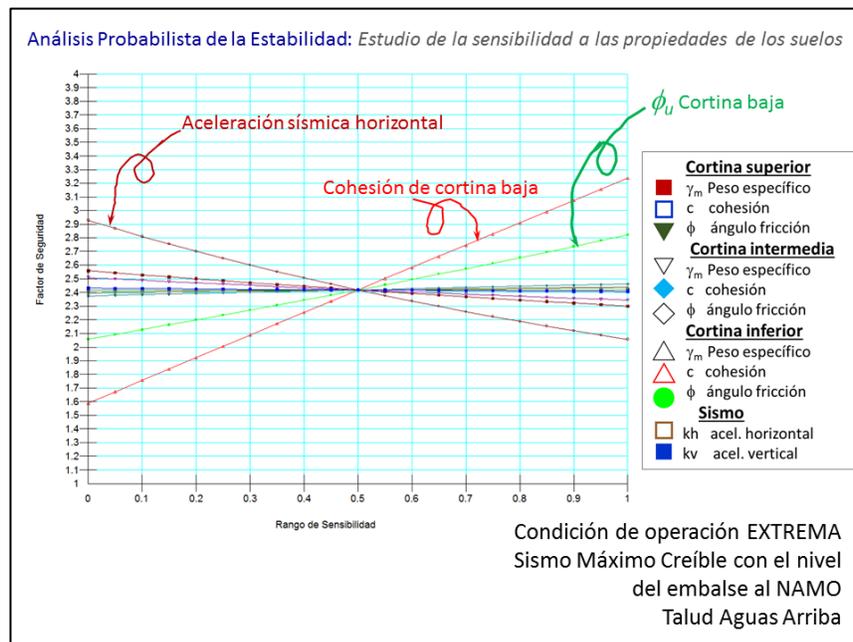


Figura 1.22 Análisis de sensibilidad y del talud mojado durante el sismo y nivel del NAMO.

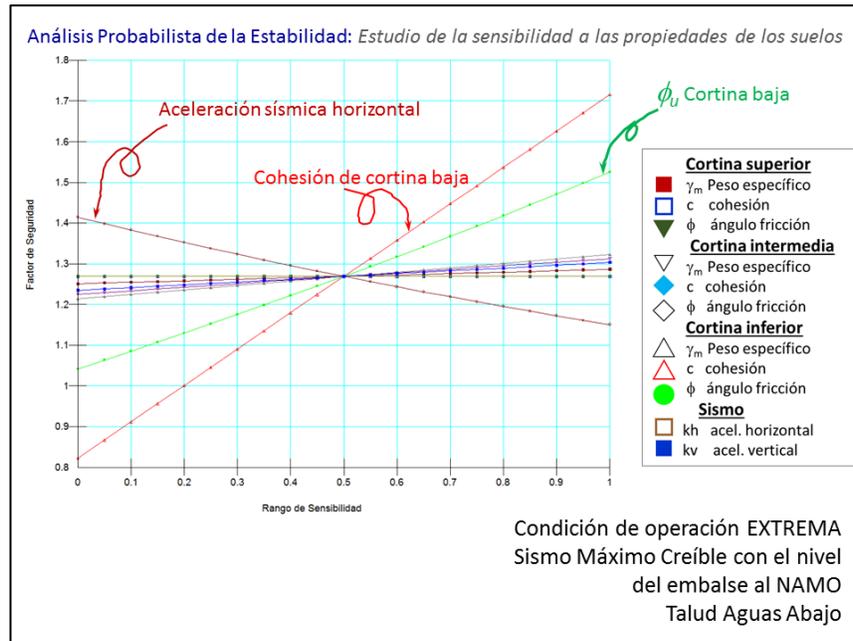


Figura 1.23 Análisis de sensibilidad y del talud seco durante el sismo y nivel del NAMO.

Es importante destacar que mediante estos estudios de sensibilidad, se pudieron estudiar las características geoestadísticas que mejor representan a los grupos de suelos presentes en la cortina de la presa, determinados a partir de las investigaciones en campo y laboratorio, así como con base en la experiencia y juicio de los especialistas en Geotecnia, toda vez que la obra de contención considerada presenta variaciones espaciales importantes de la granulometría de los suelos por una parte, así como una variación espacial importante de los valores de los parámetros de resistencia al cortante e inclusive del peso volumétrico, debido a los cambios de la composición y grado de compactación de los suelos. Es por ello, que estos análisis de sensibilidad nos permitieron mejorar sustancialmente los rangos de valores de las propiedades índices y mecánicas a emplear en los análisis probabilistas de la seguridad geotécnica estructural de la cortina.

Cálculo de la probabilidad de falla por deslizamiento

En el caso de aquellos modos de falla que son modelables mediante un cálculo analítico o determinista, será evaluada mediante técnicas de cálculos de confiabilidad para producir un análisis de confiabilidad, mediante diferentes estrategias, como la de propagación de las incertidumbres de los datos de entrada

del modelo de riesgo, como sería el caso de las propiedades mecánicas de los materiales o el modelo geométrico o la estructuración de la cortina, de tal manera que en lugar de un valor determinista se obtendrá una probabilidad. De esta manera, entre otras técnicas, se utilizará la técnica de Monte Carlo para el análisis probabilista de la estabilidad de los taludes de las cortinas de tierra y, con ello lograr la determinación de la probabilidad de falla en cada escenario, modo de falla por deslizamiento y falla por cortante, y también este proceso permitirá obtener los resultados necesarios para poder generar las curvas de fragilidad en cada uno de los casos de falla. El mismo modelo geotécnico estructural empleado para hacer los análisis deterministas, será utilizado en estos procesos, y al conceder un carácter estocástico a las propiedades mecánicas de los suelos de las cortinas, se estarán produciendo salidas de resultados de naturaleza estocástica, y por lo tanto se permite la construcción de las matrices de probabilidades de falla por una parte, y la construcción de las curvas de fragilidad por la otra.

De esta manera, a continuación se presentan los resultados de los análisis probabilistas de la seguridad de la cortina mediante el método generalizado de estado límite o GLE para el análisis de estabilidad de cada caso de composición de propiedades de los suelos, determinado en caso mediante el Método de Monte Carlo para considerar las combinaciones de propiedades mecánicas y del peso específico en los tres grupos de suelos del paquete que conforma la obra de contención cortina en condiciones de nivel del embalse al NAMO.

En la y la se presenta el análisis probabilista de seguridad de la cortina en condiciones de operación normal, es decir, con el embalse a nivel del NAMO. En la y la se presenta el análisis probabilista de seguridad de la cortina en condiciones de operación inusual con el embalse a nivel del NAME. En la y la se presenta el análisis probabilista de seguridad de la cortina en condiciones de operación inusual por vaciado rápido del vaso simulando que el nivel del embalse pasa del NAME al NAMIN por la apertura de una brecha o tubificación importante. En la y la se presenta el análisis probabilista de seguridad de la cortina en condiciones de operación inusual por llenado rápido del vaso simulando que el nivel del embalse pasa del NAMIN al NAME por presentarse una creciente muy importante que llenaría el vaso, inicialmente vacío, hasta el nivel del NAME, condición importante de analizar en el caso de esta obra construida con suelos susceptibles de sufrir erosión interna. Y, finalmente, En la y la se presenta el análisis probabilista de seguridad de la cortina en condiciones de operación extrema, cuando ocurre el Sismo Máximo Creíble y el embalse se encuentra a nivel del NAMO.

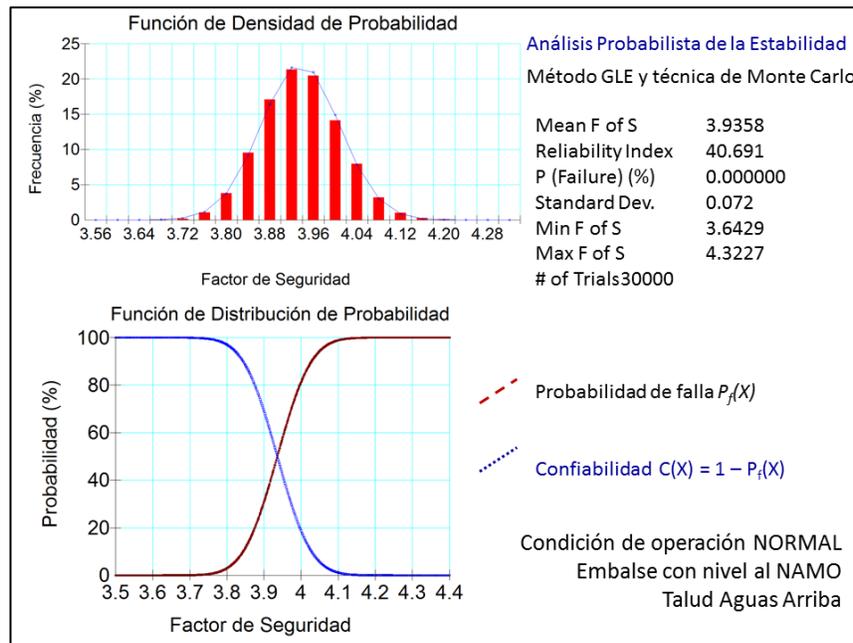


Figura 1.24 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado con el embalse al nivel del NAMO.

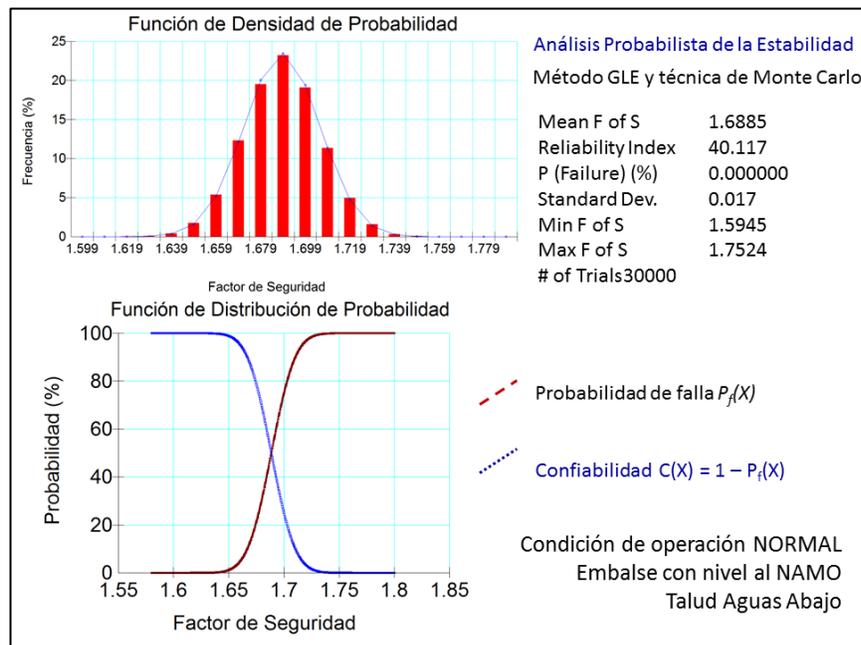


Figura 1.25 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco con el embalse al nivel del NAMO.

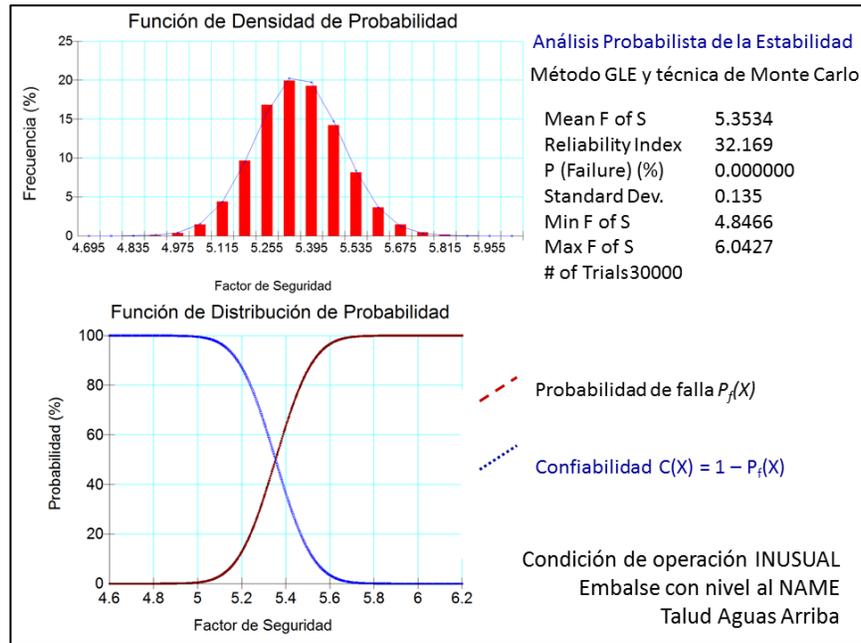


Figura 1.26 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado con el embalse lleno al NAME.

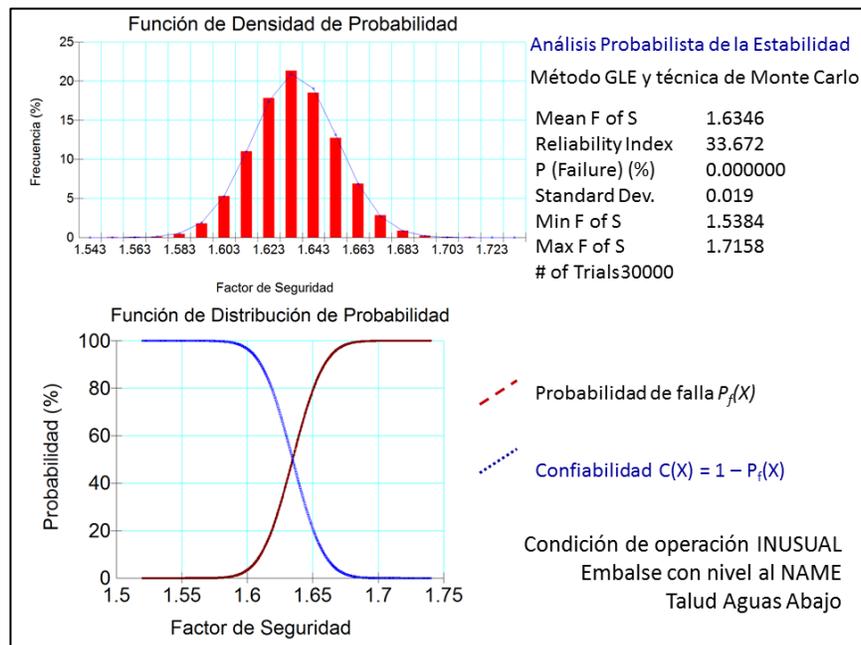


Figura 1.27 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco con el embalse lleno al NAME.

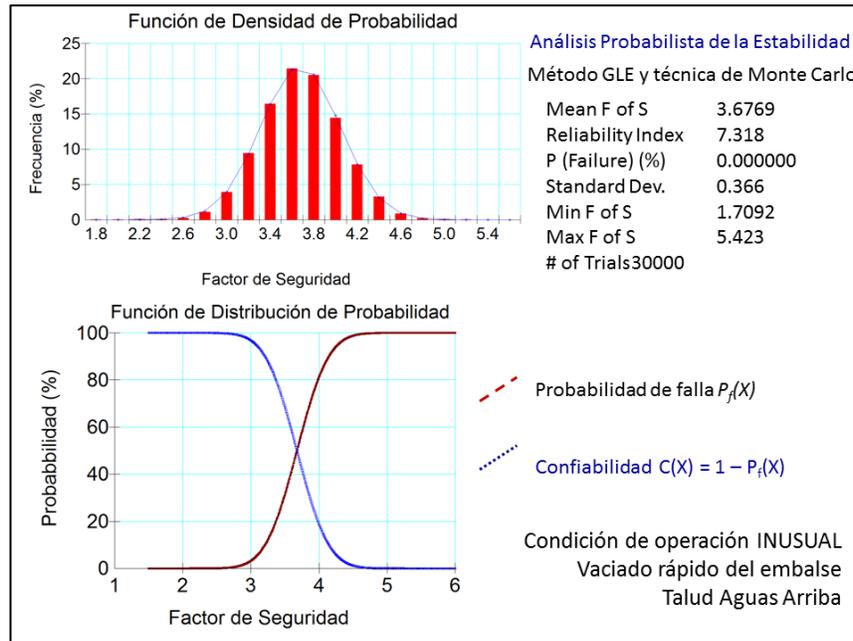


Figura 1.28 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado durante un vaciado rápido.

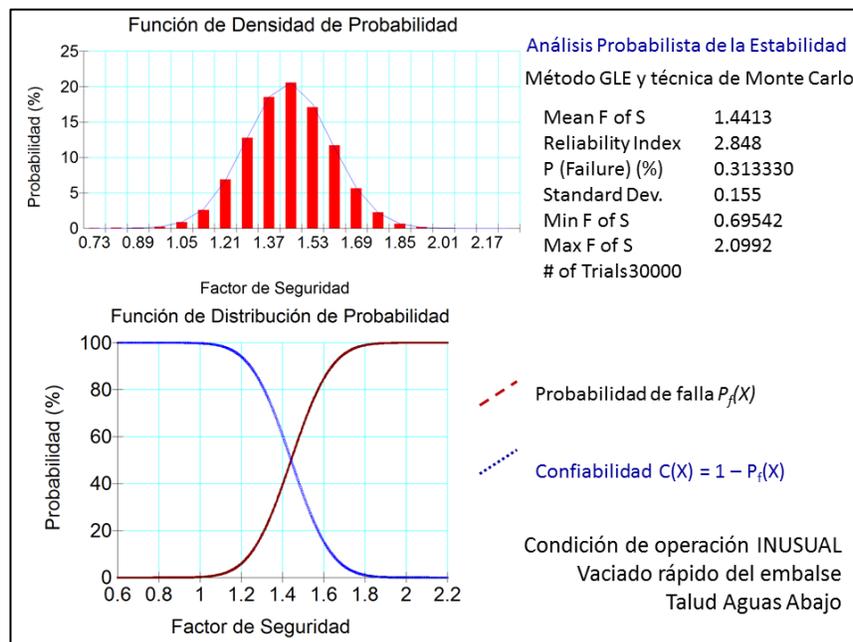


Figura 1.29 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco durante un vaciado rápido.

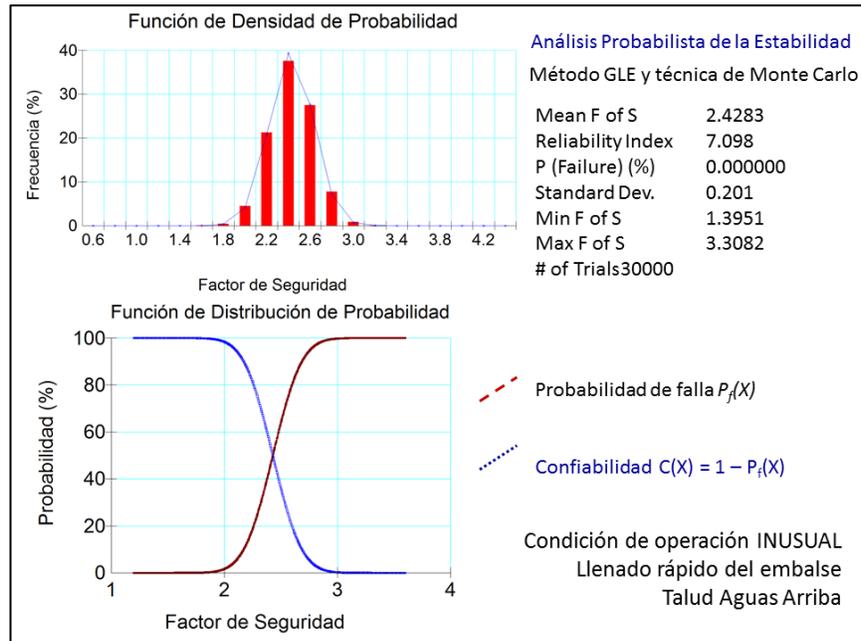


Figura 1.30 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado durante un llenado rápido.

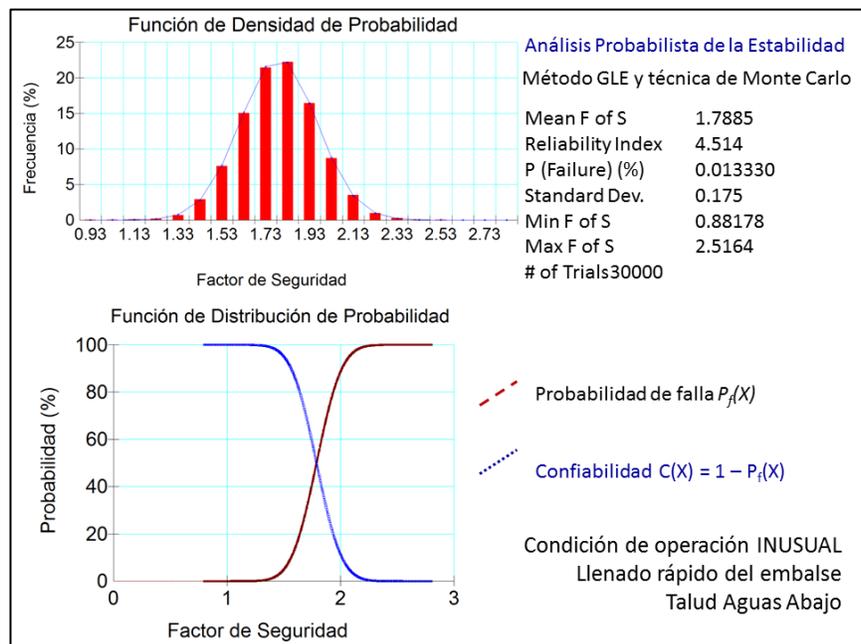


Figura 1.31 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco durante un llenado rápido.

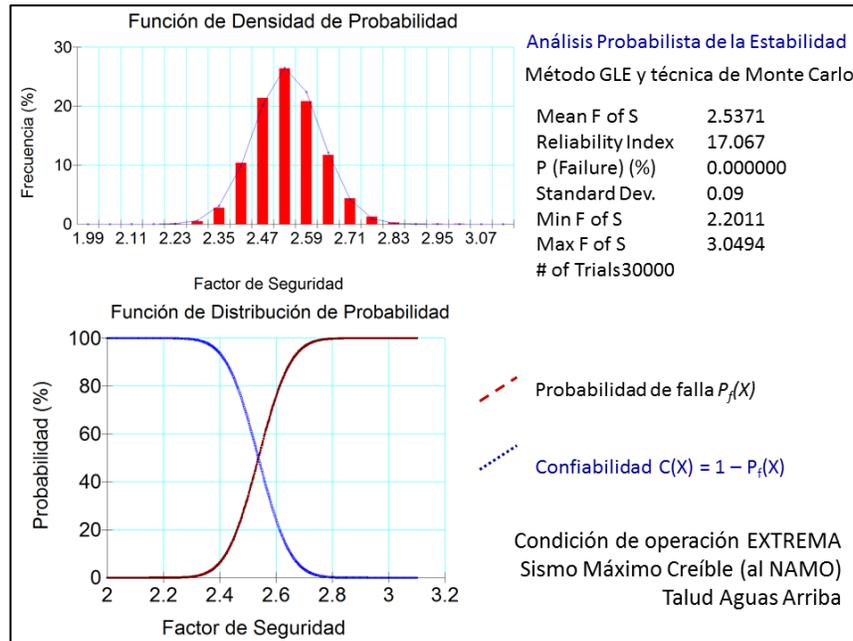


Figura 1.32 Análisis probabilista del talud mojado durante el sismo con embalse al nivel del NAMO.

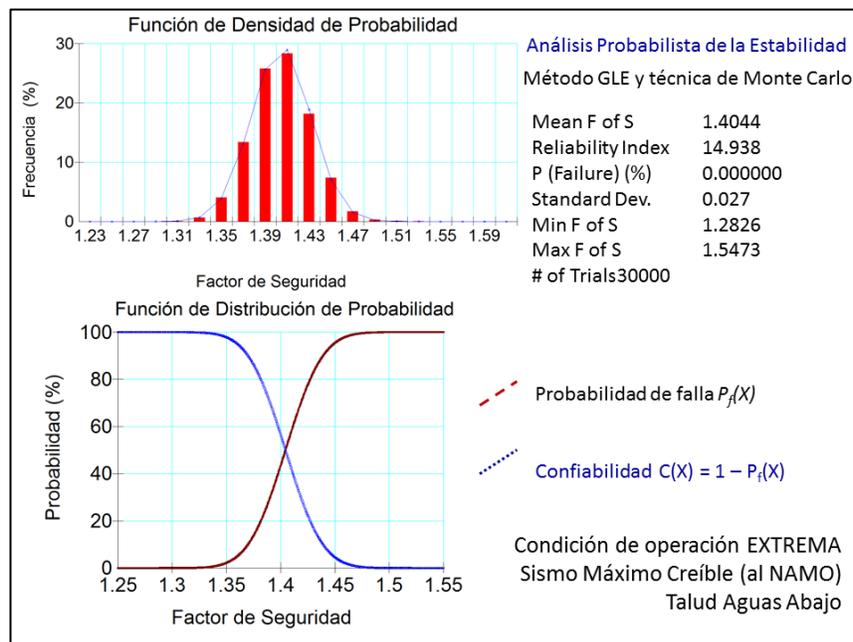


Figura 1.33 Análisis probabilista del talud seco durante el sismo con embalse al nivel del NAMO.

Curvas de fragilidad por la probabilidad de falla por deslizamiento

En la , se presenta el caso de las curvas de fragilidad derivadas del desbordamiento de la cortina, las cuales se obtienen suponiendo que el paso del agua sobre el respaldo y talud aguas abajo, o incluso en ambos taludes, va provocando la erosión del suelo y arrastrando materiales, quedando cada vez más, una sección de cortina cada vez más vulnerable a sufrir una falla de estabilidad de taludes y el colapso de parte de la cortina, provocando así una brecha en ésta.

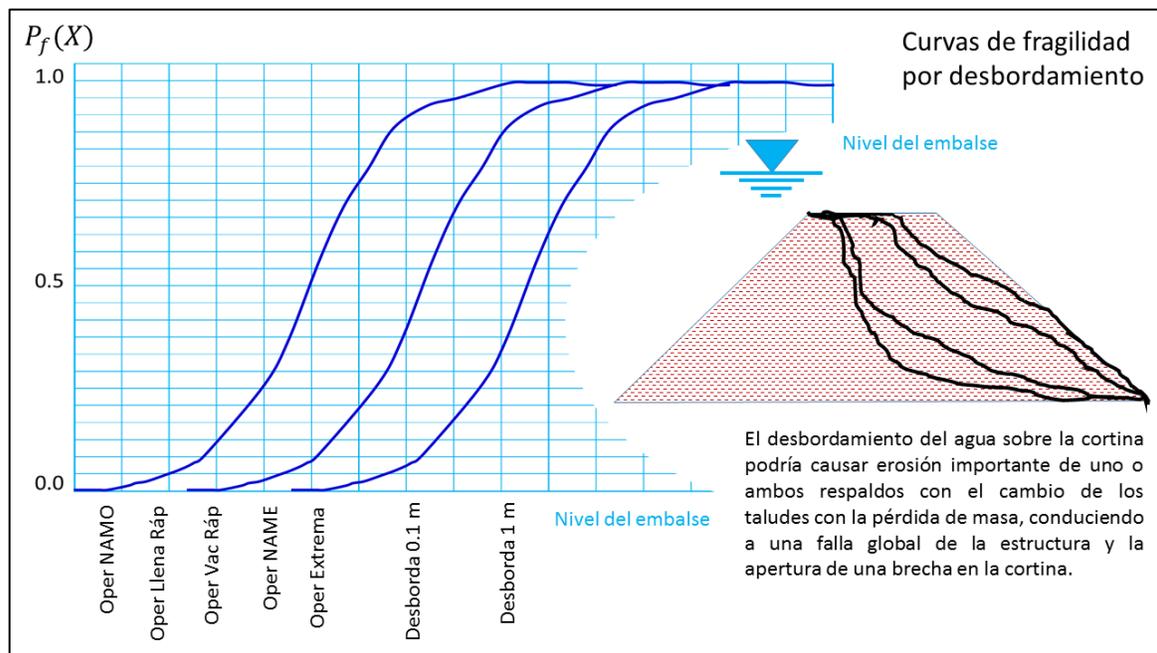


Figura 1.34 Curvas de fragilidad por la sensibilidad de la cortina en condiciones de desbordamiento.

Cálculo de probabilidad de falla anual del sistema

Con base en los resultados que permitan obtener los valores de la probabilidad anual de falla para los diferentes modos de falla de los elementos del sistema (la presa), se calculará como resultado final la probabilidad anual de falla del sistema, es decir, de la presa.

Recopilación de información y contexto

El esfuerzo de recopilar la mayor cantidad de información posible sobre la presa estudiada es muy importante, tanto con el enfoque tradicional de la seguridad como con el basado en riesgo. Por tanto, se ha reunido documentos genéricos que pueden denominarse de distinta manera en cada país. Entre ellos se puede apuntar:

- Estudios previos de soluciones o anteproyectos.
- Informes geológicos e investigaciones “in situ” efectuadas en el pasado.
- Proyecto de construcción con las eventuales revisiones o modificados.
- Estudios de impacto ambiental y declaración.
- Informes de la construcción con sus correspondientes fotografías.
- Informes geológicos posteriores al proyecto.
- Proyecto de liquidación.
- Informes de seguridad.
- Informes de auscultación.
- Normas de explotación y plan de emergencia.
- Informes sobre incidentes; etc.

En paralelo con la anterior actividad, en los dos casos se ha tenido conversaciones con los ingenieros responsables de la explotación o construcción y su equipo, así como con cualquier otra persona relacionada directamente con la presa. Cuando ha resultado factible, también se ha conversado con las personas involucradas en el diseño y construcción de la presa.

- De la misma forma, se ha llevado a cabo una inspección detallada de la presa y su zona inundable. No obstante, una vez revisada la documentación y antes de tener la visita de campo se ha concretado los siguientes aspectos:
- Definición del sistema del embalse, es decir, la presa/s, el aliviadero/s, el o los desagües diversos, tomas, vaso, cuenca drenante, zona inundable aguas abajo, sistemas de auscultación y de seguridad hidrológica, etc.
- Descripción para cada uno de esos componentes del sistema.
- Prognosis de cómo puede cambiar el riesgo en ellos a lo largo del tiempo por deterioro, modificaciones, mejora de auscultación, cambio

de población aguas abajo, cambio del personal de explotación, cambio en las normas de explotación o la implementación del plan de emergencia, etc.

- Además, en la pertinente visita a las presas se ha indagado los potenciales modos de rotura y durante la inspección de la zona inundable se ha considerado las posibles consecuencias derivadas del paso de caudales extraordinarios.

Eventos de carga: escenarios

En los casos de estudio presentados, se ha definido los escenarios de sollicitación partiendo de unos eventos de naturaleza estática, hidrológica y sísmica. Se ha descartado, por tanto, escenarios relacionados con errores de operación, terrorismo, incendio, deslizamientos de ladera en el vaso, etc.

De esta forma, en aras de la máxima claridad se utiliza la acepción “evento” para concretar la naturaleza de la sollicitación que permite definir un determinado escenario de carga. Dentro del marco del análisis de riesgos, se entiende este último como la combinación única de estados (evento de inicio, nivel previo de embalse, caudal fluyente, etc.) en el sistema “presa-embalse”.

Evento de cargas estáticas

El dominio de cargas estáticas (por dominio se entiende el rango total de magnitudes que pueden presentarse) se deriva habitualmente del registro histórico de niveles en el embalse, aunque habría de eliminarse los valores máximos por corresponder al evento hidrológico. Lógicamente, la función de distribución ajustada se considera representativa de las condiciones previsibles para el periodo en que se realiza el AR, aunque también sería posible llevar a cabo una extrapolación de niveles o emprender una simulación estocástica de niveles (Fell et al [53])

Conviene reseñar que los niveles de embalse dependen directamente de la forma en que se explote el embalse y sus usos; por consiguiente, cualquier cambio en los mismos se ha tenido en cuenta. Por otra parte, se ha definido los escenarios estáticos, únicamente, a partir del nivel de la lámina libre de

agua, aunque se podrían haber identificado a partir del estado de diversos componentes o elementos del embalse (por ejemplo: nivel previo, situación de las compuertas y órganos de desagüe, velocidad del viento, caudal entrante al embalse, etc.). En tal caso, la probabilidad de ocurrencia para dicho escenario se obtendría multiplicando las probabilidades discretas del estado de los componentes (asumiendo que fuesen independientes entre sí).

Cuando se ha evaluado los niveles de embalse se ha tenido en mente el modo de fallo considerado dado que niveles concretos pueden llegar a determinar un umbral como, por ejemplo, la cota a la que se ubica una anomalía geológica susceptible de iniciar un determinado modo de rotura. Para otros modos se ha aplicado un rango continuo de niveles (USBR).

Al tratarse este estudio de un AR preliminar o de Nivel 2 (apartado 2.4), tal y como es habitual, se ha supuesto el embalse fijo al Nivel Máximo Normal (N.M.N).

Evento hidrológico

Para el caso del evento hidrológico, lo normal es emplear un caudal o nivel punta en el embalse y relacionarlo con una probabilidad anual de excedencia. La parte con menores períodos de recurrencia se ha obtenido mediante los trabajos habitualmente efectuados en España, partiendo de un análisis de frecuencia y ajustando a una función de máximos (CNGP). Sin embargo, en el contexto de los AR es necesario estimar probabilidades todavía mucho más bajas y, por tanto, se ha recurrido a la realización de notables extrapolaciones. En fases más avanzadas del análisis podría contemplarse el estudio de paleo-avenidas al objeto de facilitarlas (USBR; Stedinger et al y Putcha et al).

Tal y como resulta habitual en estudios preliminares o dedicados a un sistema de presas, se ha supuesto que se parte del N.M.N. en el evento hidrológico.

Evento sísmico

Para el evento sísmico, la variable utilizada para definir los escenarios de carga ha sido una representación del nivel de movimiento generado en el

terreno, en concreto, la aceleración horizontal. Este parámetro integra todas las posibles contribuciones, amplificadores o amortiguadores de la energía del sismo.

A veces se emplea otros parámetros, como el espectro de respuesta, o se trata de analizar por separado las variables contribuyentes aunque, en cualquiera de los casos, para estadios más avanzados del análisis la función probabilística de excedencia debería fundamentarse sobre un estudio sismo-tectónico.

En presas de materiales sueltos también debe tenerse en cuenta la influencia de la licuefacción que, además de la aceleración, también se hace depender de la magnitud del sismo (Gutiérrez et al). Sin embargo, en la atagüa de materiales sueltos se ha despreciado esta influencia al emplear un procedimiento simplificado y resultar el riesgo sísmico mucho menor que el asociado a los eventos estático e hidrológico.

Modos de fallo

La identificación de los modos de fallo es una parte fundamental del proceso del AR y, además, determina la magnitud y contexto del trabajo restante. Una de las técnicas más utilizadas para revisarlos sistemáticamente es el FMEA (“Failure Modes and Effects Analysis”) utilizado por primera en la industria aeroespacial (ANCOLD y Hartford y Baecher); comprende:

- Realizar una lista de todos los componentes de la presa y su embalse.
- Encontrar la forma en que cada componente puede dejar de desempeñar su función considerando todas las sollicitaciones posibles.
- Estimar los efectos de dicho fallo sobre el sistema.
- La anterior actividad se ha desarrollado con el máximo nivel de detalle posible, diferenciando los componentes concretos donde puede iniciarse el mecanismo de rotura, y estimando si dicho proceso es susceptible de terminar en rotura catastrófica o un simple incidente. De esta forma, se ha concluido el análisis desechando aquellos modos de fallo que resultaban en un riesgo efectivo despreciable.

Probabilidad condicional de rotura

Juicio ingenieril y juicio de experto

Para estimar la probabilidad condicional de rotura se ha empleado diversas aproximaciones al problema, brevemente mencionadas en el estado del conocimiento (apartado

2.5.5). Ahí se ha apuntado la necesidad de aplicar, a lo largo de todo el proceso, el juicio ingenieril como herramienta fundamental para discernir el orden de magnitud de las cosas y su importancia relativa. También se ha destacado la utilidad del *juicio de experto* a la hora de asignar probabilidades totales así como para componer las probabilidades condicionales dentro de los nodos de un árbol de eventos o para un determinado mecanismo de rotura en función de la información disponible.

Método tradicional

Se ha utilizado el *tradicional enfoque determinista* basado en evaluar la seguridad mediante coeficientes de seguridad que relacionan resistencias con solicitaciones. Esta técnica obliga a emplear magnitudes fijas y exactas en las variables que influyen en el problema y, al final del cálculo, no proporciona una información clara sobre “lo cerca que nos encontramos de la rotura”.

Dentro del contexto del análisis de riesgos, se ha manejado para determinar algún umbral de rotura, aunque aquí se recomienda usar en los cálculos los valores esperados para las variables y no los más conservadores; estos últimos serían los utilizados en un diseño convencional clásico.

Métodos históricos

Además se ha contado con los *métodos históricos* que utilizan el comportamiento pasado de otras presas similares para inferir una frecuencia de fallo o rotura. Resulta habitual separar el análisis para las fases del primer llenado, o los cinco primeros años de funcionamiento, y el resto de años de vida. A pesar de que cada presa es única, cuando los métodos históricos se basan en una población numerosa de embalses y se ajustan en función de la edad de la presa analizada y sus condiciones particulares, constituyen una herramienta muy valiosa.

Estos métodos no suelen tener en cuenta el nivel de embalse ni los detalles últimos de la presa (Foster et al y Douglas et al) y, por tanto, han sido aplicados en la presa de gravedad y en la ataguía de materiales sueltos para

establecer una probabilidad inicial de referencia en alguno de los modos de rotura y como comprobación de los cálculos posteriores.

Análisis

Por último, se ha aplicado el método consignado como análisis que, en el presente caso, se contextualiza dentro de la mencionada toma de decisiones bajo incertidumbre.

Además se trata de un análisis basado en una técnica probabilística que podría englobarse dentro de las que incluyen, o se denominan, “análisis de fiabilidad” (Mínguez).

Enlazando con lo anterior, se puede empezar por establecer una clasificación taxonómica de la incertidumbre manejada (véase también el apartado 2.2). Por tanto, se diferencia:

- Variabilidad natural: relacionada con la aleatoriedad inherente a los procesos físicos tanto en el tiempo como en el espacio.
- incertidumbre epistémica: asociada a la limitación de información y el conocimiento exacto de la realidad. Puede desglosarse en la incertidumbre relativa al modelo que se define para describir el proceso físico y la vinculada a los parámetros (inferencia de valores procedentes de ensayos, errores de lectura o ejecución, etc.).
- Incertidumbre en la toma de decisiones: surge a raíz del limitado conocimiento sobre el estado del sistema analizado (circunstancias ocurridas durante la construcción o explotación, deterioro, errores humanos, etc.) así como de los objetivos sociales que se persiguen (vida útil esperada, beneficio social esperado, capacidad de inversión, etc.).

Por otra parte, las aproximaciones a la teoría de la probabilidad y su aplicación han sido diversas a lo largo de la historia. En este momento, es importante resaltar que la técnica seguida para inferir la probabilidad de fallo en el contexto de la seguridad de presas constituye una amalgama que utiliza los postulados clásicos, tradicionalistas y bayesianos (Hartford y Baecher).

A fin de aclarar brevemente la forma en que se aplicados los distintos postulados probabilísticos se utiliza un ejemplo sencillo. Es fácil comprender

la diferencia entre llevar a cabo un análisis de frecuencia con un “dado del parchís” (en esencia, igual que el de un Ingeniero Industrial cuando estudia las manchas en el capó de los coches a la salida de la factoría, un Aeronáutico cuando examina la resistencia de los remaches en un avión o un Ingeniero Civil cuando efectúa un ajuste a extremos hidrológicos con métodos clásicos) o analizar la “posición de los naipes” una vez barajados (en esencia, igual que cuando un Ingeniero Civil analiza el ángulo de fricción en una formación geológica o en el cuerpo de una presa).

El ejemplo de los “naipes” parece mucho más complejo que el del “dado de parchís”, y puede mostrar la necesidad del enfoque bayesiano cuando se dispone de muy pocos datos. No debe olvidarse que este enfoque tiene su mayor cabida en el contexto geotécnico o estructural donde se intenta modelizar sistemas complejos y habitualmente muy prefijados por la naturaleza (como una cimentación de presa o sus materiales).

Donde un Industrial tiene miles de muestras procedentes del árbol de levas de un coche, un Geotécnico dispone de escasos sondeos o ensayos. Esto hace que sea estrictamente necesario el uso del juicio ingenieril y la subjetividad.

Continuando con la estimación de la probabilidad condicional de rotura, existe múltiple y compleja bibliografía al respecto y, a menudo, se confunde entre sí métodos, conceptos y herramientas. No obstante, los pasos seguidos en el presente documento para definir la probabilidad de rotura mediante análisis han sido:

I. Definir un modelo que represente la respuesta del sistema; puede ser determinista o numérico. En este último caso se ha basado en diferencias finitas o simples cálculos.

En caso de ser determinista, lo habitual es utilizar una función de estado, como el clásico coeficiente de seguridad.

II. Describir los parámetros de entrada al modelo, tanto los fijados completamente como los considerados variables aleatorias. Para estas últimas, se ha utilizado la esperanza matemática y la desviación típica (momentos de primer y segundo orden), aunque siempre es deseable disponer una función de distribución.

III. Delimitar de forma concreta cuál es el criterio de fallo o rotura considerado; puede tratarse de una deformación o tensión máxima o un valor límite para el coeficiente de seguridad clásico.

IV. Escoger un método para describir estadísticamente los resultados obtenidos al utilizar el modelo de respuesta, con los parámetros de entrada estimados y el criterio de fallo escogido. Aquí es donde se ha obtenido la conclusión final materializada a través de:

- La función de distribución de la probabilidad de rotura.
- Un coeficiente de fiabilidad.

La mejor manera de estimar directamente la función de distribución de la probabilidad de rotura es a través de simulaciones por Monte Carlo. Se trata de una serie de experimentos numéricos efectuados con un modelo que puede ser de cualquier tipo, bien numérico, una fórmula matemática, un árbol de eventos, o una combinación de los mismos. Sólo precisa que las variables aleatorias de entrada sean definidas mediante su función de distribución o densidad (Harr; Kottegoda y Rosso y USBR).

En este trabajo no se ha utilizado las técnicas de Monte Carlo, aunque sí se ha estimado una partición en rangos para dicha función de distribución. Es decir, se ha obtenido de forma aproximada la integral de la función de densidad conjunta para todas las variables aleatorias involucradas. Para ello se ha empleado el coeficiente de fiabilidad, índice que proporciona una medida de la seguridad del sistema y refleja tanto la mecánica del problema como la incertidumbre en las variables aleatorias que lo condicionan (Harr y Kottegoda y Rosso). Se desarrolló en la ingeniería estructural para tener una medida de la fiabilidad relativa entre sistemas sin necesidad de conocer la forma exacta la función de distribución precisa para estimar la probabilidad de rotura.

Este índice es el número de desviaciones típicas que separan la esperanza matemática de la función de estado (el coeficiente de seguridad, por ejemplo) y su estado límite (ver Figura 3.1). Proporciona una medida relativa de la seguridad que obvia completamente la distribución de probabilidad que realmente tiene la función de estado.

En el presente caso, al querer obtener una probabilidad de fallo en lugar de esa medida relativa, se ha hecho necesario conocer la distribución de probabilidad que posee la función de estado. Aplicando el juicio ingenieril, se ha escogido una distribución lognormal y se ha obtenido la probabilidad de rotura a partir de esta función de distribución y el coeficiente de fiabilidad calculado.

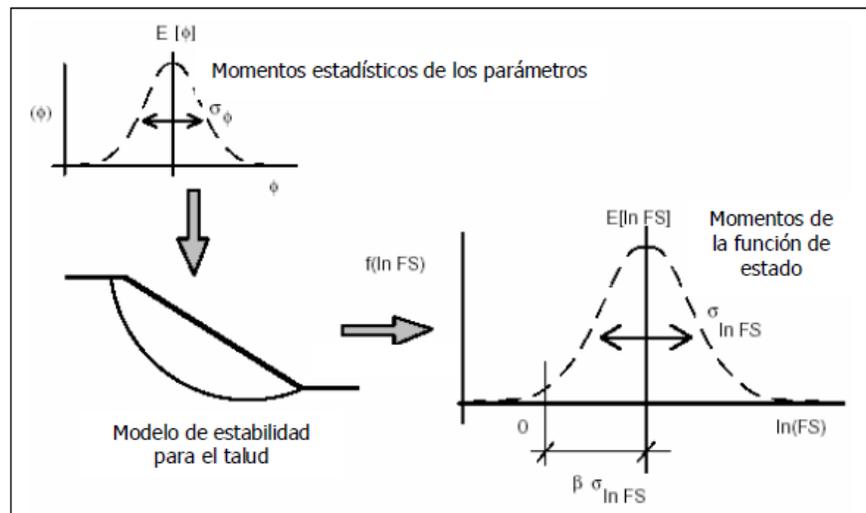


Figura 3.1. Índice de fiabilidad en la estabilidad de taludes. Fuente: Profesor Wolff en [107].

Los métodos habitualmente empleados para obtener el coeficiente de fiabilidad son los basados en la teoría lineal de segundo orden (FOSM) o los de primer orden (FORM).

En definitiva, permiten obtener distribuciones de probabilidad derivadas, es decir, asociadas a una función (la de estado) de diferentes variables aleatorias. La distribución de probabilidad asociada a esta función de estado depende de la distribución de probabilidad de las variables aleatorias que la forman así como de las relaciones funcionales del modelo de estado (que es un jacobiano). Al resultar la solución analítica para esa función de distribución derivada inabordable, se utiliza aproximaciones como las de los métodos mencionados (Mínguez [90]).

En el presente documento se ha aplicado la teoría lineal de segundo orden (FOSM) mediante el método de las Series de Taylor. Para calcular el coeficiente de fiabilidad (β) se ha obtenido los momentos de primer orden de

la función de estado (el coeficiente de seguridad “FS”) y, al haber asumido una distribución lognormal para la función de estado, el coeficiente de fiabilidad se ha obtenido según la expresión:

$$\beta = \frac{E[Ln(FS)] - Ln(FS_{crit})}{\sigma_{Ln(FS)}} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde (FS_{crit}) es el valor crítico escogido para la función de estado, es decir, aquel que delimita el estado límite que precede a la rotura o el funcionamiento incorrecto del sistema.

Para ello se ha efectuado un desarrollo en serie de Taylor de la función de estado alrededor de los valores medios. De esta manera, se puede demostrar que la esperanza matemática de la función de estado se obtiene evaluándola, a su vez, con la esperanza matemática de las variables aleatorias involucradas según:

$$E[Ln(FS)] = FS(E[X_1], E[X_2], \dots, E[X_n]) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde las (X_i) representan a las variables aleatorias (cohesión, ángulo de fricción, permeabilidad, módulo de elasticidad, etc.)

También es demostrable que la varianza de la función de estado se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Var[FS] = \sum \left(\frac{\partial FS}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 + 2 \sum \left(\frac{\partial FS}{\partial X_i} \frac{\partial FS}{\partial X_j} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde (ρ) es el coeficiente de correlación entre las variables aleatorias (X_i) y (X_j) y (σ) es la desviación típica de las variables aleatorias. En nuestro caso, al considerar estas últimas independientes entre sí, el segundo sumando de la ecuación se ha hecho cero.

Las derivadas parciales de la ecuación 3.3 son calculadas en el valor medio de cada una de las variables aleatorias y, en el presente trabajo, han sido estimadas numéricamente utilizando diferencias finita

Con lo anteriormente indicado, la probabilidad de rotura o funcionamiento incorrecto del sistema se ha aproximado a partir de la expresión:

$$Pr_f = 1 - \Phi(\beta)$$

(Ec. 3.4)

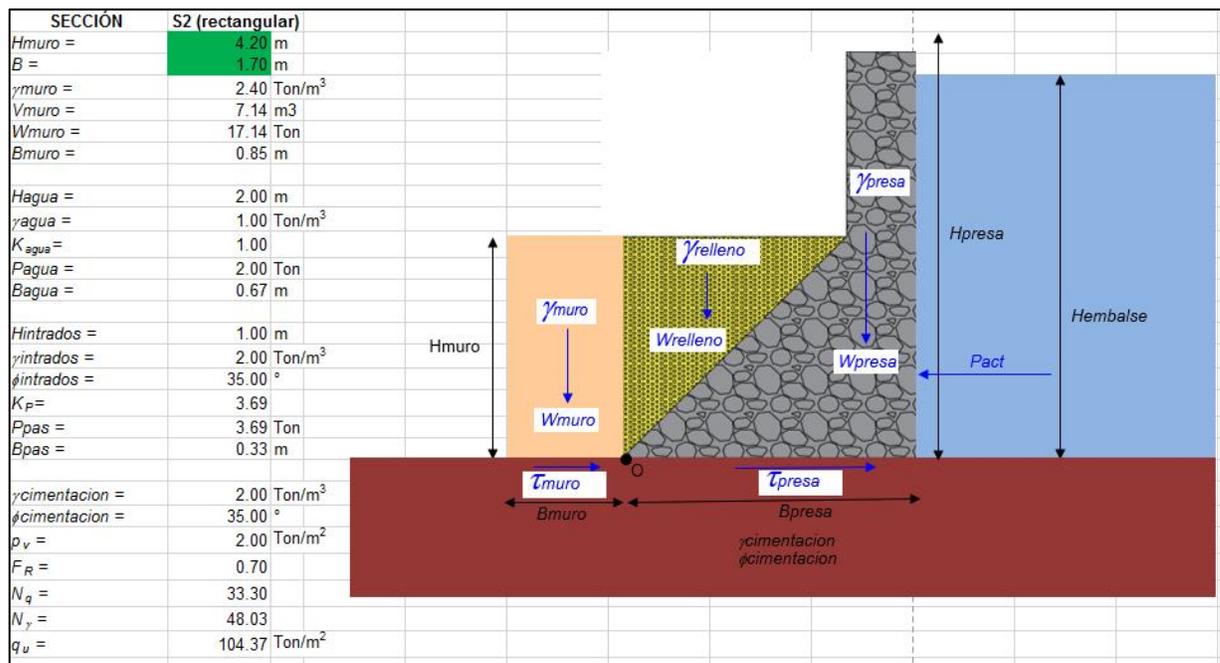
donde $\Phi(\beta)$ (implica evaluar una distribución normal estándar para el coeficiente de fiabilidad definido en la ecuación 3.1.

Por último, se hace mención a los *árboles de eventos*, también utilizados en el presente documento para evaluar probabilidades en el caso de los modos de rotura asociados al sifonamiento y la erosión interna. Con estas representaciones gráficas se refleja la secuencia lógica de ocurrencia para una serie de eventos o estados concretos del sistema. El árbol representa un modelo determinista de los estados funcionales binarios de la presa y aplica un análisis de tipo inductivo (Hartford y Baecher).

Cada uno de los nodos representa una situación en la que dos o más eventos, excluyentes entre sí, pueden acaecer habida cuenta de que los eventos existentes en un camino precedente al nodo ya han ocurrido. Por tanto, para cada una de las ramas que surgen del nodo se asigna una probabilidad condicional de ocurrencia de tal forma que todas sumarán la unidad. Aplicando la teoría matemática de la probabilidad (Harr) puede colegirse que multiplicando los valores a lo largo de uno de los caminos que atraviesan el árbol se obtiene la probabilidad de ocurrencia para el evento recogido en el último nodo.

Los árboles de eventos, realmente, no están vinculados directamente a ningún método probabilístico. De hecho, los valores de probabilidad en los nodos se han estimado mediante las diferentes formas ya mencionadas. En particular:

- Cálculo de la probabilidad de insatisfacción de algún criterio a partir de una función que tiene en cuenta la variabilidad de los parámetros involucrados y los modelos analíticos (aquí se enmarca los métodos FOSM).
- Cálculo de la probabilidad de ocurrencia empleando distribuciones de probabilidad generadas a partir de datos históricos sobre eventos similares y una vez ajustada una función a los registros disponibles.
- Estimación de la probabilidad de ocurrencia mediante un proceso que tenga en cuenta la opinión de expertos en la materia.



6. DIAGNÓSTICO

Delimitación de zonas de peligro y evaluación de las consecuencias

Esta parte se requiere conocer las consecuencias, tanto en número estimado de pérdida de vidas humanas como en costos estimados por los daños, con la finalidad de poder calcular el riesgo.

Evaluación de las Consecuencias

La parte correspondiente a la Actividad: **Evaluación del riesgo vigente y con las medidas de reducción consideradas**, se abordará con los siguientes procesos del Procedimiento Metodológico holístico para el análisis probabilista de la seguridad y la evaluación del riesgo de cada presa

En estos casos, se considerarán cuando menos tres alternativas de modificación para reducir o atenuar el riesgo a niveles aceptables. Las alternativas pueden incluir el caso de poner fuera de servicio la presa o restricciones de niveles de operación en el embalse.

En nuestro Procedimiento Metodológico Holístico (figura 3), contemplamos que las consecuencias que podría causar la falla geotécnica o estructural de la cortina, o por un problema operacional o funcional, incluyendo un desbordamiento que aunque no cause la falla de la obra de contención, sí podría causar consecuencias aguas debajo de la presa, se determinarán, en términos de dos clases de consecuencias:

- Pérdida de vidas humanas y heridos en la población.
- Consecuencias económicas, sociales y culturales.

Se utilizó la metodología de Wayne Graham para la estimación de las consecuencias en términos de pérdida de vidas humanas. También se aplicarán otras metodologías para estimar las consecuencias, principalmente las metodologías de:

- USBR (2006) de los USA
- BCHydro de Canadá
- SUFRI (Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management) de la UE
- Jonkman
- LIFESim

Para los daños económicos, sociales y culturales se utilizará principalmente la relación Tirante – Daños que expresa la relación entre el grado de destrucción y la profundidad del tirante de la corriente durante la inundación.

A nivel de nuestra participación en cuanto a la identificación, cálculos y evaluación de las consecuencias tanto en términos de pérdida de vidas humanas y heridos en la población como de daños económicos, sociales y culturales, determinar la amplitud (superficie), los tirantes y las velocidades en función del tiempo de la inundación que se provoque en los distintos escenarios; pero nosotros requerimos diferentes grados de intervención con la finalidad de poder calcular y evaluar el Riesgo y poder así desarrollar nuestro Procedimiento Metodológico de trabajo.

Análisis del Riesgo

El análisis del riesgo permitirá calcular los valores anualizados del riesgo, considerando la combinación matemática de las probabilidades de falla y las consecuencias, para determinar valores cuantitativos en términos de pérdidas de vida anual y de costo anual. En esta parte se desarrollaron aspectos y partes relativas a las cuestiones hidrológicas y determinación de las zonas de inundación, así como de los contornos de las velocidades y los tirantes del agua pasando por los poblados que encuentre la avenida a su paso aguas abajo de la presa.

Evaluación del Riesgo

La evaluación del riesgo se efectuaron considerando lo que incluye la NOM publicada por CONAGUA, pero también se emplearon otras referencias, con la finalidad de hacer aportaciones técnicas en términos de tolerancia de riesgo, distinguiendo cuando menos los siguientes casos (por utilizar la actualidad en ICOLD y otros), como son: Riesgo inaceptable, Riesgo tolerable, y Riesgo ampliamente aceptable.

Y traduciendo esos términos en niveles de Riesgo: Alto, Medio y Bajo, para darle conformidad con lo usual por la CONAGUA y el SISP, así como para no incurrir en responsabilidades legales en la ausencia de un trabajo más profundo que haya dado las normas oficiales mexicanas y legislación pertinente para su utilización en la práctica y la comunicación social.

7. ANTEPROYECTO DE ALTERNATIVA DE ATENUACIÓN DE RIESGO

SELECCIONADA

En función de los resultados, se proponen algunas medidas arquitectónicas, geotécnicas, estructurales, hidráulicas, operacionales, funcionales, alertamiento, etc., para reducir el riesgo.

La evaluación de factibilidad y efectividad de dichas medidas implica una retroalimentación parcial o total del procedimiento descrito en la figura 1, en donde se indica con flechas esta retroalimentación.

La presa San Juan de Coyotillos es una estructura que fue construida a mediados de la década de los setenta por el gobierno municipal y que en 1991 se decidió sobre elevar un metro por parte de los usuarios, para alcanzar la altura que actualmente tiene de aproximadamente 9 m. Cabe comentar que el ancho de la sobre elevación fue en general de 1.5 m, a excepción del tercio de margen derecha que quedó con un ancho de 0.55 m. En ese mismo periodo y para aumentar la estabilidad de la cortina se decidió construir 6.5 m aguas abajo, una estructura escalonada de mampostería, con lo que entre las dos estructuras se generó un tanque que fue rellenado con boleos. Actualmente ambas estructuras se aprecian en buen estado en términos generales, con pequeñas humedades y lloraderos sobre la cortina original, destacando la filtración por la cimentación que ha generado al pie de la estructura escalonada, una laguna con una profundidad máxima de 2 m y un pequeño flujo sobre el cauce aguas abajo que visualmente se calculó de 0.25 l/s.

Aunque originalmente la presa fue diseñada como cortina vertedora en toda su longitud, lo cual es justificable debido a que la presa se desplantó sobre las riolitas que afloran en la zona, lo que disminuye el peligro de socavación por efecto de las descargas, durante los trabajos de sobre elevación se construyó también a la derecha de la estructura escalonada, una rampa que aparenta ser el canal de descarga de un vertedor que no se concluyó. Esta rampa fue construida sobre los enrocamientos de la ladera derecha, es de concreto, tiene un ancho promedio de 4.5 m y comienza al nivel de la parte superior de la estructura escalonada, desde donde va descendiendo hasta descargar en el cauce. De acuerdo con lo observado, este vertedor se conectaría a la cortina en el lado derecho, precisamente en la zona donde la sobre elevación quedó más angosta, quizás para estos fines. Debido a que este vertedor aún no está terminado ni conectado a la cortina original, los excedentes aún vierten por encima de toda la corona y descargan directamente al tanque relleno de boleos, que hace la labor de tanque de amortiguamiento, para después bajar por la estructura escalonada y descargar al cauce.

Esta presa no cuenta con una obra de toma formalmente construida y solo tiene en el extremo derecho una batería de tres tubos de acero de 7.62 cm (3 pulgadas) de diámetro, instaladas a 1.20 m de la corona actual de la cortina, que se operan mediante mangueras de neopreno que se insertan en los tubos para extraer el agua por gravedad o bombeo.

Sobre el mismo cauce, a 300 m aguas abajo de la cortina fue construida una presa por la CONAZA, que capta los escurrimientos provenientes de las filtraciones para aprovecharlos con fines de abrevadero y para surtir de agua a un tanque construido también por CONAZA. Este tanque suministra agua al ejido San Juan de Coyotillos, cuyas primeras casas se ubican en las orillas del cauce a aproximadamente un kilómetro de la presa San Juan de Coyotillos, mismas que están protegidas con muros de mampostería para impedir que el agua les entre a sus predios, lo que ha generado que en algunos puntos se tengan reducciones del cauce original. Aunque la problemática que ha llevado a la presa San Juan de Coyotillos a ser declarada de **alto riesgo** está relacionado con la inundación de las casas aledañas al cauce en el ejido del mismo nombre, por las descargas de la presa, debe revisarse en el estudio de riesgo por inundación si la ubicación de estas viviendas está sobre la zona federal, lo que en su caso constituye una irregularidad por parte de los dueños.

Con base en los análisis realizados, se puede afirmar que la cortina tiene un nivel de peligro BAJO de inseguridad geotécnica tanto por los resultados de los análisis de estabilidad, que dieron como resultados factores de seguridad superiores a los mínimos exigidos, como porque no han indicios de que se pueda presentar una falla de cimentación provocada por el desbordamiento y los efectos de la caída del agua sobre las riolitas. Asimismo, por la tipología de la presa, diseñada para que el agua pase por encima de ella, puede concluirse que es SEGURA desde el punto de vista hidrológico y que la posible conclusión del vertedor que se comenzó a construir sobre la ladera derecha no eliminaría la problemática de las inundaciones a las casas ubicadas en las márgenes del cauce, aguas abajo de la presa, por lo que se debe considerar la construcción de obras de protección o la reubicación de dichas viviendas.

A continuación se presentan las recomendaciones para la rehabilitación de la presa San Juan de Coyotillos, buscando mejorar su operación y funcionamiento con lo que servirán como medidas preventivas orientadas a aumentar su seguridad.

Construcción del vertedor en la ladera derecha

La conclusión del vertedor sobre la ladera derecha, que se comenzó a construir durante los trabajos de sobre elevación de la cortina en 1991, evitaría que el agua pasara por encima de la presa, con lo que se evitaría el deterioro estructural de la cortina por dicho efecto. De acuerdo con la revisión hidrológica e hidráulica realizada, se propone una longitud de cresta de 20.29 m, con el NAMO al nivel de la corona actual para no disminuir el nivel actual de almacenamiento. Con esta longitud de cresta y con las características actuales de la cortina, la carga máxima sobre la cresta para un periodo de retorno de 10,000 años es de 0.587 m, lo que sumado a un bordo libre de 0.5 m, requeriría que el resto de la presa fuera sobre elevada 1.10 m, en números cerrados. Esta sobre elevación se recomienda se haga con un muro de concreto anclado sobre la mampostería, por lo que se deben realizar con mucho cuidado los cortes para alojar al muro, evitando el excesivo deterioro de la cortina. Además de la sobre elevación, la conclusión del vertedor requiere sea completada la sección de la corona actual del lado derecho de la presa, que funcionará como cresta, hasta alcanzar un ancho de 1.5 m, que es el que tiene el resto de la cortina. Asimismo se requiere construir los muros laterales sobre la rampa de concreto que actualmente existe, para formar el canal de descarga que entrega el flujo al cauce, alejada de la estructura escalonada, con lo que se evitaría aumente la socavación que actualmente existe al pie de dicha estructura.

Mantenimiento de la cortina

La cortina no presenta agrietamientos ni otros problemas estructurales pero, como ya se comentó en el punto anterior, para concluir el vertedor en margen derecha, requiere que sea completada la corona en ese extremo para formar la cresta del vertedor. Asimismo, para eliminar las humedades y lloraderos detectados en la parte superior de la presa, debe repellarse el paramento aguas arriba con un mortero cemento-arena con suficiente plasticidad para evitar su agrietamiento por la continua exposición al medio ambiente y, sobre todo, a la temperatura que genera ciclos de expansión y contracción en la mampostería.

Rehabilitación de la socavación en la base de la estructura escalonada

Inicialmente es necesario revisar la zona al pie de la estructura escalonada cuando el embalse esté seco, ya que es probable que la socavación debido a la acción combinada de las filtraciones a través del terreno de cimentación y las descargas de

la presa, que actualmente tiene una profundidad de hasta 2 m, se haya generado sobre los materiales sueltos depositados sobre el cauce y no sobre la riolita aflorante en el sitio ya que durante la inspección había una laguna que impidió evaluar esta situación. Se supone que las estructuras están desplantadas sobre la roca porque en la inspección no se observaron grietas que indicaran asentamientos o fallas estructurales en la cortina o en la estructura escalonada, que se esperarían ante una socavación de tal magnitud.

Sin embargo, en el caso de que se detectaran socavaciones o afectaciones en la roca de cimentación, se debe entonces reforzar la zona en cuestión colocando un relleno de concreto ciclópeo y acero de refuerzo en el lecho inferior, con la inclusión de boleos de hasta 30 cm. El bloque de concreto ciclópeo debe quedar fijado al terreno natural mediante un conjunto de anclas de acero fabricadas con varilla corrugada de una pulgada de diámetro y soldadas al acero de refuerzo.

Instalación de una obra de toma baja o de desfogue

En las condiciones actuales la presa Coyotillos no cuenta con una obra de toma formal para el aprovechamiento del agua del embalse o para bajar el nivel en caso de una emergencia, por lo que debe considerarse la instalación de una en la parte baja de la cortina, con equipamiento formal consistente en un sistema de válvulas de emergencia y servicio, así como con el resto de los accesorios que complementen el tren de descarga, debidamente protegidas para evitar que se operen de manera inadecuada o sean vandalizadas. La realización de estos trabajos requiere que el embalse esté seco para ubicar la obra de toma a un nivel que permita el máximo aprovechamiento del agua del embalse. Debe considerarse también el retiro en la zona donde se ubique la obra de toma, de los boleos que forman el relleno aguas abajo de la cortina, así como la afectación a la estructura escalonada para el paso de la tubería. Tomando como referencia los tres tubos por los que actualmente se extrae el agua del embalse, se propone una obra de toma de 25.4 cm (10 pulgadas) de diámetro.

8. REFERENCIAS

- Inciso 4.2 Estudio formal del riesgo, expresados en la Norma Mexicana NMX-AA-175-SCFI-2015 "Operación segura de presas. Parte Uno. Análisis de Riesgo Y
- "Clasificación de presas", Secretaría de Economía, 2015.
- Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-175/2-SCFI-2015 "Operación segura de presas. Parte 2. Inspecciones de seguridad", Secretaría de Economía
- Capítulo 11. Practica! Risk Assessment for Embankments, Dams, and Slopes, del libro Risk and Reliability in Geotechnical Engineering, Silva-Tulla F., Altarejos-García L., Escudero-Bieno I., Morales-Torres A. Taylor and Francis Book, 2015.
- Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability, US Army Corps of Engineers, Schultz Martin T., Gouldby Ben P., Simm Jonathan D. , Wibowo Johannes L. July 2010. ERDC SR-10-1.
- Capítulo 4.1. Programa de estudios de inundaciones fluviales para las ciudades medias del país, Primera Etapa. Zona de Coatzacoalcos-Minatitlán-Cosoloacaque. Conagua-Instituto de Ingeniería, UNAM. 2015
- Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis. Evaluación de Riesgo
- Geotécnico-Estructural de Presas y Bordos. Curso SMIG-USACE, Ciudad de México
- 2015.
- Lineamientos para la Elaboración de Mapas de Peligro por Inundación, Subdirección General Técnica, Gerencia de aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, 2014.

- Evaluación de la Longitud de Peligro por Rompimiento de Bordos de Almacenamiento con capacidad menor a 250,000 m³, XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco Guerrero, México, Noviembre, 2012.
- Manual de diseño de obras civiles, diseño por sismo, 2015.
- Manual para Capacitación en Seguridad de Presas USBR-CONAGUA, 2000.
- Manual de la US Army Corps of Engineers EM 1110-2-1902, octubre de 2003, "Slope Stability"
- Manual de la US Army Corps of Engineers EM 1110-2-2200, junio de 1995, "Gravity Dam Design.
- Basic Geotechnical Description of Rock Masses. International Society of Rock Mechanics (ISRM).
- A physically based model for scour prediction at Srisailem dam. Ballaert, EFR, Masan, P.J. Hydropower & Dams, Issue Four, 2006.
- Selecting seismic parameters for large dams, International Commission on Large Dams (ICOLD), Bulletin 72, 2010

ANEXOS

ANEXO 1 INFORMACIÓN RECOPIADA

ANEXO 2 INFORME DE INSPECCIÓN

ANEXO 2.1 ÁLBUM FOTOGRÁFICO

ANEXO 3 RESULTADOS DE CAMPO Y LABORATORIO

ANEXO 3.1 TOPOGRAFÍA DE LA CORTINA

ANEXO 3.2 TOPOGRAFÍA DE CAUCE AGUAS ABAJO

ANEXO 3.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO

ANEXO 4 ANÁLISIS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

ANEXO 5 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

ANEXO 6 REVISIÓN DE ESTABILIDAD DE LA CORTINA

ANEXO 7 REVISIÓN FUNCIONAL Y OPERACIONAL DE LA PRESA

ANEXO 8 ZONAS DE PELIGRO

ANEXO 9 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

ANEXO 10 DISEÑO CONCEPTUAL DE MITIGACIÓN DE RIESGOS