

**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 ANTONIO DE LA PEGAJOSA**

**NOMBRE COMÚN: SAN ANTONIO DE LA PEGAJOSA**

**ID 0445**



**MUNICIPIO DE PARRAS**

**ESTADO DE COAHUILA**

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

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>EVALUACIÓN DEL RIESGO Y DIAGNÓSTICO.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>1</b>
<b>3. ALCANCE.....</b>	<b>1</b>
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>2</b>
<b>5. ANÁLISIS DE RIESGO.....</b>	<b>7</b>
<b>6. DIAGNÓSTICO .....</b>	<b>26</b>
<b>7. ANTEPROYECTO DE ALTERNATIVA DE ATENUACIÓN DE RIESGO SELECCIONADA .....</b>	<b>28</b>
<b>8. REFERENCIAS .....</b>	<b>29</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 1 INFORMACIÓN RECOPIADA.....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 2 INFORME DE INSPECCIÓN.....</b>	<b>31</b>
ANEXO 2.1 ÁLBUM FOTOGRÁFICO .....	31
<b>ANEXO 3 RESULTADOS DE CAMPO Y LABORATORIO .....</b>	<b>31</b>
ANEXO 3.1 TOPOGRAFÍA DE LA CORTINA .....	31
ANEXO 3.2 TOPOGRAFÍA DE CAUCE AGUAS ABAJO .....	31
ANEXO 3.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO .....	31
<b>ANEXO 4 ANÁLISIS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS .....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 5 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO.....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 6 REVISIÓN DE ESTABILIDAD DE LA CORTINA .....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 7 REVISIÓN FUNCIONAL Y OPERACIONAL DE LA PRESA .....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 8 ZONAS DE PELIGRO.....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 9 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 10 DISEÑO CONCEPTUAL DE MITIGACIÓN DE RIESGOS.....</b>	<b>31</b>

## **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.

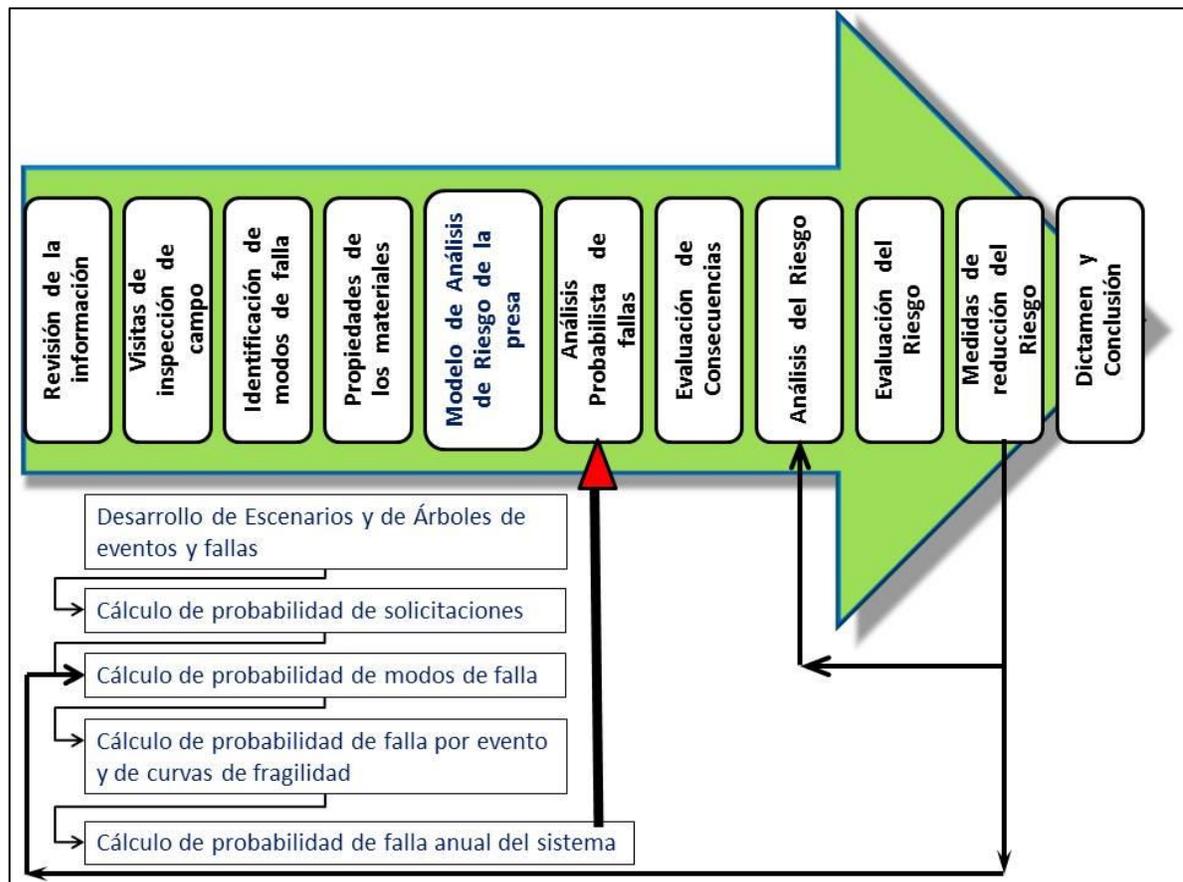
### **Revisión de la información**

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.

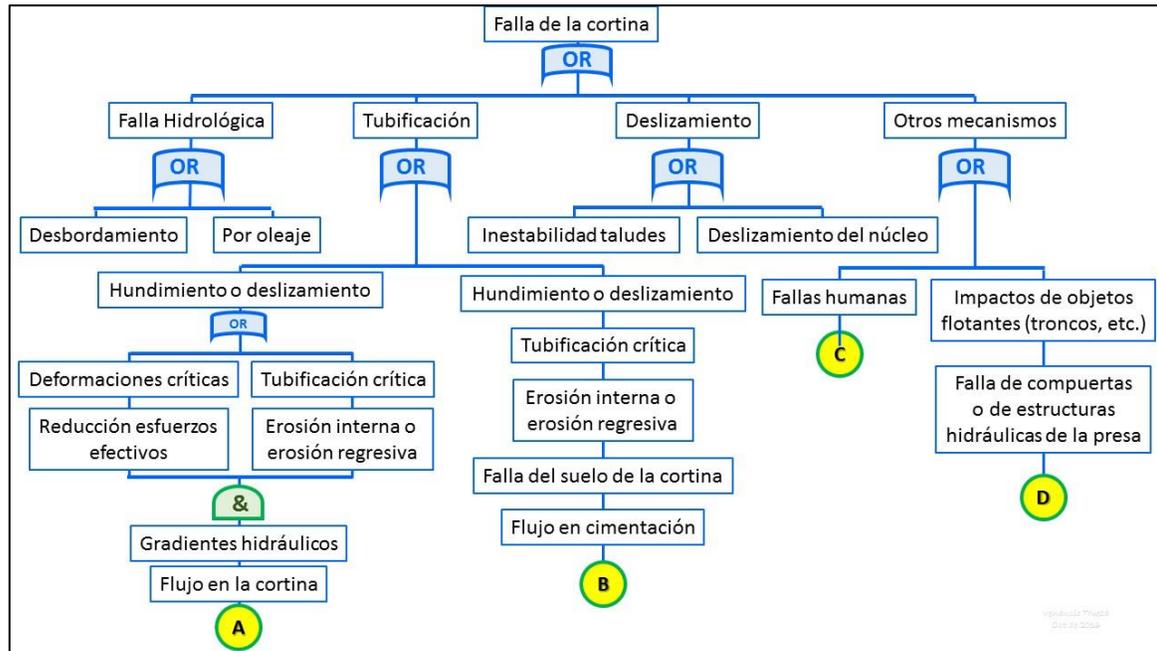
Se desarrolló un árbol de eventos para identificar las diferentes causas y mecanismos para configurar los modos de falla de la cortina, ya que estos modos podrían conducir a la falla de la presa.

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.**

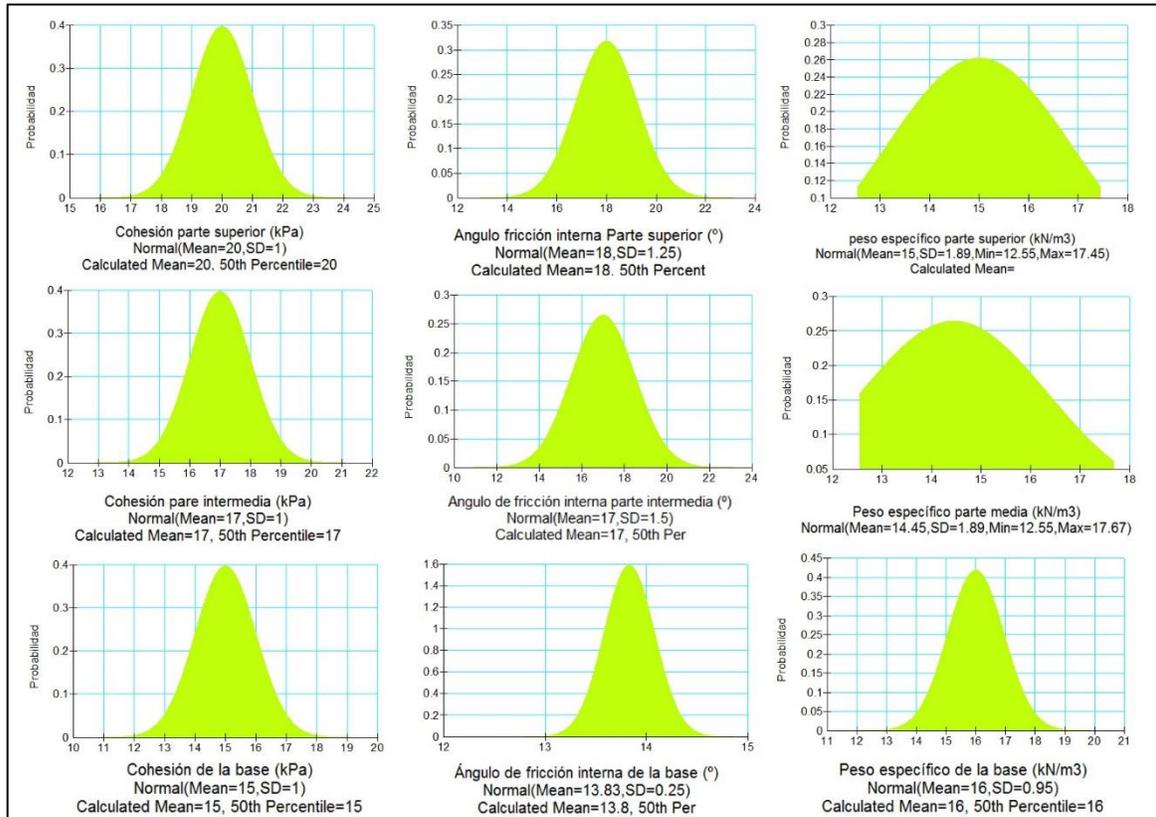
### Propiedades de los materiales

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**

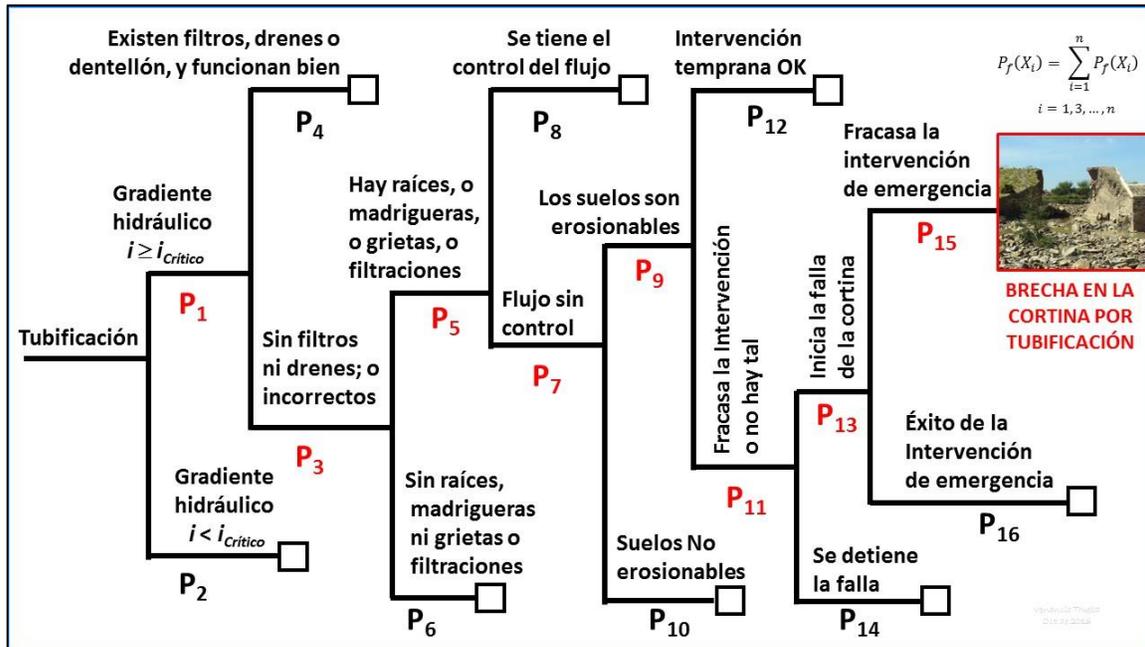
### **Análisis probabilista de fallas por tubificación**

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

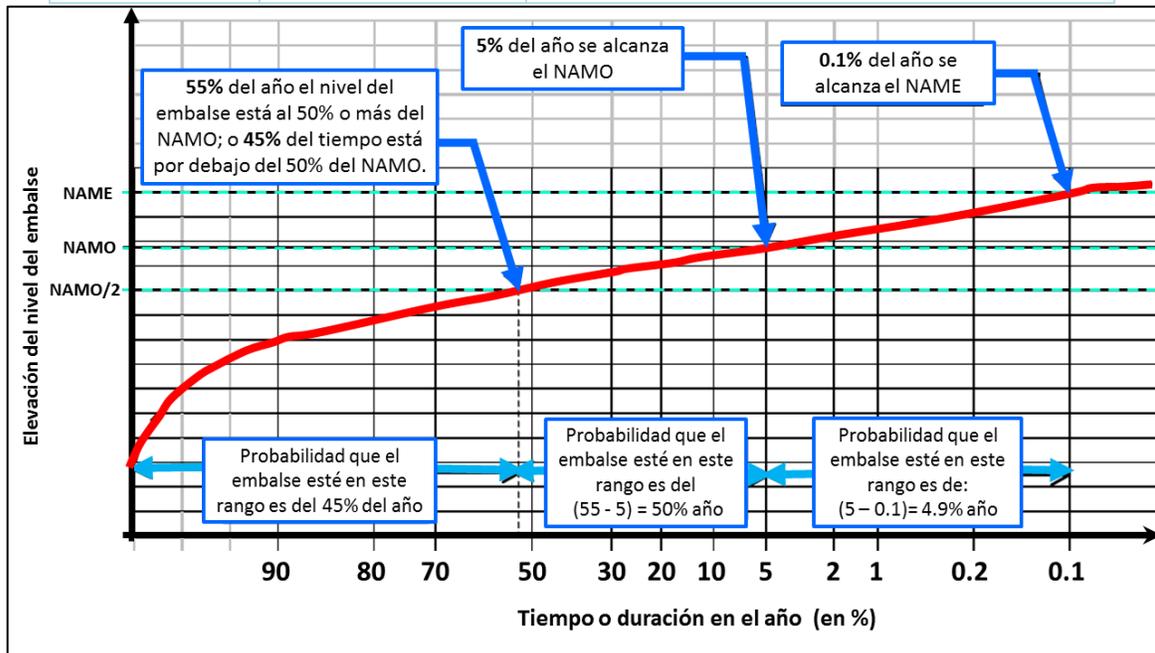
Para el análisis del problema de tuberización de la presa, se recurrió a los valores y rangos de las solicitaciones hidrológicas, que se presentan en el Capítulo correspondiente, y a partir de ello se eligieron las condiciones de operación de la presa que se presentan en la tabla siguiente.

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
<b>Normal</b>	$3.33 \times 10^{-1}$	Nivel del agua a la cresta de vertido
<b>Inusual</b>	$1.00 \times 10^{-4}$	Llenado total del vaso (NAME)

<b>Inusual</b>	$6.67 \times 10^{-3}$	Vaciado rápido de la presa (6 h)
<b>Inusual</b>	$1.00 \times 10^{-2}$	Llenado rápido de la presa (4 h)
<b>Extrema</b>	$1.00 \times 10^{-3}$	Sismo Máximo Creíble
<b>Inaceptable</b>	$1.00 \times 10^{-5}$	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

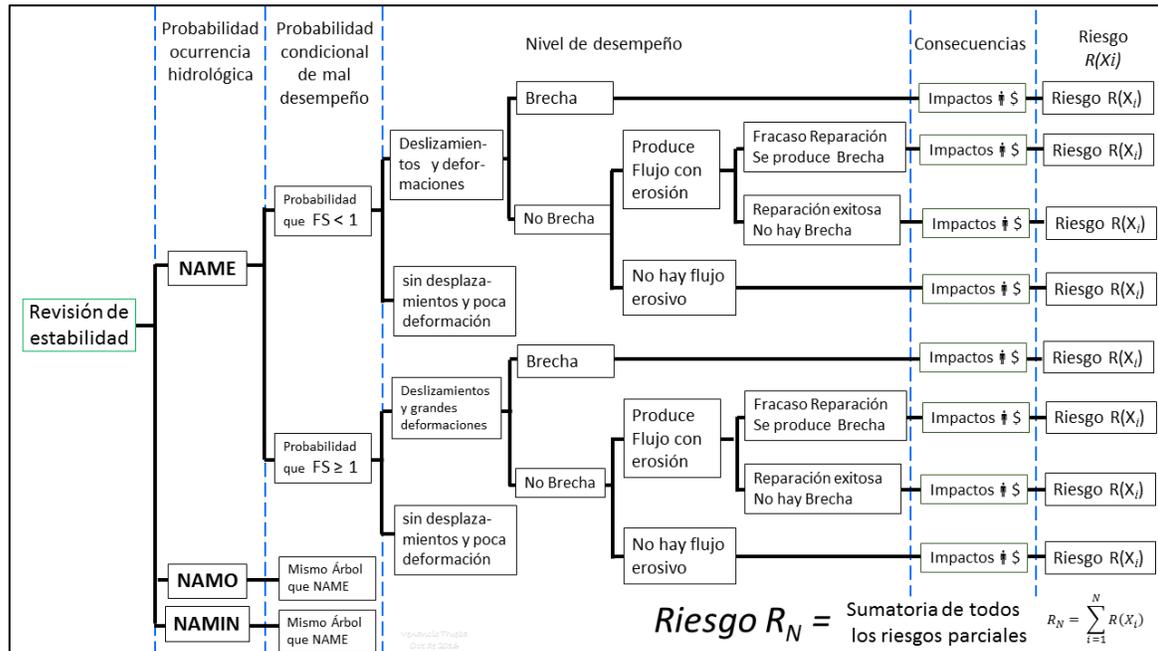
### **Análisis probabilista de fallas por deslizamiento**

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 1.6 Árbol de eventos de la presa por deslizamiento.**

### Cálculo de probabilidad de solicitaciones

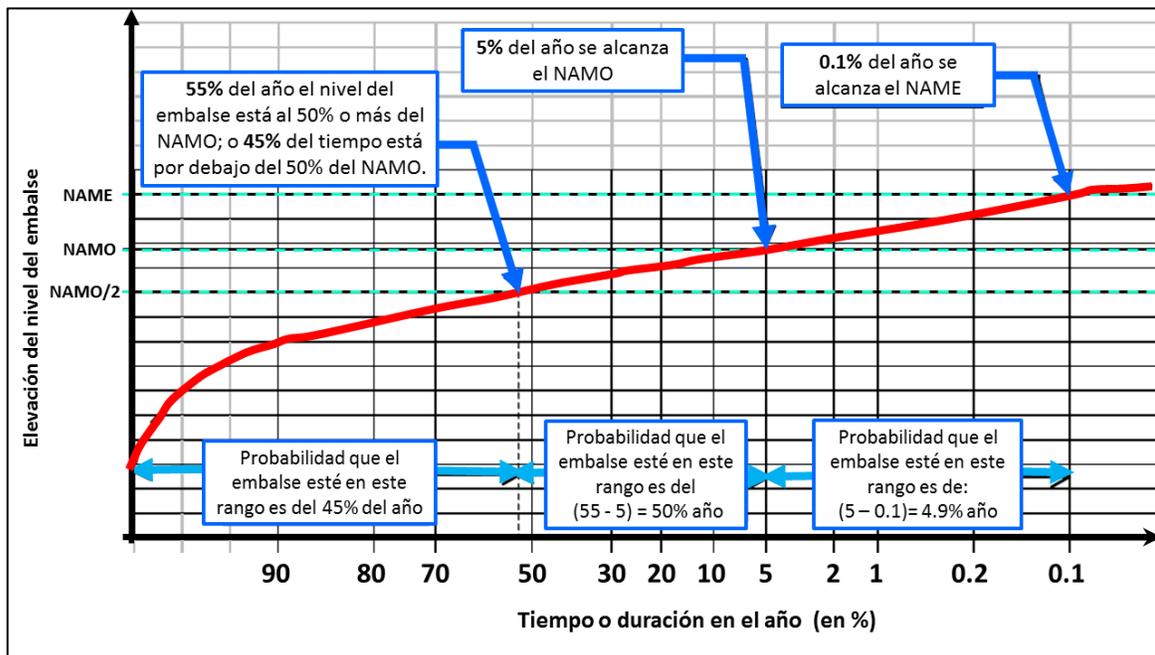
Para el análisis del problema de tubificación de la presa, se recurrió a los valores y rangos de las solicitaciones hidrológicas, que se presentan en el capítulo correspondiente, y a partir de ello se eligieron las condiciones de operación de la presa que se presentan en la tabla siguiente.

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
<b>Normal</b>	$3.33 \times 10^{-1}$	Nivel del agua a la cresta de vertido (NAMO)
<b>Inusual</b>	$1.00 \times 10^{-4}$	Llenado total del vaso (NAME)
<b>Inusual</b>	$6.67 \times 10^{-3}$	Vaciado rápido de la presa (6 h)
<b>Inusual</b>	$1.00 \times 10^{-2}$	Llenado rápido de la presa (4 h)

Operación	Prob Ocurrencia	Observaciones
<b>Extrema</b>	$1.00 \times 10^{-3}$	Sismo Máximo Creíble
<b>Inaceptable</b>	$1.00 \times 10^{-5}$	Desbordamiento de la cortina por 1 h o más



**Figura 1.7 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**

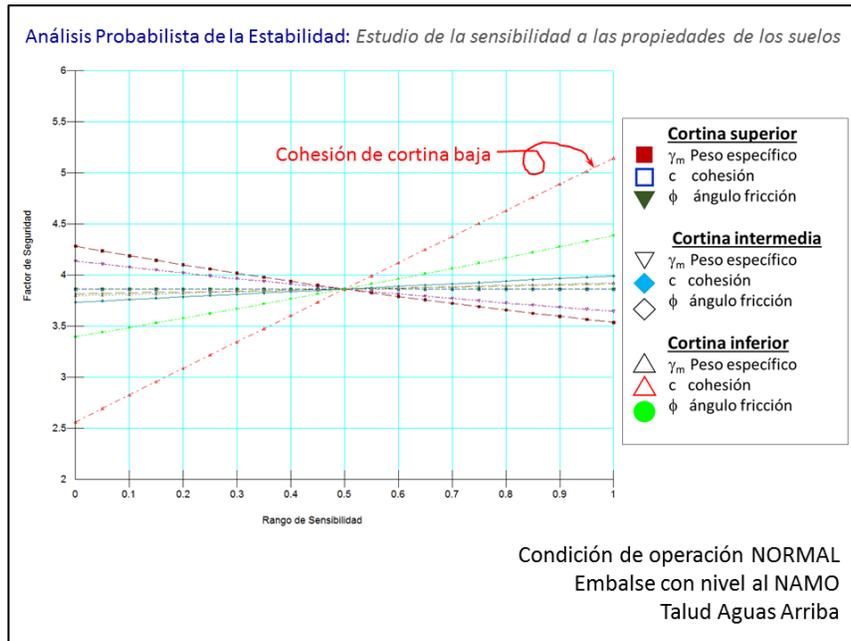
En adición, se efectuó un estudio geoestadístico de la seguridad de la cortina en cuanto que se hicieron paquetes considerando diez combinaciones de propiedades mecánicas para estudiar la sensibilidad de la estabilidad de los respaldos y taludes mojado y seco de la cortina, ante el cambio de las propiedades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

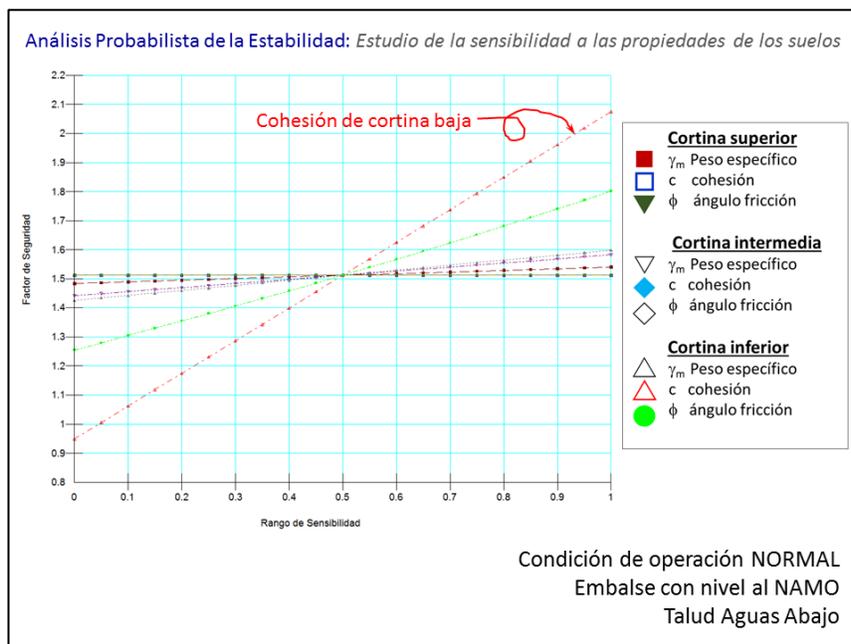
hicieron variar y que sirvieron para hacer las combinaciones y los cálculos, y en el eje de las ordenas se presenta el valor del factor de seguridad calculado para cada caso de análisis.

En la Figura 1.8 y la Figura 1.9, se presentan los resultados obtenidos en condiciones de operación normal, es decir, con el embalse a nivel del NAMO. En la Figura 1.10 y la Figura 1.11, se presentan los resultados calculados de la sensibilidad en condiciones de operación inusual con el embalse a nivel del NAME.

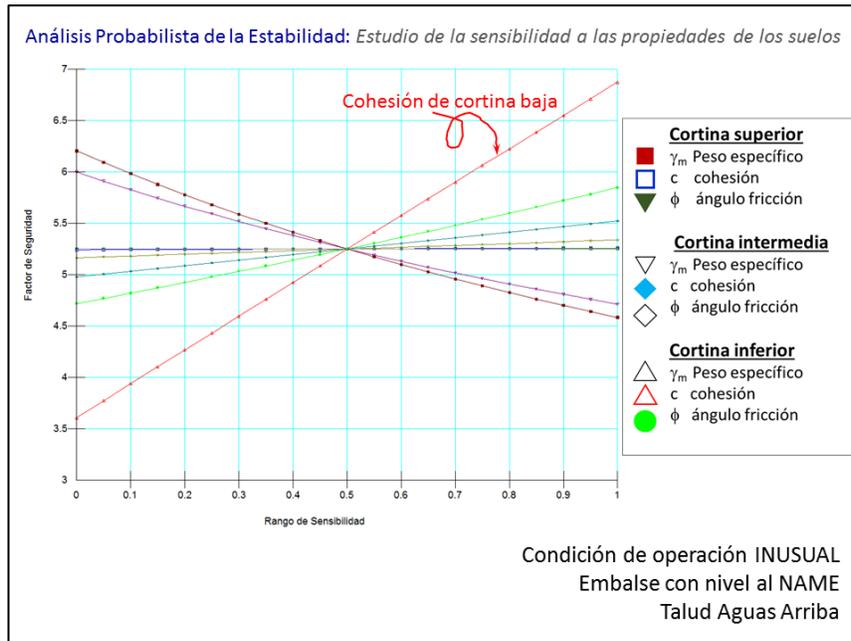
En la Figura 1.12 y la Figura 1.13, se presentan los resultados en condiciones de operación inusual por vaciado rápido del vaso simulando que el nivel del embalse pasa del NAME al NAMIN por la apertura de una brecha o tubificación importante. En la Figura 1.14 y la Figura 1.15, se presentan los valores 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 1.16 y la Figura 1.17, 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.



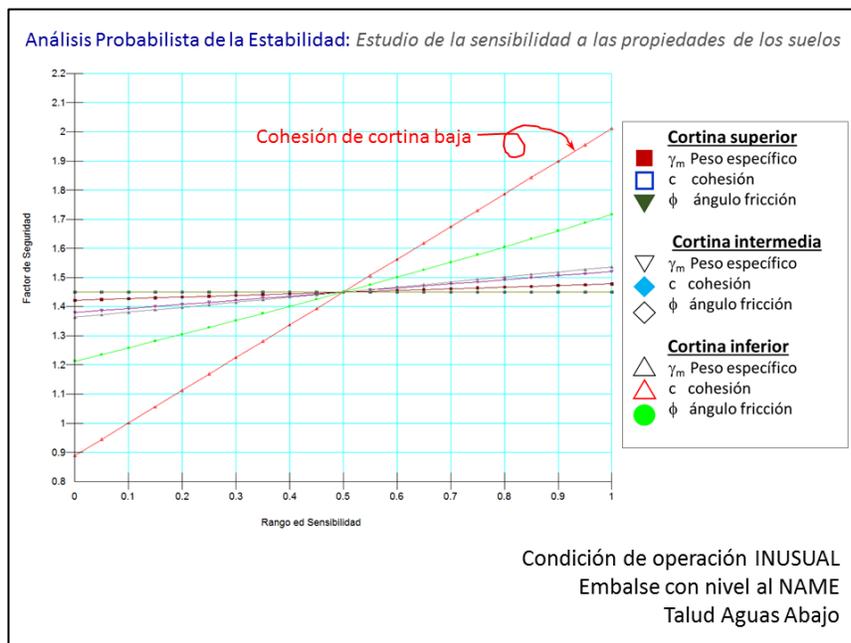
**Figura 1.8** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado con el embalse al NAMO.



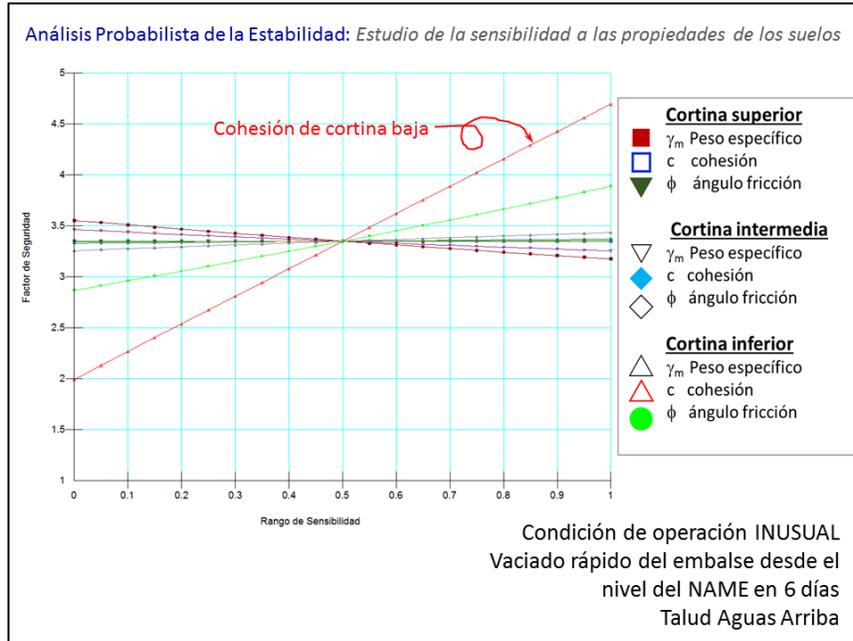
**Figura 1.9** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco con el embalse al NAMO.



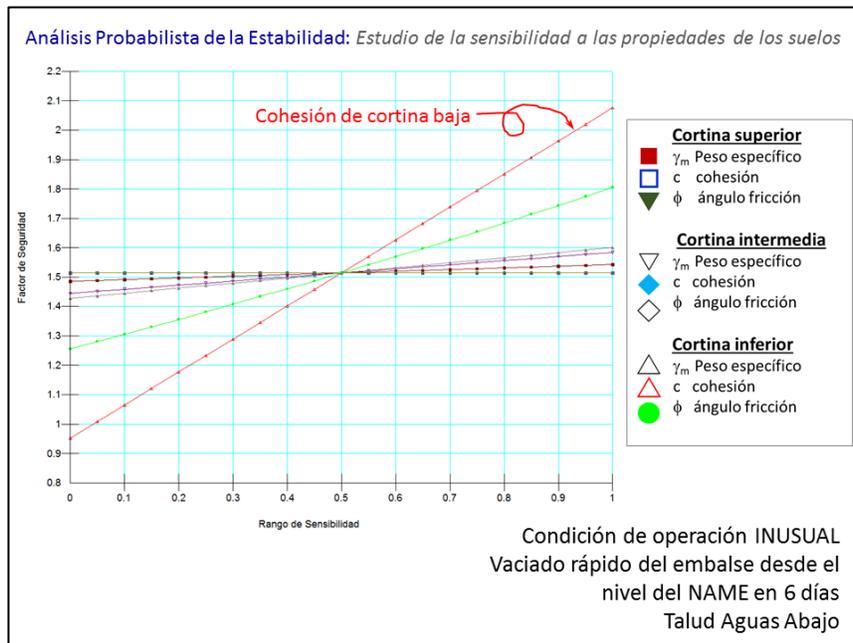
**Figura 1.10** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado con el embalse lleno al NAME.



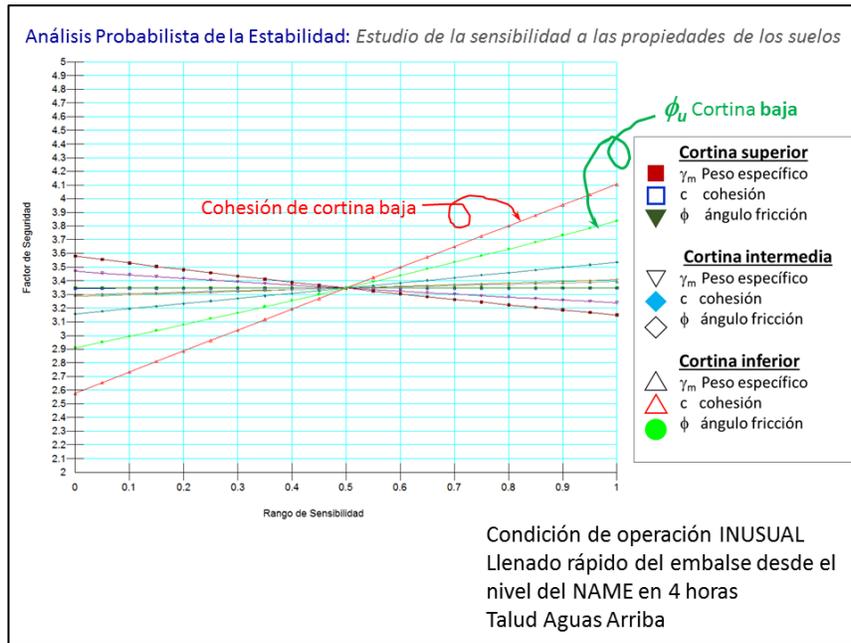
**Figura 1.11** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco con el embalse lleno al NAME.



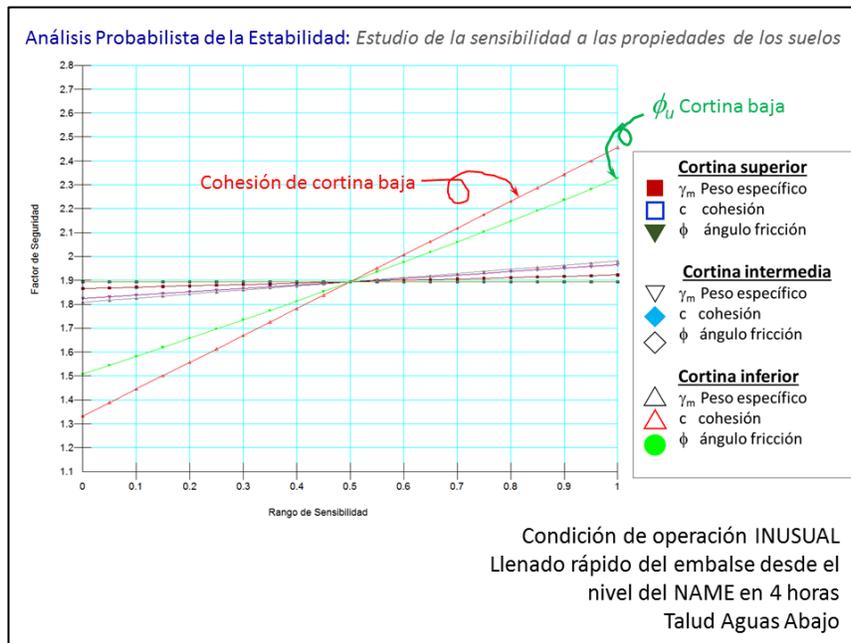
**Figura 1.12** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado durante un vaciado rápido.



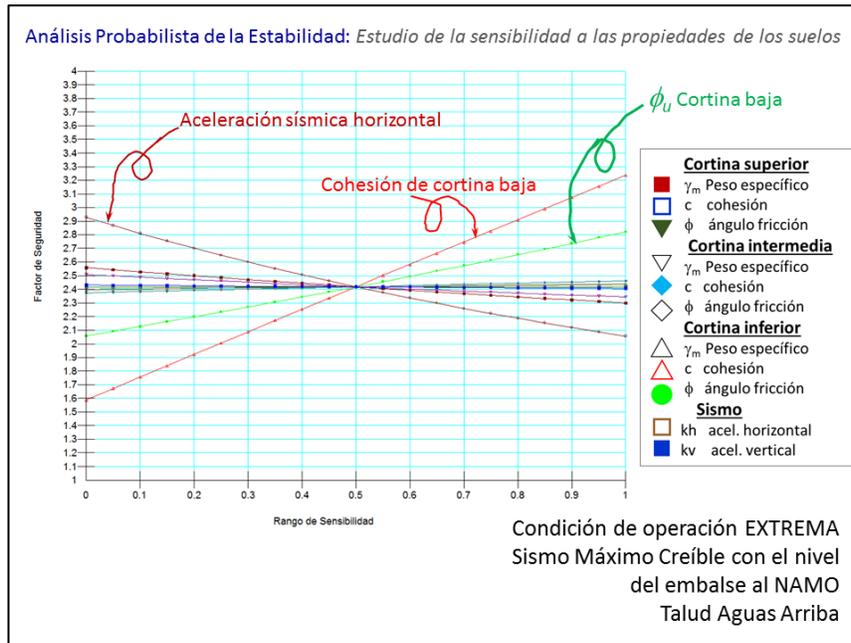
**Figura 1.13** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco durante un vaciado rápido.



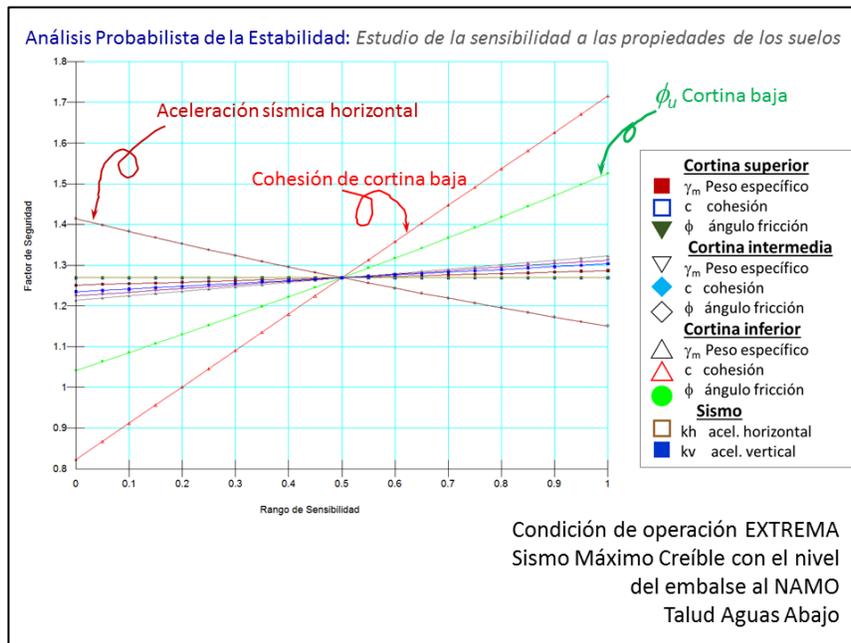
**Figura 1.14** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud mojado durante un llenado rápido.



**Figura 1.15** Análisis de sensibilidad y estabilidad del talud seco durante un llenado rápido.



**Figura 1.16** Análisis de sensibilidad y del talud mojado durante el sismo y nivel del NAMO.



**Figura 1.17** 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 al 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.

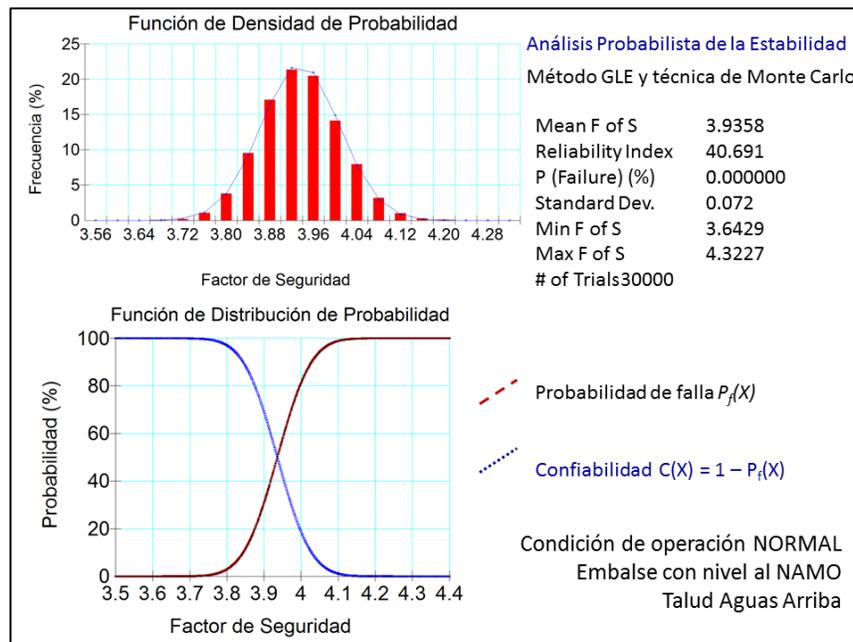
### **Cálculo de la probabilidad de falla por deslizamiento**

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.

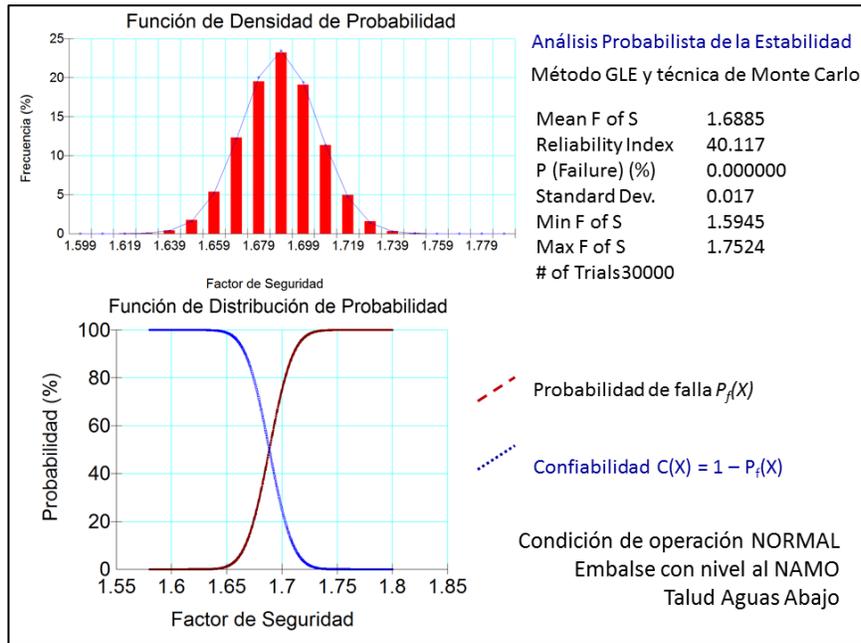
De esta manera, a continuación se presentan los resultados de los análisis probabilistas de la seguridad de la cortina mediante el método generalizado de estado límite o GLE para el análisis de estabilidad de cada caso de composición de propiedades de los suelos, determinado en caso mediante el Método 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.

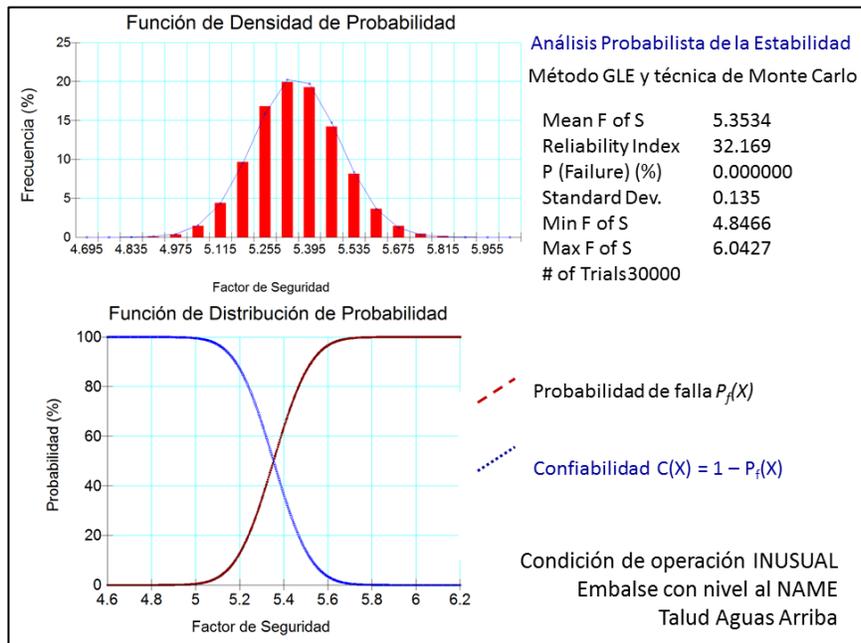
En la y la se presenta el análisis probabilista de seguridad de la cortina en condiciones de operación normal, es decir, con el embalse a nivel del NAMO. En la y la se presenta el análisis probabilista de seguridad de la cortina en condiciones de operación inusual con el embalse a nivel del NAME. En 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.



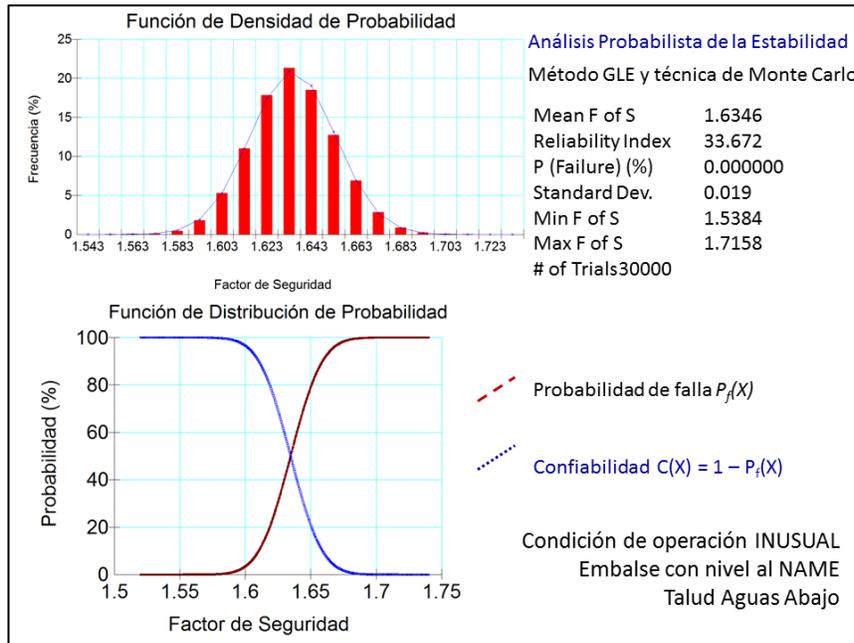
**Figura 1.18 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado con el embalse al nivel del NAMO.**



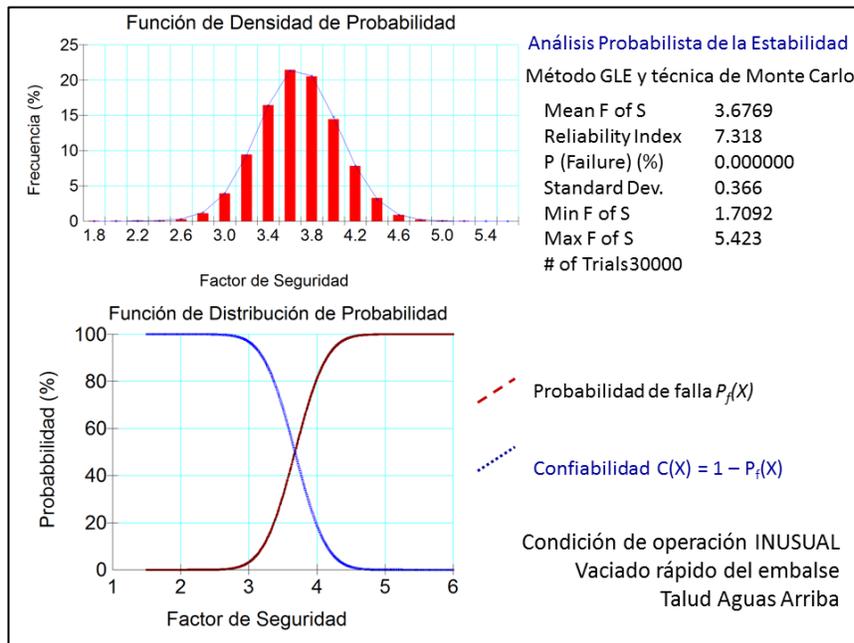
**Figura 1.19 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco con el embalse al nivel del NAMO.**



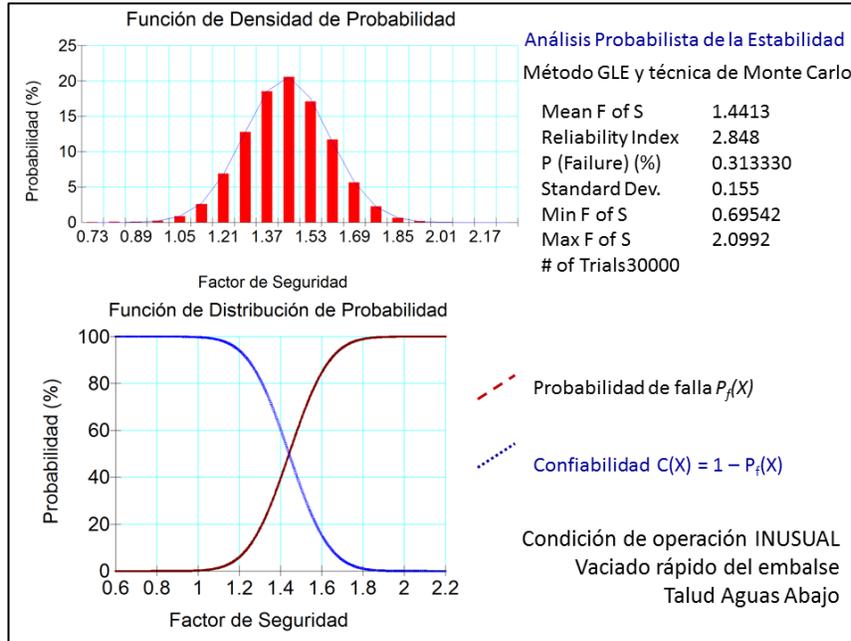
**Figura 1.20 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado con el embalse lleno al NAME.**



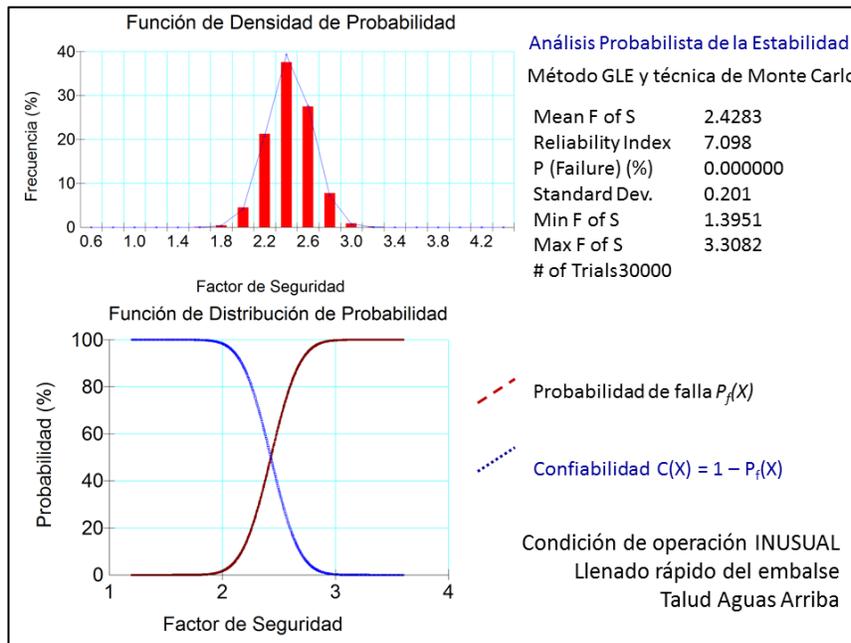
**Figura 1.21 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco con el embalse lleno al NAME.**



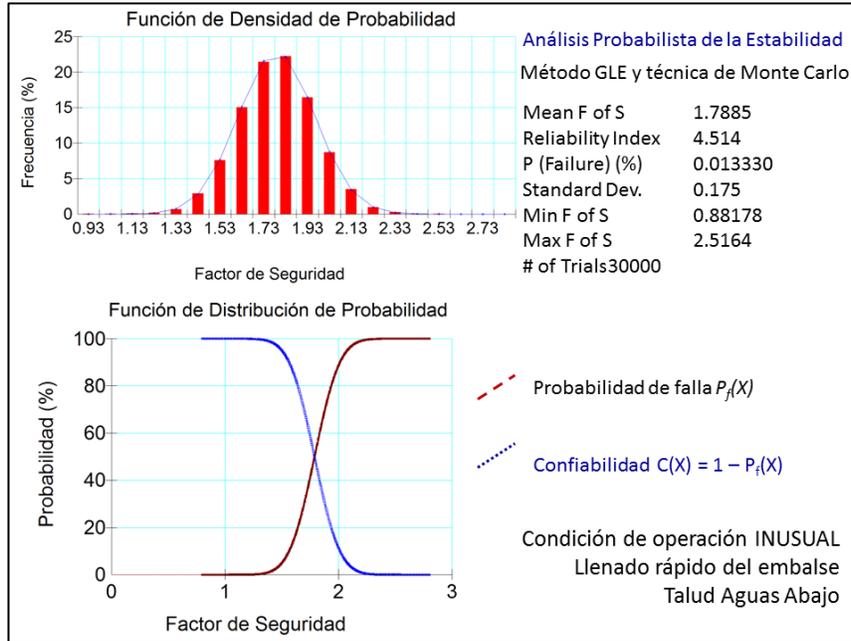
**Figura 1.22 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado durante un vaciado rápido.**



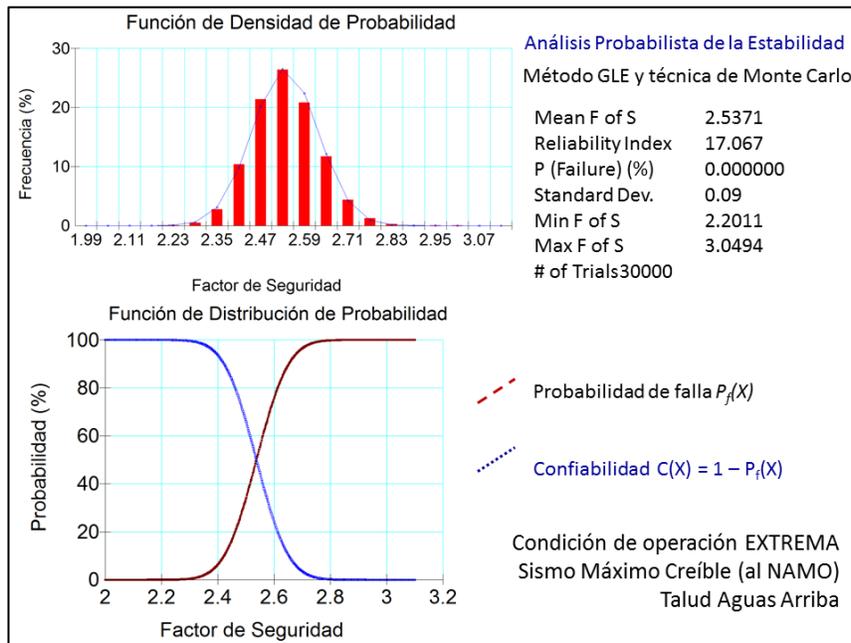
**Figura 1.23 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco durante un vaciado rápido.**



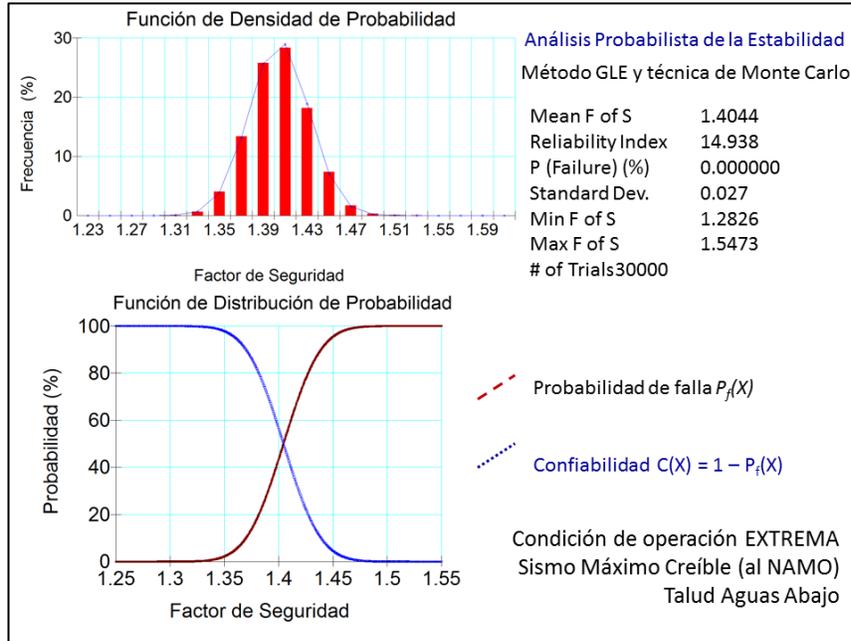
**Figura 1.24 Análisis probabilista de estabilidad del talud mojado durante un llenado rápido.**



**Figura 1.25 Análisis probabilista de estabilidad del talud seco durante un llenado rápido.**



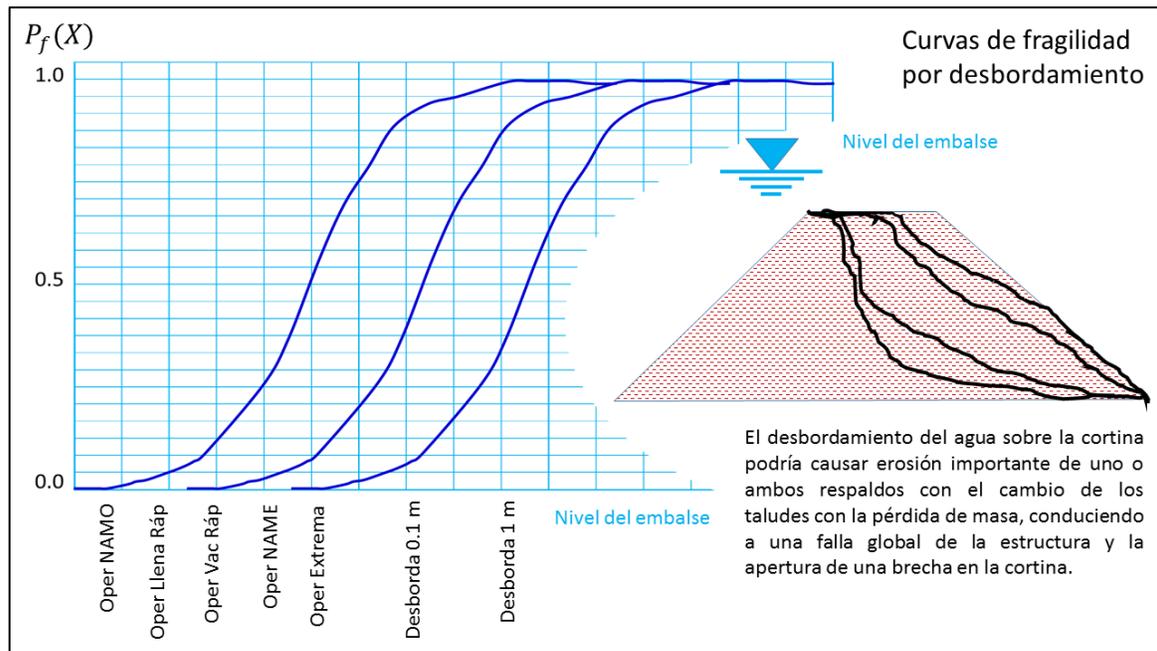
**Figura 1.26 Análisis probabilista del talud mojado durante el sismo con embalse al nivel del NAMO.**



**Figura 1.27 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 1.28 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.

## **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.

## 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 m<sup>3</sup>, 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. Hydropwer & 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**