



***EVALUACIÓN DE COSTOS
POR FALLAS EN PRESAS DE TIERRA:
UN CASO EN EL ESTADO DE MÉXICO***

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

JOSÉ EMMANUEL RIVERO SANTANA

ASESOR DE TESIS:

DR. DAVID JOAQUÍN DELGADO HERNÁNDEZ

TOLUCA, MÉXICO, MARZO DE 2009



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Cerro de Coatepec, s/n Ciudad Universitaria,
Toluca, Méx. C.P. 50130
Tel.: (01-722) 2 14 08 55 Fax: 2 15 45 12



DEPTO. DE TITULACIÓN
OF. CAP. No. XV/MMIX

Toluca, Edo. de México a 23 de marzo de 2009.

**C. JOSÉ EMMANUEL RIVERO SANTANA,
PASANTE DE INGENIERÍA CIVIL
P R E S E N T E**

En contestación a su solicitud, transcribo el tema que, aprobado por la Dirección de esta Facultad, propuesto y dirigido por el **DR. DAVID JOAQUÍN DELGADO HERNÁNDEZ**, el cual ha sido desarrollado como trabajo escrito para su titulación en la modalidad de Tesis para que proceda a presentar su Evaluación Profesional.

“EVALUACIÓN DE COSTOS POR FALLAS EN PRESAS DE TIERRA: UN CASO EN EL ESTADO DE MÉXICO”

		Introducción
Capítulo	1	Presas, definición, tipos y usos
Capítulo	2	Método de evaluación de costos por fallas en obras de infraestructura
Capítulo	3	Aplicación de los métodos a un caso particular en presa de tierra en el Estado de México
Capítulo	4	Análisis y discusión de resultados
		Conclusiones
		Referencias y bibliografía
		Anexos

Ruego a usted tomar nota de que, en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Asimismo, para la elaboración de la Tesis y demás trámites, deberá sujetarse a la Reglamentación respectiva a esta Universidad.

**ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO**

“2009, Año del Siervo de la Nación, José María Morelos y Pavón”



**FACULTAD DE INGENIERÍA
U.A.E.M.**

**DR. EN ING. MARTÍN CARLOS VERA ESTRADA
DIRECTOR**

MCVE/arr

La universidad pública construye el futuro



ÍNDICE

Agradecimientos	iv
Resumen	v
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	viii
Lista de abreviaturas	ix
INTRODUCCIÓN	
Antecedentes	x
Alcance	xi
La necesidad de “administrar los riesgos en obras de infraestructura”	xiii
Objetivo	xiv
Pregunta de investigación e hipótesis	xv
Relevancia y originalidad del trabajo	xv
Metodología	xvi
Estructura de la tesis	xvii
1. PRESAS, DEFINICIÓN, TIPOS Y USOS	
1.1 Introducción	1
1.2 Presas	1
1.3 Definiciones	1
1.4 Tipos de presas	3
1.5 Usos	6
1.6 Resumen	7
2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE COSTOS POR FALLAS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA	
2.1 Introducción	8
2.2 Métodos de evaluación de costos por falla	8
2.2.1 Métodos directos	9
2.2.2 Métodos indirectos	11
2.2.3 Métodos mixtos	14
2.3 Redes Bayesianas	15
2.3.1 Redes Bayesianas Discretas	17
2.3.2 Redes Bayesianas Continuas No Paramétricas	18
2.4 Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango	18
2.5 Juicio Estructurado de Expertos	20
2.6 Análisis de los métodos	24
2.7 Resumen	26
3. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS A UN CASO PARTICULAR DE PRESA DE TIERRA EN EL ESTADO DE MÉXICO	
3.1 Introducción	27
3.2 Descripción del caso de estudio	27

3.3 Uso de las Redes Bayesianas y el Juicio Estructurado de Expertos en el caso de estudio	32
3.3.1 Modelos gráficos	32
3.3.2 Cuantificación de los modelos gráficos	34
3.4 El modelo y sus variables	37
3.4.1 Inundación	38
3.4.2 Costos Humanos	38
3.4.3 Costos Económicos	39
3.4.4 Daños al Medio Ambiente	40
3.5 Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango	41
3.6 Resumen	44
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
4.1 Introducción	45
4.2 Juicio Estructurado de Expertos	45
4.3 Distribuciones acumuladas de probabilidad	47
4.3.1 Inundación	47
4.3.2 Costos Humanos	48
4.3.3 Costos Económicos	49
4.4 Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango	49
4.5 Análisis de sensibilidad del modelo	51
4.6 Comparación con estudios previos	67
4.7 Análisis de los estudios previos	72
4.8 Discusión	74
4.9 Conocimiento adquirido	75
4.10 Recomendaciones	76
4.11 Resumen	77
CONCLUSIONES	
Conclusiones generales	78
Limitaciones	80
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	82
ANEXOS	
Anexo I. Catalogo de Presas	89
Anexo II. Taller de Expertos	96
Anexo III. Los Expertos	115

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por haberme regalado esta hermosa vida, por llenarme de fe y esperanza, y porque sé que siempre estás con migo

A mis padres

Ramón Rivero Arzate y Reyna Santana Romero

Por enseñarme a vivir, por enseñarme a soñar, por enseñarme a no rendirme, porque todo lo que soy se lo debo a ustedes, mil gracias mamá y papa por entregarme su vida

Y hermanos

Iván Fernando y Jesús Braian

Porque son mi inspiración y mi fuerza para hacer lo correcto, gracias familia por ser mi tesoro y mi vida. ¡Los amo!

A toda mi familia

Porque creyeron en mí, porque me alentaron a mirar más arriba y me impulsaron a alcanzar mis metas

A mis amigos y esa persona especial

Por compartir su vida y sus sueños con migo, porque me han enriquecido con su compañía y me han permitido crecer con ustedes

A mis profesores

Dr. David Joaquín Delgado Hernández

Por haber confiado en mí y por todo ese invaluable esfuerzo y dedicación brindados y a todos aquellos que me contagiaron el gusto por el conocimiento y me hicieron saber que ¡Sí es posible!

¡Gracias!

RESUMEN

Una presa es una estructura construida por el hombre que tiene por objeto crear un lago artificial, a través de la captación y almacenaje de escurrimientos pluviales. Entre sus propósitos principales se pueden mencionar: generación de energía eléctrica, riego, actividades recreativas, abastecimiento de agua y prevención de inundaciones. De acuerdo con el tipo de material con el que se construye, una presa puede ser de: gravedad, contrafuerte, arco, mixtas y de materiales graduados.

La eventual falla de una de estas estructuras puede provocar grandes consecuencias tales como la destrucción de: vivienda, transporte, infraestructura pública, instalaciones industriales y tierras de cultivo. Los daños también pueden incluir la pérdida de vidas humanas y la interrupción de servicios como el teléfono, el correo y la electricidad. Un análisis de las estadísticas internacionales relacionadas con el colapso de presas, revela que las que más han fallado históricamente son las presas de tierra.

Debido a la conveniencia que representa su construcción, por el aprovechamiento de los materiales naturales para edificarlas, en México las presas de tierra son comunes. Por ello, el cálculo de las consecuencias económicas potenciales generadas por su rompimiento resulta útil, ya que permite diseñar medidas de mitigación que contribuyan a minimizar los impactos mencionados.

En esta tesis artículo se propone una metodología para cuantificar los costos directos e indirectos provocados por una falla, con base en el caso de una presa de tierra en el Estado de México (Antonio Alzate). Además, se hace uso de Redes Bayesianas para cuantificar la relación entre cuatro variables: inundación, pérdidas humanas, daños económicos y daños ambientales. Finalmente, con base en la extracción sistemática de información a un grupo de expertos, se construye un modelo matemático que permite calcular las consecuencias económicas debidas al colapso de una presa, en función de la magnitud de una inundación.

Palabras clave: Riesgo, Presas de Tierra, Estado de México, Daños Económicos, Evaluación de Costos, Redes Bayesianas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Principales componentes de una presa	2
Figura 1.2	Sección transversal de una presa de gravedad	3
Figura 1.3	Vista simplificada de una presa de contrafuertes	4
Figura 1.4	Vista de una presa de arco	4
Figura 1.5	Presa mixta	5
Figura 1.6	Tipos de presas de materiales graduados	6
Figura 2.1	Curva de daños potenciales por inundación para vivienda de una planta	12
Figura 2.2	Secciones transversales del cauce del Río Tejalpa	12
Figura 2.3	Confiabilidad óptima para el puente en estudio para diversas relaciones de costo de falla (C_d) contra costo inicial de construcción (C_i)	13
Figura 2.4	Esquema de una Red Bayesiana de cinco nodos y cinco arcos	15
Figura 2.5	Redes Bayesianas de tres variables, un padre y dos hijos	16
Figura 2.6	Red Bayesiana continua de cuatro nodos y cuatro arcos	18
Figura 2.7	Tipos de relaciones entre variables	19
Figura 2.8	Distribución de probabilidad acumulada hipotética de los costos directos por falla de un puente	23
Figura 3.1	Posición relativa de las presas Ignacio Ramírez y Antonio Alzate con respecto a la Ciudad Universitaria de la UAEMex	28
Figura 3.2	Sección transversal de la cortina de la presa José Antonio Alzate	29
Figura 3.3	Fotos recientes de la cortina de la presa José Antonio Alzate –San Bernabé-: (a) aguas abajo y (b) aguas arriba (vertedor)	29
Figura 3.4	Sección transversal de la cortina de la presa Ignacio Ramírez	31
Figura 3.5	Fotos recientes de la cortina de la presa Ignacio Ramírez -La Gavia-: (a) aguas abajo y (b) aguas arriba	31
Figura 3.6	Distribución de probabilidad acumulada de los costos económicos humanos para el experto I	36
Figura 3.7	Red Bayesiana Continua No Paramétrica con la estructura del modelo de evaluación de costos por fallas en presas de tierra en el Estado de México	37
Figura 3.8	Red Bayesiana Continua No Paramétrica con la estructura del modelo práctico de evaluación de costos por fallas en presas de tierra del Estado de México	41
Figura 3.9	Relación entre las variables, dada por la curva normal	43
Figura 3.10	Tipos de correlaciones entre variables, en base a la curva normal	43
Figura 4.1	Distribución acumulada de probabilidad de la variable inundación para la zona potencial de afectación aguas debajo de las presas de interés	48
Figura 4.2	Distribución acumulada de probabilidad de la variable costos humanos para la zona potencial de afectación aguas abajo de la presa de interés	48
Figura 4.3	Distribución acumulada de probabilidad de la variable costos económicos para la zona potencial de afectación aguas abajo de la presa de interés	49
Figura 4.4	Correlación de rango entre las variables inundación y costos humanos	50

Figura 4.5	Correlación de rango entre las variables inundación y costos económicos	50
Figura 4.6	Modelo de Red Bayesiana Continua No Paramétrica para el Proyecto UAEM 2491/2007	51
Figura 4.7	RBCNP con la estructura del modelo de evaluación de costos por fallas en presas de tierra del Estado de México, presentado en forma de histogramas	53
Figura 4.8	Curvas altura de agua vs costo total, para el 5, 50 y 95 percentiles, en una presa “tipo”	56
Figura 4.9	Curvas de costo total para el 50 percentil de la presa José Antonio Alzate	58
Figura 4.10	Curvas de costo total para el 50 percentil de la presa Ignacio Ramírez	60
Figura 4.11	Curvas de costo total para el 50 percentil de la presa El Guarda	62
Figura 4.12	Curvas de desbordamiento vs costo total para el 50 percentil de las presas: Alzate, Ramírez y el Guarda	64
Figura 4.13	Curva de altura de agua vs costo total para el 50 percentil de las presas: Alzate, Ramírez y el Guarda	65
Figura 4.14	Histograma para el costo total esperado para el 50 percentil en la presa “tipo” y las siete presas bajo estudio	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Tablas de probabilidad marginal y condicional	17
Tabla 2.2	Ejemplo numérico de los conceptos de calibración e información	24
Tabla 4.1	Resumen de indicadores del modelo clásico para los expertos de riesgos en presas de tierra del Estado de México	46
Tabla 4.2	Descripción del resto de las variables que intervienen en el modelo	52
Tabla 4.3	Correlaciones entre las diez variables del modelo	52
Tabla 4.4	Valores iniciales (50 percentíl) para las variables del modelo	54
Tabla 4.5	Relación de altura del nivel de agua vs costos humanos y costos económicos generados por la falla de una de las siete presas bajo estudio (presa “tipo”)	54
Tabla 4.6	Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa José Antonio Alzate	57
Tabla 4.7	Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa Ignacio Ramírez	59
Tabla 4.8	Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa El Guarda	61
Tabla 4.9	Comparación de los costos totales esperados en cada presa con un desbordamiento de 700 mm contra el costo total esperado para una presa “tipo”	63
Tabla 4.10	Comparación de los costos totales esperados en cada una de las siete presas y la presa “tipo” con el modelo completo de las RBCNP	65
Tabla 4.11	Algunos incidentes de fallas en presas de tierra en los Estados Unidos	68

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	Acuerdo de Chapultepec
AGEB	Área Geoestadística Básica
ASDSO	Association of State Dam Safety Officials
BS	British Standard
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CENECAM	Centro Estatal de Emergencias de Campeche
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CGM	Contraloría General de Medellín, Colombia
CICM	Colegio de Ingenieros Civiles de México
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
FS	Factor de Seguridad
GV2025	Grupo Visión 2025
ICOLD	International Commission of Large Dams
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
JEE	Juicio Estructurado de Expertos
mdd	Millones de Dólares
msnm	Metros sobre el nivel del mar
PC	Pregunta de Calibración
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PI	Pregunta de Interés
RAE	Real Academia de la Lengua Española
RB	Redes Bayesianas
RBC	Redes Bayesianas Continuas
RBCNP	Redes Bayesianas Continuas No Paramétricas
RBD	Redes Bayesianas Discretas
SE	Secretaría de Energía
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEP	Secretaría de Educación Pública
SIEA	Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMVDF	Salario Mínimo Vigente en el Distrito Federal
SRH	Secretaría de Recursos Hidráulicos
UAEMEX	Universidad Autónoma del Estado de México
UNA-USA	United Nations Association of the United States of America
USACE	United States Army Corps of Engineers
TDPG	Tomador de Decisión por Pesos Globales
TDPI	Tomador de Decisión por Pesos Iguales
TU-Delft	Universidad Tecnológica de Delft
VPN	Valor Presente Neto

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

A finales del año 2005, un grupo de ciudadanos mexicanos involucrados en distintas actividades académicas, empresariales, culturales, deportivas y sociales, decidieron firmar el Acuerdo Nacional para la Unidad, el Estado de Derecho, el Desarrollo, la Inversión y el Empleo, ahora conocido como el Acuerdo de Chapultepec (AC, 2005). Entre los principales objetivos de dicho acuerdo está el acelerar la construcción de la infraestructura que México requiere para convertirse en un país desarrollado en el mediano plazo.

Así, el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) reunió a finales de la década pasada a un conjunto de expertos en la materia. El principal objetivo fue formar un grupo que reflexionara sistemáticamente sobre el tema de infraestructura y que identificara sus rezagos y requerimientos para el año 2025. Estos profesionales se conocen como el Grupo Visión 2025 (GV2025) y han analizado la situación de la industria de la construcción, haciendo hincapié en su relación con el desarrollo de México (GV2025, 2003).

El XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, organizado por el CICM, fue el escenario donde el GV2025 presentó algunos resultados de sus investigaciones. Después de haberse reunido con distintos especialistas de la profesión, miembros del gabinete, reconocidos académicos y gobernadores de entidades como Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Nuevo León y Puebla (Zarate, 2006), se identificaron los 109 proyectos estratégicos de infraestructura que México requiere para acelerar su desarrollo económico en el periodo 2005-2015 (Borja, 2006). Estos proyectos se pueden usar directamente en el AC ya que son el resultado de varios años de investigación, y cubren el rubro de infraestructura.

En contexto, a través de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), se decide responder a la convocatoria de participar en la creación de esta nueva infraestructura en beneficio del país. Puesto que la planeación, diseño, construcción y mantenimiento de estos proyectos requerirán la participación de especialistas en todas las ramas de la ingeniería civil, y dado que la UAEMEX tiene experiencia en el área de estructuras¹, se determinó que se podría colaborar en materia de análisis y evaluación de costos en fallas en obras de infraestructura. Cabe aclarar que el término “falla”, en este trabajo, se entenderá como “la incapacidad de que una obra pueda seguir cumpliendo los objetivos para lo cual fue creada” (Vega, 2002a).

En este sentido, Merrit *et al*, (1999) afirman que los profesionales de la ingeniería civil deben tomar en cuenta la posibilidad de que los proyectos que realizan pongan en riesgo la salud o seguridad pública, o provoquen pérdidas económicas a la comunidad. De acuerdo con el British Standard 8800 (BS, 1996), un “riesgo” es la combinación de la probabilidad

¹ Las principales líneas de investigación son: comportamiento estructural e ingeniería sísmica enfocada al peligro, riesgo y vulnerabilidad de estructuras (UAEMEX, 2006). En esta última, se analiza la importancia y el potencial de las herramientas de riesgo y confiabilidad para respaldar la toma de decisiones sobre normatividad, diseño, inspección y mantenimiento de infraestructura, peligros sísmicos, hidrometeorológicos y geotécnicos, entre otros.

de que un evento peligroso ocurra y el efecto de sus consecuencias². La misma fuente define “análisis de riesgo” como el proceso para estimar la magnitud de un riesgo y decidir si es o no aceptable (BS, 1996). En contraste, las consecuencias de la falla de una obra se pueden medir en términos económicos, mediante la evaluación de costos.

Un costo es la cantidad que se debe pagar o erogar para obtener un bien o servicio (RAE, 2008). En el contexto de la presente investigación, Stahl (1986) sostiene que el costo total de una estructura comprende dos componentes principales: el costo original de la obra, y el costo asociado con su riesgo de falla. Es decir, el costo total esperado del proyecto de infraestructura equivale a la suma de la inversión inicial, más los posibles costos que se generarían como resultado de su falla. Es importante mencionar que el conocimiento de los costos potenciales, generados por la eventual falla de una obra de infraestructura, es un factor determinante para la toma de decisiones y, la canalización de recursos que permitan proteger, y llegado el momento, rehabilitar las zonas afectadas. Asimismo, contribuye a tomar medidas de prevención para que las obras operen en condiciones óptimas de servicio, lo que garantiza no sólo la seguridad de la estructura, sino también la de sus usuarios y la de las personas que viven en sus inmediaciones.

Alcance

De esta manera, se ha decidido realizar un estudio para analizar los costos, tanto directos como indirectos, asociados a fallas potenciales de obras de infraestructura. Para ello, se buscó el financiamiento de la UAEMEX, que a través de su Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados (SIEA) aprobó el proyecto titulado “Análisis de Riesgo, Confiabilidad Estructural y Mantenimiento de Presas: Un Caso en el Estado de México”, con clave UAEM-2491/2007 U, del cual este estudio forma parte.

Debido a la cantidad de actividades de investigación involucradas en dicho proyecto, se decidió dividirlo en tres partes. La primera relacionada con el análisis de riesgos, la segunda con prácticas de mantenimiento, y la tercera parte con evaluación de costos. De hecho, el presente trabajo constituye ésta última por lo que los primeros dos aspectos solo se mencionaran superficialmente en el cuerpo de la tesis.

Así, y para enfocar la investigación, se han seleccionado las presas, pues se puede argumentar que son las obras de ingeniería civil más grandes y que involucran en su diseño y construcción, a prácticamente todas las ramas de la profesión³. En cuanto a los usuarios finales de la tesis, se espera que ésta sea útil tanto para estudiantes de los últimos semestres de la carrera de ingeniería civil, como para los profesionistas, académicos e investigadores interesados en el tema. Por ello, el lector encontrará que el texto incluye desde los conceptos básicos del área, hasta el planteamiento de nuevas herramientas para evaluar los costos de interés.

² El riesgo R es una función de la probabilidad de un evento adverso y sus consecuencias, es decir, $R=(\text{probabilidad} \times \text{consecuencias})$.

³ Si se compara a las presas con puentes, edificios, carreteras o cualquier otra obra de ingeniería civil, se puede entender la magnitud de esas obras.

En otro tenor de ideas, los resultados del análisis del GV2025 demuestran que la inversión en éste tipo de obras es necesaria en los próximos años. Así, dependencias gubernamentales como la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Secretaría de Energía (SE) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), tendrán que construir presas como parte de sus proyectos hidroeléctricos, entre los que destacan: la Yesca, Pozolillo, Copainalá, Río Verde, Tenosique y la Parota (Borja, 2006), además de mantener aquellos que se han construido durante las últimas décadas y que aun están en operación.

Así, en materia de presas, Marengo (2002) reportó la existencia de al menos seis tipos, cuatro de concreto (gravedad, contrafuerte, arco, y mampostería) y dos de materiales sueltos (tierra y enrocamiento). Ese autor también reveló que, de las 15,800 presas construidas a nivel mundial hasta 1975, el 62.6% eran de Tierra. En México, se construyeron entre 1550 y 1998 un total de 1017 presas de las cuales casi el 70% fueron del mismo material.

Al ser las más comunes, las presas de tierra son las que más fallas han presentado en comparación con los otros tipos (57% del total de fallas en presas entre 1800 y 1983 internacionalmente), y las que más muertes han causado (7,692 de 16,634, ó 46%, en todo el mundo en el mismo periodo). Consecuentemente, en este proyecto se estudiarán con detalle las presas de tierra pues su posible falla puede tener consecuencias graves en términos económicos y sociales, entre otros, como lo demuestran los estudios previos (Marengo, 2002).

En especial, se abordará el caso de las presas de tierra en el Estado de México. Además, se ha decidido enfocar el estudio a estructuras con una antigüedad mayor a los 30 años, ya que las estadísticas reportadas por Marengo (2002), indican que son proyectos con esta característica los que más fallan, seguidos por los más jóvenes y que aun no exceden los cinco años de edad. De acuerdo con Ingles (1984), esto se debe a que durante los primeros años de operación, algunas presas de tierra colapsan, principalmente, por insuficiencias de diseño.

Entre 1900 y 1975, las presas de tierra que fallaron más frecuentemente en México tenían una altura entre los 15 y 30 m, y por lo general presentaron desbordamientos (Marengo, 2002). La Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), en 1976, tenía registradas en la entidad Mexiquense 53 presas (SRH, 1976). De ellas, solo cinco (Huapango, San Antonio, Ñadó, La Loma y El Molino) fueron construidas antes del año 1900 y las otras 48 datan del siglo XX. De éstas últimas, 19 son de tierra y se terminaron de edificar entre 1942 y 1972, es decir, actualmente sobrepasan los 30 años de vida.

Tomando en cuenta los criterios de altura y edad, se determinó que el número de presas de tierra que satisfacían ambos, en el Estado de México, es siete (Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela, Dolores, José Antonio Alzate -San Bernabé-, Ignacio Ramírez -La Gavia-, y El Guarda). En consecuencia, este trabajo se orienta al análisis de las siete presas identificadas y que, de acuerdo a las estadísticas mundiales, tienen más probabilidades de fallar.

La necesidad de “administrar los riesgos en obras de infraestructura”

Renn (1998), describe la “administración de riesgos” como el proceso mediante el cual la sociedad, o alguna organización, reduce los riesgos a un nivel tolerable y se asegura de controlarlos, monitorearlos y comunicarlos a los posibles afectados. A nivel internacional esta área de la administración ha cobrado importancia, sobretodo en lugares donde las amenazas naturales (ej: sismos, lluvias intensas, huracanes, ciclones, y erupciones volcánicas) son altas.

Pese a ello, un equipo internacional de especialistas en desastres naturales, pertenecientes a la Asociación Norteamericana de las Naciones Unidas -UNAUSA- (UNAUSA, 1997), manifestó, hace más de una década, que la comunidad mundial de prevención de accidentes enfrentaba un gran problema. Se trataba de la ausencia de una política gubernamental apropiada, capaz de responder a las necesidades de las víctimas de desastres, y a la canalización de ayuda externa a las comunidades afectadas. La situación no ha cambiado mucho desde entonces.

En el contexto global, organismos como la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) han reportado que, en el siglo XX, más de 8,000 personas murieron como consecuencia de la falla de importantes presas (CONAGUA, 1999). Efectivamente, los daños se remontan a tiempos más lejanos, por ejemplo la revista *Engineering News* inició un informe, con fecha 8 de junio de 1889, donde el encabezado aseguraba que:

“La catástrofe más apabullante en la historia de la humanidad a consecuencia de la falla de obras construidas por el hombre, ..., hará que la semana pasada nunca se pueda olvidar”

Dicho mensaje se refiere a una de las tragedias más devastadoras en la historia de los Estados Unidos, la inundación de Johnstown el 31 de mayo de 1889, causada por la falla de la presa South Fork. En aquel evento, la onda de la inundación, producida por el colapso de la presa de materiales graduados de 22 m de altura durante una tormenta, destruyó la ciudad de Johnstown donde murieron más de 2200 personas (CONAGUA 1999). Más adelante se presentan detalles sobre la falla de esta presa.

Desafortunadamente este tipo de tragedias se han venido repitiendo año tras año a nivel internacional, y México no ha sido la excepción. En su trabajo *“Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2001”*, Bitrán *et al.*, (2002) dejaron ver que los incidentes provocados por las lluvias torrenciales, deslaves y desbordamientos de ríos y presas, a lo largo del territorio nacional, produjeron los siguientes daños: 95 muertes; 126,594 damnificados; 14,102 viviendas dañadas; 18 escuelas afectadas; 10,000 hectáreas de cultivo destruidas; 800 Km de caminos afectados; y 57 brotes de paludismo. En suma, esto representó alrededor de 360 millones de pesos en pérdidas totales.

Más aun, las consecuencias debidas a las inundaciones que impactaron los estados de Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco, en Octubre de 1999, de acuerdo con estadísticas oficiales fueron: 384 personas muertas, y 368,000 afectadas directamente (CENECAM,

1999). Un estudio realizado por Aguirre (2004), explica parcialmente estos datos, pues concluye que el conocimiento científico, y el monitoreo de los eventos hidrometeorológicos en el contexto mexicano, en contraste con los sísmicos, son casi nulos.

De esta manera, en México se observa la inexistencia de sistemas públicos de alerta, que puedan comunicar masiva y oportunamente a la población, sobre los peligros mencionados. De hecho, hasta donde el autor percibe, no se cuenta con planes de abandono para comunidades amenazadas por inundación, que conjunten los esfuerzos de diferentes instancias gubernamentales. En este tenor de ideas, Aguirre (2004) aseveró que los sobrevivientes de las inundaciones en Estados como Veracruz, han tenido que superar las contingencias haciendo uso de recursos propios, por la falta de una respuesta gubernamental adecuada.

Habiendo afirmado esto, es evidente que la potencial pérdida de vidas humanas es una razón suficiente para monitorear el comportamiento de una presa (CONAGUA 1999). Conjuntamente, el desarrollo, la evaluación del estado de la infraestructura existente y su protección, impactan de forma directa al progreso del país. Por lo tanto, es necesario administrar los riesgos involucrados, mantener niveles aceptables de confiabilidad, entendida ésta como la probabilidad de que una estructura no falle cuando es sometida a solicitaciones externas (Canto y Alamilla 2000), y valorar las posibles consecuencias derivadas del colapso de estas obras. En definitiva, dicho análisis permite garantizar que ellas no causarán fatalidades ni pérdidas económicas a la sociedad.

Objetivo

El objetivo primordial de la investigación es analizar las técnicas para evaluar costos por fallas en obras de infraestructura. En particular, se estudiará el caso de siete presas de tierra, ubicadas en el Estado de México. Así, se plantean los siguientes puntos clave:

- Identificar las técnicas que actualmente se emplean para realizar evaluaciones de costos por fallas en obras de infraestructura, y enfatizar su utilidad en estimaciones relacionadas con presas de tierra,
- Adaptar y aplicar los métodos encontrados, enfocando la atención al caso particular del Estado de México,
- Evaluar el costo de las consecuencias provocadas por la eventual falla de una de las siete presas de tierra bajo estudio,
- Proponer una serie de recomendaciones, con base en el análisis de los resultados obtenidos, encaminadas a la selección de las mejores alternativas, que permitan optimizar el manejo de los recursos destinados al monitoreo y conservación de presas de tierra, y
- Facilitar la toma de decisiones, en materia de administración de riesgos, en las obras analizadas.

En esencia, se espera que, como resultado final de la investigación, se obtenga una herramienta capaz de orientar a los tomadores de decisiones, en la administración de los recursos destinados a la mitigación de riesgos en obras de infraestructura. Puesto que

dichos proyectos contribuyen al desarrollo del país, es necesario garantizar no solo su integridad, sino también la de las personas que habitan en las áreas de influencia de la obra. Al mismo tiempo, se espera que la metodología empleada para la obtención de datos e información, pueda ser utilizada en estudios posteriores similares, afines a las evaluaciones de costo investigadas.

Preguntas de investigación e hipótesis

Para clarificar el problema de investigación abordado, de acuerdo con Hernández *et al* (2008), es indispensable plantear, por medio de una o más preguntas, la situación a resolver. Como resultado, aquí se proponen los siguientes cuestionamientos:

- ¿Cuáles son las técnicas que se emplean actualmente en el análisis y la evaluación de costos por fallas en obras de infraestructura?,
- ¿Cuales son los métodos que permiten evaluar el costo de falla de una obra de infraestructura, ya sea antes o después de que ocurre el incidente?,
- ¿Se pueden adaptar los métodos existentes al caso de una presa de tierra?, y
- ¿Qué recomendaciones se pueden hacer, a los tomadores de decisiones, después de haber analizado los resultados del estudio, en términos del desarrollo e implementación de políticas públicas para la prevención, mitigación y control de riesgo?

Como punto de partida, es importante proponer respuestas tentativas a estos planteamientos (Hernández *et al*, 2008). Así, para guiar el rumbo del trabajo se ha planteado la siguiente hipótesis:

“La evaluación de costos por fallas en presas de tierra, ayuda a mejorar la toma de decisiones durante su construcción y vida útil, ya que puede contribuir a una mejor selección de estrategias que protejan la integridad de la población, además de contribuir a mantener la obra operando como fue diseñada”.

Cómo se puede apreciar, en este enunciado se incluye implícitamente tanto el alcance como los objetivos planteados, y se ofrece una respuesta hipotética a las preguntas de investigación citadas. Para probarla, se empleará la metodología descrita más adelante, pero primero se explicita la importancia del presente proyecto.

Relevancia y originalidad del trabajo

De acuerdo con Hernández *et al*, (2008), una investigación puede ser útil por varias razones: resuelve un problema real, soporta una nueva teoría o produce más preguntas de investigación. Ellos proponen algunos criterios para evaluar la utilidad de un estudio, mismos que se han empleado para justificar la realización de este trabajo:

- *Conveniencia.* El presente estudio ayudará a los tomadores de decisiones a implementar las medidas necesarias, para garantizar la seguridad estructural de los

proyectos de infraestructura que administran, considerando la seguridad de la obra y de la población usuaria,

- *Relevancia social.* Se busca que los resultados de la investigación tengan un gran impacto en la sociedad, mediante el desarrollo de herramientas de evaluación útiles para los administradores de infraestructura, que les permitan mejorar la protección de las obras bajo su responsabilidad,
- *Implicaciones prácticas.* Se plantea que el gobierno estatal, y los municipales involucrados, puedan garantizar la seguridad de sus localidades, a través de acciones preventivas, resultantes de las evaluaciones propuestas,
- *Valor teórico.* A pesar de que el presente trabajo adaptará los métodos existentes para hacer estimaciones en el caso de las presas del Estado de México, se propondrá un conjunto de ideas teóricas que, además de dar respuesta a las preguntas de investigación, se podrá extender y aplicar en investigaciones afines,
- *Utilidad metodológica.* Como parte del estudio se planteará el desarrollo de una nueva metodología para el análisis y evaluación de costos por fallas en presas de tierra, a través del uso de herramientas novedosas en la materia.

De esta manera, los principales beneficiarios de los resultados de la investigación, serán los dueños y administradores de presas, ya que contarán con una herramienta práctica para estimar los costos de falla de sus estructuras. No menos importante es la contribución en el bienestar de la sociedad, en caso de que la metodología propuesta se implemente y ponga en uso.

En términos de originalidad, como se detallará en los capítulos subsecuentes, el uso combinado de las Redes Bayesianas Continuas (RBC), y el Juicio Estructurado de Expertos (JEE), representa uno de los adelantos científicos más recientes a nivel internacional. De hecho, la integración de ambas técnicas es nueva, y esta dando sus primeros resultados en la industria de la aviación europea (Morales and Cooke, 2008), y se cree firmemente que esta tesis que se presenta, es una de las primeras aplicaciones en el área de ingeniería civil a nivel nacional.

Metodología

En general, existen varias técnicas que se han empleado para analizar los costos de fallas. Por ejemplo, Venegas (1994) los estudió en el contexto de la industria eléctrica, y los clasificó en tres tipos: métodos econométricos, directos e implícitos. De nuevo, estos métodos han sido empleados para la estimar los costos por fallas en sistemas eléctricos, aunque son susceptibles de ser adaptados al estudio propuesto. En contraste, se han desarrollado técnicas como: análisis de eventos, diagramas de causa-efecto y análisis comparativo (Jacinto, 2003), que pudiendo aplicarse, no necesariamente son útiles para evaluar los costos de interés.

De esta manera, en la primera etapa del proyecto se realizó una revisión de la literatura nacional e internacional, referente a desastres causados por inundaciones. En la misma línea, se exploraron las técnicas disponibles para evaluar y analizar riesgos, y estimar costos de fallas en obras de infraestructura. Después de contrastar sus ventajas y

desventajas, dos fueron seleccionadas como las mejores opciones para alcanzar los fines y objetivos planteados.

Una vez que las RBC y el JEE se identificaron, se procedió a su adaptación y aplicación al caso de las presas de tierra en el Estado de México, mediante la construcción de un modelo matemático. Con base en estadísticas mundiales relacionadas con las fallas de este tipo de obras, se reconocieron las principales causas que dan origen a estos incidentes. Acto seguido, se incluyeron en el modelo para simular escenarios de falla y evaluar las consecuencias correspondientes. En el evento, se contó con la participación de investigadores de la Universidad Tecnológica de Delft, Holanda (TU-Delft), quienes han desarrollado en gran medida las técnicas empleadas en la construcción del modelo.

Para cuantificar la RBC, fue necesario recolectar datos verídicos de las presas examinadas. Para ello, se buscó información bibliográfica, y cuando ésta se agotó, se entró en contacto con las dependencias y/o autoridades responsables de las obras, así como con las personas encargadas de éstas. Después de visitar físicamente las siete estructuras, para conocer su estado actual y las condiciones prevalcientes en las posibles áreas de inundación, se organizó un “Taller de Expertos”. En el ejercicio participaron cuatro especialistas, con amplios y detallados conocimientos sobre el tema. Sus aportaciones permitieron medir cuantitativamente las variables de interés, a través de las RBC y JEE.

Con el modelo completo, se procedió con el análisis de resultados, mismos que han sido comparados con las estadísticas e información histórica disponible en la literatura. Por último, se generó un conjunto de recomendaciones para los administradores de las obras, y se obtuvieron las conclusiones de la investigación.

Estructura de la tesis

Este documento está organizada en cuatro capítulos. El primero presenta un repaso de los conceptos básicos relacionados con el estudio de las presas. Este capítulo va dirigido a los estudiantes que no están familiarizados con la terminología empleada a lo largo de la tesis. Para los lectores con más experiencia en el tema, se recomienda realizar la consulta a partir del tema dos, el cual expone las técnicas que se han empleado tradicionalmente en la evaluación de costos de fallas en obras de infraestructura, orientando el estudio al caso de las siete presas de tierra en el Estado de México. En particular se describirán con detalle las RBC y el JEE, herramientas fundamentales en la elaboración del modelo de costos propuesto.

En el tercero, se describirá la adaptación y aplicación de los métodos encontrados y se estudiarán ampliamente dos de las siete presas seleccionadas. Asimismo, se mostrarán detalles de la recolección de datos por medio del JEE. En el cuarto capítulo, se presentará el análisis y la discusión de los resultados del ejercicio. Esta sección de la tesis es relevante para los tomadores de decisiones interesados en minimizar los riesgos de las presas que administran. Finalmente, en el último apartado, se presentan las conclusiones generales del estudio, y se brindan las recomendaciones para que los tomadores de decisiones mejoren la administración de riesgos en estas importantes estructuras.

CAPÍTULO 1. PRESAS, DEFINICIÓN, TIPOS Y USOS

1.1 Introducción

Es necesario conocer y definir algunos términos que serán de utilidad para entender las ideas propuestas en el presente trabajo. Así, en este capítulo, se presenta una breve descripción de lo que es una presa, su definición, los tipos existentes, las características que definen cada categoría, sus usos, y la relevancia que tienen en la sociedad.

1.2 Presas

A través del tiempo, debido a su disponibilidad natural, el suelo ha sido empleado por el hombre como material de construcción. Así, desde las civilizaciones antiguas, se ha estudiado la variabilidad de sus propiedades con respecto al tiempo y el espacio, lo que ha llevado a entender su comportamiento. De hecho, la mecánica de suelos desarrollada en el último siglo cuenta con técnicas que permiten modelar distintos tipos de suelo y, por ende, predecir su conducta (Juárez y Rico, 1995). Así, pese al avance en el desarrollo de nuevos materiales (Hernández, 2007), aun en la actualidad las presas se siguen haciendo con tierra y rocas.

Esto ha permitido que la construcción de las presas tenga auge, ya que sus funciones favorecen al desarrollo de la región donde se sitúan. Por ello, a pesar de que una eventual falla generaría pérdidas de vidas humanas y económicas de gran magnitud, la relación costo beneficio de su construcción es favorable (>1), por lo que su adecuado diseño, monitoreo, mantenimiento y control, son indispensables para que puedan seguir cumpliendo los objetivos para los que fueron creadas.

1.3 Definiciones

Una de las grandes obras de ingeniería civil propensa a edificarse con materiales naturales, como la tierra y las rocas, es la “presa”. El término presa se refiere a una estructura edificada por el hombre, que tiene por objeto crear un lago artificial, a través de la captación y almacenaje de escurrimientos pluviales. Aparicio (1994) la describe como un elemento que se construye a través del cauce de un río, arroyo o canal, para almacenar agua y elevar su nivel, con el fin de regular su flujo, para acumularlo en época de lluvia, y aprovecharlo en la temporada seca.

Desde el punto de vista funcional, una presa está compuesta por tres elementos básicos: el cuerpo de la cortina, la obra de toma y, el vertedor u obra de excedencias. Las dos últimas estructuras son de conducción, y facilitan el flujo controlado de agua del interior al exterior del embalse (ó cuerpo de agua almacenado por la presa). CONAGUA (1999) describe cada una como:

Cortina. Es la estructura construida para obstaculizar el paso de la corriente, cuyo propósito esencial es almacenar el agua que fluía por el cauce. Para lograr su objetivo, es indispensable que la cortina sea capaz de resistir las sollicitaciones externas, y que además

cuenta con un grado de impermeabilidad alto, para minimizar el paso del agua a través de ella. De acuerdo con el material empleado en su construcción, las cortinas se pueden clasificar como de: tierra, mampostería y concreto.

Obra de toma. Se trata de la estructura hidráulica mediante la cual se extrae el agua del embalse. Para regular la cantidad de líquido, se hace uso de compuertas, que permiten controlar las extracciones.

Obra de excedencias. Estructura que evita la acumulación excesiva de agua, es decir, por encima de los niveles deseados, situación que pondría en peligro la seguridad de la cortina, y de sus estructuras auxiliares. En general, la obra de excedencias está diseñada para impedir desbordamientos, mismos que se traducirían en daños a las zonas aguas abajo de la presa.

Además, las presas normalmente cuentan con los siguientes elementos (ver Figura 1.1): taludes (si son de tierra) o paramentos (si son de concreto) aguas arriba y aguas abajo, entendidos estos como las superficies inclinadas de la cortina, que contribuyen a mantenerla estable; corona y hombros, que se refieren a la parte más alta de la estructura, y a los vértices entre la corona y los taludes respectivamente; pie del talud aguas arriba y aguas abajo, es decir, las uniones de los paramentos con el terreno natural en ambos lados de la cortina; cimentación, que es la estructura que transmite al suelo las cargas de la cortina, generadas por el embalse; y el empotramiento, parte de la cortina que conecta la estructura con el terreno de apoyo en las laderas.

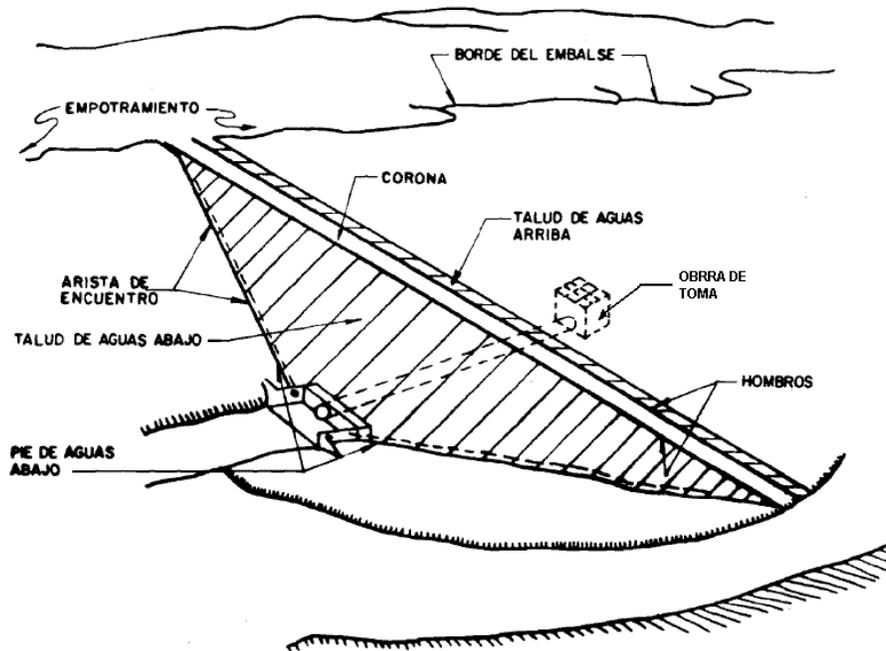


Figura 1.1 Principales componentes de una presa (CONAGUA, 1999)

1.4 Tipos de presas

Existen distintos tipos de presas, así como diversas clasificaciones para caracterizarlas. Por ejemplo, se pueden categorizar en función del material con que se construyen como: concreto, concreto compactado con rodillo, mampostería, tierra y enrocamiento. Empleando ahora, como criterio de agrupación, su diseño estructural, se pueden destacar las de: gravedad, contrafuerte, arco, mixtas y de materiales graduados. A continuación se describe brevemente cada una, tomando como referencia esta última tipificación.

Presas de gravedad. Se trata de las presas de concreto, o de mampostería, más frecuentemente construidas, por la relativa facilidad que representa su diseño. En general, una presa de concreto esta constituida en su mayoría por ese material, mismo que es colado *in situ*. En contraste, las de mampostería se construyen con rocas amalgamadas con mortero. Comparando con la robustez de las presas de materiales graduados, las de gravedad son esbeltas y transmiten eficientemente las cargas a su cimentación y empotramiento. En particular, son triangulares en su sección transversal, como se muestra en la Figura 1.2.

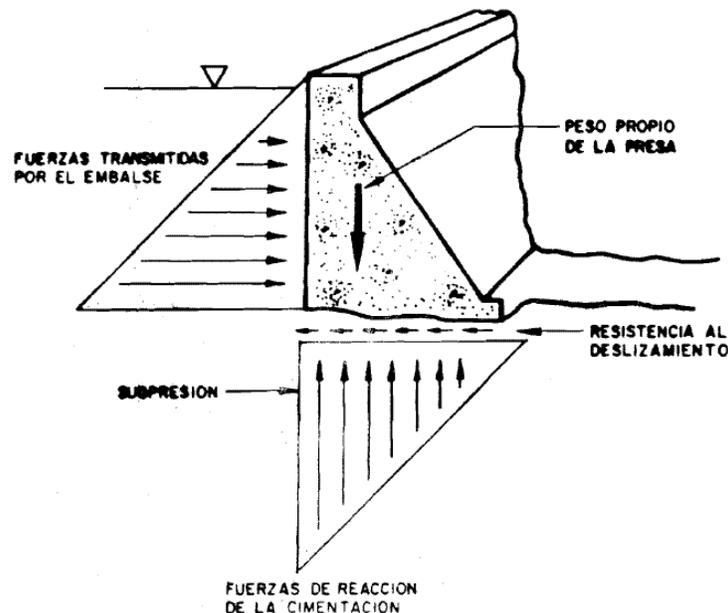


Figura 1.2 Sección transversal de una presa de gravedad (CONAGUA, 1999)

Presas de contrafuerte. Al igual que las de gravedad, las presas de contrafuerte dependen del peso del agua y del de la losa para mantener su estabilidad. Incluyen dos componentes estructurales básicos: una cara impermeable aguas arriba, y un conjunto de contrafuertes o muros verticales, que soportan al paramento y transfieren las cargas a la cimentación. En la Figura. 1.3 se muestra un ejemplo de este tipo de estructura.

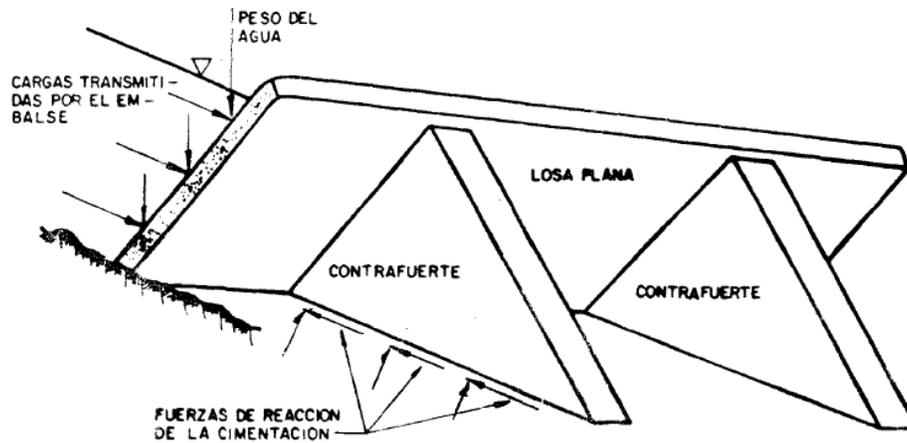


Figura 1.3 Vista simplificada de una presa de contrafuertes (CONAGUA 1999)

Presas de arco. Son estructuras de concreto, más esbeltas que las de gravedad, con curvatura aguas arriba. La estabilidad de estas presas se debe, mayoritariamente, a la transmisión efectiva, mediante su forma de arco, de las cargas producidas por el embalse a los empotramientos. En la Figura 1.4 se presenta un ejemplo.

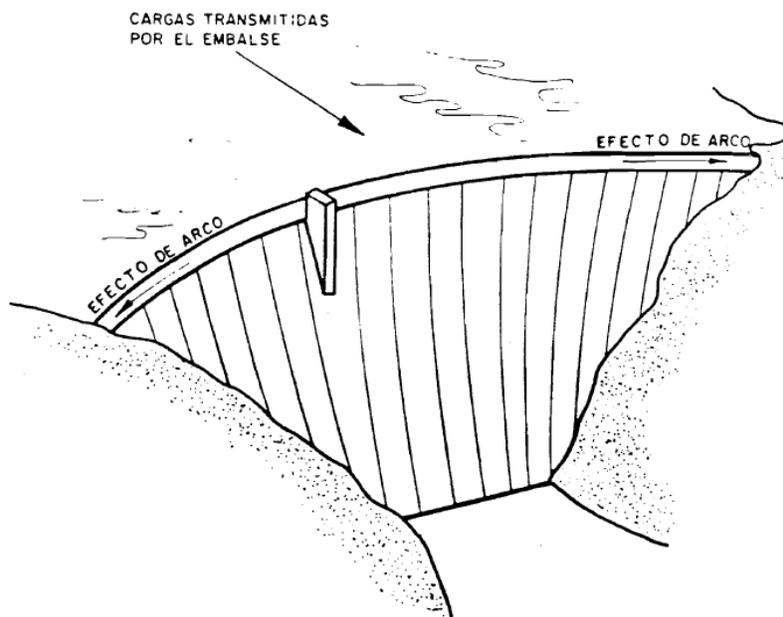


Figura 1.4 Vista de una presa de arco (CONAGUA, 1999)

Presas mixtas. Como su nombre lo indica, se trata de estructuras que combinan las propiedades de dos o más tipos de presas. Generalmente, la cortina presenta dos secciones: una de gravedad, y la otra de tierra y/o enrocamiento. La primera funciona como vertedor, lo que permite desbordamientos de la obra sin peligro de falla. Además, el empleo simultáneo de materiales graduados, disminuye considerablemente el costo de

construcción, pues estos se obtienen de las zonas colindantes. En la Figura 1.5 se ilustra un ejemplo de ellas.

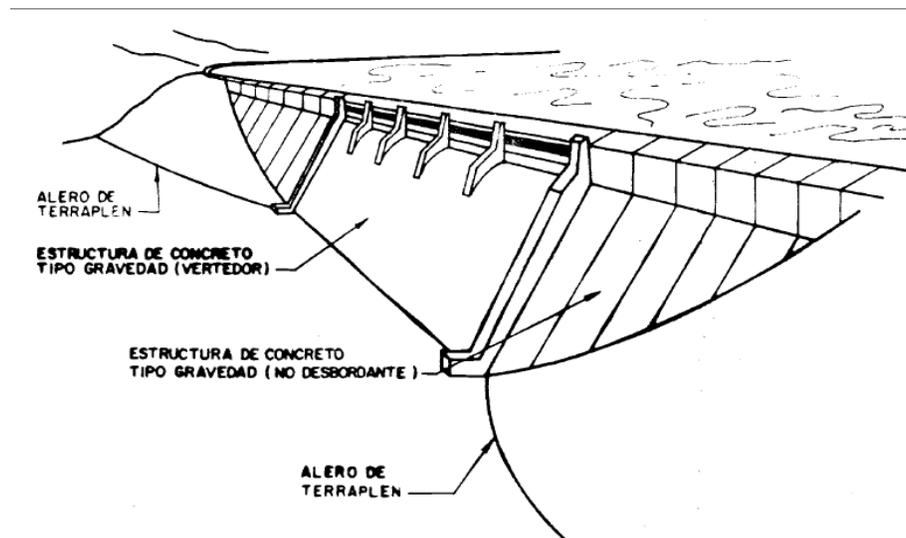


Figura 1.5 Presa mixta (CONAGUA, 1999)

Presas de mampostería. Este tipo de presas se construyen con rocas, amalgamadas mediante un mortero o cementante. La variante más común en este grupo son las presas de mampostería ciclópea, en las cuales se cuenta con elementos de tamaños exagerados e irregulares. En términos estructurales, la mayoría funcionan por gravedad, aunque también las hay de arco. Antes del comienzo del siglo XX, su aplicación era común, debido a la simplicidad que representaban tanto su diseño como su construcción. Sin embargo, en la actualidad el alto costo de sus materiales provoca que su implementación no sea tan frecuente como en el pasado. Su apariencia física es similar a la de las presas de concreto (Figura 1.2).

Presas de tierra y enrocamiento. Dentro de la gran variedad de tipos existentes, las presas de tierra y enrocamiento son las más comunes a nivel internacional, representando aproximadamente dos tercios de la población mundial (Marengo, 2002). Esto se debe a dos razones principales: por un lado son consideradas, en cuanto a sus costos de construcción, el tipo más económico, ya que los materiales con los que se edifican se extraen generalmente de zonas cercanas al sitio del proyecto. Por otro lado, se pueden adaptar a la mayoría de las condiciones locales, y construirse ya sea sobre roca o sobre suelos sueltos (CONAGUA, 1999).

En esencia, las presas de tierra son estructuras en las que el contenido de materiales térreos (suelos y rocas con diámetro menor a $\frac{3}{4}$ ") representa más del 50% de su volumen total, y las presas de enrocamiento son las que en su contenido cuentan con más del 50% de materiales del tamaño de un boleto o superiores -mayor a $\frac{3}{4}$ "- (SRH, 1976). A su vez, estas presas pueden subdividirse con base en la configuración de sus materiales, o en sus métodos constructivos. Así, en la Figura 1.6, se muestran los principales tipos de presas de tierra y enrocamiento.

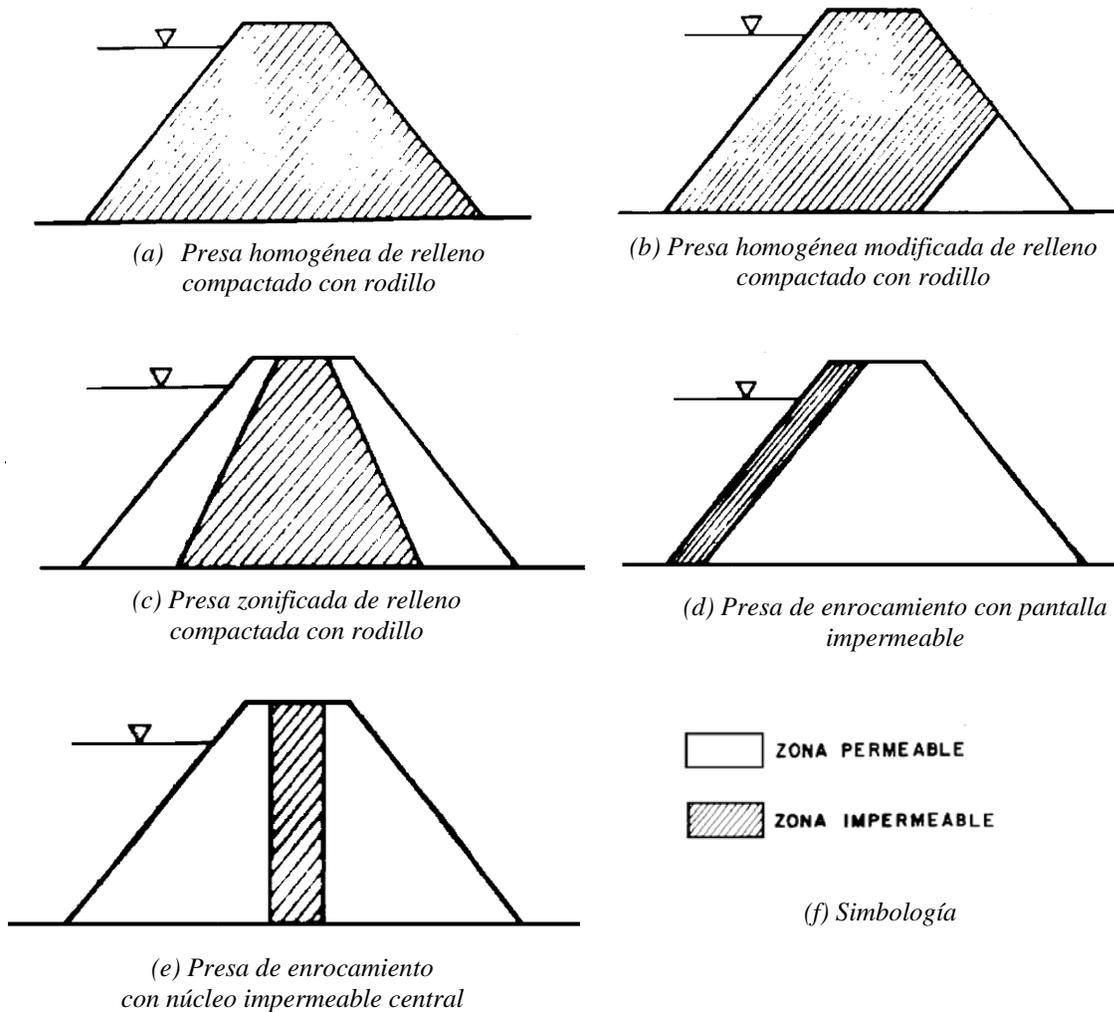


Figura 1.6 Tipos de presas de materiales graduados (CONAGUA, 1999)

1.5 Usos

La SRH sostenía, hace más de treinta años, que: “*las presas en México, en general, se destinan a usos múltiples y la mayoría tiene por finalidad el riego para el desarrollo de la agricultura, indispensable para afrontar el problema que plantea el crecimiento demográfico que registra actualmente el país. También el desarrollo hidroeléctrico ha dado origen, en los últimos años, a que se construyan grandes presas en los ríos que potencialmente presentan ventajas para este aprovechamiento*” (SRH, 1976). A tres décadas de la aparición de este enunciado, las ideas siguen siendo vigentes, aunque existen otros usos prácticos de las obras de esta naturaleza, entre los que destacan:

- Abastecimiento de agua,
- Piscicultura,
- Prevención de inundaciones -control de avenidas-, y
- Actividades recreativas.

De esta manera, las presas mexicanas, y en especial las de tierra y enrocamiento, han permitido el desarrollo de diversas regiones en el país (SRH, 1976), y lo siguen haciendo. De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2007), actualmente se tienen en la nación alrededor de 4,000 presas, de las cuales más de 2500 son de tierra y enrocamiento. Por ello, deben operarse adecuadamente, para garantizar la seguridad tanto de sus estructuras como de su entorno aguas arriba y aguas abajo. Para lograrlo, investigadores de distintas latitudes han canalizado sus esfuerzos al desarrollo de herramientas que faciliten esta tarea. Algunas de ellas se presentan a continuación.

1.6 Resumen

Como se observa, la diversidad de presas es amplia, y sus materiales de construcción pueden variar desde los naturales sueltos, hasta los artificiales como el concreto. Asimismo, existen diferentes diseños en función de la zona, capacidad, presupuesto e incluso época en las que se construyen. Pero independientemente del material con el que han sido edificadas, las presas forman parte importante de la infraestructura de un país, pues contribuyen directamente a su desarrollo.

En el siguiente capítulo se presentarán los métodos que se emplean en la evaluación de costos por fallas en obras de infraestructura. Con base en su análisis, se identificarán las técnicas más apropiadas y con potencial de ser usadas exitosamente en las presas bajo estudio.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE COSTOS POR FALLAS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

2.1 Introducción

A continuación, se presentan las metodologías desarrolladas y empleadas en el contexto mundial, para cuantificar los daños que provoca la eventual falla de obras de infraestructura. De hecho, vale la pena mencionar que el interés en evaluar la seguridad de las presas se ha incrementado en gran medida durante las últimas décadas (Chinnarasri *et al.*, 2004). Al respecto, dos conceptos medulares de seguridad de presas son: la reducción de pérdidas humanas, y la cuantificación de los daños provocados aguas abajo de la cortina de la presa. Ambos serán considerados para efectos de este capítulo y, más adelante, se definirá su rol en la construcción del modelo matemático aquí desarrollado para la evaluación de costos.

En relación a las técnicas de cuantificación de consecuencias, en los siguiente párrafos se expondrán las herramientas identificadas, se clasificarán, y se analizarán tomando en cuenta sus ventajas y desventajas. Asimismo, se presentarán detalles de las dos que fueron seleccionadas para realizar este trabajo: las RBC y el JEE, justificando su uso con base en aplicaciones similares a la de interés.

2.2 Métodos de evaluación de costos por falla

La literatura reporta la existencia de distintos métodos de evaluación de costos de fallas. De hecho, durante la revisión, se identificaron varias técnicas que se han empleado en el intento. Jacinto (2003) mencionó que, en general, existen las siguientes: modo de falla y análisis de efectos, análisis preeliminar de peligros, estudio de peligros, análisis de desviaciones, análisis de energía, análisis de seguridad, análisis de falla, análisis de eventos, diagrama de causa-consecuencia y análisis comparativo. Es importante notar que estas herramientas se orientan más al análisis de riesgos, los cuales implícitamente involucran la evaluación de consecuencias.

Para entender mejor estos conceptos, se definen a continuación los términos a emplear a lo largo de este documento. Método es un “procedimiento que se sigue en las ciencias para hallar la verdad y enseñarla” (RAE, 2008), y evaluación es “la acción de estimar, apreciar o calcular el valor de algo” (RAE, 2008). Así, un método de evaluación se entenderá como una serie de pasos a seguir, para lograr la mejor apreciación posible de un fenómeno dado, ya sea antes o después de que éste ha ocurrido.

En cuanto a costos de falla, Venegas (1994) propuso la siguiente definición en el contexto de la industria eléctrica: “*son una medida, en unidades monetarias, del daño económico y/o social que sufren los consumidores, producto de la reducción de la calidad de servicio y en especial por la energía no suministrada*”. Con base en dichas ideas, en el presente documento estos se delimitan como los costos públicos y privados totales, en pesos (\$) actuales, por todos los posibles daños y pérdidas en: infraestructura (escuelas hospitales, puentes, vías de comunicación, medios de transporte), campos de producción alimenticia

(cultivos, granjas), centrales de abasto y comercio, vivienda, centros de recreación, etc., ocasionados por la inundación debida a la falla de una presa.

Baró *et al.*, (2007a) sostienen que el cálculo de los daños económicos potenciales por inundación en una cuenca o subcuenca, es de gran importancia para implementar medidas de mitigación. Así, un acercamiento rápido y apegado a la realidad de las pérdidas económicas antes, durante y después de uno de estos fenómenos, es de gran utilidad para la asignación de recursos orientados a la prevención, recuperación y reconstrucción de las áreas afectadas.

En general, los procedimientos para la evaluación de costos de falla de una estructura, incluidas las presas de tierra, se pueden clasificar en tres categorías: métodos directos, indirectos y mixtos (Venegas, 1994). Los primeros se fundamentan en la recopilación de datos en campo, ya sea a través de encuestas, cuestionarios ó visitas a los afectados en el lugar, y justo después de que el evento ha ocurrido, con el fin de hacer una estimación real de los daños. Dichos métodos también generan información adicional que puede ser valiosa para asegurar la solidez y credibilidad del ejercicio.

Por otro lado, los métodos indirectos se basan en el uso de información histórica para estimar los perjuicios de un fenómeno, que se repite con frecuencia en cierta región. En otras palabras, estos métodos se construyen a partir del conocimiento previo de las variables de interés, normalmente generados por los métodos directos, y se aplican a las nuevas situaciones para calcular las consecuencias esperadas de un evento dado (Venegas, 1994).

Los métodos mixtos por otra parte, incluyen un conjunto de herramientas, relativamente jóvenes, que se han desarrollado durante los siglos XX y XXI, aunque tienen sus orígenes en el siglo XVII con Turgot y otros estudiosos de la econometría (Schumpeter, 1934). Estos métodos consisten básicamente en la integración de los directos e indirectos, con la particularidad de que además aprovechan las herramientas de la estadística, las matemáticas, la investigación social y la teoría económica. Su objetivo último es la elaboración de modelos que permitan determinar relaciones empíricas entre fenómenos y variables. A continuación se presenta un análisis crítico de estos tres tipos de evaluaciones.

2.2.1 Métodos directos

Como ya se había adelantado, se trata de herramientas que generan conocimiento a partir de la recopilación de datos en campo. La información que se utiliza necesariamente tiene que ser recavada para el estudio en cuestión. Así, el empleo de una técnica adecuada para la recopilación, administración, interpretación y manejo de los datos por primera vez, es un factor clave para que los resultados de la evaluación sean confiables.

Los métodos directos son convenientes por que ofrecen al analista la oportunidad de contar con información detallada, verídica y aplicable al caso de estudio. No solo eso, también contribuyen a generar bases de datos que pueden utilizarse en el futuro, para hacer evaluaciones similares mediante métodos indirectos. Consecuentemente ofrecen

información objetiva, ya que ésta resulta de la estimación inmediata de los daños evaluados.

Sin embargo, este enfoque es normalmente reactivo pues se aplica una vez que el fenómeno ha ocurrido. Además, la obtención de información no es una actividad sencilla puesto que el observador debe tener acceso a los datos detallados de la región que se estudia, por ejemplo la localización de la presa, el área potencial de afectación, la infraestructura probablemente afectada, así como la ubicación y características de escuelas, viviendas, hospitales, puentes, vías de comunicación y medios de transporte. Aunado a estos requerimientos, es necesario contar con recursos humanos, económicos y de tiempo para poder concluir satisfactoriamente el ejercicio.

Más aun, la aplicación del método es limitada cuando las fuentes de información no se encuentran estandarizadas, concentradas en un solo lugar y actualizadas (por ejemplo en un sistema de información), por que el investigador tendría que asumir la responsabilidad no solo de recopilar los datos, sino también de diseñar y construir una base para procesarlos y analizarlos.

En México, el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), a través de los censos, ha levantado datos en campo que indican la cantidad y “costos” de los bienes almacenados en los hogares del país. Aunque esta información no se recaba con fines de estimación de costos por fallas, es un ejemplo del esfuerzo que implicaría, en términos de recursos humanos y financieros, llevar a cabo una investigación de este tipo. A pesar de ello, el conocimiento generado por el INEGI es muy útil ya que puede ser empleado como punto de partida cuando se utilizan los métodos indirectos de evaluación de costos.

Un ejemplo práctico de este tipo de estimación, es el estudio realizado por Bitrán *et al* (2002), que es parte de una serie de publicaciones del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). El trabajo presenta los resultados de un arduo trabajo de recolección de datos, realizado directamente en campo, donde se resumen los daños causados anualmente por desastres naturales en la nación. Los detalles incluidos van desde el número de postes derribados durante un huracán, hasta el número de escuelas afectadas por efecto de una inundación.

Para facilitar la recolección de datos, se han firmado convenios con instancias gubernamentales como la CFE y la Secretaría de Educación Pública (SEP), mismas que emiten reportes minuciosos de los daños en sus obras de infraestructura, generados por dichos fenómenos. Básicamente, la metodología empleada en dicho trabajo busca cuantificar los impactos directos e indirectos de los desastres naturales. Así, cuestiones como la disminución de producción de bienes y servicios, y la interrupción de las actividades económicas de la localidad afectada, son estudiadas. En esencia, los costos directos son valorados en términos de los precios de reposición de los bienes perdidos o afectados.

Cabe señalar que, a pesar de ser un estudio “detallado”, solamente se incluyen los mayores costos ocasionados, por ejemplo, los derivados de la interrupción normal de ciertos

servicios como el transporte, la electricidad, y el agua. Esto se debe a la complejidad que representa la tarea de recolectar la información.

2.2.2 Métodos indirectos

En contraste con los directos, los métodos indirectos no involucran la recopilación de datos primarios en campo. Más bien, parten de ellos para realizar el análisis de situaciones presentes o futuras relacionadas que, se asume, comparten características con los eventos predecesores que dieron origen a la información. Es importante aclarar que los conocimientos usados, pueden provenir de fenómenos ocurridos en la misma región o en otras distintas al lugar de interés. Finalmente el objetivo es hacer estimaciones más rápidas y que empleen menos recursos humanos, que las que se pudieran obtener con mediciones en el lugar de los hechos.

A diferencia de los métodos directos, los indirectos son proactivos, ya que permiten realizar las evaluaciones o estimaciones de daños antes de que se presente el fenómeno causante. A pesar de que en ocasiones es necesario ajustar, adaptar y actualizar la información disponible, definitivamente estos métodos ofrecen una ventaja en términos del tiempo y recursos invertidos para generar el conocimiento que se requiere en la toma de decisiones.

No obstante, los indirectos son menos objetivos que los directos, ya que sus resultados dependen del criterio que el analista emplea para, por ejemplo, actualizar la información. Mientras que un examinador de daños puede hacer uso de las tasas de inflación para determinar la equivalencia de una unidad monetaria de hace una década con una actual, alguien más podría emplear como base el costo del dólar, o las técnicas clásicas de actualización del valor del dinero en el tiempo como el Valor Presente Neto (VPN).

De esta manera, existe un factor crítico del que depende el éxito y la trascendencia de los métodos indirectos, sin el cuál su empleo es insostenible: la información. Es decir, para poder realizar una evaluación es indispensable contar con una base de datos que contenga información no sólo del inventario de bienes, insumos, productos y servicios que se ofrecen en la zona afectada, sino también de las tasas de desarrollo de la región, tomando en cuenta tanto los crecimientos económicos, como los industriales, sociales y tecnológicos. El objetivo final de estos datos es proyectar, con la mayor precisión posible, una curva que represente el crecimiento del lugar, que se pueda usar para las estimaciones de daños.

El uso de estos métodos en la práctica fue reportado por Baró *et al*, (2007a). En su estudio, se propone la construcción de curvas de daños económicos potenciales por inundación, empleando métodos hidrológicos-hidráulicos, y encuestas previas con datos recabados por el INEGI. Para calcular los daños tangibles directos, sugieren el uso de dichas curvas, las cuales consideran dos factores principales, la profundidad de la inundación y su duración (ver Figura 2.1).

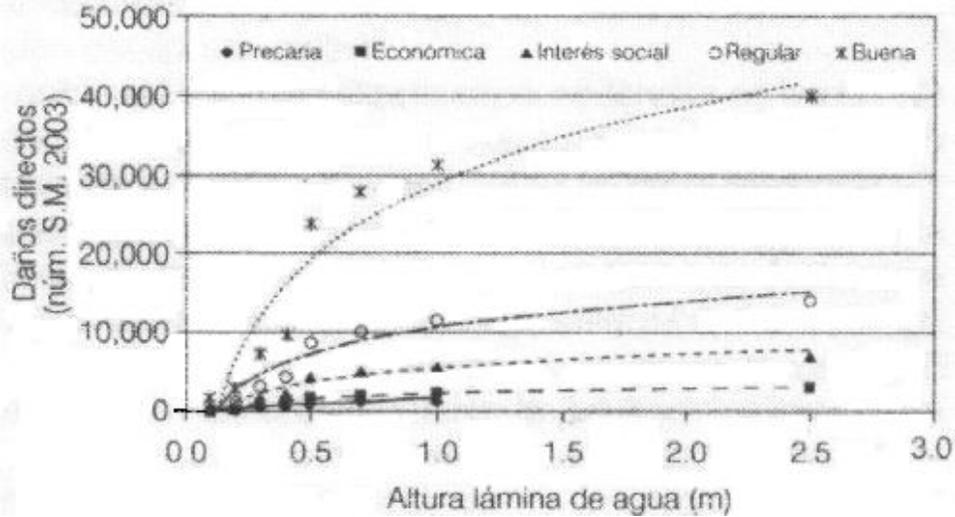


Figura 2.1 Curva de daños potenciales por inundación para vivienda de una planta (Baró *et al*, 2007a)

Las curvas relacionan el monto de los daños (\$) con la altura de la lámina de agua (m) que los provocaría, y fueron construidas con base en el caso hipotético del desbordamiento del Río Tejalpa, en la cuenca alta del Río Lerma en el Estado de México. Para la realización del estudio, los autores tuvieron la necesidad de contar con información detallada del sitio bajo estudio. Así, el primer paso consistió en determinar las zonas potenciales de inundación, para lo cual utilizaron un software comercial desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada Norteamericana -USACE por sus siglas en inglés- (USACE, 1998), que es una herramienta que permite simular el tránsito de avenidas a través de cauces (Figura 2.2).

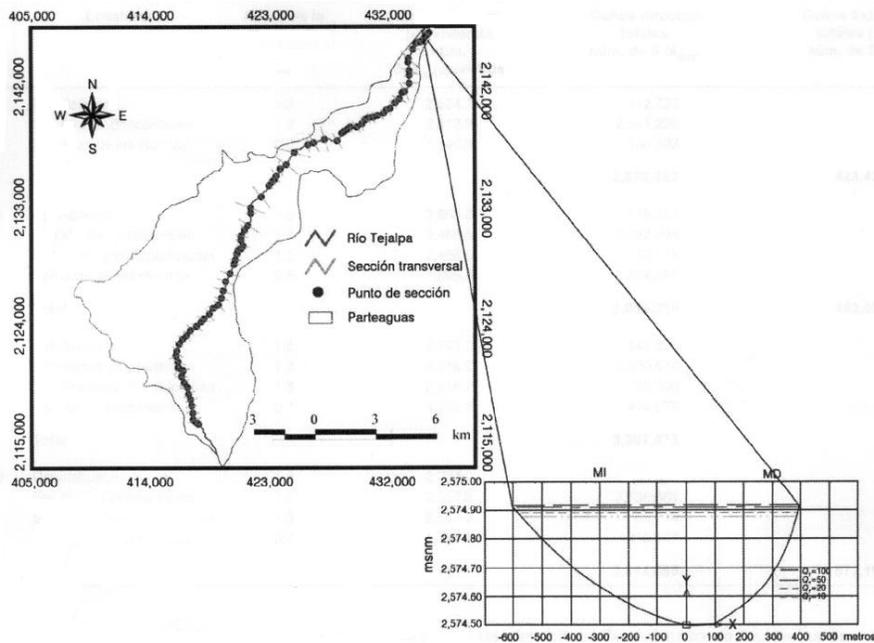


Figura 2.2 Secciones transversales del cauce del Río Tejalpa (Baró *et al*, 2007b)

No obstante, uno de los insumos principales del programa descrito, es la topografía detallada del cauce completo (curvas de nivel a cada metro), la cual es difícil de obtener, sobretodo en cauces que no han sido explorados. Posteriormente se emplearon las Áreas Geostatísticas Básicas -AGEB, que es la unidad mínima de análisis a través de la cual el INEGI reporta sus censos- (INEGI, 2000), y se supusieron los daños a los que podrían estar propensas dichas áreas. Además, fue necesaria la cuantificación de los cultivos afectados, y por último, el análisis de los datos por medio de un Sistema de Información Geográfica -SIG- (Díaz *et al*, 1998), lo cual facilitó su interpretación.

Como revela la anterior descripción, los métodos empleados en el estudio implican la consideración de detalles muy específicos, sin tomar en cuenta que también es necesario información concerniente al: tipo de muebles en las casas, precios de los mismos, y materiales de construcción de los hogares. Adicionalmente, se requiere de la zonificación detallada del lugar y datos relativos al relieve, curvas de nivel, geomorfología, secciones transversales del cauce y, áreas y tipos de cultivo. Aunque los resultados del estudio son relativamente precisos, le tomó a sus autores alrededor de cuatro años obtenerlos (Baró *et al*, 2007b).

Otro ejemplo donde se aplicaron estos métodos, pero de manera más simplificada que en el caso anterior, fue reportado por Delgado y De León (2007). Esos autores los usaron para estimar los posibles costos de la falla de un puente, diseñado para erigirse en la zona blanda de la Ciudad de México. Para ello, propusieron una curva en la que se graficó la variación de la confiabilidad contra el costo de las consecuencias. En su estudio, indicaron que dichos costos podían variar en un rango que oscilaba entre 20 y 100 veces el costo inicial de construcción de la estructura.

La Figura 2.3 exhibe la gráfica descrita, donde el eje de las abscisas representa la relación del costo de falla (C_d) al costo inicial (C_i), y en el eje de las ordenas se muestra el coeficiente de confiabilidad aceptable (Beta). En el estudio del puente, los autores emplearon la relación $C_d/C_i = 60$, es decir, asumieron que en ese tipo de estructura los costos generados por su eventual falla superarían 60 veces la inversión inicial que le dio origen a la obra.

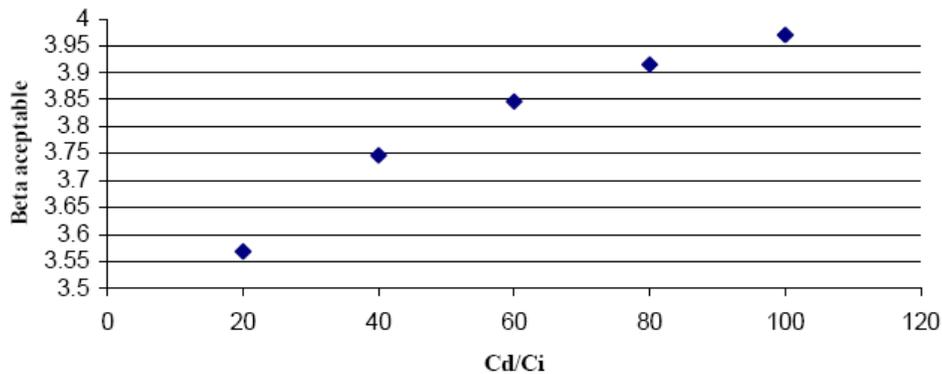


Figura 2.3 Confiabilidad óptima para el puente en estudio para diversas relaciones de costo de falla (C_d) contra costo inicial de construcción (C_i), (Delgado y De León, 2007)

De esta forma, dedujeron que el Beta aceptable era de 3.85, y llevaron a cabo un diagnóstico del puente de interés para determinar su coeficiente de confiabilidad, que resulto ser de 3.68. Con base en estos resultados concluyeron que los elementos estructurales del puente requerían ser rediseñados, básicamente incrementando sus refuerzos, para alcanzar el Beta mínimo aceptable. Esta recomendación debe ser tomada en cuenta si se quiere evitar incurrir en los costos potenciales, ya que se reitera, pueden alcanzar factores de 60 veces los costos iniciales⁴.

Como se puede apreciar, existe mucha incertidumbre en dicha estimación y el nivel de error puede ser considerable. Pese a ello, es posible realizar análisis de sensibilidad que permiten identificar la relación crítica de los costos de falla contra los costos de construcción, como se realizó en dicho estudio (Delgado y De León, 2007). Es precisamente aquí donde radica la conveniencia de los métodos indirectos, porque sin efectuar la ardua labor de obtener los datos en campo, permite hacer estimaciones de los niveles de daños causados por, en este caso, la falla de obras de infraestructura.

2.2.3 *Métodos mixtos*

Como ya se había adelantado, los métodos mixtos integran los dos tipos anteriores, además de la estadística, las matemáticas, la investigación social y la teoría económica. El principal objetivo de este enfoque es la elaboración de modelos matemáticos que permitan predecir la ocurrencia de fenómenos y cuantificar sus consecuencias a partir de datos existentes.

Así, los métodos mixtos, proponen metodologías y/o procedimientos, capaces de estimar anticipadamente las consecuencias de eventos y, mitigar el impacto que un fenómeno pudiera causar en cierta región y bajo determinadas condiciones. Al igual que en los casos anteriores, la evaluación de costos no es tarea fácil, por ello se recurre a diversas técnicas y disciplinas, con el fin de que los modelos desarrollados puedan pronosticar la magnitud de los daños esperados. Para lograrlo, dichos modelos tienen que basarse en datos y conocimientos específicos, que en ocasiones no se pueden obtener a través de experimentos, ni mediante registros históricos (pues estos son inexistentes).

De hecho, en este proyecto de investigación, se pretende predecir dichas variables, por lo que resulta conveniente elaborar uno de estos modelos, para aprovechar los beneficios de los métodos directos e indirectos, así como de las herramientas numéricas disponibles. El análisis crítico que se realizó para los dos temas anteriores se efectuará más adelante en la discusión, tomando como punto de partida la información que se presentará en el caso de estudio.

Para desarrollar el modelo mencionado, primero se llevó a cabo una revisión de la literatura, cuyos resultados revelaron que, en los análisis de riesgos en infraestructura, una

⁴ Cabe destacar que aunque el ejemplo mencionado analiza el caso de un puente, el autor ya explora la posibilidad de adaptarlo a presas, y espera presentar los resultados mediante una publicación futura. En principio se ha pensado en el XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, a celebrarse en 2010.

variable importante corresponde precisamente a la cuantificación de costos debidos a las fallas (Stahl, 1986). Así, en materia de riesgos de presas por ejemplo, Brown and Aspinall (2004) emplearon el JEE para, mediante la opinión de especialistas, cuantificar el proceso de erosión interno de presas de tierra. Los resultados fueron favorables y la metodología empleada parece adecuada para alcanzar el objetivo del presente estudio ya que ha sido aplicada y probada en las estructuras que se analizan.

Además, se identificaron las Redes Bayesianas (Cooke and Goznes, 2008) como una herramienta de soporte que, en combinación con el juicio de expertos, puede generar modelos poderosos capaces de evaluar probabilidades de falla, niveles de riesgo y costos de consecuencias en las obras bajo análisis. Como resultado, a continuación se presentan más detalles de ambas.

2.3 Redes Bayesianas

Este tipo de redes hace uso de gráficos, los cuales ofrecen una herramienta probabilística clara y flexible, para elaborar modelos conceptuales y cuantitativos. De hecho, su claridad y flexibilidad son las principales causas por las que, en los últimos años, las teorías matemáticas para cuantificarlas han tenido un gran auge (Hanea, 2008). Así, las redes Bayesianas⁵ son modelos que se han usado en la teoría de la probabilidad para realizar inferencias, y para asociar variables con relaciones complejas entre si.

Los modelos emplean nodos y arcos (ejes o flechas), para representar gráficamente las variables aleatorias que caracterizan a un fenómeno y sus interacciones, respectivamente. Mientras que las variables pueden tener distribuciones de probabilidad discretas (RBD) o continuas (RBC), los arcos asumen valores numéricos, que representan la intensidad de su interdependencia. En cualquier caso, se trata de grafos dirigidos a-cíclicos que simbolizan distribuciones de probabilidad, pudiéndose emplear en diversas áreas científicas (Hanea and Cooke, 2006). La Figura 2.4 presenta un par de ejemplos de Redes, siendo la (b) la correspondiente a una Red Bayesiana.

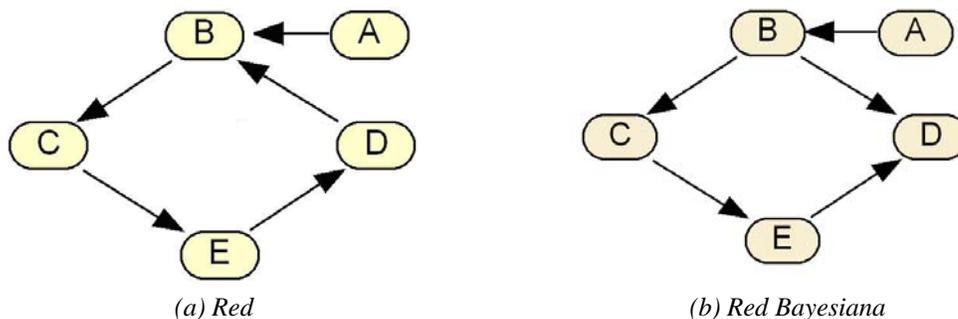


Figura 2.4 Esquema de una Red y de una Red Bayesiana de cinco nodos y cinco arcos (Netica)

⁵ Las redes nacieron en 1763 cuando, después de su muerte, se publicó el artículo llamado “An Essay Towards Solving Problem in the Doctrine Chances”, del Reverendo Thomas Bayes (Bayes, 1763). Aunque dicho documento sólo presentaba los conceptos básicos del Teorema de probabilidad que lleva su nombre, en él se sentaron las bases para desarrollar las “Redes Bayesianas” (Fienberg, 2006).

Como se puede observar, en ambos casos se tiene un conjunto de nodos (A-E), unidos por arcos que tienen dirección (dirigidos). Sin embargo, en el primer caso (a) los arcos generan un ciclo, ya que cuando parten del nodo B, las flechas eventualmente vuelven a llegar al mismo nodo. En contraste, el caso (b) es acíclico, es decir, en ningún momento las flechas que parten de un nodo, vuelven a regresar al mismo, por lo que se trata de una Red Bayesiana.

Una vez explicado el concepto de Red Bayesiana, es necesario mencionar que tanto los nodos como los arcos juegan roles distintos. Por ejemplo, un nodo que precede a otro, recibe el nombre de *padre*; y el nodo que lo sucede recibe el nombre de *hijo*. Cabe destacar que, existen casos en los que un nodo puede ser antecedido por más de un padre. En dicha situación, a los ancestros se les conoce como *conjunto de padres*, grupo que incluye también a los padres de los padres y demás generaciones antecesoras. Similarmente, existen casos en el que un padre puede tener varios hijos, ó un *conjunto de hijos*, que es el grupo de *descendientes* y está formado por los hijos, los hijos de los hijos y demás generaciones venideras.

Por otro lado, los *arcos* denotan la relación entre las variables representadas en la Red Bayesiana. Por ejemplo, en una Red Continua (ver detalles abajo sobre este tipo de redes), dichas relaciones son los coeficientes de correlación existentes entre las variables, por lo que sus valores oscilan entre -1 y 1, en función de la intensidad y dirección de la interacción (ver sección 2.4.2 adelante). En la Figura 2.5 (a) se presenta un ejemplo de Red Bayesiana Discreta con tres nodos, siendo el “A” padre tanto de “B” como de “C”. En la parte (b), se presenta un ejemplo de Red Continua, también con tres nodos que guardan el parentesco de la RBD, estando “A” mayormente correlacionado con “B” que con “C”.

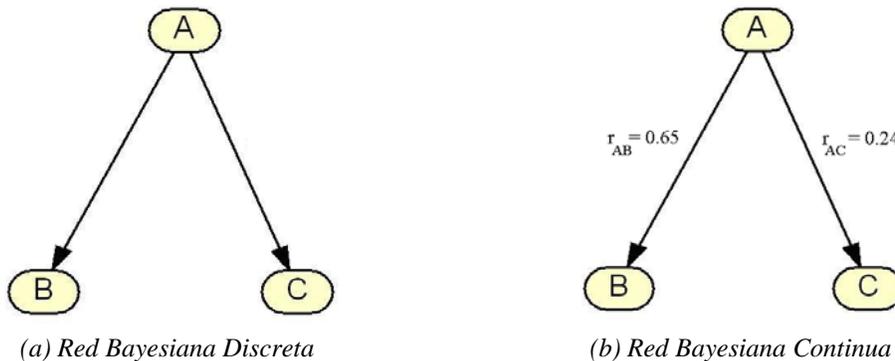


Figura 2.5 Redes Bayesianas de tres variables, un padre y dos hijos

En el caso de la RBC de la Figura anterior (b), las dos correlaciones son positivas lo que significa que entre más crece “A”, más lo hacen tanto “B” como “C”. En términos matemáticos se dice que “A” y “B” son monotónicamente crecientes. Cabe resaltar que en las RBD los arcos no representan correlaciones, sino probabilidades marginales ó condicionales entre los nodos. Esto se discute sucintamente en las siguientes secciones, aunque un análisis completo de las Redes Bayesianas, y su comparación con otros modelos similares, se puede encontrar en Hanea *et al* (2006).

2.3.1 Redes Bayesianas Discretas

Las RBD se usan para representar distribuciones de probabilidad multidimensionales discretas. Cuando las variables consideradas en un estudio son de este tipo, a cada nodo sin padres se le asigna una tabla de probabilidad marginal, y a cada nodo con padres se le asigna una tabla de probabilidad condicional (Morales *et al*, 2008a). Por ejemplo, la Tabla 2.1 presenta ambas tablas para la RBD de la Figura 2.11 (a), con tres estados de probabilidad para cada nodo (bajo, medio y alto). Así, considerando estos tres estados, el nodo padre “A” tendría una tabla de probabilidad marginal como la del lado izquierdo de la Tabla 2.1, y cualquiera de los dos nodos hijos, tendría una tabla de probabilidad condicional de nueve estados similar a la del lado derecho. Como se había adelantado, se trata de probabilidades marginales o condicionales, lo cual depende de la existencia o no de nodos padre.

Tabla 2.1. Tablas de probabilidad marginal y condicional (Netica)

<i>Padre, A</i>			<i>Hijo, B</i>			
Bajo	Medio	Alto	A	Bajo	Medio	Alto
35.000	40.000	25.000	Bajo	25.000	45.000	30.000
			Medio	35.000	35.000	30.000
			Alto	40.000	25.000	35.000

(a) Distribución marginal

(b) Distribución condicional

Como se puede apreciar en la tabla anterior, para el nodo padre “A”, se tienen tres probabilidades: *Bajo*, *Medio* y *Alto*, pero ahora para el nodo hijo “B”, se tienen nueve debido a que está condicionado por el nodo “A”. Es decir, la probabilidad de que ocurra el valor *Medio*, en el nodo padre es 0.4, pero para el nodo “B”, la probabilidad de que ocurra el valor *Medio* es 0.45, dado que ocurrió el valor *Bajo* en “A”, o 0.35 dado que ocurrió el valor *Medio* en “A”, o 0.25 dado que ocurrió *Alto* en el padre.

En general, cuando las variables consideradas en el modelo son discretas, para el nodo *i* se deben especificar *k* probabilidades condicionales, en donde *k* es igual al producto del número de estados del nodo *i*, por el número de estados de cada uno de los padres de *i*. En otras palabras, la cantidad de parámetros a ser especificados en una red discreta crece exponencialmente con el número de padres de cierta variable, y el total de estados de cada uno de estos. Pearl (1988) ofrece más detalles sobre redes discretas.

De nuevo, cuando los modelos incluyen un gran número de variables, el uso de las RBD se dificulta (Hanea, 2008). No obstante, existen las Redes Bayesianas Continuas No Paramétricas (RBCNP), que ofrecen una alternativa poderosa, e innovadora, para modelar fenómenos con esta herramienta. A continuación se presentan sus principales características.

2.3.2 Redes Bayesianas Continuas No Paramétricas.

La principal desventaja de usar una RBD, además de que su crecimiento es exponencial, radica en el hecho de que no necesariamente las variables que modela son discretas. En algunas ocasiones las variables continuas se tienen que discretizar con la intención de poder ajustarlas a los requerimientos de una RBD. Sin embargo, esta no es la mejor solución, por lo que recientemente ha habido avances científicos para manejar las RBCNP (Morales *et al*, 2008b).

Al igual que sus contrapartes discretas, las RBCNP son grafos dirigidos y a-cíclicos, pero ahora a cada nodo se le asigna una distribución continua de probabilidad (o discreta si es requerido). En términos de los arcos, a diferencia de las RBD que representan, o probabilidades marginales o condicionales entre las variables, éstos reciben correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango, las cuales permiten establecer la fuerza de la interacción entre los nodos que unen. La asignación de las correlaciones de rango se describe brevemente enseguida, aunque el procedimiento detallado puede ser encontrado en Hanea and Cooke, (2006) y Morales *et al* (2008b).

2.4 Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango

Para el caso de la RBC, de cuatro nodos y cuatro arcos, mostrada en la Figura 2.6, la asignación de correlaciones de rango sería dada de la siguiente manera:

1. Como primer paso, se debe establecer una cronología, es decir, elegir un orden para los nodos. En este caso se optó por: 1, 2, 3, y 4.
2. Ahora, se denotan las correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango como:
 - a. Entre la variable 1 y 2: $r_{2,1}$,
 - b. Entre las variables 2 y 3: $r_{3,2}$,
 - c. Entre las variables 3 y 4: $r_{4,3}$, y
 - d. Entre las variables 2 y 4: $r_{4,2|3}$.

En donde la última, $r_{4,2|3}$, es la correlación de rangos de 4 y 2 dado 3. Como se puede apreciar, existe una relación directa entre nodos padre y nodos hijo.

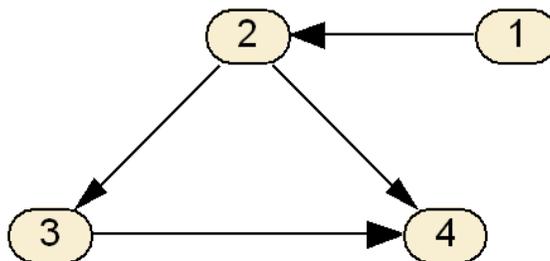


Figura 2.6 Red Bayesiana Continua de cuatro nodos y cuatro arcos (Netica)

Es importante mencionar que la inserción de nuevos arcos a la red requiere un análisis detallado, ya que se generarán correlaciones condicionales nuevas entre los padres e hijos existentes, y los nuevos arcos. Esto puede ser expresado en los siguientes términos (Hanea *et al*, 2006):

$r_{nodo\ destino, nodo\ origen}$ para un solo padre o el primer nodo, y

$r_{nodo\ destino, nodo\ origen/correlaciones\ antecesoras}$ para dos o más padres

Se puede observar que los pasos anteriores no dan una asignación única a cada red. Por ejemplo, si se hubiera optado por el siguiente orden: 1, 2, 4, y 3 en la misma figura; las correlaciones de rango hubieran sido:

- a. Entre la variable 1 y 2: $r_{2,1}$,
- b. Entre las variables 2 y 3: $r_{3,2}$,
- c. Entre las variables 2 y 4: $r_{4,2}$, y
- d. Entre las variables 3 y 4: $r_{4,3|2}$.

En general, las correlaciones entre las variables dependerán del orden seleccionado para los nodos que las contienen. Pero independientemente de ese orden, las correlaciones de rango condicionales son, en conjunción con las distribuciones de probabilidad continuas, el segundo elemento a considerar en las RBCNP. En este sentido, se puede afirmar que una correlación de rango condicional es similar a una correlación simple, excepto por que se calcula con la distribución condicional, es decir, se trata de la correlación que existe entre dos variables, dado un evento aleatorio que tiene implicaciones sobre la variable de interés. Por esta razón, en lo sucesivo tanto las correlaciones de rango condicional como las simples serán referidas únicamente como “correlación”.

Las correlaciones existentes entre dos variables pueden adoptar distintas formas dependiendo de su sentido e intensidad. La Figura 2.7 muestra tres ejemplos representativos.

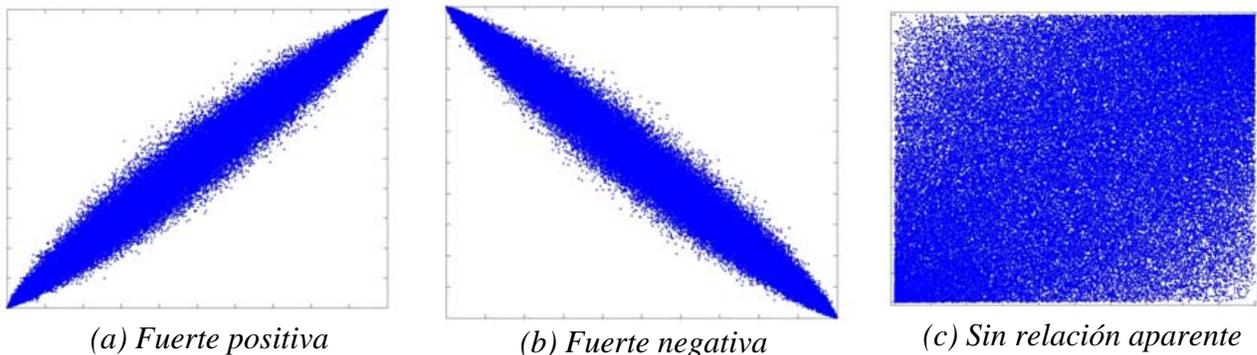


Figura 2.7 Tipos de relaciones entre variables (Morales *et al*, 2008)

En el primer caso (a), a valores *altos* de una variable le corresponden valores *altos* de otra, por lo que existe una correlación positiva entre ambas. Cabe notar que, mientras más fuerte sea esta relación, el valor de la correlación se aproximará a +1. En el extremo opuesto (b),

si a valores *altos* de una variable le corresponden valores *bajos* de otra, entonces se tendrá una correlación negativa entre las variables. Igualmente, mientras más fuerte sea esta relación, el valor de la correlación se aproximará a -1. En el último caso (c), si aparentemente no existe una relación entre las variables, éstas son llamadas independientes. Aquí, valores altos o bajos de una variable no se relacionan con los valores de la otra variable y su correlación tendería a cero (por la izquierda o por la derecha).

Pese a la descripción que hasta ahora se ha dado de las Redes Bayesianas y las correlaciones de rango, no se ha enfatizado la importancia de un factor crítico de éxito en su empleo: la información. En efecto, para usar correctamente esta herramienta, es indispensable la existencia de datos, que alimenten los modelos. Es desafortunado reconocer que, sin embargo, existen ocasiones en las que la información sobre las distribuciones de probabilidad puede ser inexistente. En este escenario, el Juicio Estructurado de Expertos (JEE) ofrece una metodología probada, para cuantificar las distribuciones marginales de probabilidad que no pueden ser generadas a partir de datos medibles (Morales *et al*, 2008b). A continuación se presentan algunos detalles de esta alternativa, resaltando su aplicabilidad para el presente trabajo.

2.5 Juicio Estructurado de Expertos⁶

El JEE es una metodología para solicitar, de manera transparente, las opiniones de especialistas, con el objetivo de tratar sus reflexiones como datos científicos, en un proceso formal de toma de decisiones. Su aplicación se fundamenta en el supuesto de que los participantes cuentan con experiencia científica previa en un tema, por lo que conocen las teorías y valores de ciertos parámetros de interés, mismos que no pueden ser directamente medidos. La incapacidad para cuantificar dichos parámetros puede responder a la presencia de restricciones de diferente índole, como la inaccesibilidad a datos e incluso la inexistencia de estos.

En este tenor de ideas, el juicio de especialistas es relevante cuando la incertidumbre científica tiene impacto en los procesos de toma de decisiones. Cuando se presenta esta situación, los expertos aportan información importante ya que cuentan con diferentes perspectivas con respecto al valor de los parámetros de interés. Pese a que el propósito último del JEE no es alcanzar un acuerdo entre los especialistas, la combinación de sus opiniones juega un rol fundamental en la metodología “clásica”, como se describirá en breve.

Históricamente, la consulta sobre un tema particular a peritos en la materia no es nueva en las ciencias aplicadas. No obstante, la idea de tratar sus opiniones, pronósticos y especulaciones de manera estructurada para soportar la toma de decisiones, si lo es (Cooke, 1991). En este sentido, Cooke and Goznes (2008), sostienen que si un conjunto de pasos quieren ser considerados como “juicio de expertos”, deben satisfacer tres objetivos primordiales:

⁶ La sección que se presenta, se basa en el trabajo de Morales y Cooke (2008)

- Censo: en el que se realiza una evaluación de la distribución de los puntos de vista en la comunidad científica, respecto a una variable o fenómeno de interés,
- Consenso político: que es un procedimiento a través del que se asignan pesos específicos a las opiniones de expertos, con base en la importancia de los grupos que representan. Una alternativa de consenso político, ampliamente usada en la práctica, es la que otorga pesos específicos iguales a cada participante, y
- Consenso racional: que se refiere a un proceso de toma de decisiones en grupo, en el que se acuerda previamente una metodología para generar la representación de incertidumbre sobre un fenómeno estudiado. El compromiso de cada uno de los actores con la metodología selecta es fundamental, ya que permite llegar a resultados consistentes, aunque no necesariamente cada miembro coincida con dichos resultados. En esencia, se pretende generar acuerdos sobre la distribución que representará al grupo, y no sobre los resultados específicos del ejercicio.

Como ya se mencionó, el JEE no es nuevo y tiene variantes. En particular, el “modelo clásico”, que será utilizado en esta investigación, fue documentado a principios de los 90s de manera formal por Cooke (1991). Recientemente, se llevó a cabo un recuento de sus características principales, en combinación con un ejemplo de la industria aérea, lo cual denota el desarrollo que este enfoque ha tenido durante casi dos décadas (Morales y Cooke, 2008).

Algunas de las principales aplicaciones del JEE (clásico) se han desarrollado en sectores como: la industria nuclear, la aeronáutica, la química y de gas, la construcción, la vulcanología, y el sector salud (Cooke and Goznes, 2008). Actualmente, se cuenta en los archivos de la Universidad Tecnológica de Delft, (TU Delft), con registros de más de 67,000 distribuciones de probabilidad subjetivas, generadas con el enfoque clásico.

El nombre “modelo clásico”, tiene su origen en una analogía entre las pruebas de hipótesis de la estadística clásica, y el cálculo de calibraciones en el JEE. Así, un concepto clave en dicho modelo es el de *variables de calibración*, que son aquellas cuyo valor verdadero, en el momento de la consulta, es conocido por el analista pero no por el experto. Estas variables cumplen con tres funciones:

- Cuantificar el desempeño de los expertos como asesores de incertidumbre. En esta línea de ideas, las medidas que se obtienen para valorar el desempeño individual de los expertos son dos: la *puntuación de calibración -PC-*, y la *puntuación de información -PI-* (descritas con mayor profundidad adelante),
- Combinar las opiniones de los expertos, con base en su desempeño individual, para generar *distribuciones de probabilidad* óptimas, y
- Evaluar y validar la combinación de los juicios de expertos.

De esta manera, el modelo clásico tiene como objetivo fundamental alcanzar el *consenso racional* y, para que esto suceda, se deben satisfacer las condiciones enseguida expuestas (Cooke, 1991):

2. Métodos de Evaluación de Costos

- Capacidad de escrutinio y confiabilidad, que se refiere a que todos los datos, incluyendo los nombres de los expertos, sus predicciones, y todas las herramientas de procesamiento, deben estar disponibles para la eventual evaluación de la comunidad y, de ser necesario, los resultados deben ser reproducibles por un grupo de revisores competentes,
- Control empírico, afín con controles de calidad prácticos, de las predicciones cuantitativas propuestas por los expertos,
- Neutralidad, relacionada con la metodología empleada para evaluar y combinar los juicios expertos, la cual debe promover que los especialistas declaren sus verdaderas percepciones, evitando sesgar los resultados, y
- Equidad, es decir, que los peritos no deben ser evaluados antes de procesar los resultados de sus predicciones.

En esencia, los expertos son cuestionados acerca de variables que pueden tomar valores inciertos en un rango continuo, y generalmente se les preguntan los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución subjetiva de incertidumbre. Cabe mencionar que, una vez que se ordenan ascendientemente, el percentil 5 corresponde al valor que está por encima del 5% de los datos. De igual forma, el percentil 50 es aquel que está arriba del 50% de los datos (y por lo tanto por debajo del otro 50%), y así sucesivamente. En algunos estudios los percentiles 25 y 75 también han sido usados.

Es oportuno mencionar aquí que el JEE no compete a todos los ámbitos de interés de la ciencia. Por ejemplo, su uso para cuantificar la velocidad del sonido o la distancia de la tierra a la luna, no es relevante. Estas cantidades son físicamente cuantificables, y se han logrado medir satisfactoriamente en el pasado. Habiendo explicado este punto, se aclara que para extraer la información, los especialistas se enfrentan a planteamientos tales como:

“Tome como referencia la ocurrencia de un sismo superior a 8 grados Richter en las costas de Acapulco. Ahora, considere los costos directos totales, por todos los posibles daños y pérdidas ocasionados por el colapso del puente vehicular que une el centro histórico de la ciudad, con la zona conocida como Punta Diamante. Indique el 5, 50 y 95 percentil de su distribución de incertidumbre (medidos en pesos (\$) actuales)”.

Así, el experto podría dar los siguientes valores: \$ 20,000; \$3'000,000; y \$19'000,000 respectivamente, lo cual indicaría que tiene una gran incertidumbre, como lo muestra la separación entre los percentiles. La Figura 2.8 presenta la distribución hipotética que se podría generar con estos datos. Como se puede apreciar, para el especialista sólo el 5% de las veces se tendrían costos directos inferiores a \$20,000. Análogamente, en la mitad de las ocasiones se tendrían costos menores a \$3'000,000 y, esperaría que en un 95% de los eventos se alcanzaran costos por debajo de los \$19'000,000.

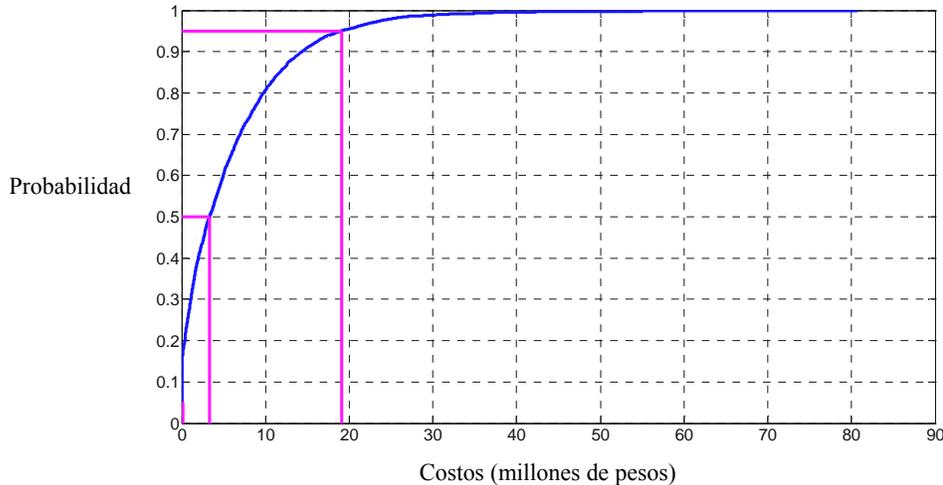


Figura 2.8 Distribución de probabilidad acumulada hipotética de los costos directos por la falla de un puente (UniNet-Matlab)

Por otro lado, las *preguntas de calibración*, presentan un formato idéntico al planteamiento descrito. Intuitivamente se puede decir que la PC (puntuación de calibración) mide la probabilidad de que un conjunto de resultados experimentales correspondan, en un sentido estadístico, con las respuestas brindadas por los especialistas. Esta alcanza su valor máximo en 1 y, valores cercanos a cero indican que es poco probable que la información proporcionada por el experto sea correcta. En contraste, la PI (puntuación de información) mide el grado en el que una distribución está “concentrada” o “extendida” con relación a una distribución de probabilidad base, como la uniforme o la loguniforme.

Para ilustrar mejor los conceptos de calibración e información, se puede decir que la primera mide la probabilidad de que los resultados experimentales de una variable, sean similares a las respuestas que brinda un experto en las preguntas de calibración que se le apliquen. Similarmente, el grado de información indica que tan precisas son las respuestas del perito. Por ejemplo, un experto que ofrece percentiles con intervalos lejanos es poco informativo, y su nivel de calibración dependerá de que tan parecidas sean sus respuestas con respecto al vector teórico de probabilidades. En este sentido, un experto podría tener una mala calibración, de nuevo, por que los percentiles que brindó no son similares a los del vector de probabilidades teórico, sin embargo, si el intervalo entre los percentiles que ofrece es relativamente pequeño, tendrá una puntuación de información alta. La Tabla 2. 1 muestra un ejemplo numérico ilustrando estos dos conceptos.

Como se aprecia en la tabla siguiente (Tabla 2.2), cuando ambos niveles son bajos, el experto proporciona valores alejados de los teóricos, y además no esta seguro de que los datos brindados sean verdaderos, por ello amplía los rangos entre ellos. Por ejemplo, si el 5, 50 y 95 percentiles teóricos fueran 5, 10 y 15, y el experto supusiera que ellos en realidad son 100, 1000 y 10000, entonces se presentaría el caso anteriormente descrito. En contraste, si el perito afirmara que dichos percentiles son 6, 10 y 14, entonces se tendría un grado de calibración alto ya que las cantidades son cercanas a las teóricas, y lo mismo ocurriría para el nivel de información que también sería alto, puesto que los intervalos dados son relativamente pequeños, lo cual indica la seguridad que el experto tiene en su respuesta.

Tabla 2.2 Ejemplo numérico de los conceptos de calibración e información

Calibración → Información ↓	Baja			Alta		
Baja	Distribución teórica			Distribución teórica		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
	5	10	15	5	10	15
	Distribución del experto			Distribución del experto		
5%	50%	95%	5%	50%	95%	
100	1000	10000	1	11	20	
Alta	Distribución teórica			Distribución teórica		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
	5	10	15	5	10	15
	Distribución del experto			Distribución del experto		
5%	50%	95%	5%	50%	95%	
50	52	54	6	10	14	

Una vez que las PC y PI son obtenidas, es necesario asignar pesos específicos a cada experto, con base en sus puntuaciones. Dichos pesos son usados para formar promedios ponderados, los cuales representarán la opinión del grupo. A la combinación lineal (promedio ponderado) de la opinión de los expertos se le llamará *tomador de decisiones*. En este estudio el tomador de decisiones por pesos globales (TDPG) y el tomador de decisiones por pesos iguales (TDPI) serán empleados. Así, los pesos específicos se obtienen mediante el producto de información y calibración.

Todos aquellos expertos cuyo peso específico este por encima de un nivel de significancia α^7 , serán considerados en el TDPG. En el TDPI, a todos los expertos se les otorga el mismo peso independientemente de su resultado en las preguntas de calibración y, por lo tanto, no forma parte de los tomadores de decisiones basados en desempeño. Es importante observar que el TDPI es la media aritmética de las opiniones de los expertos.

Como se puede apreciar, el JEE es una herramienta poderosa que ha madurado a través de los últimos años. No obstante, no es el objetivo de esta sección brindar detalles específicos de sus métodos. Por ello, se sugiere la lectura de Cooke (1991), donde se puede encontrar dicha información. A continuación, el análisis de las técnicas descritas hasta el momento será expuesto, con la finalidad de examinar las ventajas y desventajas de cada método presentado previamente.

2.6 Análisis de los métodos

Como ya se ha mencionado, la existencia de métodos para la evaluación de costos es diversa y su empleo obedece a distintos factores, entre los que destacan: el área de aplicación, los fines perseguidos, y los recursos humanos, materiales, económicos y de tiempo disponibles. Así, si se desea recabar información detallada, precisa, y aplicable a un caso particular, el uso de los métodos directos es recomendable. Dichos métodos permiten

⁷ Este nivel es obtenido mediante una rutina de optimización, de manera que la PC del tomador de decisiones es maximizada.

tratar objetivamente la información, generando en paralelo datos que pueden ser empleados en evaluaciones futuras.

No obstante, el uso de los métodos directos implica, como su nombre lo indica, la recopilación directa de cifras en el lugar del desastre. Esto, a su vez se traduce en grandes inversiones de tiempo, recursos humanos y económicos, sin mencionar el apego a una metodología que facilite la extracción de los datos y minimice el período invertido en el ejercicio. Pese a ser una herramienta objetiva, no se debe perder de vista el hecho de que la recopilación efectuada, será válida y aplicable única y exclusivamente en el caso analizado.

Por su parte, los métodos indirectos ofrecen una ventaja importante sobre sus contrapartes descritos, la estimación se hace con el empleo de menos recursos, en general, y en un intervalo de tiempo relativamente corto. Sin embargo, la gran incertidumbre que conlleva la información generada es su principal debilidad. Así mismo, la subjetividad para elegir los datos y herramientas a utilizar, hacen de los métodos indirectos una técnica de evaluación de costos que se debe manejar con precaución. Esto, sin considerar que los requerimientos de información para comenzar a utilizarlos, son elevados.

En contraste, como se mencionó al principio de este capítulo, los métodos mixtos combinan las ventajas de ambos, con otras áreas del conocimiento como matemáticas, estadística, economía e investigación social. Es decir, se trata de procedimientos multidisciplinarios que se enfocan en la elaboración de modelos matemáticos, desarrollados con base en información escasa o inexistente.

A diferencia de los métodos indirectos, los mixtos permiten la actualización inmediata de los datos. Además, ofrecen la posibilidad de actuar pro-activamente, es decir, no es necesario esperar a que acontezca un fenómeno para que éste, y sus consecuencias, sean cuantificados. Si bien existen puntos a favor de estos métodos, es importante reconocer que, a diferencia de los directos, pueden llegar a ser imprecisos en sus estimaciones. Por ello, se sugiere comparar los resultados obtenidos con casos reales similares ocurridos previamente, para validarlos o desecharlos.

Dentro de los métodos mixtos, se puede mencionar la combinación de las RBCNP y el JEE, tema que será abordado con detalle en el siguiente capítulo. De momento, sólo basta decir que las primeras son muy útiles para modelar matemáticamente algunos fenómenos de la naturaleza, entre ellos el rompimiento de una presa. No obstante, su empleo es aun limitado, precisamente por que los desarrollos matemáticos en la materia aun son incipientes.

En términos del JEE, su principal bondad radica en la relativa “sencillez” que ofrece para recopilar datos, que de otra manera, sería muy complicado obtener. Adicionalmente, ahorra tiempo y dinero en la obtención de información, pues no requiere efectuar el ejercicio directamente en campo. En cambio, la tarea de convocar a expertos en cierta materia, desarrollar los instrumentos de recolección de datos y, procesar la información recabada, son tareas arduas.

2.7 Resumen

Aunque la falla de una de estas estructuras es poco probable (apenas 1 % a nivel internacional llegan a fallar en algún momento de su vida -Foster *et al*, 2000-), la estimación de las posibles consecuencias de una ruptura es importante, ya que permite tomar medidas precautorias para minimizar los impactos generados.

En general, existen tres grupos de métodos que se pueden emplear para evaluar los costos de falla de obras de infraestructura: los directos, los indirectos y los mixtos. En esta tesis, se ha decidido emplear los últimos mediante la combinación de dos herramientas: las RBCNP y el JEE. Se cree firmemente que su empleo conjunto al caso de las presas de tierra mexiquenses, es original e innovador. De hecho, se pretende aprovechar las ventajas de ambas técnicas para poder desarrollar un modelo, que represente la incertidumbre de ciertas variables (detalladas en el siguiente capítulo), de una manera acertada y simple, apegándose en todo momento a los requisitos del método científico.

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS A UN CASO PARTICULAR DE PRESA DE TIERRA EN EL ESTADO DE MÉXICO

3.1 Introducción

En el capítulo anterior, se discutieron algunas técnicas que se han empleado para la evaluación de costos, generados por fallas en obras de infraestructura. Así mismo, se concluyó que las RBCNPs y el JEE, un par de herramientas combinables entre sí, permiten llevar a cabo el análisis de dichas evaluaciones más rápidamente que sus contrapartes tradicionales. No solo eso, los resultados que se generan con este enfoque mixto son confiables, debido principalmente a que se basan en el método científico para obtener y procesar la información recabada.

Así, en los primeros puntos de este apartado, se presentará una breve descripción del caso en estudio, que estando formado por las presas del Estado de México, se enfoca en los siete proyectos mencionados en el primer capítulo (Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela, Dolores, José Antonio Alzate -San Bernabé-, Ignacio Ramírez -La Gavia-, y El Guarda). Cabe recordar que dichas obras se eligieron con base en tres criterios principales: altura de la cortina, edad y materiales de construcción, los que condujeron a su selección tomando como punto de partida su potencial de falla, con base en estadísticas internacionales.

Una vez acotadas las presas de interés, y siguiendo el procedimiento descrito en Hanea *et al.* (2006), y los pasos propuestos en Morales y Cooke (2008), se desarrolló un modelo razonado en las RBCNPs. Con base en las ideas expuestas en el capítulo anterior, se empleó el JEE para recopilar y procesar la información de cuatro peritos en materia de seguridad de presas, dentro de la entidad mexiquense. En este proceso, la colaboración de un grupo de investigadores de TU Delft fue fundamental no solo para diseñar el instrumento de recolección de datos, sino también para aplicarlo y procesar la información generada.

Así, como parte de la descripción del modelo, en los siguientes párrafos se explicarán con detalle las variables consideradas (inundación, costos humanos y costos económicos), así como sus definiciones en el contexto del presente documento. El capítulo concluye con la metodología para el cálculo de las dependencias y correlaciones de rango entre las variables mencionadas, mismas que se analizan exhaustivamente en la siguiente sección de la tesis.

3.2 Descripción del caso de estudio

La seguridad de presas es un tema que requiere atención ya que la eventual falla de una de estas estructuras, puede traer consigo graves consecuencias (Arreguín, 2002). Otra vez, el proceso de selección descrito en el capítulo inicial, llevó a la nominación de siete presas, cuyo potencial de falla es relativamente más alto que el de otras obras similares del Estado de México. Puesto que se han tomado las estadísticas mundiales de fallas como punto de partida, el comportamiento actual de las estructuras selectas puede no ajustarse a

los recuentos encontrados. Sin embargo, los pasos descritos más adelante son igualmente aplicables a otros casos con características análogas a las presentadas en breve.

Para no interrumpir la continuidad del argumento, a continuación sólo se describen dos de las siete presas de interés: la José Antonio Alzate y la Ignacio Ramírez. Se eligieron éstas porque, como se puede apreciar en la Figura 3.1, se localizan en las inmediaciones de la ciudad de Toluca, donde se encuentra la Facultad de Ingeniería de la UAEMEX. No obstante, los lectores interesados pueden consultar las fichas técnicas de las otras cinco presas en SRH, (1976).

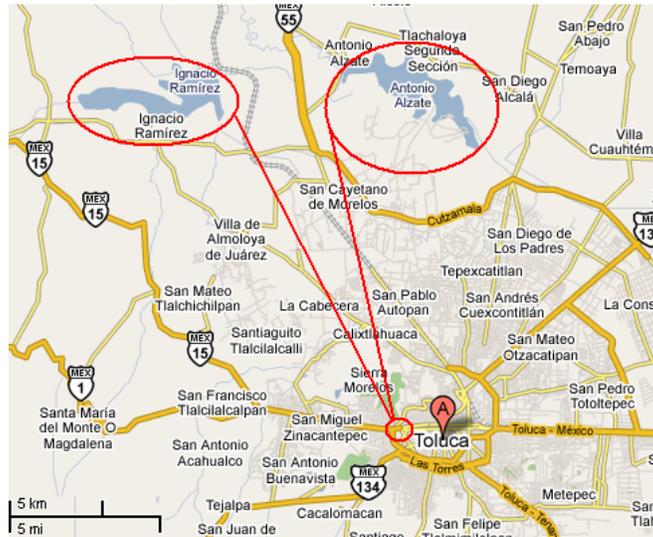


Figura 3.1. Posición relativa de las presas Ignacio Ramírez y Antonio Alzate, con respecto a la Ciudad Universitaria de la UAEMEX

Presa José Antonio Alzate (San Bernabé)

Las principales causas que motivaron la construcción de la presa José Antonio Alzate fueron dos: el aprovechamiento de las aguas del río Lerma para actividades de riego, y el control de avenidas. La estructura se construyó bajo la dirección de la SRH entre 1960 y 1962, y está localizada al norte de Toluca, aproximadamente a 25 Km de la ciudad, y a 50 Km del foco sísmico No. 110, sobre la denominada Falla de Acambay-Tixmadeje. En total, la obra beneficia primordialmente a los municipios de Ixtlahuaca, Atlacomulco, y Almoloya de Juárez.

Su cuenca de captación cubre un área de 2108 Km², siendo una de las presas más grandes para la irrigación dentro de la entidad. La descripción geológica regional corresponde a una zona lacustre, con numerosos afluentes que nacen en la zona oriente de la sierra de las cruces, y en las áreas pantanosas de la zona del municipio de Lerma. En promedio, dicha cuenca presenta un escurrimiento anual entre 70.2 y 415.1 millones de m³ (CONAGUA, 1993).

3. Aplicación de los Métodos

La cortina de la presa es de tierra con corazón impermeable, prolongado en dirección aguas arriba en forma de delantal, con la finalidad de incrementar el paso de las filtraciones a través de la cimentación, la cual se considera semipermeable. Aguas abajo cuenta con un filtro-dren de grava y arena, y a los lados tiene respaldos de material semipermeable (Lahar), resistente al oleaje y a la erosión mediante chapas de roca en los dos paramentos. Dichos respaldos poseen pendientes de 2.5:1 y 2:1 aguas arriba y aguas abajo respectivamente que le brindan un factor de seguridad promedio de 1.95, ya que sus taludes, varían según la elevación. La altura total de la cortina es de 24 m y su longitud alcanza los 282 m, con un ancho de corona de 10 m y 140 m en la base, siendo su bordo libre de 1.58 m. La Figura 3.2 muestra un corte transversal de la cortina, donde se especifican algunas elevaciones de diseño (SRH, 1976).

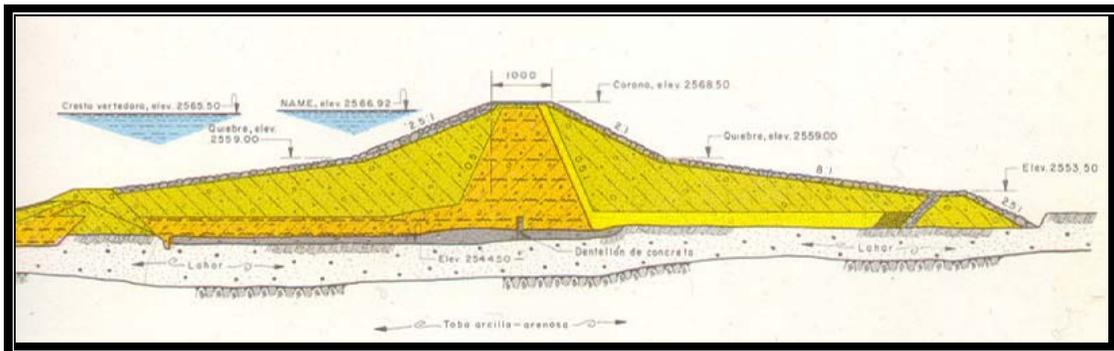


Figura 3.2 Sección transversal de la cortina de la presa José Antonio Alzate (SRH, 1976)

La obra de excedencias se ubica en la margen izquierda, y corresponde al tipo de cresta libre con una longitud de 75m. Básicamente se trata de un canal lateral tipo Creager, que descarga el agua en un canal colector paralelo al cimacio, que conduce a un tanque amortiguador. La avenida de diseño del vertedor es de $800 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo el vertedor tiene una capacidad máxima de $254 \text{ m}^3/\text{s}$. Cabe señalar que actualmente la cortina, además, funciona como puente de acceso entre las comunidades de la zona. La Figura 3.3 muestra un par de fotografías recientes, en donde se aprecia la situación actual de la cortina tanto aguas abajo, como aguas arriba (vertedor).



(a) Cortina aguas abajo



(b) Obra de Excedencias

Figura 3.3 Fotografías recientes de la cortina de la presa José Antonio Alzate -San Bernabé:-
(a) aguas abajo y (b) aguas arriba (vertedor)

También, se hace referencia a la obra de toma que consiste en un túnel profundo de 147 m de longitud y 2.5 m de diámetro, perforado a través de la ladera derecha. Además está provisto, en su extremo aguas arriba, de una estructura de entrada con rejilla, con una lumbrera de sección rectangular de 4.95 m x 5.60 m, excavada en roca, la cual alberga dos compuertas de emergencia, y dos de servicio. El gasto máximo de diseño de ésta obra alcanza los 20 m³/s, y se cuenta en el extremo aguas abajo con un tanque amortiguador de sección trapecial de 1.60 m de profundidad, 12 m de longitud y 5 m de ancho de plantilla, revestido con concreto.

La presa comenzó operaciones en el año 1962, con una capacidad de almacenaje de 35.3 millones de m³, hasta el nivel 2'565.50 msnm, y un súperalmacenamiento de 17.2 millones de m³ hasta la elevación 2'566.92 msnm. Según los registros históricos, el costo de la obra, actualizada para ese año fue de: \$4'437'000 en obras conexas y varias, \$437'000 en caminos, y \$12'810'000 en la propia presa, para hacer un gran total de \$17'640'000 (CONAGUA, 1993).

Habiendo visitado la presa como parte de este proyecto de investigación, se detectó la presencia de casas aisladas aguas abajo, y terrenos de cultivo como los descritos en Baró *et al* (2007). Es decir, existen viviendas autoconstruidas de un solo nivel, donde normalmente se tiene el siguiente mobiliario: una televisión, un radio con bocinas, un refrigerador, una lavadora, dos o tres camas, un comedor y varias sillas. En cuanto a los cultivos, se encontraron sembradíos de maíz y frijol. En términos de obras de infraestructura, en las cercanías, las principales correspondían a estructuras para el suministro eléctrico y vías de comunicación.

Presa “Ignacio Ramírez” (La Gavia)

La presa Ignacio Ramírez, fue construida entre 1964 y 1965, bajo la dirección de la SRH. Su objetivo primordial, al igual que la presa José Antonio Alzate es la irrigación y control de avenidas. Así, la presa Ramírez aprovecha las aguas del río “La Gavia”, para el riego de tierras de cultivo y, además, proteger de inundaciones a los valles de Ixtlahuaca y Temascalcingo. La cortina se localiza a 25 Km al noreste de la ciudad de Toluca, dentro de una zona sísmica de la república mexicana, a 60 Km del foco No. 110. Asimismo, aguas abajo, aproximadamente a 3 Km de la estructura, el cauce generado con la liberación de sus aguas se encuentra con el río Lerma, en el municipio de Almoloya de Juárez. Su cuenca hidrográfica cubre una superficie de 550 Km², y capta un escurrimiento promedio anual de 74 millones de m³.

La obra consiste en una cortina de tierra que se divide en cuatro zonas: (i) la central, formada por material arcilloso altamente plástico, (ii) dos respaldos a base de materiales areno-arcillosos, (iii) un filtro de grava y arena y, (iv) dos chapas de roca colocadas a volteo, y semi-acomodadas manualmente en el paramento aguas abajo. La Figura 3.4 muestra un corte transversal de la cortina donde se especifica la configuración de las secciones (SRH, 1976).

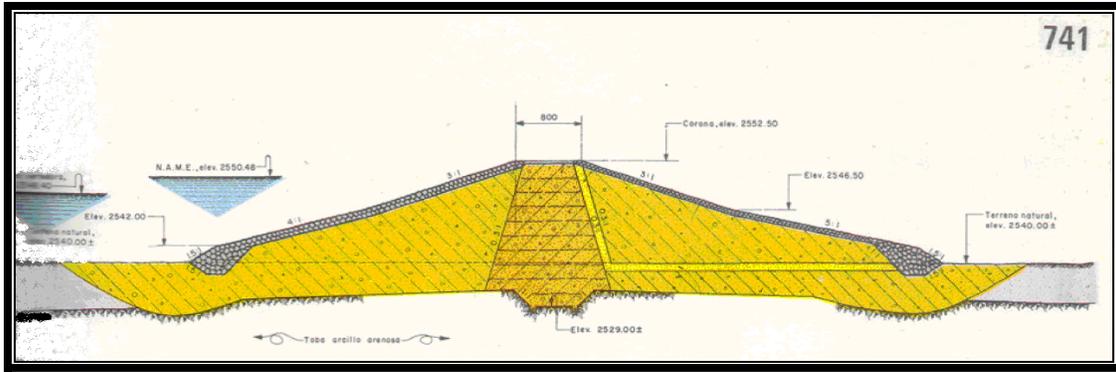


Figura 3.4 Sección transversal de la cortina de la presa Ignacio Ramírez (SRH, 1976)

Como se puede apreciar, el paramento aguas abajo, al igual que su opuesto, cuenta con taludes de 3:1 en la parte más alta, y de 1.5:1 en la base, lo que le brinda a la estructura un factor de seguridad mínimo de 1.36. Su altura total es de 23.50 m, con una longitud de 482 m, la base tiene un ancho de 90 m y termina en 8 m en la corona, y además cuenta con un bordo libre de 2.0 m.

Más aun, está provista en su margen izquierda de una obra de excedencias mediante un vertedor tipo “cresta libre”, con una longitud de 13 m. Dicha obra fue diseñada para descargar una avenida máxima de 500 m³/s, y tiene capacidad para aliviar un gasto de hasta 65 m³/s a un tanque amortiguador de 8 m de ancho x 15.50 m de largo x 2 m de profundidad, a través de un canal de 100 m de longitud.

También, en la margen izquierda existe un conducto en tajo que da lugar a la obra de toma, cuya sección corresponde a una herradura de 2.6 m de diámetro, 32.5 m de longitud y 0.40 m de espesor. Esta obra se encuentra controlada por 4 compuertas, dos de servicio y dos de emergencia. Conjuntamente, en la margen derecha se tiene un dique, con las mismas características que la cortina, para el cierre de un puerto (CONAGUA, 1993). La Figura 3.5 muestra un par de fotografías recientes, en donde se aprecia la situación actual de la cortina de la presa.



(a) Vista aguas abajo de la cortina



(b) Vista aguas arriba de la cortina

Figura 3.5 Fotos recientes de la cortina de la presa Ignacio Ramírez -La Gavia-:

(a) aguas abajo y (b) aguas arriba

La presa comenzó a operar en 1965, con una capacidad de almacenaje de 20.5 millones de m³, y un almacenaje potencial excedente de 15.8 millones de m³. De acuerdo con los registros históricos, en su momento, el costo de la presa fue de: \$3'100,000 en indemnizaciones, \$250,000 en caminos, y \$11'150,000 en la cortina, para hacer un gran total de \$14'500,000 (CONAGUA, 1993).

Para mayores detalles técnicos de las dos presas descritas, referirse a CONAGUA, (1993) y SRH (1976). Otra vez, para no interrumpir el argumento de la tesis, los datos de las cinco presas restantes se omitirán en esta parte del apartado, aunque en el anexo 1 se presentan detalles sobre cada una de ellas.

Con base en los datos anteriores, se optó por realizar el análisis para la cortina de la presa José Antonio Alzate (San Bernabé). La decisión de elegir esta presa, se basó en el cumplimiento de los siguientes criterios: el área de la cuenca, el escurrimiento promedio anual, la capacidad de almacenaje, el costo de la obra y, por último, su ubicación respecto al foco sísmico No. 110 y a los municipios de Ixtlahuaca, Almoloya de Juárez y Atlacomulco.

Cabe mencionar que la función de la presa Alzate ha cambiado, pues actualmente las actividades de irrigación son escasas, lo que ha conducido a que el control de avenidas y la prevención de inundaciones en las zonas de Almoloya de Juárez, Ixtlahuaca y Atlacomulco, sean parte de sus funciones prioritarias. Aunado a esto, se destaca que la cortina es aprovechada como puente vehicular para comunicar a dos comunidades, localizadas en los municipios de Temoaya y Almoloya de Juárez.

Por último, aguas abajo, el cauce del río Lerma atraviesa diversas comunidades, entre las que destacan: San Jerónimo Ixtapantongo, Ixtlahuaca de Rayón, Santo Domingo de Guzmán, La Concepción de los Baños, San Cristóbal de los Baños, El parque industrial de Atlacomulco de Fabela y San Lorenzo Tlacotepec. Así mismo, cruzan tres carreteras entre las que sobresale la autopista 55, de cuatro carriles, que comunica a Toluca con Atlacomulco. Como se puede observar, la seguridad de la presa Alzate es relevante por las posibles consecuencias que conllevaría su falla eventual en la infraestructura existente debajo de la cortina.

3.3 Uso de las Redes Bayesianas y el Juicio Estructurado de Expertos en el caso de estudio

3.3.1 Modelos Gráficos

Los modelos gráficos de dependencia, representan distribuciones de probabilidad multidimensional (Hanea *et al* 2006), es decir, tienen la capacidad de mostrar las dependencias simultáneas entre variables que tienen algún tipo de interrelación entre sí. Debido a esta facilidad de visualización, se optó por utilizar dichos gráficos, para simbolizar la incertidumbre de la influencia causal entre las variables que se incluirán en el modelo. Así, las variables se colocan en nodos que se unen con arcos, en función de las relaciones causa-efecto existentes entre ellos, aunque no se tiene certeza “a-priori” de la

magnitud de la correlación entre los nodos. Estas ideas se aclararán a lo largo del capítulo, cuando se presente el modelo y sus variables.

La literatura revisada, y citada anteriormente en la sección 2.2, reporta que la cuantificación de costos, debida al colapso de una obra de infraestructura, es fundamental para la toma de decisiones, la mitigación de daños, la reducción de consecuencias y, en general para la óptima administración de recursos. Pese a ello, durante el análisis de los diferentes métodos y técnicas encontrados (ver apartado 2.7), llegó a ser evidente que en la mayoría de los casos, no se puede llevar a cabo una estimación proactiva, rápida y precisa. Esto obedece, principalmente, a la cantidad de recursos (económicos, humanos y de tiempo) necesarios para completar evaluaciones acertadas. Similarmente, el uso de métodos simples que proporcionen estimaciones en breves periodos de tiempo, pero con altos grados de inexactitud, es poco deseable.

Entonces, debido a las características y ventajas discutidas en el capítulo anterior, se considera adecuado el empleo de las Redes Bayesianas en este trabajo, y en particular se utilizarán las RBCNP al caso bajo estudio. Lo anterior se debe a que existe incertidumbre acerca de los costos consecuentes, derivados de la eventual falla de presas, como las aquí consideradas.

De esta forma, con base en el conocimiento existente sobre las RBCNP, se puede iniciar la construcción del modelo. En esencia, se busca que éste, represente distribuciones de probabilidad de variables aleatorias, que no se pueden cuantificar ni estadística ni experimentalmente, o que hacerlo consume una gran cantidad de recursos. Por ejemplo, como se verá más adelante en la sección 3.4, una de las variables a considerar en el modelo son los “costos humanos”. Aunque la definición detallada de este concepto se discutirá con detenimiento, por ahora es importante tener en mente que cuantificar dicha variable experimentalmente, implicaría inundar súbitamente alguna comunidad una y otra vez, para generar estadísticas que brindaran luz sobre la distribución de probabilidad buscada.

Una primera solución al problema sería construir un modelo físico a escala, que representará las condiciones de las cortinas, de las cuencas y de las precipitaciones de las siete localidades estudiadas individualmente. Sin embargo, los recursos empleados en un ejercicio así, como se discutirá en el capítulo siguiente, son superiores a la generación de un modelo matemático como el aquí propuesto.

En segunda instancia, se podría considerar la elaboración de un modelo matemático que usara variables discretas (ej: RBDs), en el que estas asumieran valores puntuales como: bajo, medio y alto. Por ejemplo, un sismo se podría catalogar en alguno de estos tres grupos, pero habría que definir claramente los criterios para considerarlo como bajo, o como alto. De nuevo, esto tiene la limitante de asignar un peso similar a un movimiento telúrico cuya magnitud apenas sobrepasa el límite impuesto entre los grupos “medio” y “alto”, y uno que es verdaderamente elevado⁸.

⁸ Para aliviar este contratiempo, se han desarrollado herramientas como la “lógica difusa” o Fuzzy Logic. No obstante, incluso con el empleo de estos métodos, la discretización de una distribución no permite manejar los datos tan adecuadamente como una gráfica continua, a no ser que se aumente su complejidad mediante el

Para explicar numéricamente lo expuesto, se puede suponer que sismos mayores a tres grados en la escala de Richter se considerarán como “medios”, y los mayores a seis grados en la misma graduación serán “altos”. Entonces, tanto un temblor de seis como un terremoto de nueve grados se considerarían “altos”, siendo que en esta escala el incremento en una unidad corresponde a un aumento exponencial, y no lineal, de liberación de energía.

Aun si este inconveniente fuera superado, discretizar una variable en más de tres categorías tiene implicaciones directas en la complejidad del manejo matemático asociado. Para dar una idea del incremento en la dificultad de manejar el modelo, cuando dos variables relacionadas asumen tres valores cada una, se tienen que generar nueve valores (tres x tres) para alimentar el modelo. Si ahora cada variable adopta diez estados, el número de entradas se eleva a 100. En ello radica la importancia de usar las RBCNPs, donde no existe la necesidad de discretizar las variables, pero si se permite que adopten cualquier valor en sus rangos de operación (ej: se puede obtener la probabilidad de tener un sismo de 6.72 grados Richter).

Es importante aclarar que, a nivel internacional, existen estadísticas sobre la falla de presas de tierra en distintas latitudes del globo. Efectivamente, dichos recuentos se usaron en la introducción para justificar la selección de las siete presas en el Estado de México. Sin embargo, se cree que usar datos relativos a catástrofes ocurridas en otras ubicaciones geográficas, no sería representativo de la situación que se vive en la entidad, por lo menos en materia de costos de consecuencias, por que las condiciones de vivienda, cultivo e infraestructura existentes en cada locación son diferentes. Consecuentemente, la red desarrollada como parte de esta investigación, no será aplicable directamente a otros contextos, aunque sí la metodología expuesta.

En suma, el modelo que se propondrá, al ser gráfico, esta compuesto por nodos y arcos, y tiene por objeto simbolizar la relación que existe entre las variables bajo estudio (descritas adelante en la sección 3.4). Como ya se ha expresado, los nodos representarán la probabilidad de que una variable adquiera ciertos valores en un rango no paramétrico, es decir, un rango asociado a la variable independiente de una distribución, cuya forma no se ajusta a alguna de las distribuciones paramétricas conocidas (ej: la normal, gama, xi cuadrada, log-normal, etc.) Para caracterizar las distribuciones continuas no paramétricas que se requieren en la red Bayesiana, se hará uso del JEE, como se describe a continuación.

3.3.2 Cuantificación de los Modelos Gráficos

Al igual que las RBCNPs, el JEE se describió con detalle en el capítulo precedente. Se trata de una herramienta de interés para cuantificar el modelo, objeto del presente estudio, pues evita la evaluación inmediata de costos después de ocurrido el suceso (métodos directos), y con ello optimiza los tiempos y recursos invertidos en la estimación de consecuencias. Esto no significa que los resultados buscados, tengan que ser menos precisos que los calculados directamente en campo. Por el contrario, se trata de obtener

incremento en el número de valores discretos a considerar. Otra vez, en este caso se sacrifica precisión por sencillez.

resultados comparables pero sin tanto esfuerzo, ni inversión de tiempo, ni de dinero y, consecuentemente, sin la intervención excesiva de capital humano.

Resulta importante mencionar que, por fortuna, no se cuenta con registros históricos de desastres relacionados con el colapso de alguna de las presas estudiadas. No obstante, durante las pláticas con un par de expertos, se encontró que la presa José Antonio Alzate (San Bernabé), había registrado un vertido extraordinario a través de su obra de excedencias a finales de la década pasada, lo que provocó inundaciones en las comunidades aguas abajo de la cortina. A pesar de que no se trató de una falla, la liberación de los volúmenes excedentes de agua causó daños en algunas comunidades aledañas.

Aunado a los pocos incidentes documentados en la zona, de este tipo, la dificultad de obtener otros datos históricos, se debe a la falta o inexistencia de mecanismos de evaluación. Por ejemplo, los gobiernos municipales y/o estatales, no cuentan con programas que sirvan de base para diseñar estrategias, e implantar acciones orientadas a la administración de riesgos en dichas zonas. Así, en el mejor de los casos, se tienen identificadas las áreas en peligro latente de inundación, pero hasta donde el autor sabe, se carece de planes de evacuación bien estructurados, y que sean del dominio público. El conocimiento relativo a la información sobre los peligros, ha sido adquirido a través de la experiencia, y no con base en un estudio científico o de ingeniería como el presente.

Durante el estudio, llegó a ser evidente que realizar una evaluación detallada de cada variable, en cada una de las siete presas bajo análisis, era virtualmente imposible. Por esta razón, se recurrió a personas con experiencia no solo en el tema de interés, sino con pleno conocimiento de la región. Por cierto, localizar y coordinar a los expertos resultó ser una actividad más complicada que lo originalmente esperado. Afortunadamente, se obtuvo la cooperación de cuatro de ellos, y fue así como, a través del JEE, sus opiniones se trataron como información científica válida, para cuantificar el modelo desarrollado.

Así, para poner en práctica las ideas y conceptos expuestos en el capítulo anterior, relativas al JEE, se diseñó un instrumento de recolección de datos. Este, incluía tres secciones principales: (i) preguntas para cuantificar las variables de interés, (ii) cuestionamientos para medir las correlaciones entre variables y, (iii) planteamientos relacionados con la calibración de las opiniones expertas (ver Anexo II).

De esta forma, se aplicó un conjunto de preguntas, en las que los expertos expresaban su incertidumbre con respecto a los valores que las variables de interés podían tomar. En este caso, se usaron los percentiles 5, 50 y 95 con el fin de simplificar la respuesta del experto. Para extraer la información, se pidió a los peritos que respondieran a interrogantes como:

“Tome como referencia una eventual inundación, debida a la falla de la presa bajo estudio. Ahora considere los costos públicos y privados totales, para un periodo de tiempo igual a la máxima esperanza de vida promedio restante de las personas afectadas, por todos los posibles daños y pérdidas en: salud y vidas humanas. Indique el 5, 50 y 95 percentil de su distribución de incertidumbre (medidos en pesos (\$) actuales)”.

Las respuestas de los expertos, permitieron la construcción de curvas de distribución de probabilidad. Por ejemplo, para un experto I (denominado así para fines de esta ilustración), la incertidumbre asociada al costo humano, está dada por los percentiles 5, 50 y 95 siguientes: \$10,000, \$2 millones y \$46 millones respectivamente. La Figura 3.6 muestra la curva continua de valores no paramétricos resultante, que representan su incertidumbre. Como se puede apreciar, para este especialista sólo el 5% de las veces se tendrían costos humanos inferiores a \$10,000. Análogamente, en la mitad de las ocasiones se tendrían costos menores, o mayores, a \$2 millones, y se esperaría que en un 95% de los eventos, se alcanzaran costos por debajo de los \$46 millones.

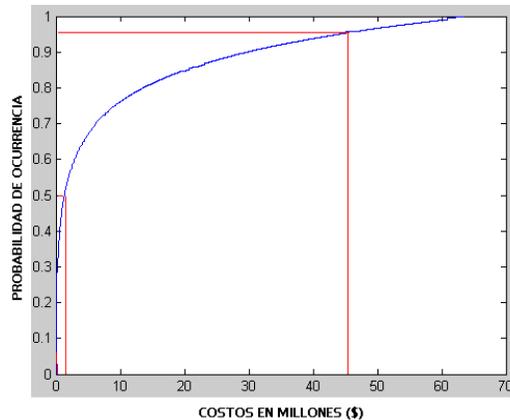


Figura 3.6 Distribución de probabilidad acumulada de los costos económicos humanos para el experto I

Tal razonamiento corresponde a la opinión del experto I. Sin embargo, para construir la curva que contiene la opinión de otros especialistas, y tratar las respuestas de todos siguiendo un proceso científico, se emplea el JEE. En este sentido, las variables de calibración e información descritas en el capítulo dos, son el medio por el cual se puede analizar la información de cada perito. El resultado de este ejercicio para las siete presas estudiadas se presenta en el capítulo subsecuente, así como las distribuciones de probabilidad, ponderadas con base en las predicciones de los cuatro especialistas que tomaron parte en la investigación. A la par, las correlaciones de rango obtenidas se expondrán detalladamente.

Por ahora, solo resta mencionar que este proyecto es más amplio, y el modelo que aquí se presenta solo muestra la parte requerida para la cuantificación de los costos de interés. Así, el estudio general también ha sido enfocado a las siete presas de tierra arriba mencionadas y, además ha considerado la cuantificación de otras siete variables (frecuencia sísmica, precipitación, mantenimiento, deslizamiento, desbordamiento, tubificación y abrechamiento)⁹. A continuación se exhibe la forma gráfica del modelo y se explican las variables a considerar.

⁹ En el momento en el que se escribía esta tesis, otras dos, con las siete variables mencionadas se estaban desarrollando como parte del presente estudio. Para un panorama completo del modelo se recomienda revisar el reporte de investigación del proyecto UAEM 2491/2007, financiado por la Universidad Autónoma del Estado de México.

3.4 El modelo y sus variables

El modelo propuesto como parte del presente estudio es una RBCNP. Es importante mencionar que los criterios empleados para desarrollarlo fueron los siguientes:

- a) Sencillo: lo que significa que es fácil de entender por sus usuarios,
- b) Sistemático: es decir, emplea siempre los mismos juicios en la evaluación de costos, independientemente de la presa que se estudie,
- c) Completo: incluye las variables más relevantes relacionadas con el problema abordado,
- d) Bien estructurado: muestra de forma transparente la relación entre las variables, y presenta gráficamente relaciones “causa-efecto”,
- e) General: es ajustable a los siete casos bajo análisis,
- f) Práctico: puede usarse en la industria para soportar la toma de decisiones, y
- g) Aplicable: se puede emplear en el ejercicio profesional, y no sólo es un modelo académico-teórico.

Así, el primer paso para construirlo fue consultar la literatura en materia de fallas de presas, lo que condujo a la conclusión de que, entre los detrimentos más comunes ocasionados por su ruptura, es decir, la liberación repentina de grandes volúmenes de agua, están: la pérdida de vidas humanas, los daños materiales, y los daños al ambiente (Foster, 2000; Marengo, 2002). Por ello, se decidió adoptar estas cuatro como las variables a considerar.

Con base en estos antecedentes y las herramientas descritas, es que ahora se propone el “*modelo para la evaluación de costos por fallas en presas de tierra del Estado de México*”. La Figura 3.7, muestra no solo su representación gráfica, sino también la relación existente entre las siguientes variables: inundación, costos humanos, costos económicos, y daños al medio ambiente.

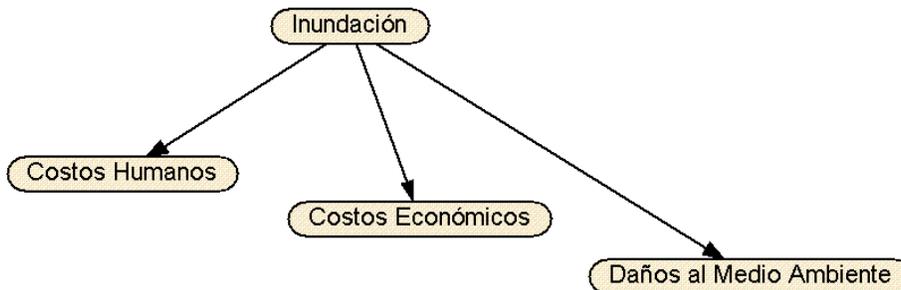


Figura 3.7 Red Bayesiana Continua No Paramétrica con la estructura del modelo de evaluación de costos por fallas en presas de tierra del Estado de México

En la representación gráfica, se observa que de la red Bayesiana cumple con los requisitos establecidos en la sección 2.3 (grafos dirigidos y a-cíclicos). Pese a que, como ya se había mencionado, existen otros nodos y relaciones adicionales a las mostradas en la imagen, ellos no serán analizados con detalle en el presente trabajo. Por lo tanto, no han sido

incluidos en la Figura 3.7, aunque en el análisis de resultados se describirá, cualitativamente, su rol en el modelo.

De esta manera, las cuatro variables mencionadas se han tenido que cuantificar, para obtener las distribuciones marginales requeridas para operar el modelo. A continuación se describen con detenimiento dichas variables, y en el capítulo siguiente se profundiza en aspectos sobre su medición cuantitativa.

3.4.1 Inundación

Una inundación es un fenómeno natural que puede ser provocado por exceso en los escurrimientos de agua superficiales, escasez de drenaje artificial, o insuficiente filtración natural, que deriva en la acumulación del líquido en zonas relativamente bajas (Bremer y Lara, 2001). Desafortunadamente, estos eventos son recurrentes a nivel internacional y se producen, en general, por avenidas extraordinarias que se presentan en lapsos de tiempo cercanos entre sí. Aunado a estos incidentes meteorológicos, las inundaciones también pueden ocurrir debido al desbordamiento o la falla de algún tipo de estructura contenedora de agua, como las presas o los ríos.

Independientemente de la causa, el volumen de agua y la velocidad con que ésta recorre las distancias, son factores determinantes en las consecuencias y daños inducidos en una zona de afectación. Además, la actividad humana inherente a las áreas geográficas cercanas a las presas incrementa el riesgo de una inundación. En las últimas décadas se ha reportado la ocurrencia de algunos incidentes en diversas presas del mundo (Marengo, 1994), con severas consecuencias debidas a inundaciones.

Es claro que la liberación súbita de miles de metros cúbicos de agua sobre asentamientos humanos, puede causar grandes pérdidas de vidas, así como mermas materiales y daños al medio ambiente. Así, para fines del presente trabajo, la inundación se ha caracterizado como el nivel de la lámina de agua, medida como los milímetros por día (mm/día), que se tendrían en la zona potencialmente afectada, dado el evento de una inundación provocada por la falla de cualquiera de las siete presas estudiadas. La cuantificación de esta variable se presenta más adelante, en la sección 4.3 del próximo capítulo.

3.4.2 Costos Humanos

Los costos humanos se definen, en este proyecto, como las erogaciones públicas y privadas totales, para un periodo de tiempo igual a la máxima esperanza promedio de vida restante de las personas afectadas, por todos los posibles daños y pérdidas en salud y vidas humanas, medidos en pesos (\$) actuales, ocasionados por una eventual inundación debida a la falla de una de las siete presas seleccionadas.

Es decir, en el caso de que una presa fallase y una persona de, por ejemplo, 30 años perdiera la vida, el costo económico de dicha pérdida equivaldría al monto de su salario durante 45 años aproximadamente, actualizado al día del evento, si se asume que el promedio de vida de los habitantes de la localidad afectada es de 75 años (INEGI, 2008). Lo anterior implica que el individuo dejaría de ser productivo desde el momento del suceso,

por lo que su familia dejaría de percibir los ingresos mencionados, y ese “costo” es resultado directo del incidente asociado a la ruptura de la presa.

Similarmente, si esa persona de 30 años resultara con un mal físico crónico, el costo generado incluiría el tratamiento médico vitalicio que tendría que llevar hasta su deceso, partiendo del hecho de que aun puede trabajar y ser productivo. Si no fuese crónico, entonces los costos relacionados serían las erogaciones realizadas hasta lograr su completa recuperación. Dichas erogaciones pueden provenir del sector público, como del gobierno a través del seguro social, o del sector privado, como los ahorros del individuo o una compañía particular de seguros.

Se reconoce que la cuantificación de los costos humanos es una actividad difícil y delicada, y el caso mencionado en los párrafos anteriores representa, sin lugar a dudas, un enfoque simplificado y frío, pero que puede usarse para aproximar los costos de interés a una cantidad medible en unidades monetarias. Evidentemente no todos los afectados tendrán necesariamente el mismo salario ni la misma edad, por lo que este enfoque debe manejarse con cuidado, y los datos deben estar respaldados por información, idealmente, recolectada en campo.

Debido a esta complejidad, el JEE ofrece una herramienta que provee estimaciones cuantitativas de parámetros que no pueden ser medidos directamente a través de las técnicas de muestreo tradicionales (Brown and Aspinall, 2004). Entonces, para efectos del presente trabajo, se empleo el JEE, lo que condujo a las cuantificaciones expuestas más adelante en la sección 4.3.

3.4.3 Costos Económicos

Los desastres naturales, o aquellos provocados por la falla de obras de infraestructura, además de causar pérdidas humanas, también provocan daños materiales y económicos. Tan sólo en el año 2003 las pérdidas alcanzaron los 55 mil millones de dólares a nivel mundial (Munich RE, 2004). Para efectos del proyecto de investigación, estas pérdidas se traducen como los costos públicos y privados totales, en pesos (\$) actuales, por todos los posibles daños y pérdidas en: infraestructura (escuelas hospitales, puentes, vías de comunicación y medios de transporte), campos de producción alimenticia (como cultivos o granjas), centrales de abasto y comercio, vivienda, centros de recreación, etc., ocasionados por un infortunado desastre como la inundación provocada por la falla de cualquiera de las presas analizadas.

Dichos costos incluyen también aquellos debidos a la interrupción de servicios. Por ejemplo cuando una carretera se ve inhabilitada como resultado de la falla de una presa, el servicio de comunicación entre las comunidades que une se interrumpe, lo cual provoca costos a los usuarios quienes tienen que buscar rutas alternas. Esto podría implicar el consumo de más combustible o la inversión de más tiempo y dinero en los traslados. Lo mismo aplica para otras obras de infraestructura como las líneas de transmisión de electricidad y los puentes (Delgado y De León, 2007).

En general, los costos económicos son más fáciles de medir que los humanos, ya que a diferencia de las personas, los objetos materiales tienen un valor monetario. Sin embargo, su cuantificación también es complicada por las implicaciones prácticas asociadas a la recolección de datos. Otra vez, aquí el JEE juega un papel relevante para hacer dichas estimaciones sin necesidad de levantar la información en campo.

Es oportuno recordar que, tanto los costos humanos como los económicos se han medido en pesos actuales (\$). Si bien es cierto que otros estudios como el de Baró *et al* (2007b), hacen uso de “salarios mínimos vigentes en el Distrito Federal” (SMVDF) para hacer cuantificaciones similares y no perder la validez de las cantidades encontradas, en el presente estudio se optó por emplear simplemente los pesos.

Esto obedece a que, durante el ejercicio de extracción de información con los expertos, se consideró más sencillo emplear pesos actuales que SMVDF. En cualquier caso los valores resultantes se pueden convertir ya sea a SMVDF o a dólares norteamericanos, (USD) con base en los tipos de cambio vigentes en el momento en el que ocurre la catástrofe.

3.4.4 Daños al Medio Ambiente

Además de los costos arriba descritos, una eventual inundación puede provocar daños ambientales. La valoración económica del medio ambiente implica la disponibilidad de un indicador, capaz de medir su importancia en el desarrollo social y que, además, permita realizar comparaciones con otros componentes del sistema ambiental. Sin embargo, este concepto impone cuestionamientos de gran importancia, como: ¿Qué le da valor al medio ambiente? (Azqueta, 1994). Esta interrogante, que no es fácil de responder, ha dado origen a hipótesis como la propuesta por Aldo Leopold, que afirma que el medio ambiente tiene valor por sí mismo y no necesita que nada ni nadie se lo otorgue (Pearce y Turner, 1990).

En otro extremo, existen teorías de ética que establecen que el valor de los objetos, incluido el medio ambiente, se relaciona directamente con los humanos (Swaney y Olson, 1992). Un enfoque de cuantificación recomienda que los seres humanos son quienes deben otorgar valor a un bien que reciben, un servicio del que gozan, e incluso, a la percepción que tienen del ambiente. Esto significa, determinar cuanto estarían dispuestos a sacrificar por alguno de estos bienes.

Asimismo, se identificaron metodologías para evaluar costos ambientales como la de la Contraloría General de Medellín, Colombia (CGM, 2004), que hace uso de modelos de simulación para estimar los daños ambientales totales en una zona. A nivel nacional, Petróleos Mexicanos (PEMEX, 2009), ha llevado a cabo ejercicios de evaluación de daños ambientales, pero aplicados a la remediación de los suelos contaminados con hidrocarburos.

Como se aprecia, la cuantificación de daños ambientales no sólo es compleja, sino también variada, y en la presente investigación no se ha abordado. De hecho, los expertos consultados como parte de este trabajo, manifestaron que no se encontraban en posibilidades de dar un valor adecuado, por que a pesar de tener experiencia en los otros

tipos de costos, no contaban con ella en el área ambiental. No obstante, el autor ha identificado esta como una línea de investigación para el futuro. De esta manera, la RBCNP ahora tendrá la siguiente estructura (Figura 3.8).

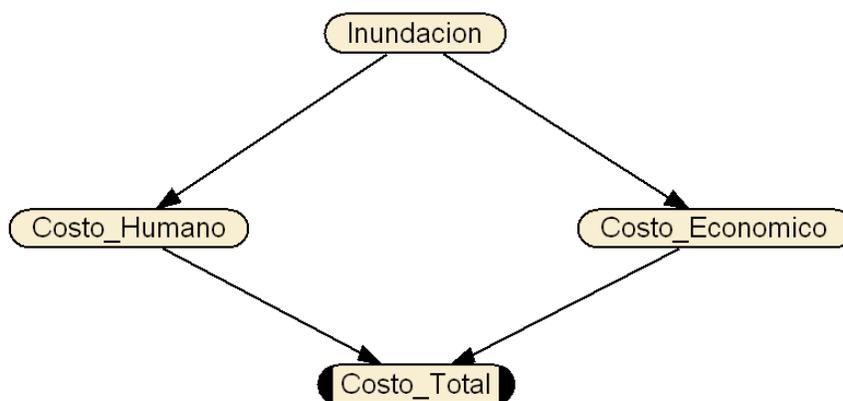


Figura 3.8 Red Bayesiana Continua No Paramétrica con la estructura del modelo práctico de evaluación de costos por fallas en presas de tierra del Estado de México

Como se observa, además se ha agregado el costo total, un nodo funcional que servirá para sumar las dos variables que le dan origen, es decir los costos humanos y económicos. El nuevo nodo, no tiene correlación con ninguno de los anteriores, y por lo tanto, no impacta en el comportamiento del modelo. De hecho, por tratarse de un nodo funcional, solamente tiene la tarea de realizar una operación, en este caso, la suma. Cabe mencionar que esta operación no debe hacerse directamente pues los coeficientes de correlación existentes entre las variables: *inundación-costo humano* e *inundación-costo económico*, lo impiden al tratarse de valores diferentes. Esto se explica con más detalle en la sección 4.5.

3.5 Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango

Como se describió en el capítulo anterior, las correlaciones de rango o correlaciones condicionales de rango, son un conjunto de distribuciones de probabilidad continuas, que expresan el grado de dependencia existente entre dos variables, y están tratadas en términos de un índice que toma valores entre -1 y +1. De acuerdo con Clemen and Reilly (1999) y Clemen *et al* (2000), se sabe que las correlaciones de rango pueden utilizarse para ingresar información a modelos de riesgo y toma de decisiones. Además, existen tres metodologías para obtener dichos valores:

- *Aproximaciones estadísticas.* En este caso la opción es consultar a los expertos acerca de las dependencias, con base en una escala predeterminada, la cual tendrá que ser convertida posteriormente, para estandarizar el análisis. Una de las desventajas que se presentan, es que a los expertos se les da un rango, o parámetro, a seguir, lo cual puede influenciar sus estimaciones,
- *Aproximaciones probabilísticas.* En esta metodología, los expertos son cuestionados acerca de: un conjunto de probabilidades, una probabilidad condicional, o una probabilidad de concordancia entre las variables en cuestión. Posteriormente, los

resultados, o distribuciones de probabilidad, pueden ser transformados a un rango de correlaciones, y

- *Aproximación condicional de rango.* En este caso, al experto se le proporciona información de una de las variables, y se le pregunta por la relación que tiene esta variable con otra. También es posible preguntar las correlaciones existentes entre variables sabiendo la existencia de otras. La correlación entre nodos (variables), conociendo la existencia de otro, se obtiene gracias a la regresión no paramétrica empleada en las RBCNP.

Es claro ahora, que la metodología empleada para la obtención de correlaciones entre variables, para el presente estudio, será la *aproximación condicional*, también llamada correlación condicional de rango. Para mayores detalles sobre los métodos de estimación de correlaciones, ver Morales *et al* (2008a).

La metodología para obtener la información de las correlaciones entre los nodos del modelo, se basó en la aplicación de una pregunta (Morales *et al*, 2008a). En ella, se solicita la relación directa entre dos variables. Tal relación está representada por una probabilidad directa, es decir, se le pide al experto que considere la situación particular o estado de una variable. Con base en su experiencia y conocimiento, el especialista expresa su incertidumbre en términos de una probabilidad, asociada al grado de influencia que ésta tiene sobre la otra variable en cuestión. Un ejemplo de la pregunta aplicada, es:

“Considere una situación en la que la variable brecha¹⁰ (m) se encuentra por encima de su mediana. ¿Cuál es la probabilidad de que la variable inundación, medida en (mm/día), se encuentre también por arriba de su mediana?”

$$P(\text{Inundación (mm/día)} \geq \text{su mediana} \mid \text{brecha} \geq \text{su mediana (m)})$$

Con la información solicitada al experto, se emplea la curva de la distribución condicional de la cópula normal bivariada¹¹. Esta, se ilustra en la Figura 3.9, donde el valor de la probabilidad se ubica en el eje de las ordenadas (y), asumiendo valores entre 0 y 1, y el valor del coeficiente de correlación buscado, se ubica en el eje de las abscisas (x). Como ya se especificó, este coeficiente toma valores entre -1 y +1.

¹⁰ La variable brecha es parte del modelo, para el proyecto mencionado en la sección 3.3.2, el cual involucra las diez variables citadas, sin embargo, para fines del presente trabajo, se entenderá por brecha, a la longitud del ancho de la abertura promedio, presentada debida a la erosión en la corona de la cortina.

¹¹ Se utiliza la distribución condicional de la curva de la cópula normal, para obtener la correlación entre variables, ya que UniNet (un software desarrollado en Tu-Delft para manejar RBCNP) trabaja con base en dicha curva. Es importante mencionar, que la cópula normal es equivalente a una distribución de probabilidad normal, pero para el caso en el que la distribución es condicional. Ver Morales *et al* (2008a).

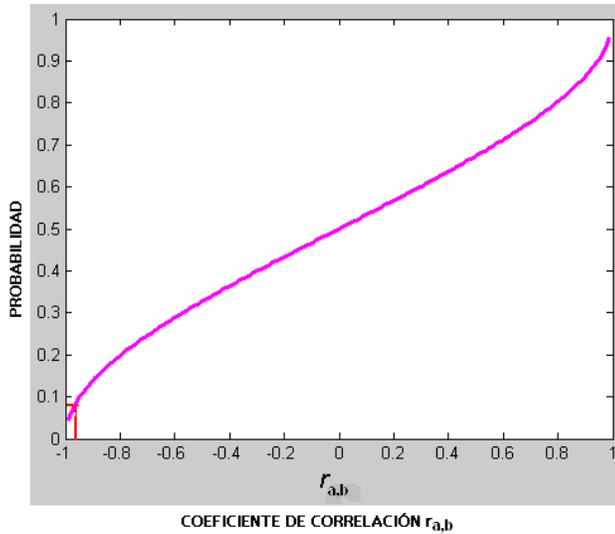
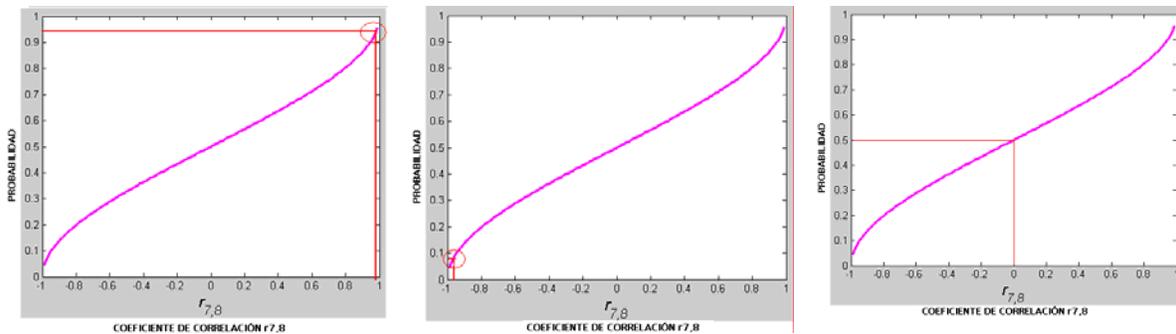


Figura 3.9 Relación entre las variables, dada por la curva normal condicional (entre los nodos a y b).

Por ejemplo, con base en la Figura 3.10 (a), cuando se presenta una probabilidad muy cercana a 1, se dice que la variable “padre” explica a la variable “hijo” (o al fenómeno de interés), casi en su totalidad. Ahora bien, cuando por el contrario, se cuenta con valores cercanos a cero, se dice que existe una correlación negativa entre las variables (ver caso *b* de la Figura 3.10). Finalmente, un valor de 0.5, representa un coeficiente de correlación cero, y significa que no se tiene ninguna relación entre estos nodos (caso *c*).



(a) Altamente correlacionadas
 $P(\rightarrow 1)$

(b) Correlación negativa
 $P(\rightarrow 0)$

(c) No Correlacionadas
 $P(\rightarrow 0.5)$

Figura 3.10 Tipos de correlaciones entre variables, con base en la curva normal condicional

Los pasos presentados, cumplen con el procedimiento descrito en la sección 2.4 del capítulo anterior, referente a la dependencia entre variables o nodos de un modelo basado en las RBCNPs. Asimismo, permite la obtención del grado de dependencia existente entre variables. Por ejemplo, como se describirá en el siguiente capítulo, la correlación entre las variables “inundación” y “costos humanos” del modelo, resultó ser de 0.23, lo que significa que existe una relación baja entre ambas. Si se supone que ese valor es 0.87, se diría que la correlación es alta entre las dos variables investigadas. Por último, en este caso no se

aplicaron las correlaciones condicionales de rango (descritas en la sección 2.4), ya que las relaciones entre los nodos no están condicionadas.

3.6 Resumen

Al revisar la literatura internacional, es evidente que las presas son obras de infraestructura de gran importancia, que promueven el desarrollo de una nación, y de la sociedad en general. No obstante, estos proyectos corren el riesgo de fallar, desde el momento en que inicia su construcción. Diferentes autores, como los citados en las secciones precedentes, coinciden en que las presas de tierra son obras susceptibles de fallar, en un porcentaje relativamente alto, con respecto a otros tipos de presas, Así, del 1.01 % de todas las presas construidas en el mundo hasta 1986 que fallaron (sin considerar las construidas en China), tres cuartas partes (76%) de los incidentes ocurrieron en presas de tierra y enrocamiento (Vega, 2002a).

Lo anterior obedece a distintas causas, atribuibles por ejemplo a: derrames sobre la corona, erosión interna en la cortina, asentamientos, grietas, tubificación, licuefacción, inadecuada operación de las estructuras, entre otras (Vega, 2002b). Así, tomando en cuenta los antecedentes descritos, se propuso el ***“modelo para la evaluación de costos por fallas en presas de tierra del Estado de México”***.

De esta forma, en el contexto de la entidad mexiquense, se localizaron las siete presas cuyas características son similares a aquellas que, internacionalmente, han fallado con mayor frecuencia. Por otro lado, el conocimiento de técnicas como las RBCNPs y el JEE, han sido determinantes para proponer el modelo descrito en los párrafos anteriores.

El modelo fue construido con base en los siete criterios descritos en la sección 3.4 (sencillo, sistemático, completo, bien estructurado, general, práctico y aplicable). Además, se fundamenta como ya es evidente, en el uso de las RBCNPs. En este tenor de ideas, las variables involucradas se seleccionaron con base en datos históricos, y estadísticas internacionales, resultando ser cuatro: inundación, costos humanos, costos económicos y daños al medio ambiente (Marengo, 2002). Se aclara que la última no será considerada ya en el estudio, por la dificultad que representa su cuantificación, aun haciendo uso del JEE.

En lo que respecta a costos humanos y económicos, ambos se midieron en pesos actuales, para tener una unidad común que permita compararlos, y sumarlos. Por cierto, se debe notar que los costos económicos que sufre una comunidad, en términos absolutos, pueden no ser exorbitantes. Sin embargo, costos relativamente bajos para ciudades desarrolladas, pueden resultar significativos para comunidades en desarrollo. Para aclarar estas ideas, en el siguiente capítulo, se presentan los resultados numéricos obtenidos, después de aplicar las metodologías estudiadas.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En el capítulo tres, se describieron algunos de los métodos que se han empleado para la cuantificación de costos causados por fallas en obras de infraestructura. Además, durante la revisión de la literatura, se identificaron dos técnicas (RBCNP y el JEE), que fueron empleadas para desarrollar el modelo propuesto en la presente tesis. De igual manera, tanto la descripción como la aplicación de esas herramientas al caso de estudio, se detalló en el capítulo anterior. Nuevamente, dicho caso de estudio consiste en una presa de tierra ubicada en el Estado de México, cuyas características fueron descritas en la sección 3.2.

Ahora, se mostrarán los resultados derivados del uso del modelo, producto de la combinación de las técnicas encontradas. Como es claro ya, se trata de una RBCNP, que relaciona las variables: inundación, costos humanos y costos económicos por medio de arcos. Debido a la complejidad y tiempo requerido para llevar a cabo los análisis hidráulico, social y económico de las presas y cuencas bajo estudio, se empleó el JEE, que resultó ser un medio eficaz para obtener la información requerida, con estricto apego a los pasos del método científico.

Así, la metodología seguida hasta este punto se podría resumir en seis pasos: (i) identificar y analizar las técnicas de evaluación de costos por fallas en obras de infraestructura, (ii) seleccionar las RBCNP y el JEE como herramientas útiles para realizar dicha evaluación, (iii) proponer un modelo que cumpla con las características de una RBCNP, (iv) recolectar la información estadística relevante para cuantificar las variables el modelo propuesto, (v) para aquellas variables con información escasa o inexistente, localizar a expertos y solicitarles información a través del JEE, e (vi) incorporar todos los datos recabados al modelo y aplicarlo. A continuación se ofrecen mas detalles de los resultados generados.

4.2 Juicio Estructurado de Expertos

El JEE, se aplicó a cuatro especialistas en seguridad y mantenimiento de presas en el Estado de México, quienes tomaron parte en un ejercicio denominado *taller de expertos*. En esencia, los especialistas fueron convocados a una sesión donde se les presentaron los antecedentes, alcances y objetivos del estudio. Dicho evento tuvo lugar en las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de México y, posteriormente durante la etapa de recolección de datos, en las oficinas de los especialistas.

Cabe mencionar que, además de la información técnica solicitada a los expertos, durante las entrevistas personales también se obtuvieron otros datos relevantes, lo cual permitió pulir el modelo hasta llegar a su estructura final. Dicha retroalimentación, por ejemplo, contribuyó a enriquecer el estudio mediante la consideración de variables que no se tenían contempladas originalmente, tales como las causas que originan una falla (edad de las presas y falta de mantenimiento), y algunos de los síntomas que podrían presentarse (agrietamientos y asentamientos).

4. Análisis y Discusión de Resultados

Debido a que ya se había analizado la literatura que reporta las principales causas de fallas en presas de tierra a nivel internacional, hubo variables que, pese a las recomendaciones de los especialistas, no se incluyeron finalmente en el modelo ó quedaron integradas dentro de otras variables. Por ejemplo, se consideró que la falta de mantenimiento y la edad de las presas estaban relacionadas, y que los agrietamientos en presas de tierra no eran estadísticamente relevantes como causas de falla, ya que las partículas que conforman el cuerpo de la presa se reacomodan cuando existen huecos en la edificación (Foster *et al*, 2000).

Como parte del taller y en términos de la recolección de datos propiamente dicha, se desarrolló el cuestionario descrito en el apartado 3.3.2, el cual incluía las siguientes tres secciones: (i) preguntas de interés, (ii) de correlaciones y correlaciones condicionales de rango, y (iii) preguntas de calibración. Como ya se había mencionado, el Anexo II presenta las preguntas empleadas. La primera parte fue diseñada para solicitar información relacionada con las variables cuyos datos eran escasos o difíciles de obtener. En la segunda sección se cuestionó acerca de la intensidad de la relación existente entre las variables y, finalmente, el tercer apartado permitió valorar las respuestas de los especialistas, para determinar en que medida podían ser tratadas como datos verídicos.

Con base en la sección 2.5 del presente trabajo, se aplicó el método clásico del JEE, lo que generó los resultados presentados en la Tabla 4.1. Los valores fueron calculados tomando como punto de partida la información proporcionada por los expertos, misma que fue procesada en EXCALIBUR (Expert Calibration), un programa desarrollado en TU-Delft que permite combinar sus opiniones de manera óptima.

Tabla 4.1 Resumen de indicadores del modelo clásico para los expertos de riesgos en presas de tierra del Estado de México.

<i>Experto</i>	<i>Puntuación de Calibración (PC)</i>	<i>Puntuación de información (tomando en cuenta todas las variables)</i>	<i>Puntuación de información (tomando en cuenta sólo las Preguntas de Calibración)</i>
A	0.0001381	0.9154	0.8259
B	3.588E-14	2.245	2.196
C	3.223E-9	1.507	1.576
D	3.57E-7	0.09291	0.8722
TDPG	0.0009212	0.8405	0.7569
TDPI	0.07164	0.2976	0.3283

Como se puede observar, en la primera columna se presentan las claves de los cuatro expertos participantes en el estudio (A, B, C y D), además de dos claves más, que representan a los llamados “expertos virtuales”: Tomador de Decisiones por Pesos Globales y Tomador de Decisiones por Pesos Iguales (TDPG y TDPI, respectivamente). Estos últimos dos expertos representan la combinación de las respuestas obtenidas de cada participante, por medio de las preguntas de calibración e información, y en base a estos se generan las probabilidades que alimentarán a la RBCNP.

En la siguiente columna de la tabla se aprecia la puntuación de calibración (PC) de los cuatro especialistas que, como se observa, en todos los casos resultó ser menor a 0.001. También se presenta la puntuación de los TDPG y TDPI, siendo el primero el resultado de

4. Análisis y Discusión de Resultados

otorgar un peso específico a cada experto, según su puntuación de calibración, y el segundo es consecuencia otorgarles pesos similares a cada participante. En la práctica, PCs menores a 0.05 fallarían en otorgar el nivel de confianza requerido en el estudio. En cambio, puntuaciones de calibración superiores a ese valor (>0.05) son suficientes para soportar la hipótesis del modelo clásico.

En la misma Tabla se puede ver que cualquiera de las dos combinaciones de opiniones de los expertos (TDPG y TDPI), es mejor que la de cada uno individualmente. Con frecuencia la PC del TDPG es mayor que la del TDPI¹², sin embargo aquí se presentó el caso inverso. De esta forma, el TDPI supera el nivel de confianza mínimo requerido en el enfoque empleado ($0.07164 > 0.05$). La tercera y cuarta columnas presentan las puntuaciones de información (PIs) de los expertos para todas las variables, y para las preguntas de calibración respectivamente.

Así, se observa que el experto más informativo (B) es también el más bajo en la calibración. Éste ha sido un patrón recurrente en estudios anteriores (Morales y Cooke, 2008). Pese a que el TDPI fue el mejor calibrado, resultó ser el menos informativo. No obstante, ya que es el único que excede el nivel de significancia requerido en el enfoque clásico, se recomienda su uso. Consecuentemente, el resto del análisis se realizará con los resultados de este tomador de decisiones.

4.3 Distribuciones acumuladas de probabilidad

Las distribuciones que a continuación se muestran, representan un rango continuo de probabilidad, el cual contiene los valores que pudiera alcanzar alguna de las variables bajo estudio, de acuerdo a las correlaciones existentes en el modelo, y las condiciones que se presenten. El rango obtenido es no-paramétrico y se obtiene gracias al uso del JEE.

Asimismo, las respuestas de los expertos, juegan un rol fundamental para poder construir las curvas de distribución de probabilidad, mismas que representan su incertidumbre sobre el valor real que pudiera adoptar la variable en cuestión. Se enfatiza que tales distribuciones se construyen a partir de la información recabada de los expertos, y mediante el uso de UniNet. (Ver las secciones 2.5, 3.3 y 3.4).

4.3.1 Inundación

La Figura 4.1 muestra la distribución acumulada de probabilidad de la variable inundación considerada para el modelo de RBCNP propuesto en la sección 3.4.

¹² Lo cual no es sorprendente ya que los tomadores de decisiones basados en el desempeño fueron diseñados con este propósito.

4. Análisis y Discusión de Resultados

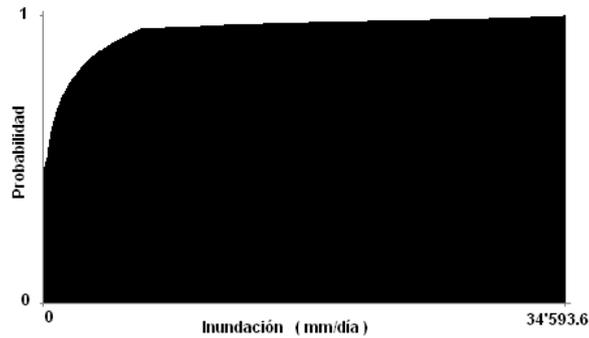


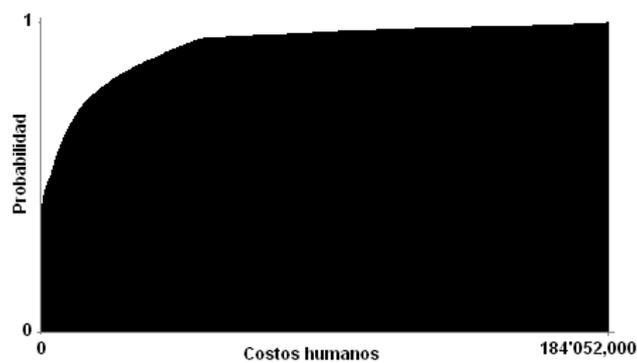
Figura 4.1 Distribución acumulada de probabilidad de la variable Inundación para la zona potencial de afectación aguas abajo de las presas de interés

Media	Desviación Estándar	5 Percentil	50 Percentil	95 Percentil
1,831.4	4,517.3	0.015902	299.35	6,403.2

Como se había especificado en el capítulo anterior, la inundación es caracterizada por el nivel de la lámina de agua, medida en milímetros por día (mm/día), que se alcanza en la zona potencial de afectación, dado el evento de una inundación provocada por la falla de alguna de las presas de interés. Así, el TDPI generó los siguientes valores: 0.015902, 299.35, y 6,403.2, para el 5, 50 y 95 percentiles respectivamente. Esto indica que los expertos, en promedio, consideran que sólo el 5% de las veces se alcanzarían láminas de agua inferiores a 0.015902 mm/día. De forma similar, el 50% de las ocasiones se tendrían láminas menores a 299.35 mm/día y, se esperaría que en un 95% de los eventos se alcanzaran niveles de agua por debajo de los y 6,403.2 mm/día. Esto significa que inundaciones superiores a los 6.4 m por día serían poco probables en la zona de interés. En este caso la media y desviación estándar fueron: 1,831.4 y 4,517.3 mm/día.

4.3.2 Costos Humanos

La Figura 4.2 muestra la distribución acumulada de probabilidad respectiva de la variable costos humanos considerada para el modelo de RBCNP ya mencionado.



Media	Desviación Estándar	5 Percentil	50 Percentil	95 Percentil
14'094,000	27'059,000	3,045	3'349,100	53'009,000

Figura 4.2 Distribución acumulada de probabilidad de la variable costos humanos para la zona potencial de afectación aguas abajo de la presa de interés

4. Análisis y Discusión de Resultados

Como se puede apreciar, el TDPI generó los siguientes valores: \$ 3,045; \$ 3'349,100; y \$ 53'009,000; para el 5, 50 y 95 percentiles respectivamente. Esto significa que los especialistas, en promedio, consideran que en el evento de una falla, sólo el 5% de las veces se tendrían costos inferiores a \$ 345. Igualmente, el 50% de las ocasiones se alcanzarían costos menores a \$ 3'349,100, y, esperarían que en un 95% de los eventos se tuvieran niveles de costos por debajo de los \$ 53'009,000. Los resultados indican que los daños a la salud y vida de los seres humanos en la zona de interés superiores a los \$ 185'200,000 se presentarían rara vez. Ahora la media y la desviación estándar resultaron ser: \$ 14'094,000 y \$ 27'590,000.

4.3.3 Costos Económicos

La Figura 4.3 presenta los resultados obtenidos para cuantificar los daños materiales y económicos en las presas de interés.

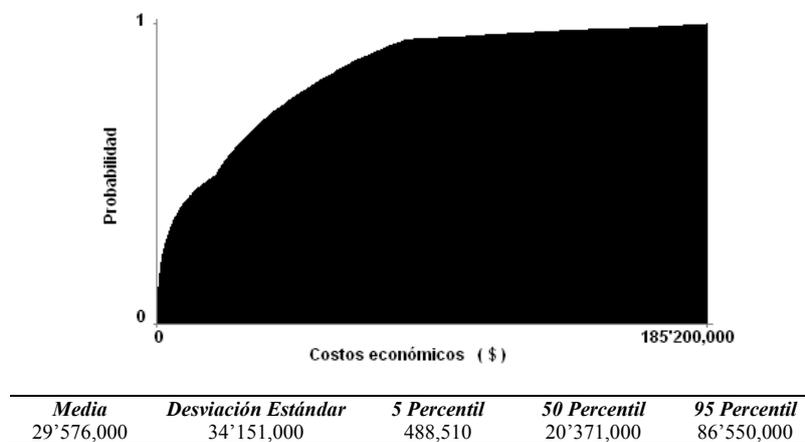


Figura 4.3 Distribución acumulada de probabilidad de la variable costos económicos para la zona potencial de afectación aguas abajo de las presas de interés

Los resultados indican que el TDPI obtuvo los siguientes valores: \$ 488,510; \$ 20'371,000; y \$ 86'550,000, para el 5, 50 y 95 percentiles respectivamente. Esto implica que los expertos, en promedio, piensan que en el evento de una falla, sólo el 5% de las ocasiones se alcanzarían costos inferiores a \$ 488,510. De forma análoga, el 50% de las ocasiones se tendrían costos menores a \$ 20'371,000, y, esperarían que en un 95% de los sucesos se tuvieran niveles de costos menores a \$ 86'550,000. En otras palabras, los daños económicos y materiales en el área de estudio que rebasen los \$ 86'550,000 serían poco probables (menos del 5% de probabilidad de ocurrencia). Los valores de la media y desviación estándar fueron: \$ 29'576,000 y \$ 34'151,000.

4.4 Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango

Como se mencionó, las dependencias, correlaciones y correlaciones condicionales de rango, son de gran importancia para la construcción del modelo, ya que estas expresan las dependencias existentes entre dos o más variables. Así, siguiendo los pasos descritos en la sección 3.5, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 4.4, donde se muestra la

4. Análisis y Discusión de Resultados

función de distribución condicional de la cópula normal bivariada, como función de la correlación de rangos (dado que la variable inundación se encuentra por encima de su mediana -ver pregunta P26 de la sección correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango del Anexo II). Lo que permite obtener el coeficiente de correlación entre las variables inundación y costos humanos.

Como se puede apreciar en la Figura 4.4, la correlación entre esas dos variables es de 0.23 (medida en el eje horizontal). Este valor se obtuvo a partir del JEE, ya que las opiniones combinadas de los especialistas (TDPI) generaron un valor de probabilidad de 0.58. Al ingresar con este valor a la figura mediante el eje vertical, se llega al coeficiente de correlación $r_{\text{inundación, costos humanos}} = 0.23$. De la misma manera, la correlación obtenida entre las variables inundación y costos económicos, se muestra en la Figura 4.5.

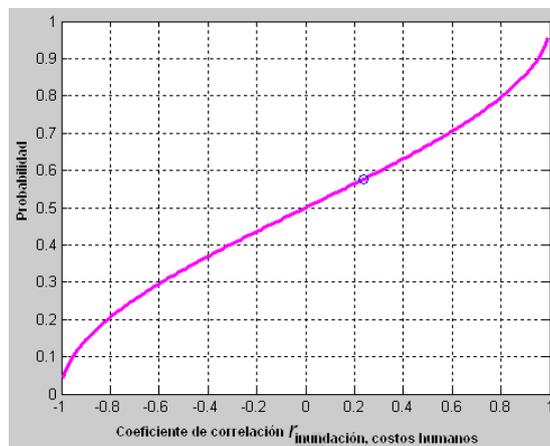


Figura 4.4 Correlación de rango entre las variables inundación y costos humanos

Nota: la probabilidad representada en el eje vertical es:

$$P(\text{Costos humanos } (\$) \geq \text{su mediana} \mid \text{inundación} \geq \text{su mediana (mm/día)})$$

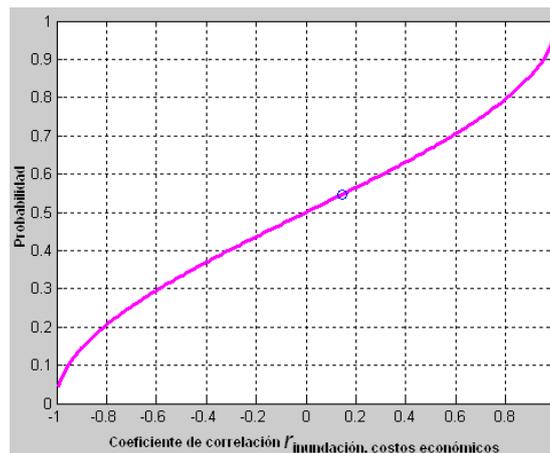


Figura 4.5 Correlación de rango entre las variables inundación y costos económicos

$$P(\text{Costos económicos } (\$) \geq \text{su mediana} \mid \text{inundación} \geq \text{su mediana (mm/día)})$$

En el nuevo ejercicio el valor del coeficiente de correlación se estimó de manera similar al caso anterior, que ahora resultó ser 0.14. Analizando los valores obtenidos, es claro que los expertos consideran que es más probable que la variable inundación tenga mayores impactos sobre los costos humanos (0.23), que sobre los costos económicos (0.14). Este resultado coincide con la idea de que las vidas humanas son “invaluables”.

4.5 Análisis de sensibilidad del modelo

Para realizar el análisis de sensibilidad, es necesario presentar todas las variables consideradas en el modelo trabajando conjuntamente. La Figura 4.6 muestra la RBCNP construida para los alcanzar las metas del proyecto mencionado en la sección 3.4. Se reitera que la investigación de la cual esta tesis es parte, tiene por objetivo tener una visión completa de las causas, indicios y consecuencias de la falla de una presa de tierra, aunque este documento en particular sólo estudia el último aspecto.

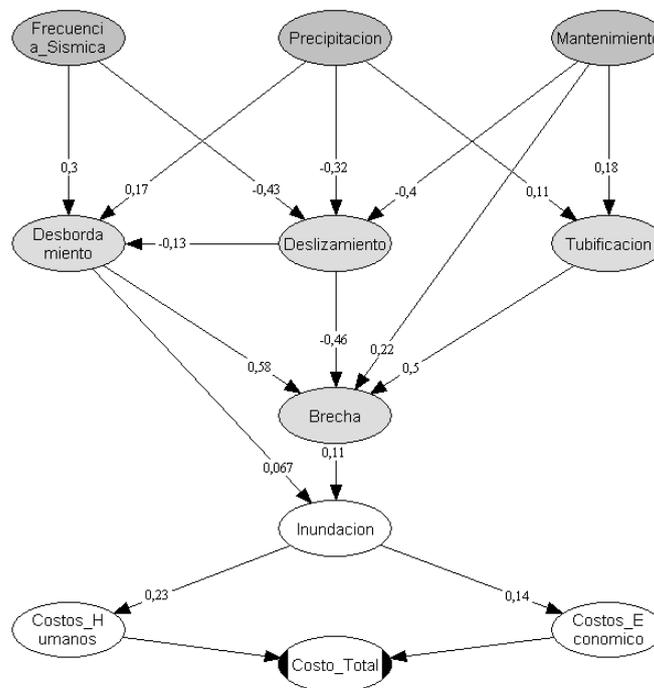


Figura 4.6 Modelo de Red Bayesiana Continua No Paramétrica para el proyecto UAEM 2491/2007

Como se puede apreciar, la red consta de diez variables, más un nodo funcional (“Costo total” -indicado con dos marcas negras para diferenciarlo), donde inundación, costos humanos y costos económicos ya fueron descritos. Para no desviar la atención hacia aspectos fuera del alcance de esta tesis, en la Tabla 4.2 se presenta una breve descripción de las otras variables del modelo, aunque los detalles y su cuantificación, son mostrados en trabajos de tesis paralelos a este¹³. En ellos, al igual que en el presente trabajo, se detalla la descripción de las variables: frecuencia sísmica, precipitación, mantenimiento, desbordamiento, tubificación y brecha, así como la razón por la cuál fueron seleccionadas,

¹³ Los autores de dichos trabajos son: David Carlos Pérez Flores y Benjamín Pérez Pliego

4. Análisis y Discusión de Resultados

e integradas en el modelo matemático propuesto para el proyecto UAEM 2491/2007 (Figura 4.6).

Tabla 4.2 Descripción del resto de las variables que intervienen en el modelo

<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
Frecuencia sísmica	Es una distribución del número de eventos con frecuencia ≥ 5.5 grados en escala de Richter de 2000 a 2008.	(# sismos ≥ 5.5)/año
Precipitación	Es el promedio diario para las cuencas de cada presa en estudio, obtenido a través de sus estaciones meteorológicas de influencia. Con dicho promedio se obtiene un promedio móvil por cuenca, y finalmente se obtiene un promedio de estos promedios móviles a lo largo de las 7 cuencas.	(mm/día)
Mantenimiento	Es el número de años transcurridos entre mantenimientos que llevan a la obra al estado original, es decir, a ser tan buena como cuando era nueva.	(# de años entre mantenimientos)
Desbordamiento	Se considera como el tirante medido a partir de la cresta, durante un evento en el cual es posible que el nivel del agua almacenada supere la altura total de la cortina	(mm)
Deslizamiento	Es la distribución de los Factores de Seguridad (Momento resistente/Momento motor) que tiene cada presa, con base en su geometría de diseño y mediante la aplicación del llamado método Sueco.	(--)
Tubificación	Gasto de la presa que se filtra a través de la cortina y/o cimentación, sin considerar el agua que fluye a través de la obra de toma y/o de la obra de excedencias	(Lps)
Brecha	Longitud del ancho de brecha promedio, es decir, ancho de brecha superior y ancho de brecha inferior, presentada debida a la erosión la corona de la cortina	(m)

Vale la pena señalar, que las variables que constituyen el modelo, fueron seleccionadas con base en las estadísticas mundiales que reportan las principales causas de falla de presas de tierra (Foster *et al*, 2000). Además cada variable, como se menciona en la descripción de las Redes Bayesianas, mantiene una relación con las demás ya sea de manera directa o indirecta. Así, la descripción de los resultados obtenidos utilizando el modelo completo, será presentada en el reporte de dicho proyecto. Sólo para darle una idea al lector de la magnitud de las relaciones existentes entre las variables, se presenta la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Correlaciones entre las diez variables del modelo

	Frecuencia Sísmica	Precipitación	Mantenimiento	Deslizamiento de talud	Desbordamiento	Tubificación	Brecha	Inundación	Costos Económicos	Costos Humanos	Costo Total
Frecuencia Sísmica	1	0.00	0.00	-0.36	0.30	0.00	0.24	0.05	0.01	0.02	0.02
Precipitación		1	-0.01	-0.28	0.19	0.10	0.22	0.04	0.00	0.01	0.01
Mantenimiento			1	-0.41	-0.03	0.18	0.33	0.02	0.00	0.01	0.01
Deslizamiento de talud				1	-0.12	-0.11	-0.46	-0.05	0.00	-0.02	-0.01
Desbordamiento					1	0.01	0.49	0.11	0.02	0.03	0.03
Tubificación						1	0.51	0.04	0.01	0.01	0.02
Brecha							1	0.12	0.02	0.03	0.03
Inundación								1	0.14	0.23	0.22
Costos Económicos									1	0.03	0.82
Costos Humanos										1	0.48
Costo Total											1

4. Análisis y Discusión de Resultados

Como se puede apreciar, la correlación mas alta se presenta entre las variables “costo económico” y “costo total”, que alcanzó un valor de 0.82. En segundo lugar se encuentra la correlación de 0.49, entre las variables “desbordamiento” y “brecha”. Cabe aclarar que esta matriz de correlaciones solo presenta los valores de los coeficientes de correlación entre las variables, por lo que no necesariamente coinciden con los coeficientes del modelo de la Figura 4.6, que presenta correlaciones condicionales de rango, las cuales fueron obtenidas mediante el JEE. Para más detalles, el lector puede consultar Hanea (2008) y Morales *et al* (2008b).

Con base en el modelo de la Figura 3.7, ahora se analizará el comportamiento de las variables: inundación, costos humanos, costos económicos y costos totales. Antes, se presenta la misma Figura, pero en forma de histogramas (Figura 4.7).

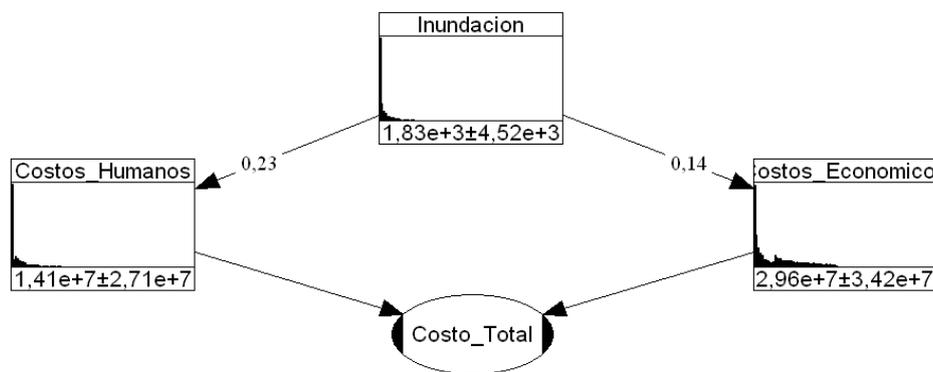


Figura 4.7 RBCNP con la estructura del modelo de evaluación de costos por fallas en presas de tierra del Estado de México, presentado en forma de histogramas

De nuevo, cada nodo del modelo representa una variable. Así, en la parte central superior se observa el histograma de la variable inundación, y a la izquierda, debajo de ella, se encuentra otro histograma que representa a la variable costos humanos. Se puede observar que ambos están unidos por un arco que, como se explicó en las secciones 2.4, 3.5 y 4.4, representa la fuerza de la relación existente entre ellas. Nótese que en la parte inferior de los nodos se muestran dos cantidades, que representan la media y desviación estándar de las distribuciones generadas.

Cabe señalar que el modelo propuesto es aplicable a cualquiera de las siete presas en estudio, ya que la cuantificación de sus variables empleó datos relevantes para todas ellas. En este sentido, la Tabla 4.4 presenta los valores que el modelo tiene inicialmente, es decir, antes de que se le proporcionen datos específicos para caracterizar alguna presa en especial. La primer variable, frecuencia sísmica, adoptó el valor 6.43 (50 percentil). Esto significa que en promedio se pueden esperar entre 6 y 7 sismos mayores a 5.5° Richter en las zonas donde se ubican las presas investigadas. Otro ejemplo, precipitación, indica que el promedio móvil de lluvia en cualquiera de las siete estructuras es 5.42 mm/día (50 percentil).

4. Análisis y Discusión de Resultados

Las demás variables se interpretan de forma similar. En la Tabla 4.4 se hace referencia a una presa “tipo”, la cual corresponde a una presa virtual de la que no se tiene más información, excepto los valores iniciales del modelo (valores por defecto).

Tabla 4.4 Valores iniciales (50 percentil) para las variables del modelo

Variable	Frec. Sísmica (# sismos \geq 5.5)/año	Tubificación (Lps)	Precipitación (mm/día)	Mantenimiento (años)	Deslizamiento (FS)	Desbordamiento (mm)	Brecha (m)
Presa Tipo	6.4363	0.20281	5.425	11.26	1.6762	-3,528	1.3213

Tabla 4.4 (Continuación) Valores iniciales (50 percentil) para las variables del modelo

Variable	Inundación (mm/día)	Costos Humanos (\$)	Costos Económicos (\$)	Costo Total (\$)
Presa Tipo	298.99	\$3'343,500.00	\$20'365,000.00	\$32'125,000.00

Para comenzar a utilizar el modelo, se decidió usar como “variable independiente” el nivel de agua provocado por una eventual inundación (sin considerar la causa que la genera), y como variable dependiente los costos totales. Se reitera que esta última variable se ha colocado en forma de nodo funcional, ya que representa la suma de los costos humanos más los económicos. Es importante aclarar que dicha suma no es aritmética, pues como se dijo en la sección 3.4, los coeficientes de correlación existentes entre las variables son diferentes.

La Tabla 4.5 resume los resultados obtenidos cuando el nivel de la lámina de agua se incrementa de 50 mm/día a 10,000 mm/día. Los valores correspondientes al 5, 50 y 95 percentiles son presentados en la misma tabla tanto para los costos humanos y económicos como para los totales.

Tabla 4.5 Relación de altura del nivel de agua vs costos humanos y costos económicos generados por la falla de una de las siete presas bajo estudio (presa “tipo”)

Inundación (mm/día)	Costos Humanos (\$)			Costos Económicos (\$)		
	5	50	95	5	50	95
Percentiles →						
50	\$3,026.00	\$2'460,300.00	\$49'857,000.00	\$476,480.00	\$18'837,000.00	\$83'761,000.00
100	\$3,201.30	\$2'794,800.00	\$50'529,000.00	\$484,100.00	\$19'763,000.00	\$83'945,000.00
150	\$3,292.40	\$3'000,300.00	\$50'895,000.00	\$488,450.00	\$20'128,000.00	\$84'158,000.00
500	\$3,635.70	\$3'909,800.00	\$52'826,000.00	\$516,940.00	\$20'941,000.00	\$89'676,000.00
1000	\$4,151.00	\$4'629,500.00	\$62'142,000.00	\$534,740.00	\$21'957,000.00	\$96'405,000.00
1500	\$4,677.40	\$5'118,200.00	\$69'236,000.00	\$548,190.00	\$22'551,000.00	\$100'370,000.00
5000	\$7,204.50	\$7'738,600.00	\$96'126,000.00	\$617,130.00	\$25'961,000.00	\$116'740,000.00
10000	\$9,817.10	\$9'694,100.00	\$110,770,000.00	\$665,110.00	\$27'966,000.00	\$123'880,000.00

4. Análisis y Discusión de Resultados

Tabla 4.5 (Continuación) Relación de altura del nivel de agua vs costos humanos y costos económicos, generados por la falla de una de las siete presas bajo estudio (presa “tipo”)

<i>Inundación (mm/día)</i>	<i>Costo Total (\$)</i>			
	<i>Percentiles →</i>	<i>5</i>	<i>50</i>	<i>95</i>
50		\$984,260.00	\$30'174,000.00	\$125'830,000.00
100		\$1'012,400.00	\$30'837,000.00	\$128'250,000.00
150		\$1'032,800.00	\$31'238,000.00	\$129'320,000.00
500		\$1'147,900.00	\$33'284,000.00	\$135'710,000.00
1000		\$1'317,700.00	\$35'805,000.00	\$143'760,000.00
1500		\$1'440,400.00	\$37'435,000.00	\$148'730,000.00
5000		\$2'172,000.00	\$44'923,000.00	\$168'420,000.00
10000		\$2'824,200.00	\$49'214,000.00	\$176'970,000.00

Como se puede apreciar, los costos totales varían de \$ 30'174,000 a \$ 49'214,000 en el caso del 50 percentil. Es decir, existe una relación de 1.63 entre los costos totales generados por una inundación de 10 m contra una de apenas 5 cm por día. Es claro que la relación no es lineal. Esto se podría explicar en términos físicos, de la siguiente manera, cuando el agua entra a un hogar comienza a dañar los muebles y objetos que están a nivel del piso. Este daño puede ser muy significativo en comparación con el provocado por la eventual subida del nivel de la lámina, ya que los daños más importantes ya fueron causados.

Para ejemplificar lo descrito en el párrafo anterior se puede usar el caso de una computadora de escritorio, apoyada directamente en el piso. En una eventual inundación, 5 cm de agua le provocarían grandes daños. Entonces, si el nivel sube hasta 30 cm, el costo no se vería incrementado sobre el mismo bien, ya que hubo pérdida total prácticamente desde el momento en que el agua entro en contacto con este.

La Figura 4.8 presenta simultáneamente las tres curvas generadas para los costos totales, correspondientes al 5, 50 y 95 percentil, con base en los datos presentados en la Tabla 4.4. Debido a la escala, no es claro que la curva del 5 percentil crece a una tasa más alta que las otras dos. Sin embargo esto se puede verificar en las Tablas de datos que dieron origen a las gráficas. Como se esperaba, los costos totales suben a medida que se incrementa la lámina de agua, aunque no de manera lineal.

4. Análisis y Discusión de Resultados

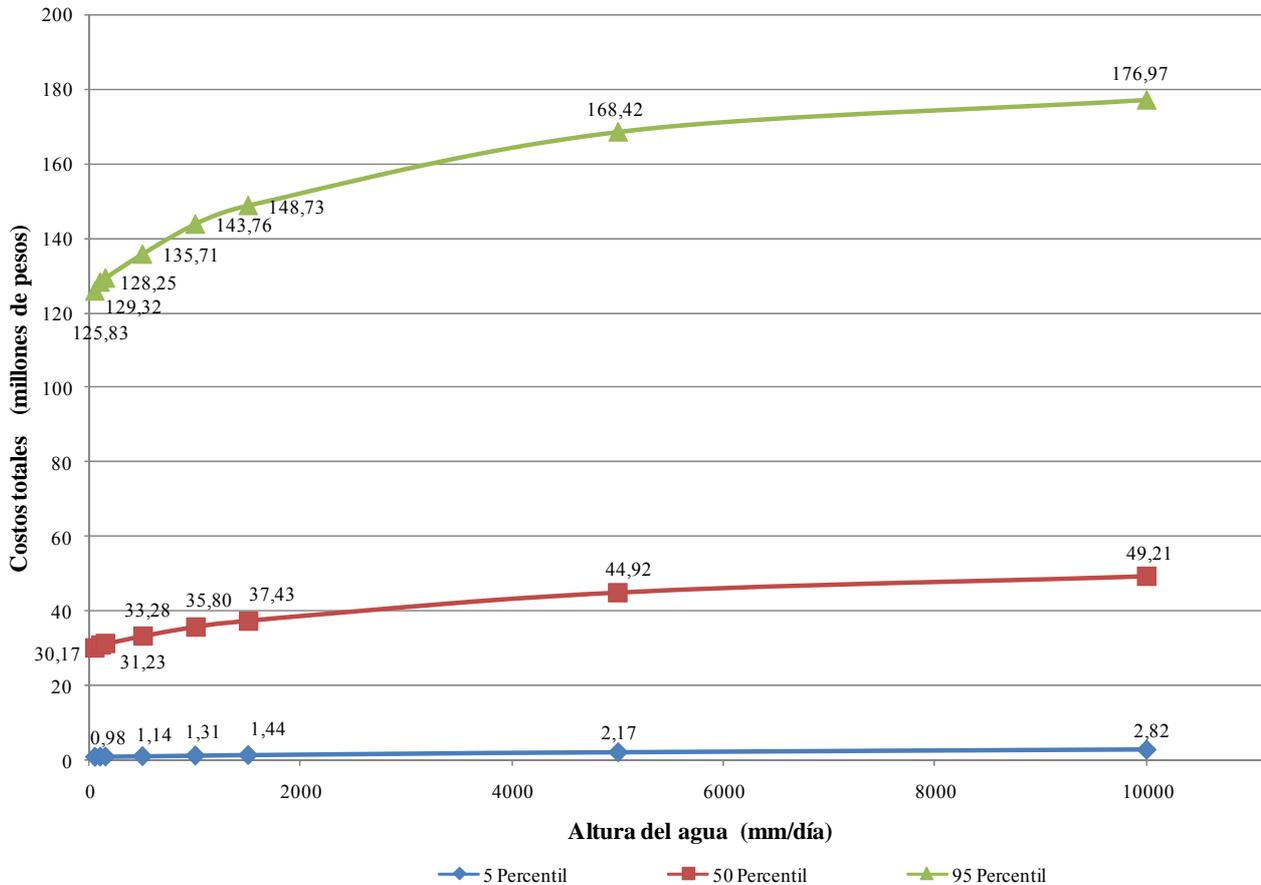


Figura 4.8 Curvas altura de agua vs costos total, para el 5, 50 y 95 percentiles, en una presa “tipo”

Ahora, se realizará el análisis para tres de las siete presas en el Estado de México. La selección de éstas, se hizo con base en las características de cada una. Tomando como criterios la ubicación relativa con respecto a zonas habitadas y la edad, se seleccionó en primera instancia a la presa José Antonio Alzate (presentada en la sección 3.2). La segunda presa elegida fue la Ignacio Ramírez (ver también la sección 3.2), y por último se tomó en cuenta a El Guarda, por ser la estructura más joven, ya que se quiso analizar la sensibilidad del modelo a la edad.

El análisis pretende comparar los costos totales resultantes para cada una de las presas en estudio, con la intención de visualizar las diferencias o variaciones que se presentarían durante su eventual falla. Para realizarlo, y comprobar la utilidad del modelo, se propondrán algunos escenarios de falla, que ayudarán a determinar el monto de las consecuencias esperadas en cada uno.

La Tabla 4.6, muestra la caracterización de la presa José Antonio Alzate. Dicha caracterización se basa en dos variables: mantenimiento y deslizamiento. Para fines del ejemplo, se supondrá que la presa no ha tenido mantenimiento alguno desde que inicio sus operaciones, y se tomará como deslizamiento el Factor de Seguridad (FS) de diseño de la

4. Análisis y Discusión de Resultados

presa. Más aun, la “variable independiente” será el desbordamiento, mientras que inundación y costo total serán las “variables dependientes”.

Tabla 4.6 Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa José Antonio Alzate

<i>Presa/Variable</i>	<i>Frec. Sísmica (# sismos ≥ 5.5/año)</i>	<i>Tubificación (Lps)</i>	<i>Precipitación (mm/día)</i>	<i>Brecha (m)</i>	<i>Mantenimiento (años)</i>	<i>Deslizamiento (-)</i>	<i>Desbordamiento (mm)</i>
<i>Condiciones de iniciales del modelo (media)</i>					<i>Caracterización</i>		<i>Condición</i>
							-100.00
							0.00
<i>José Antonio Alzate</i>	6.68	19.77	5.69	8.29	46.00	1.95	100.00
							500.00
							700.00

Tabla 4.6 (Continuación) Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa José Antonio Alzate

	<i>Inundación (mm)</i>			<i>Costo Total (\$)</i>		
	<i>5</i>	<i>50</i>	<i>95</i>	<i>5</i>	<i>50</i>	<i>95</i>
0.03	553.07	11,422.00		\$1'080,700.00	\$33'805,000.00	\$143'250,000.00
0.03	567.42	11,597.00		\$1'084,700.00	\$33'911,000.00	\$143'560,000.00
0.03	567.42	11,597.00		\$1'084,700.00	\$33'911,000.00	\$143'560,000.00
0.03	643.79	12,646.00		\$1'106,700.00	\$34'316,000.00	\$145'100,000.00
0.04	692.03	13,913.00		\$1'126,000.00	\$34'587,000.00	\$145'980,000.00

Como se puede apreciar, la lámina de agua generada por una inundación varía de 553.07 a 692.03 mm en el caso del 50 percentil. En cuanto al costo total, el valor va de \$ 33'805,000 a \$ 34'587,000 para el mismo percentil. Esto significa, en el primer caso, que el incremento del nivel de agua de -100 a 700 mm en la variable desbordamiento, produce el 25 % (1 - 692.03/553.07) de incremento en la variable inundación. Como se aprecia, se tiene un impacto considerable ya que el agua contenida por la cortina se libera repentinamente hacia el valle aguas abajo, generando una variación en el nivel de la inundación.

En el segundo caso, el mismo aumento en la variable desbordamiento produce una variación de apenas 2.3 % en el costo total. Esto se explica, nuevamente, por el hecho de que la gran mayoría de los bienes no requieren tener un nivel de agua muy alto para considerarse como perdidos. Cabe aclarar que las variaciones obtenidas con el 5 y el 95 percentil son equiparables a las obtenidas con el 50.

En la Figura 4.9 (a y b) se presentan los datos anteriores graficados, para los valores del 50 percentil. La gráfica de la izquierda representa la relación desbordamiento vs costo, mientras que la de la derecha la altura de agua vs costo.

4. Análisis y Discusión de Resultados

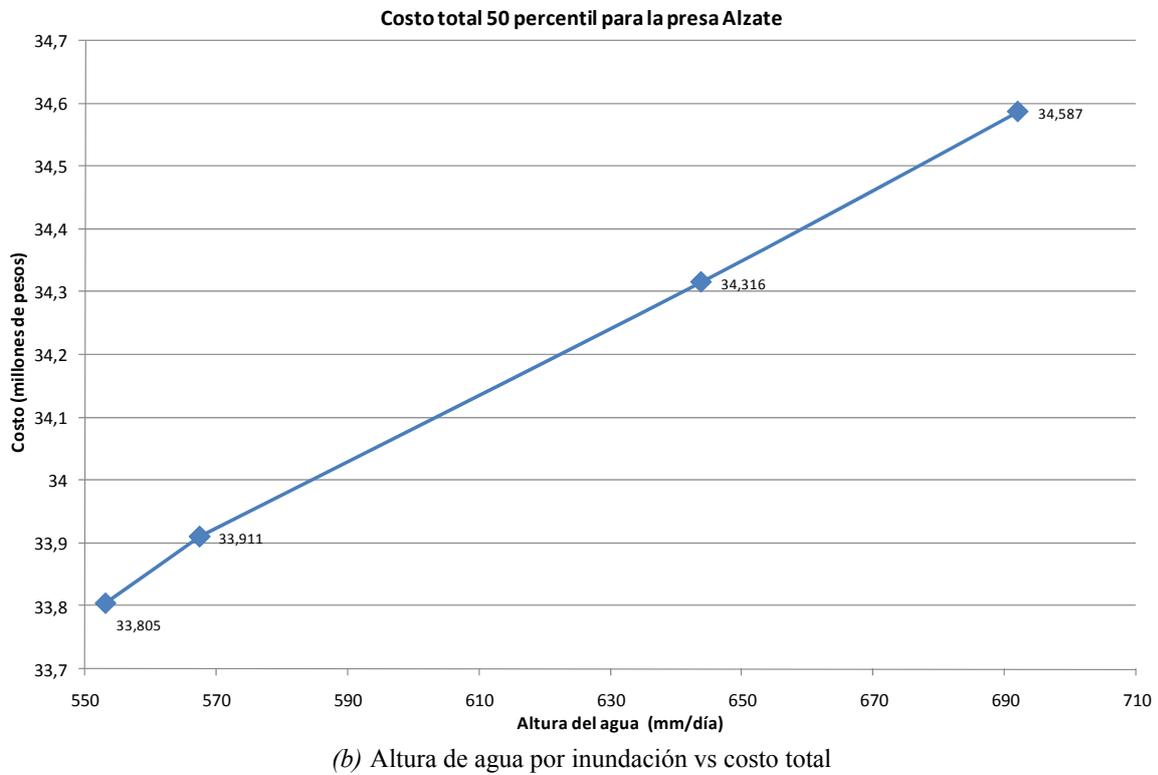
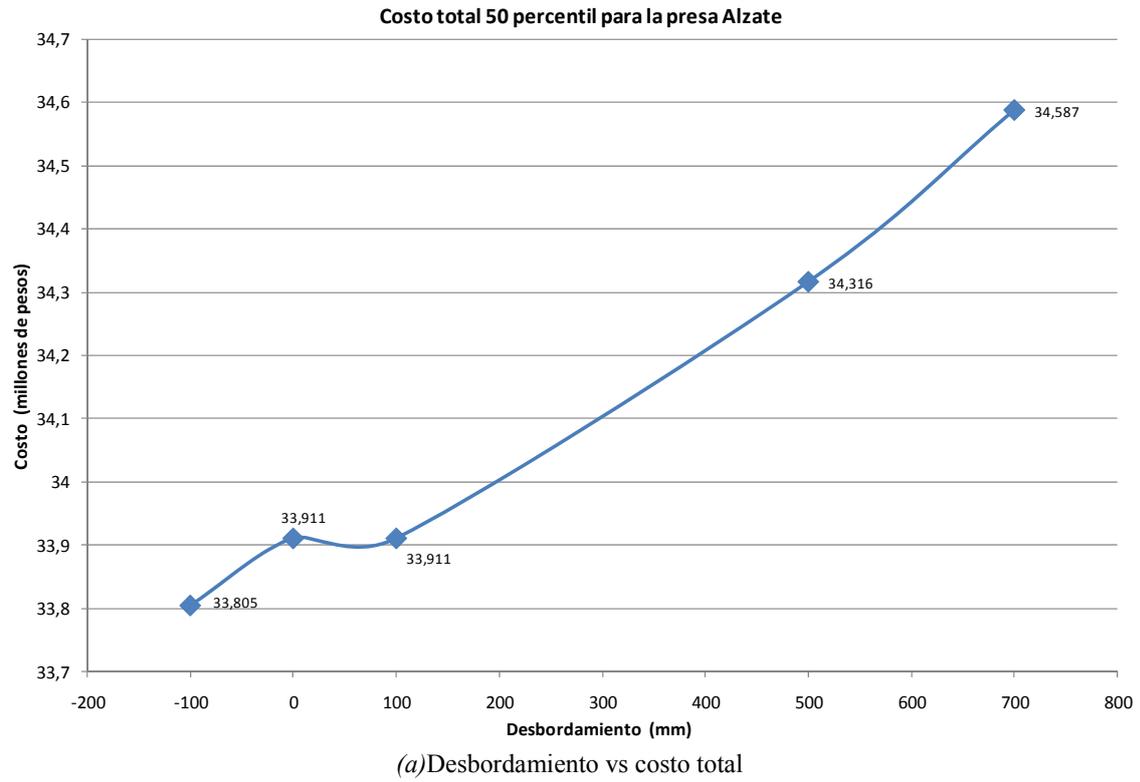


Figura 4.9 Curvas de costo total para el 50 percentil de la presa José Antonio Alzate

4. Análisis y Discusión de Resultados

Como se puede apreciar, en el eje de las abscisas se colocaron los niveles de agua correspondientes a las variables desbordamiento e inundación respectivamente, y en el de las ordenadas los costos totales resultantes. En ambos casos existe una relación positiva, aunque las curvas muestran una ligera variación entre si. Esto se debe a que en la primera gráfica los costos están relacionados con el desbordamiento, y en la segunda con la inundación resultante de dicho desbordamiento.

Con base en estas dos gráficas se puede observar, por ejemplo, que un desbordamiento de 500 mm sobre la cresta de la cortina produce costos totales de \$ 34'316,000 (Figura 4.9-a). En paralelo, los daños por esta cantidad son generados por una inundación de 643.79 mm por día, como se aprecia en la Figura 4.9 (b). Esta información corresponde a la presentada en la Tabla 4.6, solo que ahora se ha mostrado gráficamente.

La Tabla 4.7, por otro lado, representa la caracterización de la presa Ignacio Ramírez. Esto se logró siguiendo los pasos descritos para la presa José Antonio Alzate, siendo la edad y el FS diferentes.

Tabla 4.7 Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa Ignacio Ramírez

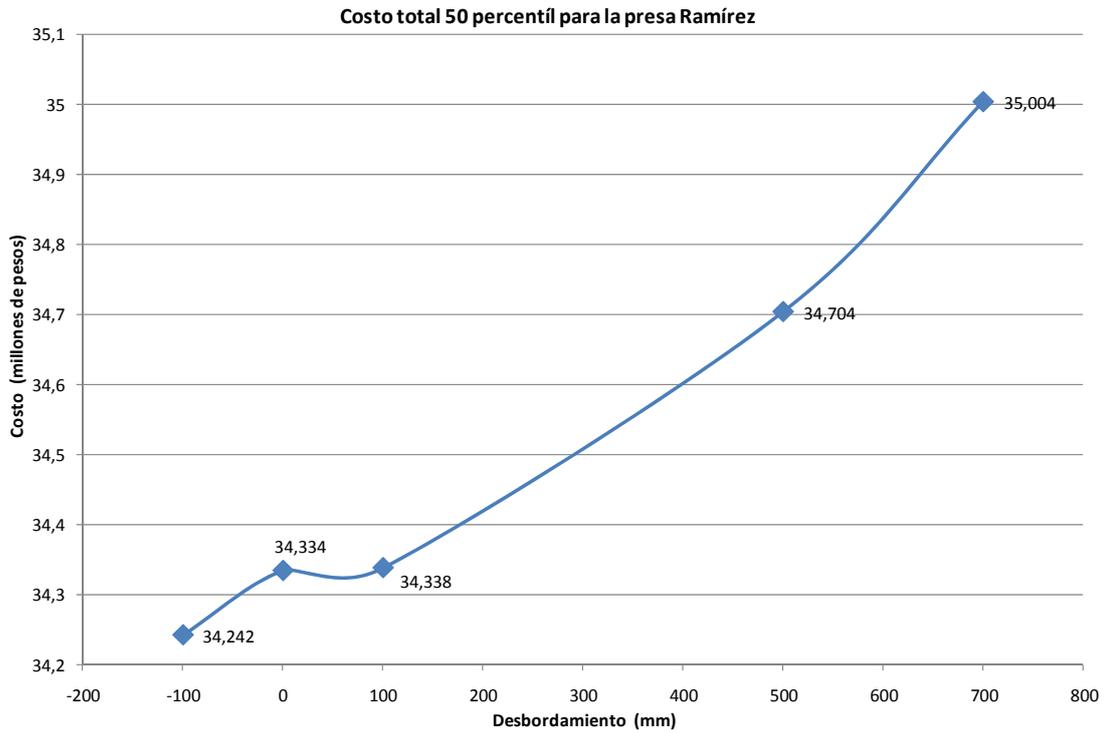
<i>Presa/Variable</i>	<i>Frec. Sísmica (sismos \geq 5.5/año)</i>	<i>Tubificación (Lps)</i>	<i>Precipitación (mm/día)</i>	<i>Brecha (m)</i>	<i>Mantenimiento (años)</i>	<i>Deslizamiento (--)</i>	<i>Desbordamiento (mm)</i>
<i>Condiciones de iniciales del modelo (media)</i>					<i>Caracterización</i>		<i>Condición</i>
							-100.00
							0.00
<i>Ignacio Ramírez</i>	6.68	19.77	5.69	8.29	43.00	1.36	100.00
							500.00
							700.00

Tabla 4.7 (Continuación) Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa Ignacio Ramírez

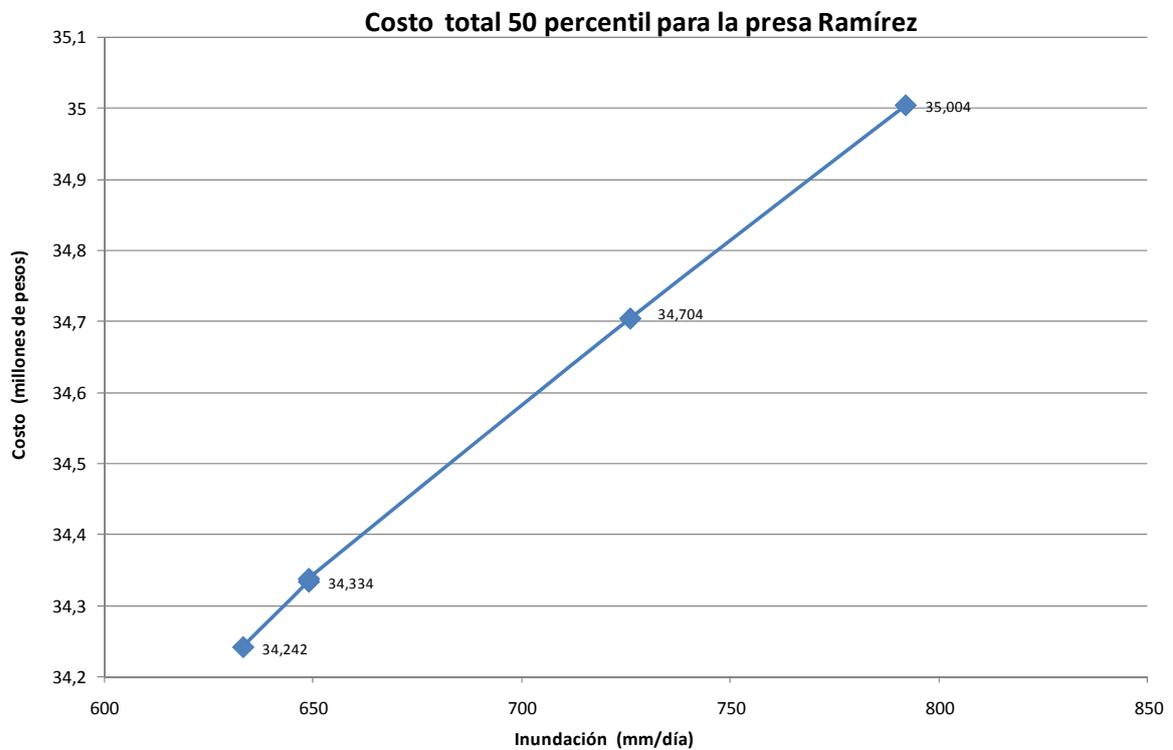
	<i>Inundación (mm)</i>			<i>Costo Total (\$)</i>	
	<i>5</i>	<i>50</i>	<i>95</i>	<i>50</i>	<i>95</i>
0.03	633.23	1,2471.00	\$1'103,400.00	\$34'242,000.00	\$144'910,000.00
0.03	648.97	1,2689.00	\$1'109,200.00	\$34'334,000.00	\$145'160,000.00
0.03	648.97	1,2772.00	\$1'109,200.00	\$34'338,000.00	\$145'160,000.00
0.04	725.99	1,4697.00	\$1'135,400.00	\$34'704,000.00	\$146'620,000.00
0.04	791.98	1,5965.00	\$1'146,800.00	\$35'004,000.00	\$147'620,000.00

En esta ocasión, la variable inundación también cambió 25%, para el percentil 50, y el costo total lo hizo 2.2%. Esto indica que las presas Ignacio Ramírez y José Antonio Alzate tendrían un comportamiento similar en cuanto a niveles de inundación y costos totales esperados. Después de graficar estos datos, se construyó la Figura 4.10.

4. Análisis y Discusión de Resultados



(a) Desbordamiento vs costo total



(b) Altura de agua por inundación vs costo total

Figura 4.10 Curvas de costo total para el 50 percentil de la presa Ignacio Ramírez

4. Análisis y Discusión de Resultados

Por último, se tipificó a la presa El Guarda. La edad y el FS correspondientes a dicha estructura aparecen en la Tabla 4.8, así como los valores obtenidos para los niveles de inundación y costo total, que resultan al mover la variable desbordamiento.

Tabla 4.8 Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa El Guarda

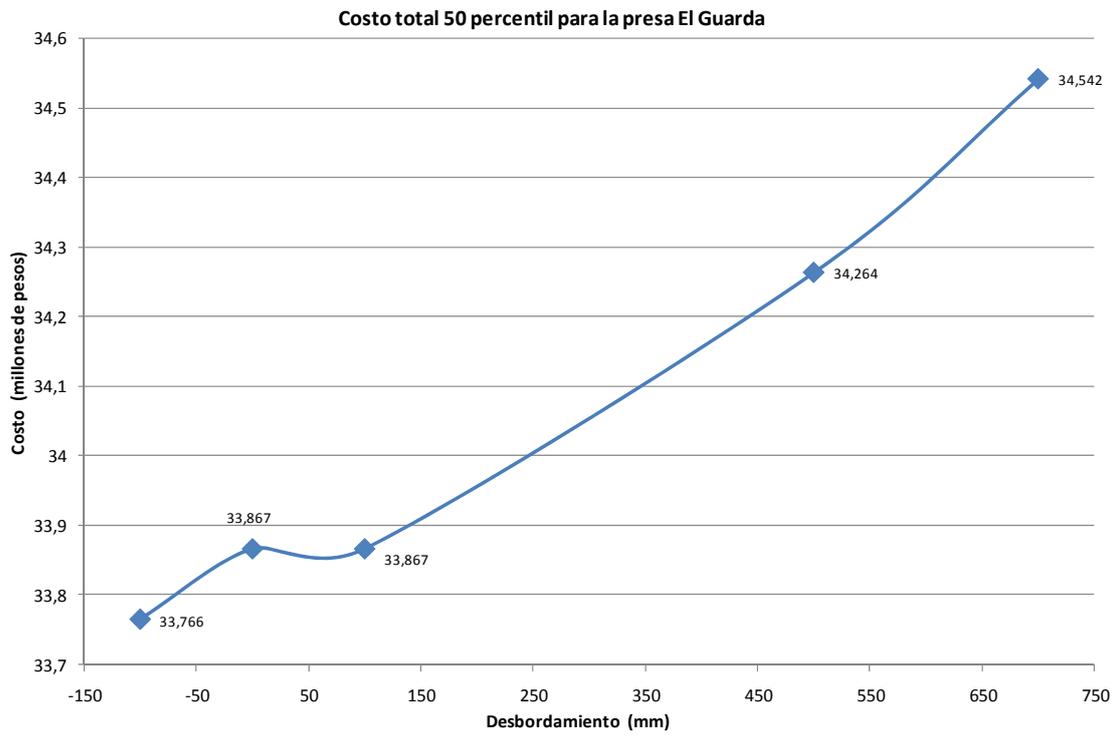
Presa/Variable	Frec. Sísmica (° Richter)	Tubificación (Lps)	Precipitación (mm/día)	Brecha (m)	Mantenimiento (años)	Deslizamiento (--)	Desbordamiento (mm)
<i>Condiciones de iniciales del modelo (media)</i>					<i>Caracterización</i>		<i>Condición</i>
							-100.00
							0.00
<i>El Guarda</i>	6.68	19.77	5.69	8.29	36.00	1.92	100.00
							500.00
							700.00

Tabla 4.8 (Continuación) Relación de desbordamiento, altura del nivel de agua y costo total generados por la eventual falla de la presa El Guarda

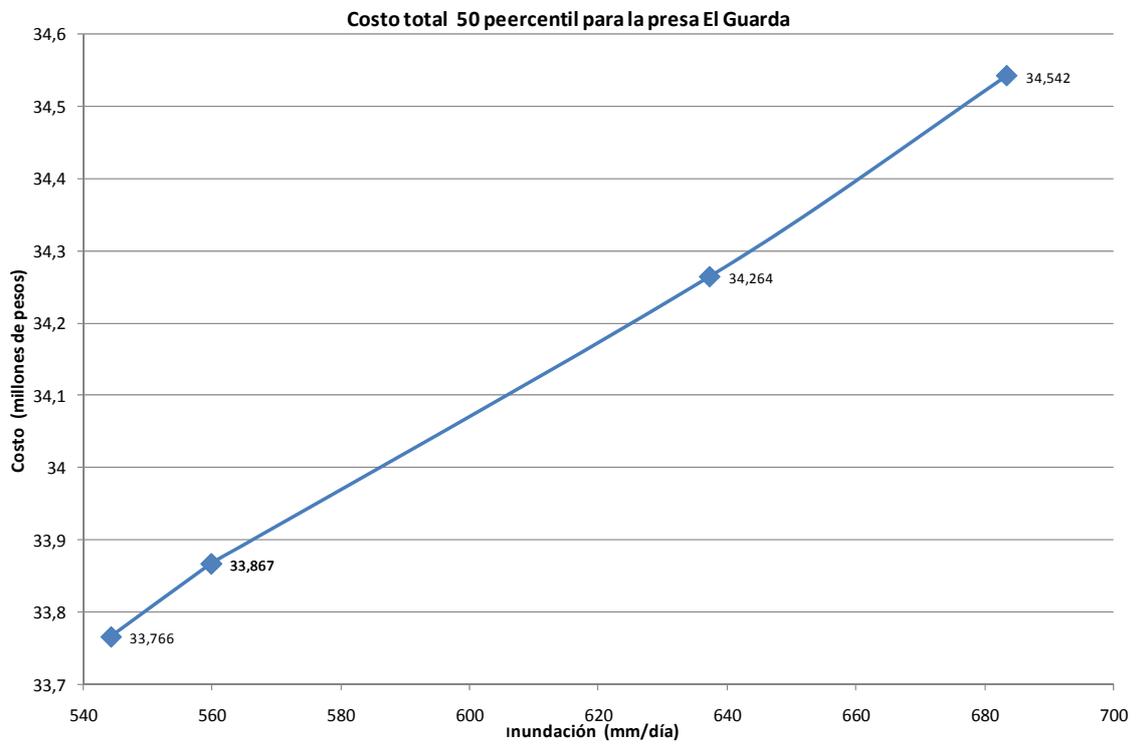
	Inundación (mm)			Costo Total (\$)	
	5	50	95	5	95
0.03	544.22	11,160.00		\$1'079,600.00	\$33'766,000.00
0.03	559.80	11,510.00		\$1'082,600.00	\$33'867,000.00
0.03	559.80	11,510.00		\$1'082,600.00	\$33'867,000.00
0.03	637.26	12,558.00		\$1'103,700.00	\$34'264,000.00
0.04	683.45	13,694.00		\$1'123,000.00	\$34'542,000.00

De nueva cuenta, para el 50 percentil la variable inundación se incremento un 25%, y el costo total un 2.2%. Esto indica que El Guarda tendría aumentos similares a los observados en las presas Ignacio Ramírez y José Antonio Alzate. La Figura 4.11, valida para El Guarda, muestra relaciones similares a las ya expuestas para las otras dos presas bajo estudio.

4. Análisis y Discusión de Resultados



(a) Desbordamiento vs costo total



(b) Altura de agua por inundación vs costo total

Figura 4.11 Curvas de costo total para el 50 percentil de la presa El Guarda

4. Análisis y Discusión de Resultados

A pesar de que las variaciones relativas en las tres presas estudiadas son similares (25% para inundación y 2.2% para costos totales), los valores absolutos son diferentes. Si se toma como referencia el caso del modelo incondicional (Tabla 4.4), y se comparan los valores obtenidos en los tres casos cuando el desbordamiento alcanza, por ejemplo, 700 mm, se obtienen resultados mostrados en la Tabla 4.9. Es importante mencionar que en todos los casos se ha tomado el valor del 50 percentil para hacer las comparaciones.

Tabla 4.9 Comparación de los costos totales esperados en cada presa con un desbordamiento de 700 mm, contra el costo total esperado para una presa “tipo”

<i>Presa</i>	<i>Inundación (mm)</i>	<i>Inundación/Inundación incondicional</i>	<i>Costo total (\$)</i>	<i>Costo total/Costo incondicional</i>
Incondicional (presa tipo)	298.99	1	\$32'125,000.00	1.00
José Antonio Alzate	692.03	2.31	\$34'587,000.00	1.08
Ignacio Ramírez	791.98	2.65	\$35'004,000.00	1.09
El Guarda	683.45	2.29	\$34'542,000.00	1.08

Mientras que la variable inundación se dispara para el caso de la presa Ignacio Ramírez (2.65 veces el valor esperado para la presa “tipo”), tanto la José Antonio Alzate como El Guarda presentan valores similares (2.31 y 2.29). En cuanto a la variable costo total, los tres casos son muy aproximados, estando prácticamente 10% por encima del caso incondicional. De esta forma, aunque los niveles de agua por inundación provocados por la falla de alguna de las tres estructuras es sustancialmente mayor que para la presa “tipo” (más del doble), los costos totales se mantienen en cotas cercanas al caso “tipo”.

Estos resultados permiten que los tomadores de decisiones tengan una idea de los costos totales esperados, con base en la presa que analicen. Asimismo, contribuyen a determinar los valores de inundación que se podrían alcanzar aguas abajo de cada una de las presas estudiadas en el ejercicio. Análisis similares se pueden realizar con las otras presas de interés, ya que cada una se puede caracterizar mediante su edad, FS de diseño, frecuencia sísmica en la localidad donde se ubica, precipitación en la región y las demás variables incluidas en el modelo general.

La Figura 4.12, muestra simultáneamente las curvas obtenidas para las tres presas bajo estudio (en todas se ha empleado el 50 percentil). Para el caso del desbordamiento, los mayores costos se deben a la presa Ignacio Ramírez, seguida por la José Antonio Alzate y, por último, El Guarda. Así, se observa que el modelo es sensible a las variables analizadas y también, se comprueba que la edad de la presa tiene influencia en los costos esperados. En concreto, El Guarda es la más joven de las tres estructuras analizadas y se espera que los costos generados por su eventual falla sean menores a los de las otras dos. Esto se puede explicar debido a que, una presa relativamente joven, tiene una probabilidad de falla menor y por consiguiente un menor riesgo. En general, una presa joven tiene menos asentamientos humanos aguas abajo así como infraestructura que pueda verse dañada. Aunque esto no necesariamente es cierto en todos los casos donde se construye alguna presa, lo es en los analizados.

4. Análisis y Discusión de Resultados

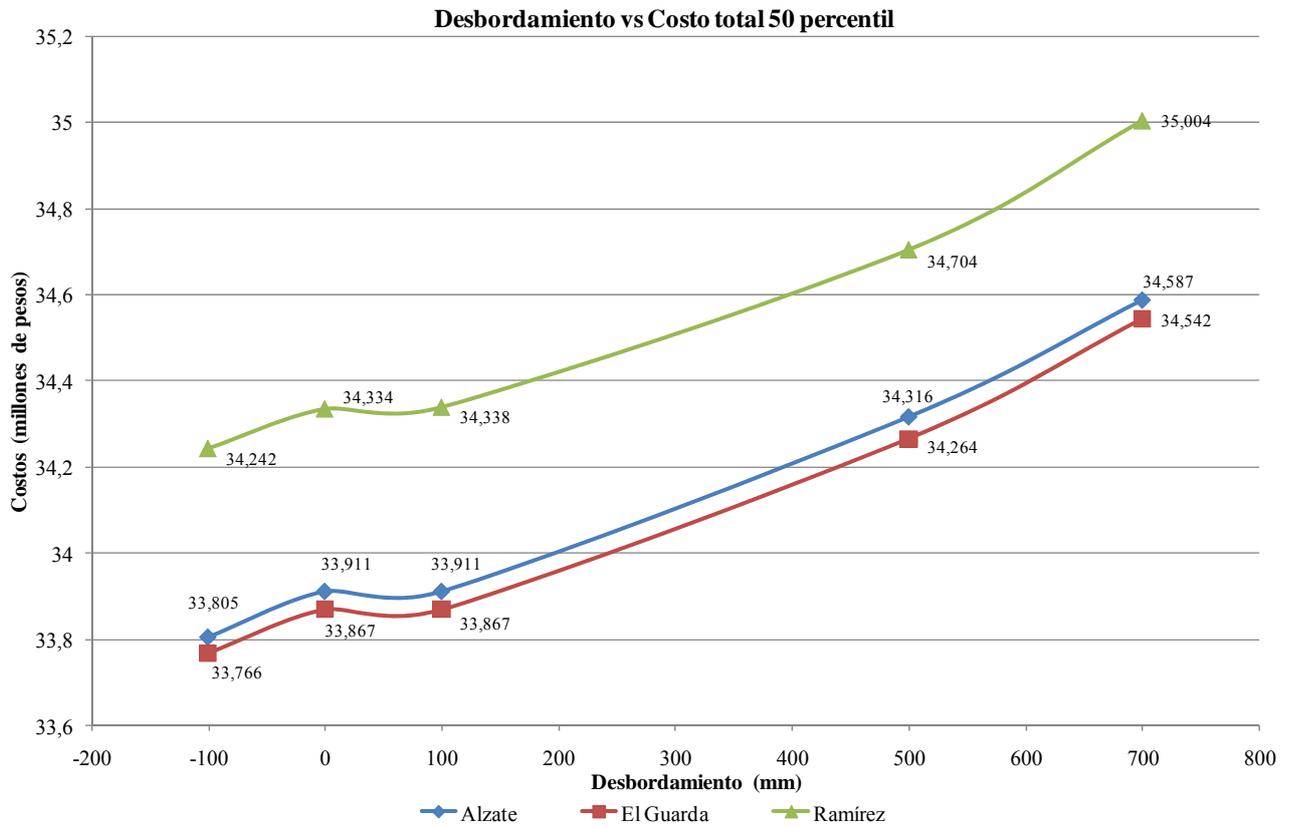


Figura 4.12 Curvas de desbordamiento vs costo total para el 50 percentil de las presas: Alzate, Ramírez y El Guarda

En la Figura 4.13 se muestran las gráficas debidas a la inundación. Los costos esperados son muy parecidos en las tres estructuras, y sólo la presa Ignacio Ramírez supera los 680 mm/día de lámina, lo que conduce a costos de aproximadamente \$ 35'000,000. Esto implica que tanto la inundación como los costos generados por la eventual falla de esta presa, son superiores a los de sus contrapartes analizadas.

Además, como parte del proyecto de investigación, también se realizó el análisis para las siete presas bajo estudio, la Tabla 4.10 mostrada abajo, describe brevemente la metodología y los criterios empleados para comparar las características y los valores propios obtenidos de cada presa.

4. Análisis y Discusión de Resultados

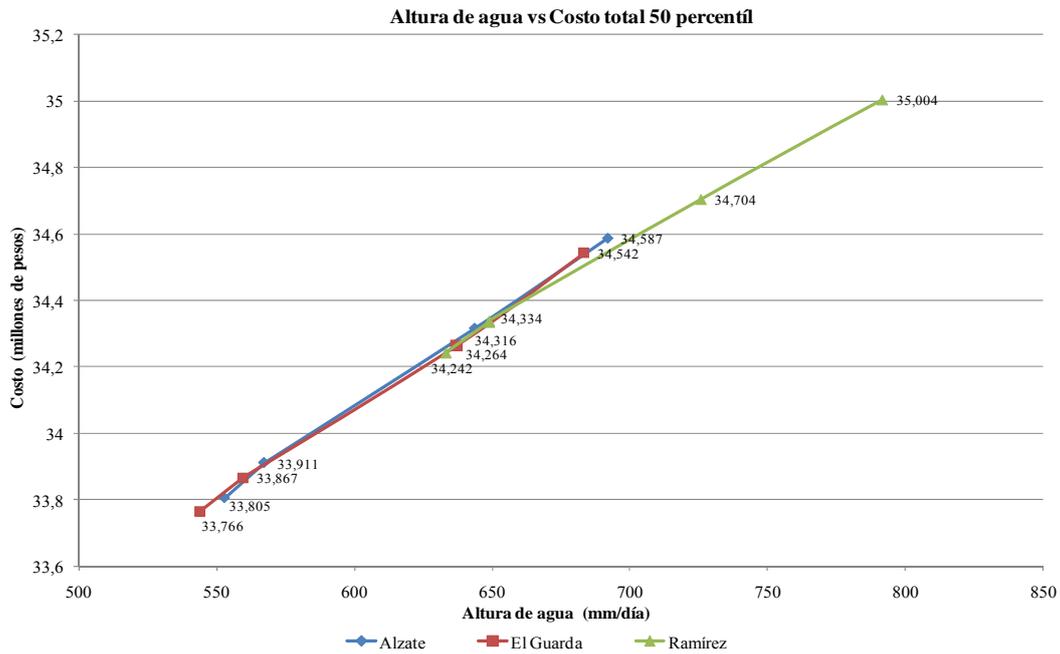


Figura 4.13 Curvas de altura de agua vs costo total para el 50 percentil de las presas Alzate, Ramirez y El Guarda

Tabla 4.10 Comparación de los costos totales esperados en cada una de las siete presas y la presa “tipo” con el modelo completo de RBCNP

Presa/Variable		“Presa tipo”	San Joaquín	Trinidad Fabela	Ramírez
<i>Frec. Sísmica</i> (sismos $\geq 5,5^{\circ}$ Richter)		6.68	6.68	6.68	6.68
<i>Tubificación</i> (Lps)	<i>Condiciones iniciales</i>	19.67	19.77	19.77	19.77
<i>Precipitación</i> (mm/día)		5.69	5.69	5.69	5.69
<i>Mantenimiento</i> (años)	<i>Caracterización</i>	15.10	65.00	64.00	44.00
<i>Deslizamiento</i> (F. S.)		1.66	1.31	1.37	1.63
<i>Desbordamiento</i> (mm/día)	<i>Condición</i>	-3,806.60	100.00	100.00	100.00
<i>Brecha</i> (m)	<i>Media</i>	8.30	44.30	42.20	37.10
<i>Inundación</i> (mm/día)	<i>5</i>	0.02	0.04	0.04	0.03
	<i>50</i>	299.35	680.43	670.08	650.26
	<i>95</i>	6,403.20	13,607.00	13,519.00	12,777.00
<i>Costo Total</i>	<i>5</i>	\$1'004,300.00	\$1'122,300.00	\$1'118,600.00	\$1'109,800.00
	<i>50</i>	\$32'125,000.00	\$34'524,000.00	\$34'474,000.00	\$34'339,000.00
	<i>95</i>	\$137'990,000.00	\$145'810,000.00	\$145'590,000.00	\$145'260,000.00

4. Análisis y Discusión de Resultados

Tabla 4.10 (Continuación) Comparación de los costos totales esperados en cada una de las siete presas y la presa “tipo” con el modelo completo de RBCNP

Presa/Variable		Embajomuy	Dolores	Alzate	El Guarda
Frec. Sísmica (sismos $\geq 5,5^{\circ}$ Richter)		6.68	6.68	6.68	6.68
Tubificación (Lps)	<i>Condiciones iniciales</i>	19.77	19.77	19.77	19.77
Precipitación (mm/día)		5.69	5.69	5.69	5.69
Mantenimiento (años)		67.00	47.00	47.00	37.00
Deslizamiento (F. S.)	<i>Caracterización</i>	1.75	1.85	1.95	1.92
Desbordamiento (mm/día)	<i>Condición</i>	100.00	100.00	100.00	100.00
Brecha (m)	<i>Media</i>	34.20	23.90	20.60	19.20
Inundación (mm/día)	<i>5</i>	0.03	0.03	0.03	0.03
	<i>50</i>	638.07	588.59	568.18	561.92
	<i>95</i>	12,558.00	11,816.00	11,597.00	11,553.00
Costo Total	<i>5</i>	\$1'104,800.00	\$1'088,600.00	\$1'084,700.00	\$1'082,600.00
\$	<i>50</i>	\$34'264,000.00	\$34'008,000.00	\$33'915,000.00	\$33'874,000.00
	<i>95</i>	\$144'930,000.00	\$144'010,000.00	\$143'560,000.00	\$143'490,000.00

Como se puede observar, se presenta una tabla con 10 columnas (dividida en dos partes por su tamaño), la del extremo izquierdo muestra las variables consideradas y la unidad de medida que se utilizó, en la segunda columna, se indica si las variables fueron empleadas para el análisis como: condiciones de inicio, variables características de cada presa, condiciones, media o si son el 5, 50 y 95 percentiles. La primera presa, es denominada “incondicional” y es la presa “tipo” representada por las características iniciales con las que trabaja el programa. Así, la presa “tipo” ayuda a obtener los niveles de inundación y costos que podrían generarse para cualquier presa, en el caso que no se contara con datos que permitieran caracterizarla.

En las columnas siguientes, se observa cada una de las siete presas, comenzando con la presa San Joaquín, los primeros tres renglones representan el valor inicial (por defecto) que el modelo toma para la frecuencia sísmica, tubificación y precipitación. El cuarto y quinto renglón expresan el valor de mantenimiento y deslizamiento característico de esta presa. El sexto renglón es el valor que permite aplicar una condición en el modelo para observar el comportamiento de los resultados, para este análisis se empleó la variable desbordamiento aunque puede hacerse con cualquier otra variable o variables si se desea. El séptimo renglón muestra el valor medio que se obtendría de la variable brecha, dada una eventual falla y con las condiciones y características descritas anteriormente.

4. Análisis y Discusión de Resultados

En la parte inferior de la tabla, se presentan tres valores, el 5, 50 y 95 percentiles de la variable inundación, que representan el nivel que el agua alcanzaría debajo de la cortina, para el 5, 50 y 95 por ciento de las veces. Y finalmente, en los últimos tres renglones se presentan los costos totales esperados de igual forma, para el 5, 50 y 95 percentil en un evento de falla. En las otras columnas se presenta el mismo análisis para el resto de las presas bajo estudio.

A continuación, la Figura 4.14, presenta un histograma de los costos que pudieran generarse, dado el evento de falla de cada estructura. La construcción de la gráfica se realizó con base en el 50 percentil, es decir, si se presentara una falla, se tendría 50 por ciento de probabilidad que se presentaran los costos totales que aparecen en el histograma.

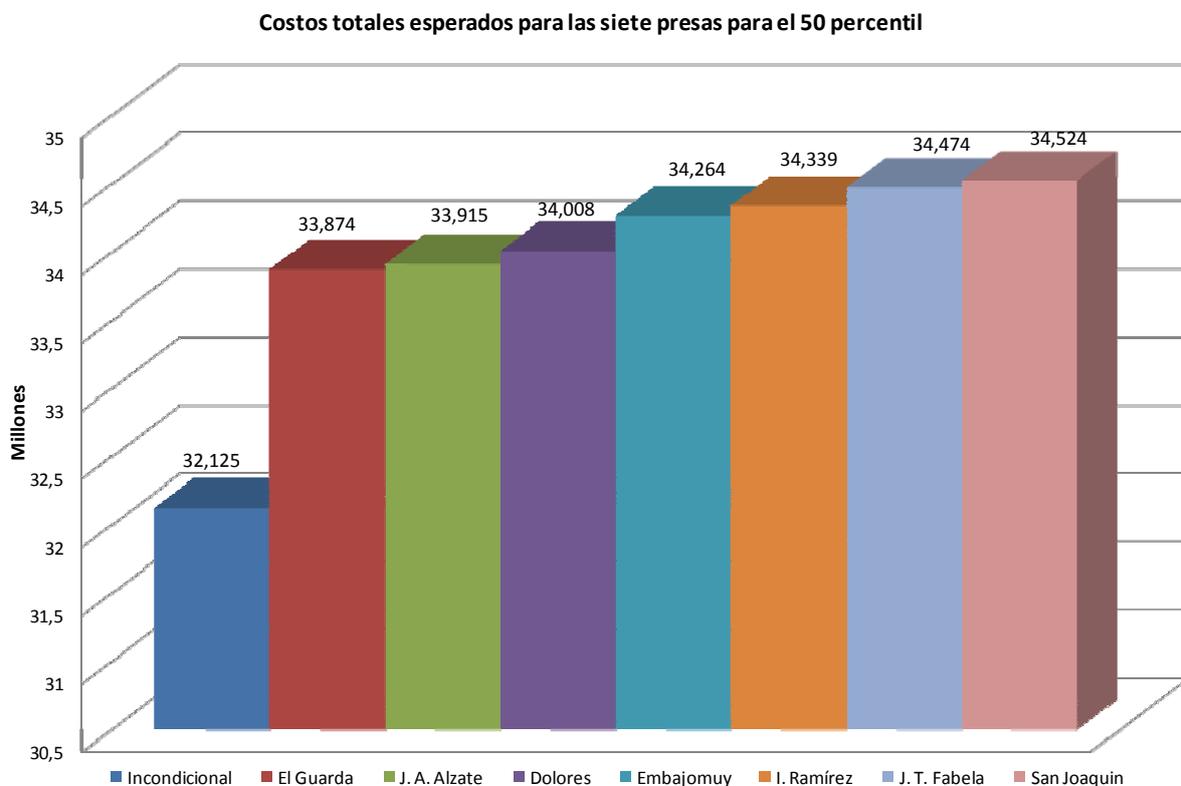


Figura 4.14 Histograma para los costo total esperado para el 50 percentil en la presa tipo y las siete presas bajo estudio

Como se puede observar, la presa San Joaquín es la que más costos totales generaría. Esto coincide con la situación actual ya que la presa está ubicada en una zona altamente poblada, justo en los límites del Estado de México y el Distrito Federal. Además es, junto con la presa Embajomuy la obra más antigua de las analizadas. En contraste, El Guarda, la estructura más joven, es la que relativamente hablando tendría menos costos.

4.6 Comparación con estudios previos

Una comparación directa con estudios similares es difícil, debido a que no existen reportes previos dentro del Estado de México, que puedan ser útiles en el cotejo de

4. Análisis y Discusión de Resultados

resultados. No obstante, a continuación se presentan algunos trabajos y datos que servirán como punto de referencia para poder contrastar el modelo que se presenta, así como los resultados obtenidos.

Como ya se ha mencionado, durante el ejercicio de investigación fue difícil identificar y, posteriormente, lograr la colaboración de expertos. Esto obedece a que dichos especialistas deben conocer con detalle las áreas y obras de estudio, así como estar concientes de eventos pasados con características similares a los de interés. De lo contrario, los resultados pueden no ser representativos. En este tenor de ideas, es importante mencionar que la carga de trabajo de los propios expertos, complica significativamente las reuniones para extraer la información. Pese a estos obstáculos, los resultados obtenidos muestran valores “razonables” y comparables con los reportados en otras investigaciones.

Por ejemplo, los estudios realizados por la Association of State Dam Safety Officials (ASDSO, 2007) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Hanson *et al*, 2001), reportan algunas fallas de presas. En la Tabla 4.11 se hace un breve recuento de los eventos más relevantes, tomando como criterios principales para su inclusión: las alturas de las cortinas, la pérdida de vidas y los costos económicos causados (medidos en millones de dólares -mdd-).

Tabla 4.11 Algunos incidentes de fallas en presas de tierra en los Estados Unidos (adaptado de: ASDSO, 2007 y Hanson *et al*, 2001)

<i>Presa y ubicación</i>	<i>Fecha de Falla</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Decesos</i>	<i>Costos económicos (mdd)</i>
Presa South Fork, Pensilvania	31 de Mayo, 1889	22	2,209	>17
Presa Austin, Pensilvania	30 de Septiembre, 1911	15	78	--
Presa Castlewood, Colorado	2 y 3 de Agosto, 1933	21	2	1.7
Presa Baldwin Hills, California	14 de Diciembre, 1963	20	5	11
Presa Buffalo Creek, Virginia	26 de Febrero, 1972	14	125	>50
Kelly Barnes, Georgia	6 de Noviembre, 1977	12	39	30
Presa Lawn Lake y Presa Cascade Lake, Estes Park, Colorado	15 de Julio, 1982	8 y 11	4	25
Presa Evans y Presa Lockwood, Fayetteville, Carolina del Norte	15 de Septiembre, 1989	10 y 10	3	10
Presa Silver Lake y Presa Tourist Park, Marquette, Michigan	13 de Mayo, 2003	10 y 8	0	102
Presa Big Bay Lake, Purvis, Mississippi	12 de Marzo, 2004	17	0	--
Presa Upper Jones Tract, Stockton, California	3 de Junio, 2004	15	0	>90
Presa Kaloko, Isla Kauai, Hawaii	14 de Marzo, 2006	30	7	>67
Presa Needwood, Gaithersburg, Maryland	28 y 29 de Junio, 2006	21	0	--

Como se puede apreciar, las fallas en presas de tierra han sido comunes a lo largo de los últimos 120 años. Nótese que la tabla anterior, solamente muestra algunos casos registrados de los que se tiene información, todos provenientes de los Estados Unidos, pues se trata de un país en donde estos eventos se han documentado históricamente. A pesar de esta limitante en el origen de la información, no se considera esto como un obstáculo para poder contrastar esos datos con los resultados obtenidos en el presente estudio.

Se han incluido algunas presas que no están en el rango de altura que se propuso en el capítulo uno para la selección de las mismas en este trabajo (15-30 m). Sin embargo, se

4. Análisis y Discusión de Resultados

creo conveniente incluirlas en el listado, debido a la relevancia en cuanto a las consecuencias generadas a causa de su colapso, ya sea en términos de costos humanos o económicos.

En seguida se presenta una descripción más detallada de las características, el monitoreo y causas de falla, las pérdidas humanas y los costos económicos provocados por el colapso de algunas de las presas citadas en la Tabla 4.11. Para no redundar en las descripciones y poder analizar adecuadamente la información con la que se cuenta, solo se presentarán los casos más notables en cuanto a consecuencias resultantes.

Presa South Fork

Localizada sobre el Río Conemaugh en Pensilvania, se trata de una presa de tierra construida en 1853, con una altura de cortina de 22 m y capacidad de almacenamiento de poco más de 14 millones de m³, aunque al momento de fallar el embalse alcanzó los 19 millones de m³. El objetivo principal de la estructura, era el abastecimiento de agua potable por medio de canales, y después de 35 años de servicio la presa falló el 31 de Mayo de 1889, a las 3:10 a.m. En aquel tiempo, se encontraba bajo la responsabilidad del Club de Caza de South Fork, y del Club de pesca de Pittsburgh. La causa del colapso fue un desbordamiento causado por un periodo de ocurrencia de 25 años.

Detalles de la falla y advertencia

El rompimiento de la presa se debió a la insuficiencia del vertedor para desalojar el volumen de agua requerido, además del pobre mantenimiento y las fuertes lluvias que se presentaron en la zona, lo que provocó su desbordamiento. Antes de que la falla ocurriera, algunas personas trataron de evitar que la cortina se viera sobrepasada, pero fue entre las 11:30 y las 12:00 de la noche cuando el ingeniero residente descendió cabalgando tres kilómetros al pueblo de South Fork, con la voz de alarma. De inmediato empleó el telégrafo para informar de la situación a Johnstown, la comunidad residente aguas abajo. Desafortunadamente, la alerta no fue esparcida de manera oportuna, pues en esa época una advertencia falsa era sancionada severamente, y la gente que recibió la noticia no quiso asumir el riesgo de alterar el orden público sin motivos de peso.

Alrededor de las 4.00 am, un muro de agua de aproximadamente 11 m de altura golpeo Johnstown, pero se estima que el pico de la ola alcanzaba los 27 m, con velocidades entre los 32 y los 60 Km/h. En un lapso de 57 minutos, la ola ya había recorrido cerca de 23 Km. Al tiempo de la inundación, Johnstown se encontraba debajo de, por lo menos, 3 m de agua.

Pérdidas humanas y costos económicos

La mayoría de las fatalidades ocurrieron en los primeros 23 Km a partir de la presa de South Fork. Hubo en total 2,209 decesos, entre los que se cuentan al menos dos de los cinco ingenieros residentes, 99 familias enteras. 396 niños menores de 10 años y, cuando menos, otras 20,000 personas más se encontraban en riesgo. La ciudad quedó completamente destruida, 1,600 casas devastadas y 280 negocios perdidos. Los costos totales ascendieron a más de 17 mdd.

Presa Castlewood

Se trata de una presa ubicada cerca de Franktown en Colorado, aproximadamente a 56 Km de Denver. Contaba con una cortina de tierra y enrocamiento de 21 m de altura y 183 m de longitud, con una capacidad de almacenamiento de poco más de cuatro millones de m³, y un sobrealmacenamiento de dos millones de m³. También contaba con un vertedor central de 30 m de longitud. El propósito de la presa fue la irrigación y se terminó de construir en 1890. La presa de Castlewood, colapsó a los 43 años de edad.

Detalles de la falla y advertencia

Aproximadamente a la media noche del día 3 de Agosto de 1933, la presa de Castlewood comenzó a verse sobrepasada por el nivel de agua, como consecuencia de las lluvias de temporada. El vigilante solamente contaba con un teléfono, el cual no funcionaba, para emitir la voz de alerta. Así que tuvo que conducir casi 20 Km para poder usar uno que si lo hiciera e informar del riesgo que representaba la presa en aquellos momentos. Esto fue posible hasta las 2:30 a.m. Asimismo, residentes de algunas presas localizadas aguas arriba recibieron alertas, probablemente extraoficiales, por lo que no se actuó oportunamente. De esta manera, la ola de inundación llegó a la ciudad de Denver entre las 5:30 a.m. y las 8:00 a.m., mucho antes que la policía y el cuerpo de bomberos pudieran reaccionar.

Un gran volumen de personas evacuaron el poblado contiguo a la presa, lo cual fue descrito por un periódico local de la siguiente forma: “*una estampida de 5,000 hombres vestidos en ropa de dormir huyeron de las tierras bajas*”. Incluso algunos habitantes de Cherry Creek acudieron a las partes altas en las cercanías de Franktown, para ver la inundación. En el área de Denver, la inundación causó daños significativos, aunque afortunadamente la altura y la velocidad de la onda de avenida no fueron suficientes para destruir estructuras importantes.

Pérdidas humanas y costos económicos

Por desgracia, ocurrieron dos fatalidades, la primera relacionada con la muerte de una mujer que observaba la inundación sobre su caballo y, la segunda con un hombre que cayó en un hoyo profundo mientras intentaba refugiarse en tierras altas. Las pérdidas económicas superaron los 1.7 mdd.

Presas Baldwin Hills

Localizada en California, entre Los Ángeles y el aeropuerto de la misma ciudad, se trataba de una presa de tierra, con una altura de 20 m, capacidad de almacenaje de cerca de un millón de m³, y un aliviadero en la cima de la cortina. El propósito por el cual se construyó en 1950 fue el abastecimiento de agua, y después de 13 años de vida útil colapsó.

Detalles de la falla y advertencia

La presa se desplomó el sábado 14 de Diciembre de 1963, por una falla en la cimentación provocada por tubificación, lo que dio origen a un deslizamiento de talud en la cortina, que

4. Análisis y Discusión de Resultados

ocasionó un abrechamiento y este a su vez desencadenó una fuerte inundación. A las 11:15 a.m. se descubrió una grieta en la cortina y a las 12:20 p.m los operadores comenzaron a liberar parte del líquido almacenado. El Departamento de Agua y Energía de Los Ángeles, notificó el suceso a la policía a la 1:30 p.m., y 15 minutos después se tomó la decisión de evacuar. Así, a las 2:20 p.m. comenzó el abandono y, finalmente la presa colapsó a las 3:38 p.m. La propagación de alarma se llevó a cabo por medio de la policía que, en carros patrulla, motocicletas y un helicóptero, recorrieron la ciudad anunciando el peligro. Asimismo, el evento fue cubierto por radio y televisión. Aunque la gran mayoría de la gente fue evacuada, algunas personas no tomaron en serio la advertencia.

Pérdidas humanas y costos económicos

Los cinco decesos que se registraron, ocurrieron en los primeros 1,500 m del recorrido de la ola inducida, sobre un conjunto habitacional que se inundó pero no fue destruido. La inundación se extendió más allá de tres Km de la presa, y el área afectada abarcó por lo menos 2.5 Km², donde había alrededor de 16,500 personas, 27 de las cuales resultaron heridas. Los costos económicos incluyeron 1,027 casas destruidas, 100 departamentos, líneas de alcantarillado y drenaje, puentes, kilómetros de carretera dañados, y más de 3,000 automóviles afectados. Se estima que el monto de los daños alcanzó los 11.3 mdd.

Presa Buffalo Creek

Se trataba de una estructura localizada cerca de Saunders en Virginia del Norte. La cortina tenía 14 m de altura y una capacidad de almacenaje de casi medio millón de m³. La presa se mantenía en constante modificación y su principal objetivo era mejorar la calidad del agua, la cual contenía desperdicio de carbón.

Detalles de la falla y advertencia

La presa falló el 26 de Febrero de 1972 alrededor de las 8:00 a.m. La causa del colapso fue un deslizamiento de talud durante una lluvia con periodo de retorno de 2 años. Los vigilantes encargados del monitoreo de la presa se encontraban en un recorrido de rutina y se percataron de la inminente falla. Así, dos de ellos acudieron inmediatamente con el jefe de policía del poblado de Logan para advertir de la situación, y que éste emitiera una alarma general para evacuar la zona. Sin embargo, el encargado directo de la seguridad de la presa impidió que otros dos jefes de policía, que habían acudido a la zona para ayudar a la evacuación, permanecieran en la presa. Además de esto, los residentes del lugar hicieron poco caso de la alarma que se emitió, pues cuatro ocasiones anteriores se habían difundido falsas alarmas.

Pérdidas humanas y costos económicos

La onda de avenida recorrió casi 25 Km a lo largo del valle a una velocidad promedio de 8 Km/h, arrasando con más de 1,000 casas. Las pérdidas humanas ascendieron a 125 víctimas fatales y más de 4,000 damnificados. Se estima que los costos superaron los 50 mdd.

Presa Kaloko

Ubicada al norte de la isla de Kauai, Hawaii, se alimentaba con los flujos de agua de la localidad conocida como Ka Loko y del Río Waiakalua. Constaba de una cortina de tierra con altura de 30 m, construida en 1890. La estructura almacenaba más de un millón y medio de m³ de agua y su función principal era la irrigación.

Detalles de la falla y advertencia

La presa falló durante la mañana del 14 de marzo de 2006 (a la edad de 116 años). Las fuertes lluvias registradas durante ese año tuvieron un impacto determinante en el colapso de la presa. Además, se tienen reportes de que el dueño había comenzado trabajos de estabilización del terraplén sin el consentimiento del departamento de tierra y recursos naturales de Hawaii (Hawaii Department of Land and Natural Resources), bloqueando el pequeño aliviadero de emergencia de la presa. Se presume que los trabajos previos a la estabilización (estudios, perforaciones, despalmes, etc.) debilitaron la cortina y, aunado al desbordamiento que se vio favorecido por la obstrucción del aliviadero, se generó una brecha. Cabe señalar que la presa no recibía mantenimiento, control o cualquier clase de monitoreo ni por parte de dicho departamento ni por parte de su dueño.

Pérdidas humanas y costos económicos

La ola provocada por el desbordamiento recorrió varios kilómetros hasta llegar a la comunidad de Kilauea, donde alcanzó una altura de entre 6 y 20 m, con un ancho de 60 m. La masa de agua golpeó el poblado, provocando el deceso de 7 personas, entre ellas, un niño y una mujer embarazada. Asimismo destruyó cientos de casas, grandes extensiones de cultivo, infraestructura carretera, y granjas enteras. El costo de las consecuencias incluyeron: 33.5 mdd en apoyo a los damnificados (medicinas, agua, etc), 20 mdd para reparar la infraestructura carretera dañada (sobretudo la autopista Kuhio), 6 mdd en daños agrícolas (cultivos de azúcar), 1 mdd para ayuda a los granjeros afectados, 3 mdd para remoción de escombros, 3 mdd para pagar la ayuda técnica brindada por los especialistas de la USACE, 0.5 mdd para estudios técnicos de evaluación de riesgos en las otras presas de la región (isla de Kauai). Así, en total el incidente costó por lo menos 67 mdd.

Habiendo presentado estos casos, ahora se analizan para determinar las similitudes que tiene lo ocurrido en ellos, con las variables del modelo propuesto y sus valores asociados. Esto tiene la intención de validar la estructura de dicho modelo.

4.7 Análisis de los estudios previos

Al analizar las consecuencias de la falla de una presa, con base en los estudios presentados, es evidente que estas son de gran impacto para la sociedad, siendo las más lamentables las que incluyen la pérdida de vidas humanas. Al observar el resumen de los datos en la Tabla 4.10, se aprecia que en los primeros cien años de registro de estas fallas (1889-1989), se tiene un mayor número de decesos. Una posible causa es que en aquel entonces la carencia de medios, para difundir el peligro y alertar a los posibles afectados, era alta.

4. Análisis y Discusión de Resultados

No obstante, como resultó evidente, en algunos casos sí se tenían los medios para difundir la voz de alerta masiva, aunque se hacía caso omiso de las advertencias, lo cual finalmente desataba las tragedias. Esto se debió, principalmente, a la mala coordinación y planeación, o falta de planes de contingencia para emergencias, capaces de alertar y poner a salvo a las personas en riesgo.

Se puede ver que, aunque las presas no sean de gran altura (menores a 15 m), las consecuencias generadas por su eventual falla, también pueden ser devastadoras. De forma similar se observa que variables como: desbordamiento, mantenimiento, precipitación, tubificación, brecha y deslizamiento de taludes, son factores que propician, o que de alguna manera intervienen en las fallas. Estas variables fueron tomadas en cuenta en la construcción del modelo propuesto para el proyecto de investigación, lo que fortalece su estructura y demuestra su aplicabilidad a casos reales.

De la misma manera se aprecia que las variables: pérdidas de vidas humanas y costos económicos son consecuencias de las fallas. En este tenor de ideas, recordando el modelo de Red Bayesiana creado para la tesis (ver Figura 3.7), se reitera que las variables seleccionadas son adecuadas, y aunque los decesos no fueron cuantificados como “número de pérdidas humanas”, su proceso de cuantificación es aceptable y, mediante el uso de pesos (\$) (ver sección 3.4.2), permiten hacer comparaciones con otros estudios, lo cual es práctico para los objetivos de la investigación.

Los costos económicos registrados en las presas arriba citadas, van de los 2 mdd, es decir, \$ 28 millones de pesos (aproximadamente al 20 de Marzo de 2009), hasta los 102 mdd (\$ 1,428 millones de pesos, en el caso extremo de dos presas falladas en serie). También se observa que los costos totales obtenidos por el modelo son comparables con los ejemplos vistos (del orden de hasta \$149 millones de pesos, para el 95 percentil de una inundación de 1,500 mm/día –ver Tabla 4.5).

Lo mismo aplica para las otras variables, por ejemplo, uno de los cuatro expertos manifestó durante el taller, que en la liberación de agua de la presa José Antonio Alzate en 1998, los municipios de Ixtlahuaca y Atlacomulco resultaron afectados con inundaciones hasta de 1.2 m de altura. Entonces, si se considera que dicho evento se debió al vertido de los volúmenes excedentes de la presa por las intensas lluvias y no a la falla de ésta, con base en los ejemplos enunciados, los valores de inundación obtenidos en este proyecto (6.4 m por día en un evento extremo) parecen factibles.

En suma, aunque los casos de fallas presentados y las presas estudiadas en la investigación se encuentran en diferentes contextos, se puede argumentar que comparten aspectos que pueden servir como puntos de comparación. Esto permite validar tanto las variables, como los valores del modelo generados al suponer la eventual falla de una obra de esta naturaleza. Los puntos de comparación son:

- Las políticas de administración de riesgo y planes de contingencia para la evacuación masiva de los pobladores en peligro, que tanto en los casos descritos como en el Estado de México son poco divulgadas a la población (cuando existen),

4. Análisis y Discusión de Resultados

- Las variables que intervienen en las fallas de las presas: desbordamiento, mantenimiento, precipitación, tubificación, brecha y deslizamiento de taludes. como lo describen las estadísticas internacionales, son las causas más comunes en fallas de presas de tierra, y lo fueron en los casos estudiados,
- Los niveles de inundación provocada aguas abajo de las presas, cuyos valores registrados en los casos se asemejan a los especificados por los expertos de la entidad Mexiquense, y
- Los niveles de costos humanos y económicos, que son comparables en los casos prácticos y en los simulados.

Así, se cree firmemente que el modelo puede usarse para “predecir” los daños esperados por la eventual falla de alguna de las presas de interés.

4.8 Discusión

Como resultado del crecimiento poblacional, las tendencias del uso de suelo, la urbanización y diversas acciones inherentes a la vida del hombre moderno en sociedad, se provocan fenómenos sociales tales como devaluaciones, empobrecimiento y concentración de grandes masas de población. En paralelo, la naturaleza impone riesgos que pueden desembocar en tragedias cuando no se toman medidas contingentes. Dichos riesgos se generan por la existencia de fenómenos naturales, y que por si solos no son nocivos, pero que al ocurrir en zonas altamente pobladas, se convierten en catástrofes. Esto, cobra importancia cuando se comprende que las pérdidas ocasionadas por la falla de obras de infraestructura pueden convertirse en un factor de gran impacto para las naciones donde ocurren los eventos dañinos, ya que afectan directamente a su desarrollo y avance (La Red, 1993).

En el transcurso de este capítulo se ha confirmado que una falla puede traer consigo pérdidas de vidas humanas, además de sustanciales costos económicos, invertidos en la rectificación de los daños causados por dicha falla, y en el pago de distintas indemnizaciones (Ingles, 1984).

Durante las últimas décadas se han realizado investigaciones relacionadas con la cuantificación del riesgo y confiabilidad de las estructuras. Por lo que se ha recomendado tomar decisiones con base en el número de vidas humanas que potencialmente se podrían perder. De esta forma, siempre que una vida este en riesgo, es necesario tomar las acciones preventivas que correspondan para evitar los decesos al máximo.

El año 1985 fue un parteaguas en el diseño y construcción de estructuras en México. En efecto, a raíz de los sismos ocurridos en septiembre de aquel año, se introdujeron cambios significativos en reglamentos de construcción, elevándose considerablemente los requisitos de sismo-resistencia. Así, investigadores como Rosales y Bitrán (1996) argumentan que es necesario analizar los fenómenos que representan un riesgo latente para la sociedad, por ejemplo los eventos hidrometeorológicos, los cuales se relacionan directamente con las estructuras estudiadas.

Es preciso ser proactivos y no esperar a que desastres con magnitudes catastróficas, similares a los registrados en 1985, ocurran para revisar parámetros y criterios de diseño, construcción y mantenimiento en obras de infraestructura. Esto es cierto en particular para el caso de las presas, que cumplen funciones tan importantes como la contención de avenidas y protección contra inundaciones. Por ello, no se deben subestimar los impactos negativos que pudieran llegar a dañar a la sociedad, ya que las fallas en presas representan un gran riesgo para el desarrollo de un país. Así, es necesario que los gobiernos cuenten con planes de contingencia bien estructurados. Además, es importante contar con medidas no sólo de atención, sino también de mitigación y prevención de desastres.

Es importante enfatizar que el medio ambiente es también un factor relevante para que el hombre pueda vivir en la tierra. Desafortunadamente, los daños causados a este no se pueden medir fácilmente pues su cuantificación no ha sido estandarizada en la literatura. Pese a ello, algunas características se pueden cuantificar, pero no se han medido en este trabajo debido a la escasez de recursos (humanos, económicos y de tiempo) con los que se contó.

4.9 Conocimiento adquirido

Durante el desarrollo de la investigación, se presentaron diversas complicaciones y obstáculos que dificultaron la recolección y el análisis de los datos. Sin embargo, todos se pudieron sortear exitosamente. A pesar de ello, es preciso aclarar que si se tuviera la oportunidad de realizar una vez más el estudio, se tomarían en cuenta algunas recomendaciones para mejorar el desempeño del proyecto. Sobre la aplicabilidad de la metodología que se empleó, su implementación en la práctica depende de los tomadores de decisiones. Es decir, los pasos seguidos aquí pueden ser replicados en la práctica profesional de los administradores de presas, para generar modelos como el presentado, que les permitan soportar su toma de decisiones en materia de seguridad de presas.

Para ello, y con la intención de evitar los problemas encontrados aquí, a continuación se reportan algunas lecciones aprendidas en el proceso de investigación:

- Las variables a considerar en un estudio como el presentado, son un factor crítico de éxito, pues con base en ellas se generan las redes y correlaciones que describen un fenómeno. Por esta razón se recomienda que en trabajos futuros, se tenga el cuidado necesario y se investiguen, clasifiquen y seleccionen de manera minuciosa las variables, sin caer en el error de considerar demasiadas,
- De no tomarse en cuenta la última recomendación, se corre el riesgo de generar modelos engorrosos y saturados de variables, algunas de las cuales pueden no tener influencia importante en el comportamiento de las estructuras,
- Otro de los factores relevantes en la construcción del modelo, son las relaciones, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango, pues determinan la interacción de las variables. De no realizar un análisis detallado de su interrelación, se podrían omitir detalles o relaciones que establezcan el comportamiento de las variables, generando resultados erróneos. Al igual que en el caso de las variables,

un exceso o mala interpretación de estas correlaciones conllevan a un modelo mal elaborado, que en el peor de los casos tiene que ser reestructurado.

- En cuanto al tema de resultados, se cree que un factor decisivo en su obtención es la participación de “expertos”. En este tenor de ideas, tanto su elección como su calibración son temas que no deben ser tomados a la ligera. En primer lugar, cuando se selecciona a alguna persona, es necesario estar consciente que ésta ya tiene arraigada una ideología, construida con base en su experiencia. Por ende, sus opiniones y respuestas pueden ser contrastantes con las que se esperaban,
- Para la elección de las preguntas de calibración (descritas en el apartado 2.4), se debe tener en cuenta el área de especialización de cada experto para elegir las preguntas correctas. Con esto, se tiene la certeza de que se valora adecuadamente la opinión de cada uno de los peritos. De no seguir esta recomendación, se puede caer en el error de sobreestimar o subestimar las respuestas de alguno de ellos,
- En el proceso de investigación, llegó a ser evidente que existen una gran variedad de conocimientos por obtener. Por ello, es indispensable acotar los objetivos y definir los alcances desde un principio, para evitar perderse en un mar de información que conduce a ningún lugar, entorpeciendo dicho proceso,
- Se considera adecuado mencionar que durante el desarrollo del presente estudio, el autor notó que los avances recientes en el área son vastos, aunque en la entidad Mexiquense no se cuente con suficiente información ni desarrollo. De hecho, como se describirá en brevemente, existen un gran número de líneas de investigación que pudieran explorarse más adelante.

4.10 Recomendaciones

Todo proyecto tiene un inicio y un fin (Chamoun, 2002). Así, el presente documento ha llegado a su etapa final. Sin embargo, se cree que éste trabajo puede convertirse en un motor que permita generar y ampliar el conocimiento en cuanto a la comprensión de las consecuencias potenciales relativas a fallas en obras de infraestructura. En esencia, se espera que en el corto plazo se pueda tener la oportunidad de ampliar el modelo propuesto mediante la experiencia obtenida, el perfeccionamiento de los datos usados para generar las distribuciones de las variables, y la inclusión de variables que fueron omitidas (por ejemplo, agrietamiento).

Como ya se ha explicado, la evaluación de costos por fallas en obras de infraestructura de este tipo, no es sencillo. Sin embargo, a pesar de que el modelo desarrollado cuenta con ciertas limitaciones, se han propuesto una serie de pasos y técnicas que permiten una evaluación sistemática y simplificada de obras civiles, y que podrían ahorrar recursos tan valiosos como tiempo, personal y medios económicos en ejercicios de evaluación de riesgos. Por ello se recomienda ahondar en los temas aquí abordados, con la finalidad de perfeccionar en el futuro la metodología presentada.

Similarmente, se sugiere aplicar las ideas expuestas a presas con diferentes dimensiones, características, e incluso tipo de material de construcción. En general, se tiene la confianza de que este documento motivará estudios futuros en la materia, que permitan lograr que el

Estado de México y el país desarrollen tecnología propia para la evaluación de riesgos en obras de infraestructura.

Asimismo, se enfatiza la necesidad de emprender un proyecto estatal, con la finalidad de diagnosticar y estimar la vulnerabilidad tanto de las presas de tierra Mexiquenses, como de las personas que habitan su entorno. Es importante mencionar en este momento, que la inversión en la industria no termina con la construcción de las presas, sino que continúa durante su operación y a lo largo de su vida útil. Así, el monitoreo constante y la evaluación de riesgos, también deben formar parte las actividades sistemáticas realizadas como parte de su mantenimiento y conservación.

Se espera que las presentes recomendaciones sean de utilidad para los operadores y administradores de las presas bajo estudio, y otras similares ya sea dentro o fuera de la entidad. Asimismo, que sea la base para iniciar un estudio más a fondo de las presas en el estado de México que pudieran estar en un alto riesgo de falla.

4.11 Resumen

Para concluir con éste capítulo, se hace un breve recuento de su contenido. Primero, se realizó un resumen de las actividades que se han venido desarrollando a lo largo del trabajo y se mencionó que el objetivo central que se perseguía en este apartado era mostrar los resultados obtenidos con el modelo propuesto. Se presentaron formalmente los resultados del JEE, en el cual se retoman ideas de capítulos anteriores para poder verificar la validez de su utilización. Como es posible apreciar, la calibración de los expertos no fue muy alta, sin embargo, se tiene el nivel de significancia mínimo requerido para que sus opiniones puedan sean tomadas como verídicas.

En la tercera parte del capítulo, se muestran las distribuciones acumuladas de probabilidad para las variables de inundación, costos humanos y costos económicos, que se generaron, derivado del uso del JEE. Posteriormente, se describió el proceso de asignación del valor de la correlación entre las variables del modelo y se realizó el análisis de sensibilidad del mismo, en el que se presenta una serie de datos y gráficas, primero para una presa “tipo” y luego para la presa en estudio (José Antonio Alzate) y dos más (El Guarda e Ignacio Ramírez). También, se hizo una comparación y análisis con algunos reportes de fallas de presas a nivel mundial.

Finalmente, se presenta la discusión generada de los resultados obtenidos y se hace un breve recuento del conocimiento adquirido que deberá tenerse presente en trabajos futuros, mismos que se mencionan en la última parte del capítulo en forma de recomendaciones. En el siguiente apartado se presentan las conclusiones generales del estudio.

CONCLUSIONES

Conclusiones generales

Durante las últimas tres décadas, el interés por cuantificar la vulnerabilidad, el riesgo y la confiabilidad de las estructuras construidas por el hombre ha cobrado gran importancia. Las presas no son la excepción, ya que los daños potenciales provocados por la eventual falla de una de estas obras, tiene impactos significativos como pérdidas de vidas humanas, bienes materiales y naturales (Chinnarasri *et al*, 2004). Con base en estas ideas, nació la inquietud de realizar una investigación que contribuya a generar conocimiento en materia de evaluación de costos, en particular los provocados por fallas en presas de tierra. Así, derivado del estudio que se ha desarrollado enfocado a siete presas de tierra ubicadas en el Estado de México, cuya selección fue y fue justificada, se concluye lo siguiente.

- Mediante esta investigación, se reitera que las consecuencias que puede traer consigo el colapso de una presa, no son someras. De hecho, estudios previos en la República Mexicana (CNA, 2002), revelan que existen más de 2,000 presas que necesitan ser evaluadas a conciencia y en el menor tiempo posible, pues se corre el riesgo de que alguna, o varias de ellas, sean un peligro latente para las comunidades y los habitantes asentados aguas abajo. “*A mayor seguridad, mayor nivel de vida*” (Ramírez, 2002).
- Asimismo, se revela que actualmente, en la entidad mexiquense, no se cuenta con una política formal para la administración de riesgos en presas y planes de evacuación masiva de zonas en peligro. Esto llegó a ser evidente en la pasada temporada de lluvias (2008), cuando la falta de monitoreo y la inadecuada administración de algunas presas, como por ejemplo “Los Álamos”, ubicada al norte del estado, ocasionaron que estuviera al borde del colapso.
- Como parte de la etapa de recolección de datos, fue necesario recurrir al JEE, como se dijo, una herramienta que permite generar conocimiento cuando la información relevante es escasa o inexistente con base a las creencias de expertos en algún tema en específico. En el caso particular, desafortunadamente no se contó más que con cuatro, sin embargo la información brindada, fue suficiente e indispensable para realizar el análisis propuesto, pues la obtención de la información en campo era virtualmente imposible para los alcances de la tesis.
- También, se ha demostrado que el JEE en combinación con las RBCNPs, ofrecen una herramienta poderosa para cuantificar los costos originados por la falla de obras de infraestructura.
- Como se pudo ver en los resultados del modelo, el impacto de una falla de cualquiera de las presas bajo análisis es sensible a las variables: frecuencia sísmica, tubificación, precipitación, mantenimiento, deslizamiento e inundación (ver la matriz de correlaciones en la Tabla 4.3). Así, la inundación potencial en las zonas

Conclusiones y Recomendaciones

de afectación de cualquiera de las presas, va de 299.35 mm/día hasta 6,403.20 mm/día, en un caso extremo.

- Siguiendo con el análisis, el costo total por la falla de cualquiera de las presas analizadas se encuentra en un rango entre \$32'125,000.00 en el caso del percentil 50, y hasta \$137'990,000.00 dado un caso extremo.
- De esta manera, se puede ver que, la presa San Joaquín es la que más costos totales generaría: \$34'524,000.00 para el percentil 50, y hasta \$145'810,000.00 en un evento extremo.
- Otra de las presas bajo estudio (José Antonio Alzate), presentó costos totales de falla del orden de \$33'915,000.00 para el percentil 50, y de hasta \$143'560,000.00 para un caso extraordinario (ver Tabla 4.10).
- A pesar de que el alcance del trabajo presentado sólo permitió el estudio de siete presas en la entidad Mexiquense, se concluye que la metodología descrita aquí es aplicable a otras estructuras similares, y a obras de infraestructura en general, lo que quedó demostrado con base en los resultados de las comparaciones con otros estudios (sección 4.7).
- De esta manera, y con base en los resultados obtenidos, se ha probado la hipótesis planteada al inicio del trabajo. Es decir, al tener un análisis cuantitativo y cualitativo de los riesgos que impone una presa a las zonas aledañas y sus habitantes, se puede promover una mejor administración de recursos destinados a mantener e incrementar su seguridad, no sólo durante las etapas de diseño y construcción, sino también durante la operación. Esto, a través del desarrollo de medidas de mitigación y planes de contingencia, que garanticen la integridad de las comunidades vecinas.
- Asimismo, el autor considera indispensable que la evaluación de los costos provocados por el colapso de una obra de esta naturaleza, sea normalizado o reglamentado, primero en la entidad y luego en el país.
- Se cree firmemente que estas reflexiones motivarán un proceso de concientización que permitirá otorgarle al tema la importancia que merece, con el único afán de ampliar el conocimiento que se tiene, y de mantener a salvo no solo las estructuras construidas sino también las vidas humanas e infraestructura existentes a su alrededor.
- Finalmente, se puede afirmar que los objetivos establecidos al principio de la investigación se han alcanzado. Así, se espera que esta tesis sea útil para los operadores, administradores, dueños y profesionistas interesados en la seguridad de presas, y que busquen ampliar y modernizar las herramientas empleadas en la evaluación de riesgos de estas importantes estructuras.

Habiendo realizado el proyecto, el autor amplió sus conocimientos en materia de seguridad de presas. También se conocieron técnicas poderosas con posibilidad de aplicación bastante extensa. Durante el proceso de investigación llegó a ser evidente que la literatura en la materia es vasta, y actualmente es necesario mantenerse en constante retroalimentación si se quiere estar en la posibilidad de aportar conocimiento a la ciencia, por lo que definitivamente el trabajo no termina aquí.

Otra que el autor ha reflexionado, es que el conocimiento no es propio ni particular, la ciencia esta construida gracias a los esfuerzos de un gran número de personas, por tal motivo el empleo de técnicas como el JEE se vuelve relevante, pues si bien los expertos se encuentran en áreas o dependencias donde emplean sus conocimientos, es importante que se pueda disponer de estos juicios, y tener un registro con bases científicas, lo que permitirá utilizarlo y conservarlo. Por ultimo, es importante señalar las limitaciones del estudio y como se han podido superar.

Limitaciones

Como se ha descrito a lo largo de la tesis, el trabajo que se expone tiene la intención de convertirse en una herramienta útil para los tomadores de decisiones, y en particular para las personas que estén involucradas en la seguridad de estructuras tan importantes como son las presas. Sin embargo, existen limitaciones que de alguna manera influyen en el desarrollo de la investigación, así como en los resultados obtenidos. Para el caso particular, se describe cada una, junto con la forma en la que se vieron sorteadas.

- El proyecto se basa únicamente en el estudio de siete presas localizadas en el Estado de México. Esto es, partiendo de la clasificación hecha para la selección de las estructuras a estudiar, se optó por elegir las más cercanas –en términos relativos- a la UAEMEX. Lo anterior permitió que se consiguiera realizar una serie de visitas a cada una. Sin embargo, esto no significa que los resultados obtenidos no sean validos, pues con base en los resultados de comparación con otros estudios, se ha mostrado que la metodología empleada es aplicable a la evaluación de los costos de interés.
- La información disponible para el desarrollo del estudio fue inconclusa y en algunos casos inexistente. Por desgracia dentro de la entidad, el tema de investigación, no ha sido desarrollado ampliamente, lo cual se refleja en la falta de información o escasez de la misma. Así, el uso del JEE se convirtió en una herramienta fundamental para el desarrollo del proyecto, permitiendo generar conocimiento sobre la materia en la zona de estudio.
- En este caso, la mayor dificultad que se presentó fue la localización de personas con un amplio conocimiento del tema. Aunado a esta restricción, la coordinación entre los peritos en el tema también se convirtió en un obstáculo a salvar. No obstante, la organización del llamado “Taller de Expertos”, logró que el autor tuviera un acercamiento e interactuara con dichos peritos, para obtener la información requerida de cada uno.

Conclusiones y Recomendaciones

- Otra característica del modelo que pudiera verse en determinado momento como desventaja, es que la unidad que se utilizó para evaluar los costos, fue el peso actual (\$), y el estudio pudiera perder relevancia en determinado momento. Sin embargo, esta desventaja se puede superar actualizando los valores, utilizando la tasa de inflación anual que se presente, o variables económicas como la relación peso dólar.

A pesar de haber superado las limitaciones, el estudio presentado se debe entender como un trabajo seminal y no concluyente, el cual tiene la intención de promover y/o ampliar el conocimiento en cuanto a seguridad de presas de tierra en el Estado de México.

REFERENCIAS

1. AC, (2005), Acuerdo Nacional para la Unidad, el Estado de Derecho, el Desarrollo, la Inversión y el Empleo, Acuerdo de Chapultepec, México, disponible en: <<http://www.acuerdodechapultepec.org.mx>>
2. Aguirre B.E., (2004), The 1999 Floods in Veracruz and the Paradigm of Vulnerability, Preliminary Paper #341, Disaster Research Center, University of Delaware, Newark, Delaware, US
3. Aparicio, F., (1994), Fundamentos de Hidrología de Superficie, Limusa, México
4. Arreguín, F., (2002), Inauguración, Seminario de Seguridad de Presas, Comisión Nacional del Agua, México D.F., Sep 5-6
5. ASDSO, (2007) Association of State Dam Safety Officials, An Incomplete History of Dam Failures and Near Failures in the US, USA, Sep
6. Azqueta, D., (1994), Valoración Económica de la Calidad Ambiental, Mc Graw Hill, España
7. Baró, S.J.E., Díaz, D.C., Esteller, A.M.V., y Calderón, G., (2007a), Curvas de Daños Económicos Provocados por Inundaciones en Zonas Habitacionales y Agropecuarias de México, Parte I: Propuesta Metodológica, Ingeniería Hidráulica en México, Vol. 22 No. 1, pp. 91-102
8. Baró, S.J.E., Díaz, D.C., Esteller, A.M.V., y Calderón, G., (2007b), Curvas de Daños Económicos Provocados por Inundaciones en Zonas Habitacionales y Agropecuarias de México, Parte II: Caso de Estudio en la Cuenca Alta del Río Lerma, México, Vol. 22 No. 3, pp. 71-85
9. Bayes, T., (1763), An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 53 No. 370, pp. 370-418
10. Bitrán B.D., Acosta C.L., Eslava M.H., Gutierrez M.C., Salas S.M.A., Vázquez C.M.T., (2002), Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2001, Sistema Nacional de Protección Civil-Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México
11. Borja, N.G., (2006), Los 109 Proyectos Estratégicos de Infraestructura, Memorias del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros Civiles de México, 1-3 Marzo, México, D.F.
12. Bremer, M.H. y Lara C.A. (2001), Proyecto de Atlas de Riesgo de Inundación de la Ciudad de Monterrey, Reporte ITESM, Campus Monterrey, México

13. Brown, A.J., and Aspinall, W.G., (2004), Use of Expert Opinion Elicitation to Quantify the Internal Erosion Process in Dams, Presented at the 13th British Dams Society (BDS) Conference, University of Kent, Canterbury, UK, June 22-26
14. BS, (1996), Guide to Occupational Health and Safety Management Systems”, British Standard Institutions (BSI), UK
15. Canto, J.T. y Alamilla, J.L., (2000), Análisis de Confiabilidad de Estructuras de Varios Grados de Libertad, Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, Nov 1-4
16. CENECAM, (1999), Lluvias Intensas, Protección Civil en Funciones. Revista del CENECAM (Centro Estatal de Emergencias de Campeche), México, Vol. 2 No. 8, pp. 25
17. Chamoun, Y., (2002), Administración Profesional de Proyectos: La Guía, IAN Editores, México
18. Chinnarasri, C., Jirakitlerd S., and Wongwises, S., (2004), Embankment Dam Breach and its Outflow Characteristics, Civil Engineering and Environmental Systems, Vol. 21 No. 4, pp. 247-264
19. Clemen, R.T., and Reilly, T., (1999), Correlations and Copulas for Decision and Risk Analysis, Manage Science, Vol. 45 No. 2, pp. 208–224
20. Clemen, R.T., Fischer, G.W. and Winkler R.L., (2000), Assessing Dependencies: Some Experimental Results, Manage Science, Vol. 46 No. 8 pp. 1100–1115
21. CONAGUA, (1993), Presas de México, Volumen 5, Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, CONAGUA-SARH, México
22. CONAGUA, (1999), Importancia de la Seguridad de Presas, Manual para la Capacitación en Seguridad de Presas, Comisión Nacional del Agua, México
23. CGM, (2004), Proceso Evaluación del Principio de Valoración de Costos Ambientales, Instructivo Metodológico, Colombia
24. Cooke, R.M., (1991), Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science, Oxford University Press
25. Cooke, R.M., y Goznes, L.H.J., (2008), TU Delft Expert Judgment Data Base, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 93 No.5, pp. 657-674
26. Delgado H.D.J., y De León E.D., (2007), Hacia la Administración del Riesgo Sísmico en Obras de Infraestructura, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Gro., México, Nov 1-4

27. Díaz, D.C., Bã, K.M., Esteller, M.V., y García, A.J.A., (1998), Sistema de Información Geográfica para el Análisis Geográfico-Hidrológico del Curso Alto del Río Lerma, SIGCARL, disponible en: <<http://cira.uaemex.mx>>
28. Fienberg, S.E., (2006), When Did Bayesian Inference Become “Bayesian”?, *Bayesian Analysis*, Vol. 1 No. 1, pp. 1-40
29. Foster, M., Fell, R., and Spannagle, M., (2000), The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37 No. 5, pp. 1000-1024
30. GV2025, (2003), Autodeterminación en Infraestructura, *Ingeniería Civil*, Vol. 53, No. 414, pp. 4-10
31. Hanea, A.M., (2008), Algorithms for Non-Parametric Bayesian Belief Nets, Master of Science in Applied Mathematics, PhD Thesis, Technological University of Delft, The Netherlands
32. Hanea, A., Kurowicka, D., and Cooke, R.M., (2006), Hybrid Method for Quantifying and Analyzing Bayesian Belief Nets, *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 22 No. 6, pp 709-729
33. Hanson, G., Irwin, B., Temple, D., Graham, W., Pearre, C., Fiegle, E., Hamptom, T., Fleming, G., (2001), Issues, Resolutions and Research Needs Related to Embankment Dam Failure Analysis, *Proceedings FEMA Workshop US*, Department of Agriculture, Oklahoma Ok, Jun 26-28
34. Hernández, M. S, (2007), Los nuevos Materiales en Arquitectura y Construcción de Edificios en México, *Materiales Avanzados*, Vol. 4, No. 8, pp. 37-41
35. Hernández, S.R., Fernández, C.C. y Baptista, L.P., (2008), *Metodología de la Investigación*. ed. Mc Graw Hill, México.
36. ICOLD, (1975), *Lessons from Dam Incidents*, United States Committee on Large Dams, American Society of Civil Engineers, New York, US
37. INEGI, (2000), *Sistema para la Consulta de Información Censal 2000 en CD*, SCINCE, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México
38. INEGI, (2008), *Esperanza de Vida en México*, Disponible en: <<http://cuentame.inegi.gob.mx/poblacion/esperanza>>
39. Ingles, O.G., (1984), A short study of dam failures in Australia: 1857-1983. *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 1 No. 4, pp. 190-194

40. Jacinto, R.C., (2003), Work Accidents Investigation Technique, PhD Thesis, The University of Birmingham, UK
41. Juárez, E., y Rico, A., (1995), Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Tomo I, Limusa, México
42. La Red, (1993), Editorial, Revista Semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en America Latina, Vol. 1, No. 1, Jul-Dic
43. Marengo, M.H., (2002), Consideraciones de Riesgo de Falla en Presas Mexicanas, Seminario de Seguridad de Presas, Comisión Nacional del Agua, México D.F., Sep 5-6
44. Marengo, M.H., (1994), La Seguridad de Presas no debe Ignorarse, Revista de Ingeniería Civil, No.307, pp. 13-15, México
45. Merritt, F.S., Kent Loftin, M. and Ricketts, J.T., (1999), Manual del Ingeniero Civil, Mc Graw Hill, México
46. Morales, N.O., y Cooke, R., (2008), Introducción al Modelo Clásico de Juicio Estructurado de Expertos: Breve Recuento del Pasado y una Aplicación Reciente, Working Paper TU-Delft (próximo a publicarse en el número Nov 09-Feb 10 de *ciencia ergo sum*, Universidad Autónoma del Estado de México
47. Morales, N.O., Kurowicka, D., Cooke, R.M., and Baren, G.B., (2008a), Expert Elicitation Methods of Rank and Conditional Rank Correlations: An Example with Human Reliability Models in the Aviation Industry, Working Paper, Delft Institute of Applied Mathematics, TU Delft, (En revision)
48. Morales O., Kurowicka D., and Roelen A., (2008b), Eliciting Conditional and Unconditional Rank Correlations from Conditional Probabilities, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93 No. 5, pp. 699-710
49. Munich Re Group, (2004), Annual Review: Natural Catastrophes 2004, disponible en: <munichre.com>
50. Netica, (2008), Bayesian Network Software from Norsys, disponible en: <<http://www.norsys.com/download.html>>
51. Pearce, D. W. y Turner, R. K., (1990). Economics of Natural Resources and the Environment, Harvester, London, UK
52. Pearl, J., (1988), Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems, Morgan Kaufmann, San Francisco California, US
53. PEMEX, (2009), Concluye PEMEX Primera Etapa de Proyecto de Remediación Ambiental de 1700 ha. en Texistepec, Veracruz, Boletín 037, Mex

54. RAE, (2008), Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, disponible en: <<http://www.rae.es>>
55. Ramírez, R.E. (2002), Fin de la Vida Útil de las Presas y su Seguridad, Seminario de Seguridad de Presas, Comisión Nacional del Agua, México D.F., Sep 5-6
56. Renn, O., (1998), The Role of Risk Perception for Risk Management, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 59 No. 1, pp. 49-62
57. Rosales A. V. y Bitrán B. D., (1997), Lecciones Aprendidas en América Latina de Mitigación de Desastres en Instalaciones de Salud: Aspectos de Costo-Efectividad, Organización Panamericana de la Salud, Washington, D.C., USA
58. Schumpeter, J., (1934), Historia del Análisis Económico, Editorial Ariel, España
59. SEMARNAT, (2007), Estadísticas del Agua en México, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México
60. SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México
61. Stahl, B., (1986), Reliability Engineering and Risk Analysis, Chapter 5 in Planning and Design of Fixed Offshore Platforms, edited by McClelland, C. and Reifel, M.D., Van Nostrand Reinhold CO, NY, US
62. Swaney, J.A. and Olson, P.I., (1992), The Economics of Biodiversity: Lives and Lifestyles, Journal of Economic Issues, Vol. 26, No. 1, pp. 1-25
63. UAEMEX, (2006), Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Disponible en: <<http://www.uaemex.mx>>
64. UNAUSA, (1997), Acts of Nature, Acts of Man, Policy Studies Panel on Internacional Disaster Relief, The Global Response to Natural Disasters, United Nations Association of the United States of America, US
65. USACE, (1998), HEC RAS: User's manual, Version 2.1., US Army Corps of Engineers-Hidrologic Engineering Center, US
66. Vega, R.O., (2002a), Algunas Consideraciones Sobre los Aspectos de Seguridad de las Presas Considerados en el Diseño, Seminario de Seguridad de Presas, Comisión Nacional del Agua, México D.F., Sep 5-6
67. Vega, A.O., (2002b) La Comisión Internacional y la Seguridad de Presas (ICOLD and Dam Safety), Seminario de Seguridad de Presas, Comisión Nacional del Agua, México D.F., Sep 5-6

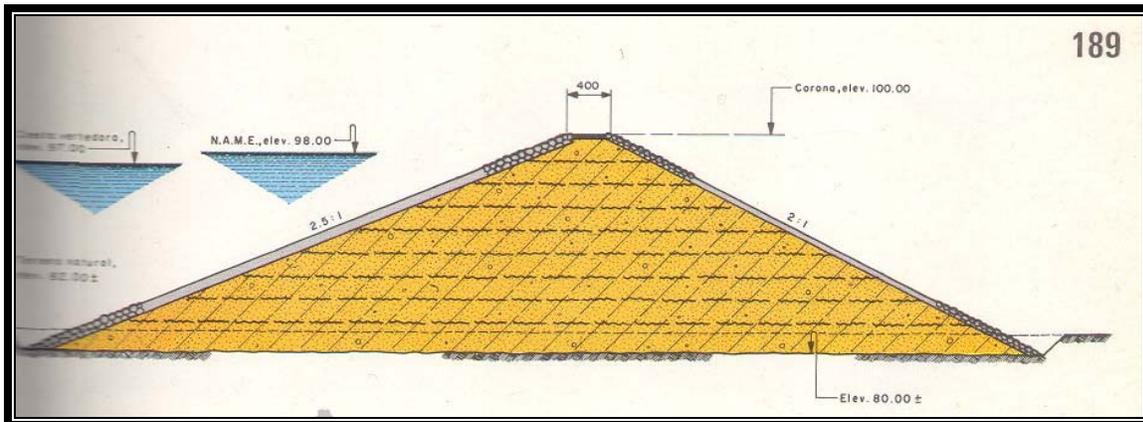
68. Venegas, J., (1994), Metodologías de Evaluación de Costos de Falla en Sistemas Eléctricos, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería, Pontifica Universidad Católica de Chile, Chile
69. Zarate, R.L., (2006), Discurso de Inauguración, Memorias del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros Civiles de México, México D.F. Mar 1-3

BIBLIOGRAFÍA

1. Faber, H.M., (2008), Maintenance Optimization Using Bayesian Probabilistic Nets, Cátedra Nacional CUMEX, UAEMex, Toluca, México
2. Kates, R.W., (1965), Industrial Flood Losses, Damage Estimation in the Lehing Valley, Department of Geography, Research paper, No. 98 Vol. 6, pp. 621-656
3. Laplace, P.S., (1774), Mémoire sur la Probabilité des Causes par les Evenements, Mémoires de Mathématique et de Physique Presentés á l'Académie Royale des Sciences, Par Diverse Savans, & Lus Dans ses Assemblées, Vol. 6, pp. 621-656
4. Savage, L.J., (1951), The Theory of Statistical Decision, Journal of the American Statistical Association, Vol. 46 No. 55-67, pp. 201-213
5. Wolpert, R., (2008), What is Bayesian Analysis?, International Society of Bayesian Analysis, disponible en: <<http://www.bayesian.org/bayesexp/bayesexp.html>>

A N E X O S

PRESA EMBAJOMUY



Corriente: Cristo
 Estado: México
 Año de terminación: 1942
 Constructor: S.R.H
 Propósito: Irrigación

Presas

Tipo: Tierra
 Altura: 20 m
 Longitud de corona: 225 m
 Volumen: 52000 m³
 Factor de Seguridad: 1,75

Vaso

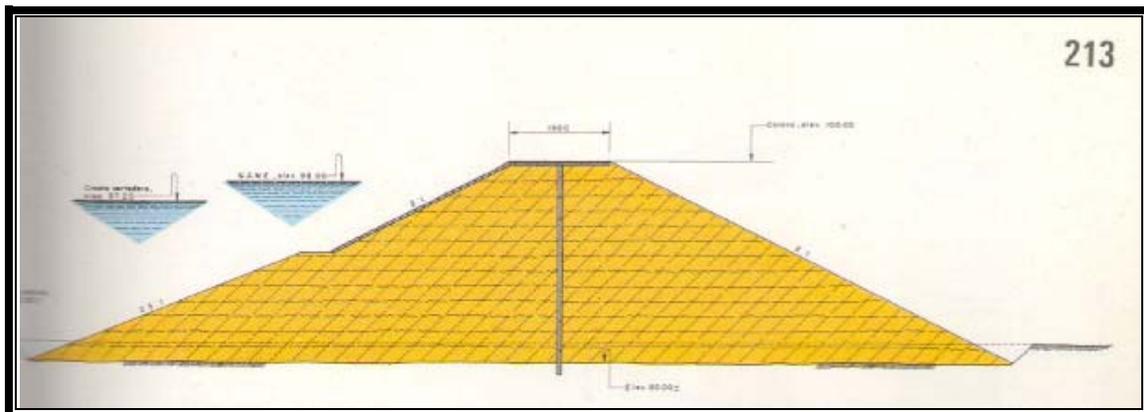
Capacidad de Azolves: 0.3 hm³
 Capacidad Útil: 1.1 hm³
 Superalmacenamiento: 0.1 hm³
 Capacidad Total: 1.5 hm³

Vertedor:

Tipo: L
 Carga Máxima: 1.0 m
 Longitud de Cresta: 30 m
 Capacidad: 60 m³/s

Fuente: SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México

PRESA SAN JOAQUÍN



Corriente: San Joaquin
 Estado: México
 Año de terminación: 1944
 Constructor: S.R.H
 Propósito: comercio

Presa

Tipo: Tierra
 Altura: 20 m
 Longitud de corona: 200 m
 Volumen: 140000 m³
 Factor de Seguridad: 1,31

Vaso

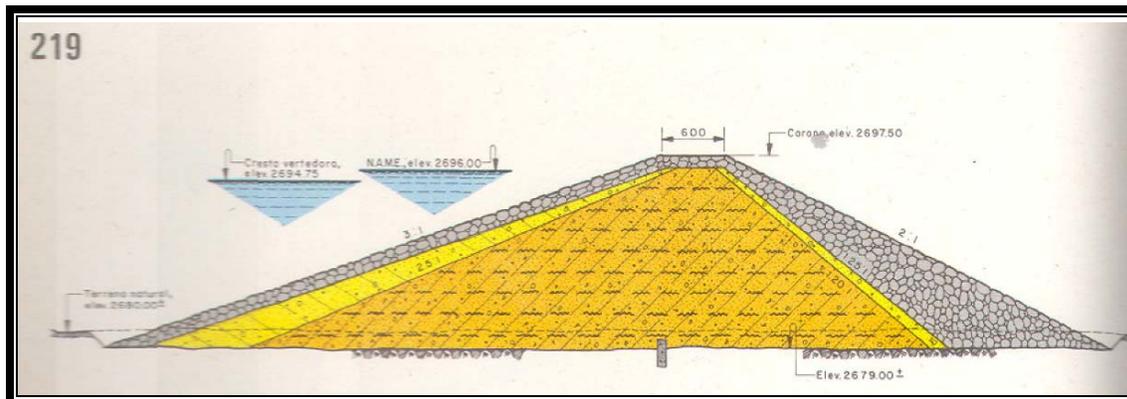
Capacidad de Azolves: 0.2 hm³
 Capacidad Util: 0.5 hm³
 Superalmacenamiento: 0.3 hm³
 Capacidad Total: 1.0 hm³

Vertedor:

Tipo: L
 Carga Máxima: 0.80 m
 Longitud de Cresta: 18 m
 Capacidad: 25 m³/s

Fuente: SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México

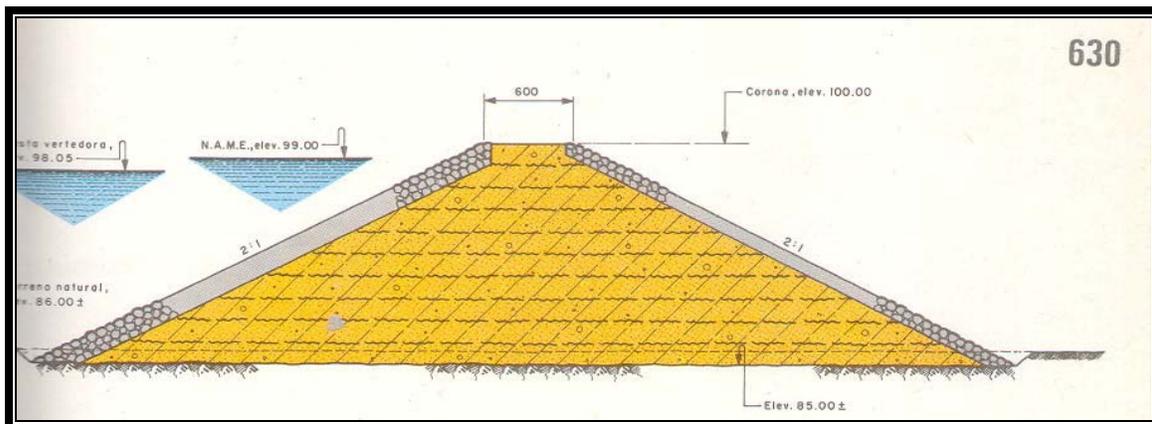
PRESA JOSÉ TRINIDAD FABELA



Corriente:	Del Salto	Vaso	
Estado:	México	Capacidad de Azolves:	0.6 hm ³
Año de terminación:	1945	Capacidad Útil:	5.9 hm ³
Constructor:	S.R.H	Superalmacenamiento:	3.5 hm ³
Propósito:	Irrigación	Capacidad Total:	10.0 hm ³
Área Cuenca:	81.2 Km ²		
Presa			
Tipo:	Tierra	Vertedor:	
Altura:	19 m	Tipo:	L
Longitud de corona:	320 m	Carga Máxima:	1.25 m
Volumen:	104000 m ³	Longitud de Cresta:	30 m
Factor de Seguridad	1,37	Capacidad:	125 m ³ /s

Fuente: SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México

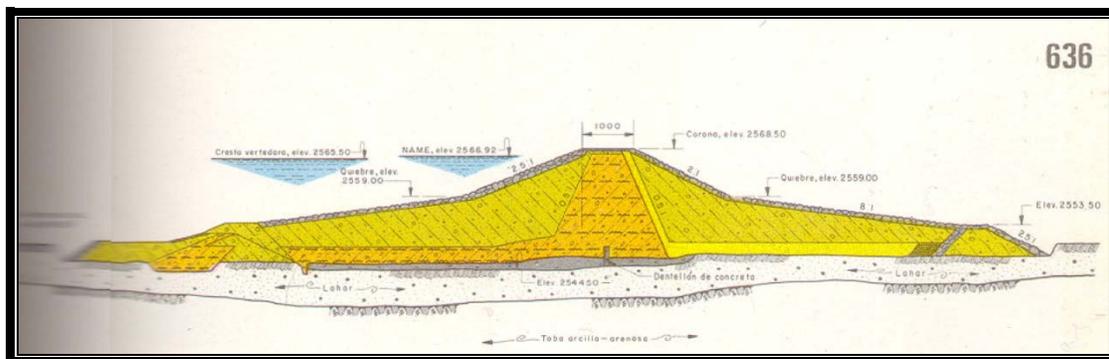
PRESA DOLORES



Corriente:	La Gavia	Vaso
Estado:	México	Capacidad de Azolves: 0.1 hm ³
Año de terminación:	1962	Capacidad Útil: 3.24 hm ³
Constructor:	S.R.H	Superalmacenamiento: 0.16 hm ³
Propósito:	Irrigación	Capacidad Total: 3.5 hm ³
Presa		
Tipo:	tierra	Vertedor:
Altura:	15 m	Tipo: L
Longitud de corona:	322 m	Carga Máxima: 0.95 m
Volumen:	108000 m ³	Longitud de Cresta: 35 m
Factor de Seguridad	1,85	Capacidad: 65 m ³ /s

Fuente: SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México

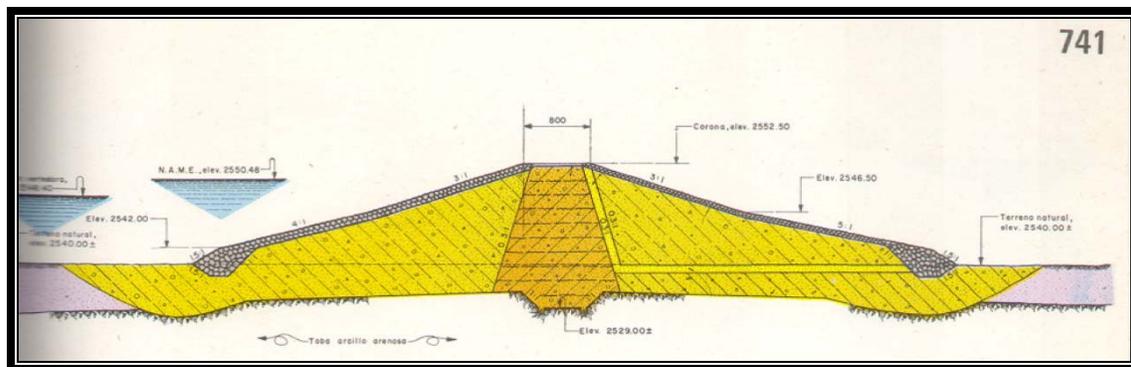
PRESA JOSÉ ANTONIO ALZATE (SAN BERNABÉ)



Corriente:	Lerma	Vaso
Estado:	México	Capacidad de Azolves 8.0 hm ³
Año de terminación:	1962	Capacidad Útil: 27.3 hm ³
Constructor:	S.R.H	Superalmacenamiento: 17.2 hm ³
Propósito:	Irrigación. generación eléctrica	Capacidad Total: 52.5 hm ³
Cuenca		
Área:	2100 Km ²	
Gasto Máximo registrado.	92 m ³ /s	
Escurrencimiento medio anual.	190.4 hm ³	
Gasto máximo probable.	800 m ³ /s	
Presa		
Tipo:	Tierra.	Vertedor:
Altura:	24 m	Tipo: L
Longitud de corona:	282 m	Carga Máxima: 1.42 m
Volumen:	168000 m ³	Longitud de Cresta: 75 m
Factor de Seguridad	1,95	Capacidad: 254 m ³ /s

Fuente: SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México

PRESA IGNACIO RAMÍREZ (LA GAVIA)



Corriente:	La Gavia	Vaso	
Estado:	México	Capacidad de Azolves:	3.0 hm ³
Año de terminación:	1965	Capacidad Útil:	17.5 hm ³
Constructor:	S.R.H	Superalmacenamiento:	15.8 hm ³
Propósito:	Irrigación.	Capacidad Total:	36.3 hm ³

Cuenca

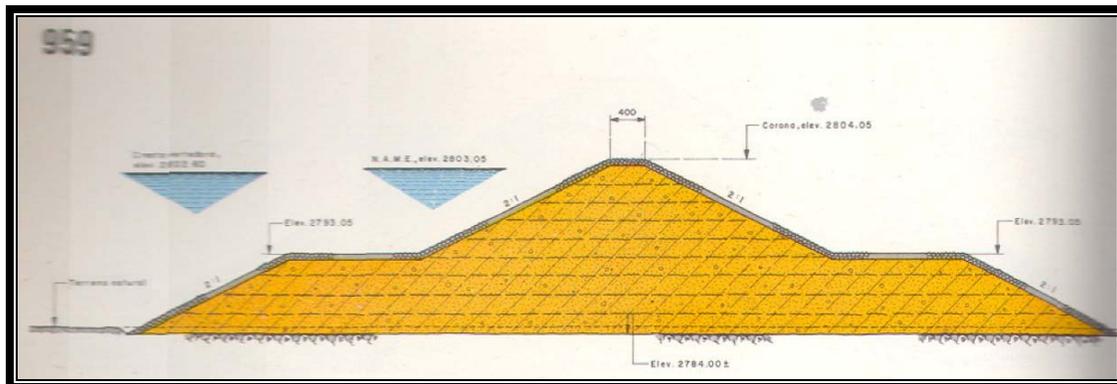
Área:	550 Km ²
Gasto Máximo registrado.	63 m ³ /s
Escorrentamiento medio anual.	74.0 hm ³
Gasto máximo probable.	500 m ³ /s

Presa

Tipo:	Tierra.	Vertedor:	
Altura:	24 m	Tipo:	L
Longitud de corona:	480 m	Carga Máxima:	2.08 m
Volumen:	225000 m ³	Longitud de Cresta:	13 m
Factor de Seguridad	1,36	Capacidad:	65 m ³ /s

Fuente: SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hídricos, México

PRESA EL GUARDA



Corriente:	Puentezuela	Vaso
Estado:	México	Capacidad de Azolves: 0.02 hm ³
Año de terminación:	1972	Capacidad Útil: 0.48 hm ³
Constructor:	S.R.H	Superalmacenamiento: 0.05 hm ³
Propósito:	Irrigación	Capacidad Total: 0.55 hm ³
Cuenca		
Área:	3 Km ²	
Escorrimento medio anual.	0.5 hm ³	
Gasto máximo probable.	31 m ³ /s	
Presa		
Tipo:	Tierra.	Vertedor:
Altura:	20 m	Tipo: L
Longitud de corona:	255 m	Carga Máxima: 0.45 m
Volumen:	140000 m ³	Longitud de Cresta: 50 m
Factor de Seguridad	1,92	Capacidad: 30 m ³ /s

Fuente: SRH, (1976), Presas Construidas en México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México

Consulta estructurada de expertos para la cuantificación de riesgos en presas de tierra en el Estado de México.



Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México

UAEM-TU  Delft

Delft Institute of Applied Mathematics

Julio 2008

ÍNDICE.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INTRODUCCIÓN.	98
El modelo.	98
Variables de interés y de calibración.	100
Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango.	102
VARIABLES DE INTERÉS.	103
CORRELACIONES DE RANGO Y CORRELACIONES CONDICIONALES DE RANGO.	105

Introducción.

Gracias por su participación en este ejercicio de juicios estructurados de expertos. El presente cuestionario tiene como objetivo la cuantificación de riesgos en presas de tierra en el estado de México. Como el nombre del proyecto lo indica, se pretende describir cuantitativamente estos riesgos y para ello se empleará el modelo de redes Bayesianas continuas. Las presas de interés en este modelo son: Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela, Guarda, Dolores, José Antonio Alzate e Ignacio Ramírez.

Un conjunto exhaustivo de datos que nos permitan extraer la información completa requerida para la cuantificación del modelo no está disponible. Por esta razón se solicita su cooperación, así como la de otros expertos en la materia para la cuantificación del modelo. Para lograr una mayor validez del modelo de riesgos, las opiniones de los expertos serán extraídas y analizadas de manera estructurada. En concreto, el *modelo clásico de consulta de expertos* será usado para combinar las opiniones de los expertos participantes. Este ha sido utilizado en un número importante de aplicaciones anteriormente alrededor del mundo. En México ha sido empleado para cuantificar los efectos de la contaminación del aire (partículas menores a 2.5 micrómetros en diámetro aerodinámico) en la salud. En este proyecto se esperan lograr resultados tan exitosos como los que se han alcanzado en el pasado.

El modelo.

La figura 1 representa el modelo de riesgos de presas de tierra tal y como será cuantificado en este proyecto. Se trata de una representación simplificada de las posibles causas y consecuencias de fallos en cualquiera de las siete presas descritas anteriormente. La estructura del modelo no está bajo discusión en este ejercicio y debe ser considerado tal y como se encuentra actualmente. Una breve definición de las variables que entrarán en el modelo se presenta en la tabla 1.

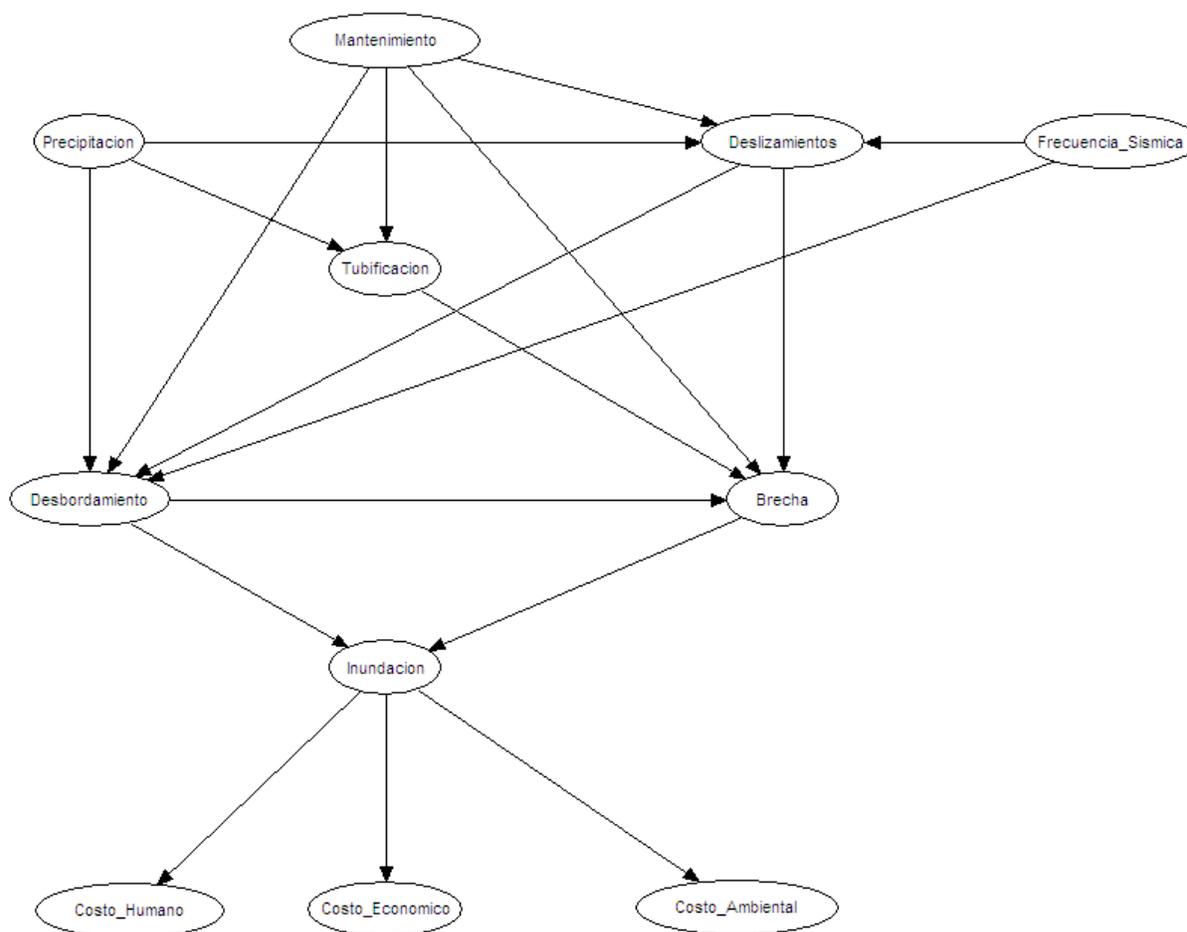


Figura 1. Red Bayesiana representando el Modelo de riesgos en presas de tierra del Estado de México

Nombre de la Variable	Descripción	Unidades
Precipitación	Se obtiene el área de influencia para cada cuenca de interés (7 en este caso). Se identifican las estaciones climatológicas que la afectan y de sus registros se obtienen datos diarios de lluvia por medio del programa ERIC (1961-1998 con valores faltantes dependiendo de la estación de medición). Se calcula el promedio diario para cada cuenca a través de sus estaciones. Con dicho promedio se obtiene un promedio móvil por cuenca y finalmente se obtiene un promedio de estos promedios móviles a lo largo de las 7 cuencas. La distribución final muestra los datos de este último promedio de lluvias.	mm/día
Frecuencia sísmica	Es una distribución del número de eventos con frecuencia ≥ 5.5 grados en escala de Richter de 2000 a 2008. Los datos son obtenidos del sistema sismológico nacional.	(# sismos ≥ 5.5)/año
Deslizamiento de taludes en la cortina	Es la distribución de los Factores de Seguridad (Mom_resist/Mom_mot) que tiene cada presa, con base en su geometría de diseño y mediante la aplicación del método Sueco.	Adimensional
Mantenimiento	Es el número de años transcurridos entre mantenimientos que llevan a la obra al estado original	# de años entre mantenimientos
Tubificación	Gasto de la presa que se filtra a través de la cortina y/o cimentación, sin considerar el agua que fluye a través de la obra de toma y/o de la obra de excedencias	l/seg
Desbordamiento	Tirante medido a partir de la cresta durante un evento en el cual el nivel del agua almacenada supera la altura total de la cortina	mm
Brecha	Longitud del ancho de brecha promedio, es decir, ancho de brecha superior y ancho de brecha inferior, presentada debida a la erosión la corona de la cortina	m

Nombre de la Variable	Descripción	Unidades
Inundación	Nivel de la lámina de agua promedio por día, en el área inundada aguas abajo de la presa, en el evento de una falla	mm/día
Costo Humano	Son los costos públicos y privados totales, para un periodo de tiempo igual a la máxima esperanza de vida restante, por todos los posibles daños y pérdidas en: salud y vidas humanas, ocasionados por la inundación debida a la falla de una presa, medidos en pesos (\$) actuales	\$
Costo Económico	Son los costos públicos y privados totales, en pesos (\$) actuales, por todos los posibles daños y pérdidas en: infraestructura (escuelas hospitales, puentes, vías de comunicación, medios de transporte), campos de producción alimenticia (cultivos, granjas), centrales de abasto y comercio, vivienda, centros de recreación, etc., ocasionados por la inundación debida a la falla de una presa	\$
Costo Ambiental	Esta variable no se estudia con detalle en el proyecto, aunque se sabe que existe y que debe tomarse en cuenta	\$

Figura 2. Definición de las variables de interés

En este proyecto se intentará obtener dos tipos de información: el primero esta relacionado con la distribución de ciertas variables de la figura 1, para la que no se tienen datos disponibles actualmente. La segunda se refiere a la manera en que éstas variables se relacionan de manera probabilística unas con otras. Para lograr estos objetivos, de acuerdo al modelo clásico, se preguntarán *variables de calibración* adicionalmente a las variables de interés.

Las variables de calibración serán utilizadas para formar combinaciones de las opiniones individuales de los expertos participantes. Estas combinaciones son, más concretamente, promedios ponderados cuyos pesos específicos son obtenidos a partir del desempeño de los expertos en las variables de calibración. A continuación se describe con detalle el tipo de preguntas que serán empleadas en este cuestionario.

VARIABLES DE INTERÉS Y DE CALIBRACIÓN.

El juicio estructurado de expertos se emplea en problemas en los que existe experiencia científica pero existe incertidumbre en cuanto al valor verdadero de ciertos parámetros que los describen. Esta incertidumbre puede encontrar su origen en la imposibilidad de llevar a cabo cierto tipo de experimentos, por ejemplo en estudios relacionados a la toxicidad de sustancias en humanos, o en la falta de disponibilidad de recursos (económicos, humanos, de tiempo) para llevar a cabo las mediciones correspondientes.

Estos parámetros desconocidos son los que se preguntarán a los expertos participantes, no en la forma de un estimador puntual, sino en la forma del percentil 5, 50 y 95 de la distribución de probabilidad que describe la incertidumbre de cada experto individualmente respecto al parámetro de interés. Un ejemplo del tipo de preguntas que se usaran en este ejercicio se presenta a continuación:

Ejemplo	Tasa promedio de precipitación (mm/día)	
<p>Considere observaciones de tasa de precipitación diarias en cualquiera de las 5 estaciones de medición de lluvia relacionadas con Villahermosa Tabasco, desde enero de 1961 hasta junio de 1985, obtenidas con el programa Histórica ERIC II del IMTA-CONAGUA. Con estas tasas se toma el promedio a lo largo de las 5 estaciones y con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria. ¿Cuál es el valor esperado de estos últimos (promedios móviles) que se observaría durante el periodo de tiempo anteriormente referido?</p> <p>Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.</p>		
5%	50%	95%

Una breve explicación de la interpretación de estos percentiles se presenta enseguida. Si se dispusiera de una muestra aleatoria (tomada al azar) de 103 de estos promedios, en el que ninguno de los 103 se repite, entonces:

- El percentil 5 de estos 103 promedios es aproximadamente el valor que tienen las 5 observaciones más pequeñas, y las 97 observaciones mayores que éste;
- El percentil 50 es aproximadamente el número que tienen 51 observaciones más pequeñas que éste, y 51 observaciones más grandes que el mismo (la mediana) y,
- El percentil 95 es aproximadamente aquel valor para el cual existen 5 observaciones mayores y 97 menores que éste.

Una respuesta hipotética a la pregunta del ejemplo puede ser que usted considera que su mejor estimador es 3.3 mm/día en el promedio móvil de 7 días. Éste podría ser el valor que corresponde a la mediana. En seguida puede decir que usted estaría sorprendido si el promedio móvil fuera menor a 0.05 mm/día o mayor a 19.1 mm/día a lo largo del periodo considerado. Estos podrían ser estimadores de los percentiles 5 y 95 de su distribución de incertidumbre. La distribución acumulada se presenta a continuación. Los percentiles anteriores se presentan también en la Figura 2.

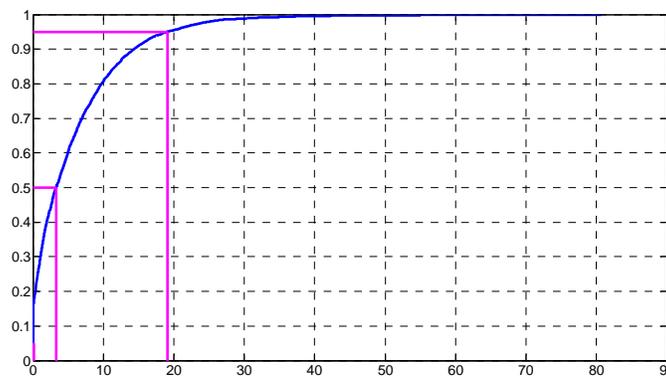


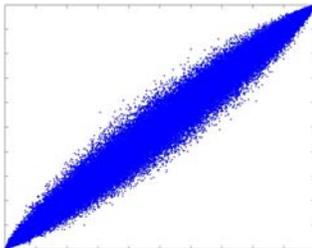
Figura 2. Distribución acumulada de probabilidad del promedio móvil de 7 días en Tabasco (1961-1985, ERIC II)

Dependencia, correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango.

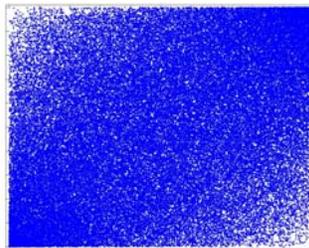
Los indicadores que se usarán para cuantificar la dependencia en el modelo son correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango. Las correlaciones de rango condicionales son iguales que la correlación excepto que se calculan con la distribución condicional. Por esta razón en lo sucesivo todas serán referidas como correlación. La correlación indica el nivel de relación entre dos variables. Este indicador toma valores entre -1 y +1.

- Si valores *altos* de una variable implican valores *altos* de otra, entonces habrá una correlación positiva entre las variables. Mientras más fuerte sea esta relación el valor de la correlación se aproximara a +1. Correlación +1 implica que una variable es una función monótonica creciente de la otra (por ejemplo una función lineal)
- Si valores *altos* de una variable implican valores *bajos* de otra entonces habrá una correlación negativa entre las variables. Mientras más fuerte sea esta relación el valor de la correlación se aproximara a -1. Correlación -1 implica que una variable es una función monótonica decreciente de la otra (por ejemplo una función lineal)
- Cuando aparentemente no existe una relación entre las variables éstas son llamadas independientes. En este caso valores altos o bajos de una variable no implican nada acerca de los valores de la otra variable y su correlación sería cero.

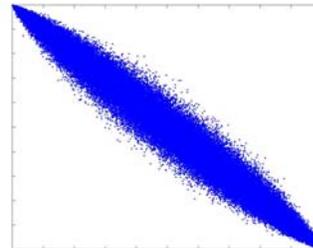
(Fuerte) positiva



Débil positiva



(Fuerte) negativa



Variables de Interés.

Al responder a las preguntas de esta sección considere que las presas de tierra bajo estudio son: Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela, el Guarda, Dolores, José Antonio Alzate e Ignacio Ramírez.

<i>P1</i>	<i>Mantenimiento (# años entre mantenimientos)</i>	
<p>¿Cuál es el número actual (real) de años entre mantenimientos, que llevan a cualquiera de las presas de interés, para efectos prácticos, a su estado original (as good as new)?</p> <p>Para caracterizar su incertidumbre por favor indique el 5, 50 y 95 percentil de su distribución.</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>P2</i>	<i>Tubificación (l/seg)</i>	
<p>¿Cuál es el gasto promedio mensual, para un periodo de tiempo de 50 años, de cualquiera de las presas bajo estudio, que se filtra a través de la cortina y/o cimentación, excluyendo la obra de toma y la obra de excedencias?</p> <p>Para caracterizar su incertidumbre por favor indique el 5, 50 y 95 percentil de su distribución.</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>P3</i>	<i>Desbordamiento (mm)</i>	
<p>Considere los niveles de aguas históricos sobre la corona de la cortina en las presas consideradas en este estudio. Se mide diariamente el tirante (mm) a partir de la corona; cero significa que el nivel del agua esta justo en la corona. Números negativos por debajo de la corona, números positivos por encima de la corona. ¿Cuál es el promedio anual del tirante para un periodo de 10,000 años?</p> <p>Indique el 5, 50 y 95 percentil de esta distribución.</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

P4	Inundación (mm/día)	
<p>Considere el nivel de la lámina de agua promedio diaria (en el evento de una falla) dentro del área de afectación de las 7 presas de interés.</p> <p>Indique el 5, 50 y 95 percentil de esta distribución de promedios diarios.</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

P5	Costos Económicos Humanos (\$)	
<p>Considere los costos públicos y privados totales, para un periodo de tiempo igual a la máxima esperanza de vida restante, por todos los posibles daños y pérdidas en: salud y vidas humanas, ocasionados por la inundación debida a la falla de una presa (medidos en pesos (\$) actuales), de una o mas de las 7 presas consideradas en el área de influencia de las mismas.</p> <p>Indique el 5, 50 y 95 percentil de su distribución de incertidumbre.</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

P6	Costos Económicos (\$)	
<p>Considere los costos públicos y privados totales, en pesos (\$) actuales, por todos los posibles daños y perdidas en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura (escuelas hospitales, puentes, vías de comunicación, medios de transporte) • Campos de producción alimenticia tales como cultivos, granjas • Centrales de abasto y comercio • Vivienda, • Centros de recreación <p>Ocasionados por inundación debida a la falla de una o mas de las 7 presas consideradas en el área de influencia de las mismas</p> <p>Indique el 5, 50 y 95 percentil de su distribución de incertidumbre.</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

Correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango.

En esta sección obtendremos medidas de dependencia (correlaciones de rango y correlaciones de rango condicionales) entre las variables del modelo.

P7	Efectos de precipitación, frecuencia sísmica y mantenimiento en deslizamiento			
De las siguientes variables consideradas en el estudio otorgue el número 1 a la que este más correlacionada con <i>deslizamiento</i> , 2 a la segunda más correlacionada y 3 a la menos correlacionada. Si considera que hay empates en términos del valor de correlación con <i>deslizamiento</i> , otorgue el mismo número a las variables empatadas.				
Precipitación (med = 5.55)		frecuencia sísmica (med = 6.4)		Mantenimiento

P8	$P(\text{deslizamiento (factor de seguridad)} \geq \text{mediana} = 1.66 \text{mantenimiento} \geq \text{mediana})$			
Considere una situación en la que la variable mantenimiento se encuentra por encima de _____ (su mediana). ¿Cuál es la probabilidad de que <i>deslizamiento (factor de seguridad)</i> se encuentre por arriba de 1.66 (su mediana)?				
P	_____	r		r_c

P9	$r_{D,P} / r_{D,M}$			
¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos del <i>deslizamiento</i> y <i>precipitación</i> y la correlación de rangos del <i>deslizamiento</i> y <i>mantenimiento</i> ?				
R				
P		r		r_c

P10	$r_{D,FS} / r_{D,M}$			
¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos del <i>deslizamiento</i> y <i>frecuencia sísmica</i> y la correlación de rangos del <i>deslizamiento</i> y <i>mantenimiento</i> ?				
R				
P		r		r_c

P11	Efectos de precipitación, frecuencia sísmica y deslizamiento en desbordamiento				
e las siguientes variables consideradas en el estudio otorgue el numero 1 a la que este mas correlacionada con <i>desbordamiento</i> , 2 a la segunda mas correlacionada y 3 a la menos correlacionada. Si considera que hay empates en términos del valor de correlación con <i>desbordamiento</i> , otorgue el mismo numero a las variables empatadas.					
Precipitación (med = 5.55)		frecuencia sísmica (med = 6.4)		Deslizamiento (med = 1.66)	

P12	$P(\text{Desbordamiento (mm)} \geq \text{mediana} = \underline{\hspace{2cm}} \mid \text{Deslizamiento} \geq 1.66$				
Considere una situación en la que la variable <i>deslizamiento</i> de se encuentra por encima de 1.66 (su mediana). ¿Cuál es la probabilidad de que el <i>desbordamiento (mm)</i> se encuentre por arriba de <u> </u> (su mediana)?					
R					
P		r		r_c	

P13	$r_{O,P} / r_{O,D}$				
¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos del <i>desbordamiento precipitación</i> y la correlación de rangos del <i>desbordamiento</i> y <i>deslizamiento</i> ?					
R					
P		r		r_c	

P14	$r_{O,FS} / r_{O,D}$				
¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos del <i>desbordamiento</i> y <i>frecuencia sísmica</i> y la correlación de rangos del <i>desbordamiento</i> y <i>deslizamiento</i> ?					
R					
P		r		r_c	

P15	Efectos de precipitación y mantenimiento en tubificación				
De las siguientes variables consideradas en el estudio otorgue el numero 1 a la que este mas correlacionada con <i>tubificación</i> y 2 a la segunda mas correlacionada. Si considera que hay empates en términos del valor de correlación con <i>tubificación</i> , otorgue el mismo numero a las variables empatadas.					
Precipitación (med = 5.55)			Mantenimiento		

P16	$P(\text{tubificación (l/s)} \geq \text{mediana} = \underline{\hspace{2cm}} \mid \text{mantenimiento} \geq \text{mediana} \underline{\hspace{2cm}})$				
<p>Considere una situación en la que la variable mantenimiento se encuentra por encima de <u> </u> (su mediana). ¿Cuál es la probabilidad de que tubificación (l/s) se encuentre por arriba de <u> </u> (su mediana)?</p>					
P		r		r_c	

P17	$r_{T,P} / r_{T,M}$				
<p>¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos de la tubificación y precipitación y la correlación de rangos de la tubificación y mantenimiento?</p>					
R					
P		r		r_c	

P18	<i>Efectos de tubificación, mantenimiento, deslizamiento y desbordamiento en brecha</i>				
<p>De las siguientes variables consideradas en el estudio otorgue el numero 1 a la que este mas correlacionada con la brecha, 2 a la segunda mas correlacionada y sucesivamente hasta 4 a la menos correlacionada. Si considera que hay empates en términos del valor de correlación con brecha, otorgue el mismo numero a las variables empatadas.</p>					
Tubificación	Mantenimiento	Deslizamiento (med = 1.66)	Desbordamiento		

P19	$P(\text{brecha (m)} \geq \text{mediana} = 1.3 \mid \text{tubificación} \geq \text{mediana} \underline{\hspace{2cm}})$				
<p>Considere una situación en la que la variable tubificación se encuentra por encima de <u> </u> (su mediana). ¿Cuál es la probabilidad de que la variable brecha (m) se encuentre por arriba de 1.3 m (su mediana)?</p>					
P		r		r_c	

P20	$r_{B,O} / r_{B,T}$				
<p>¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos de brecha y desbordamiento, y la correlación de rangos de brecha y tubificación?</p>					
R					
P		r		r_c	

P21	$r_{B,D} / r_{B,T}$				
¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos de <i>brecha</i> y <i>deslizamiento</i> y la correlación de rangos de <i>brecha</i> y <i>tubificación</i> ?					
R					
P		r		r_c	

P22	$r_{B,M} / r_{B,T}$				
¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos de <i>brecha</i> y <i>mantenimiento</i> y la correlación de rangos de <i>brecha</i> y <i>tubificación</i> ?					
R					
P		r		r_c	

P23	<i>Efectos de desbordamiento y brecha en inundación</i>				
De las siguientes variables consideradas en el estudio otorgue el numero 1 a la que este mas correlacionada con la <i>inundación</i> , y 2 a la menos correlacionada. Si considera que hay empates en términos del valor de correlación con <i>inundación</i> , otorgue el mismo numero a las variables.					
Desbordamiento		Brecha (Med = 1.3)			

P24	$P(\text{Inundación (mm/día)} \geq \text{mediana} = \underline{\hspace{2cm}} \mid \text{brecha} \geq 1.3 \text{ (m)})$				
Considere una situación en la que la variable brecha se encuentra por encima de 1.3 m (su mediana). ¿Cuál es la probabilidad de que la variable inundación (mm/día) se encuentre por arriba de <u> </u> (su mediana)?					
P		r		r_c	

P25	$r_{i,O} / r_{i,B}$				
¿Cuál es la razón entre la correlación de rangos de <i>inundación</i> y <i>desbordamiento</i> y la correlación de rangos de <i>inundación</i> y <i>brecha</i> ?					
P		r		r_c	

P26	$P(\text{Costos económicos Humanos (\\$)} \geq \text{mediana} = \underline{\hspace{2cm}} \mid \text{Inundación} \geq \text{mediana} \underline{\hspace{2cm}})$				
Considere una situación en la que la variable inundación se encuentra por encima de <u> </u> (su mediana). ¿Cuál es la probabilidad de que la variable costos económicos Humanos (\$) se encuentre por arriba de <u> </u> (su mediana)?					
P		r		r_c	

P27	$P(\text{Costos económicos (\\$)} \geq \text{mediana} = \underline{\hspace{2cm}} \mid \text{inundación} \geq \text{mediana} \underline{\hspace{2cm}})$				
Considere una situación en la que la variable inundación se encuentra por encima de <u> </u> (su mediana). ¿Cuál es la probabilidad de que la variable costos económicos (\$) se encuentre por arriba de <u> </u> (su mediana)?					
P		r		r_c	

Preguntas de Calibración.

PC1	Sismicidad		
¿Cuál es el promedio máximo anual de las magnitudes de los sismos registrados en la Republica Mexicana mayores a 5.5 grados en escala Richter de acuerdo a datos del Servicio Sismológico Nacional para el periodo 2000-2008?			
<hr style="border: 0.5px solid black;"/>			
5%	50%	95%	

PC2	Sismicidad		
¿Considere la razón entre la magnitud máxima del 2001 y mínima del 2008 registrados en México mayores a 5.5 grados en escala de Richter de acuerdo a datos del Servicio Sismológico Nacional?			
<hr style="border: 0.5px solid black;"/>			
5%	50%	95%	

<i>PC3</i>	<i>Sismicidad</i>	
<p>Considere la magnitud máxima de los sismos registrados en la Costa de Guerrero y por separado la magnitud máxima de aquellos registrados en la Costa de Baja California mayores a 5.5 grados en escala Richter de acuerdo a datos del Servicio Sismológico Nacional para el periodo 2000-2008. ¿Cuál es la razón entre el mayor y menor de estos máximos?</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC4</i>	<i>Presas</i>	
<p>Considere las capacidades de azolve de diseño (hm^3) de las siguientes presas: Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela Guarda, Dolores, José Antonio Alzate, Ignacio Ramírez. ¿Cuál es la razón entre el mínimo y máximo de la capacidad de azolve en estas presas?</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC5</i>	<i>Presas</i>	
<p>Considere las siguientes presas: Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela, Guarda, Dolores, José Antonio Alzate, Ignacio Ramírez. ¿Cuál es el promedio de la capacidad del vertedor (m^3/s) de las 2 presas con altura máxima de cortina?</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC6</i>	<i>Presas</i>	
<p>¿Considere las siguientes presas: Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela, Guarda, Dolores, José Antonio Alzate, Ignacio Ramírez. ¿Cuál es la longitud promedio de la corona (m)?</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC7</i>	<i>Presas</i>	
<p>¿Cuál es el promedio de los años de construcción de las presas Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela Guarda, Dolores, José Antonio Alzate, Ignacio Ramírez (años)?</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC8</i>	<i>Presas</i>	
¿Considere el volumen de diseño de las presas: Embajomuy, San Joaquín, José Trinidad Fabela, Guarda, Dolores, José Antonio Alzate, Ignacio Ramírez. ¿Cuál es el promedio del volumen de las presas (m ³)?		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC9</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
Dada la de tasa de precipitación diaria acumulada, observada en las 29 estaciones climatológicas relacionadas con la presa José Antonio Alzate , desde enero de 1961 hasta agosto de 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario a lo largo de las 29 estaciones y con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria. ¿Cuál es el valor máximo esperado de estos últimos (promedios móviles) que se observaría durante el periodo de tiempo anteriormente referido?		
Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC10</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
Dada la de tasa de precipitación diaria acumulada, observada en las 6 estaciones climatológicas relacionadas con la presa José Trinidad Fabela , desde enero de 1961 hasta agosto de 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario a lo largo de las 6 estaciones y con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria. ¿Cuál es el valor máximo esperado de estos últimos (promedios móviles) que se observaría durante el periodo de tiempo anteriormente referido?		
Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC11</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
Dada la de tasa de precipitación diaria acumulada observada en las 6 estaciones climatológicas relacionadas con la presa El Guarda , desde abril de 1963 hasta marzo de 1990 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario a lo largo de las 6 estaciones y con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria. ¿Cuál es el valor máximo esperado de estos últimos (promedios móviles) que se observaría durante el periodo de		

tiempo anteriormente referido?		
Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.		
5%	50%	95%

<i>PC12</i>	<i>Tasa promedio de precipitación (mm/día)</i>	
Mediante la tasa de precipitación diaria observada en las 26 estaciones climatológicas relacionadas con la presa Ignacio Ramírez , desde enero de 1961 hasta agosto de 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario acumulado a lo largo de las 26 estaciones y con este se genera un promedio móvil de 7 días, ¿Cuál es el valor promedio de este último (promedio móvil) que se observaría durante el periodo de tiempo anteriormente referido?		
Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.		
5%	50%	95%

<i>PC13</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
Mediante la tasa de precipitación diaria observada en las 2 estaciones climatológicas relacionadas con la presa Embajomuy , desde enero de 1961 hasta agosto de 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario acumulado a lo largo de las 2 estaciones y con este se genera un promedio móvil de 7 días, ¿Cuál es el valor promedio de este último (promedio móvil) que se observaría durante el periodo de tiempo anteriormente referido?		
Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.		
5%	50%	95%

<i>PC14</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
Mediante la tasa de precipitación diaria observada en las 2 estaciones climatológicas relacionadas con la presa San Joaquín , desde enero de 1961 hasta agosto de 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario acumulado en las 2 estaciones y con este se genera un promedio móvil de 7 días, ¿Cuál es el valor promedio de este último (promedio móvil) que se observaría durante el periodo de tiempo anteriormente referido?		
Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.		
5%	50%	95%

<i>PC15</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
<p>Tomando en cuenta como zona norte las presas: El Guarda, Embajomuy y José Trinidad Fabela, dada la tasa de precipitación diaria acumulada, observada en las estaciones climatológicas relacionadas con la zona, desde 1961 hasta 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario a lo largo de las estaciones de influencia de cada una de las presas de la zona mencionada y con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria en cada una de las 3 áreas de influencia. ¿Cuál es el valor mínimo de los 3 máximos de estos últimos (promedios móviles) que se observaría durante el periodo de tiempo referido?</p> <p>Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.</p>		
5%	50%	95%

<i>PC16</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
<p>Tomando en cuenta como zona sur las presas: Dolores, Ignacio Ramírez y José Antonio Alzate, dada la tasa de precipitación diaria acumulada, observada en las estaciones climatológicas relacionadas con la zona, desde 1961 hasta 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario a lo largo de las estaciones de influencia de cada una de las presas de la zona mencionada y con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria en cada una de las 3 áreas de influencia. ¿Cuál es el valor máximo de los 3 máximos de estos últimos (promedios móviles) que se observaría durante el periodo de tiempo referido?</p> <p>Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.</p>		
5%	50%	95%

<i>PC17</i>	<i>Tasa máxima de precipitación (mm/día)</i>	
<p>Tomando en cuenta toda la zona de estudio dada la tasa de precipitación diaria acumulada, observada en las estaciones climatológicas relacionadas con la zona, desde 1961 hasta 1999 obtenidas con el programa histórico ERIC II del IMTA-CONAGUA, se toma el promedio diario a lo largo de las estaciones de influencia de cada una de las presas, con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria en cada una de las 7 áreas de influencia. Finalmente se construye un promedio con estos 7 promedios móviles para caracterizar a toda la zona ¿Cuál es el valor máximo que se observaría durante el periodo de tiempo anteriormente referido en este promedio de zona?</p> <p>Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.</p>		
5%	50%	95%

<i>PC18</i>	<i>Tasa promedio de precipitación (mm/día)</i>	
<p>Tomando en cuenta toda la zona de estudio dada la tasa de precipitación diaria acumulada, observada en las estaciones climatológicas relacionadas con la zona, desde 1961 hasta 1999 obtenidas con el mismo programa, se toma el promedio diario a lo largo de las estaciones de influencia de cada una de las presas, con estos promedios se construyen promedios móviles de 7 días para precipitación promedio diaria en cada una de las 7 áreas de influencia. Finalmente se construye un promedio con estos 7 promedios móviles para caracterizar a toda la zona ¿Cuál es el valor promedio que se observaría durante el periodo de tiempo referido en este promedio de zona?</p> <p>Para caracterizar su incertidumbre por favor indique los percentiles 5, 50 y 95 de su distribución de incertidumbre.</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC19</i>	<i>Tasa de gasto (m³/s) promedio diario</i>	
<p>Considere datos de Gasto promedio diario m³/s en la estación hidrométrica San Bernabé clave 12539 del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. ¿Cuál es el promedio registrado para los años de 1961 a 1993?</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

<i>PC20</i>	<i>Tasa de gasto (m³/s) promedio diario</i>	
<p>Considere datos de Gasto promedio diario m³/seg en la estación hidrométrica San Bernabé clave 12539 del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. ¿Cuál es el la razón entre el máximo y mínimo registrada para los años de 1961 a 1993?</p>		
_____	_____	_____
5%	50%	95%

Expertos

Ing. Claudia Guzmán Vilchis
Operación y Conservación de Presas, Subdirección de Asistencia Técnica Operativa,
Dirección local en el Estado de México, CONAGUA
Tel. 01722 2322636
e_mail, claudia.guzman@cna.gob.mx

Ing. Luis Eduardo Mejía Pedrero
Director del Departamento de Aguas Superficiales, CONAGUA
Profesor de la Facultad de Ingeniería de la UAEMex
Tel. (01722) 2322636
e_mail, luis.mejia@cna.gob.mx

Ing. Miguel Valdez Sinto
Operación y Conservación de Presas, Subdirección de Asistencia Técnica Operativa,
Dirección local en el Estado de México, CONAGUA
Tel. 01722 2322660
e_mail. miguel.valdez@cna.gob.mx

Ing. Rafael López Albarrán
Director del Organismo de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Zinacantepec,
(ODAPAS)
Profesor de la Facultad de Ingeniería de la UAEMex
Tel. (07222) 2183245, ext. 102
e_mail, loar88@hotmail.com

Colaboraciones

Ing. José Luis Cortéz Martínez
Profesor tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la UAEMex
Tel. (01722) 2151351

Ing. José Maya Ambrosio
Director de Obras Hidroagricolas, SEDAGRO
Tel. (01722) 2756400, ext, 5773

Comentarios

Variable de Interés P1

Ing. Claudia Guzmán Vilchis

- *La variable mantenimiento si se puede controlar, pero las demás variables salen de nuestro control.*
- *Se les da mantenimiento por partes, es difícil darles un mantenimiento general.*

Ma. Luis Eduardo Mejía Pedrero

- *Parte del estado ideal de las presas, es el desasolve, desafortunadamente éste no es posible.*

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *También sujeto a eventualidades o condiciones de operación.*
- *Existen variaciones entre cada y cada presa por ejemplo la Alzate el mantenimiento es cada año, la Ignacio Ramírez es cada 3 años, Trinidad Fabela de 6-7 años, el Guarda y Dolores hasta los 10 años.*

Ing. Rafael López Albarrán

- *No se tiene precaución de dar mantenimiento constantemente, en general el que se realiza es el mantenimiento correctivo (presas de distrito de riego)*

Ma. José Maya Ambrosio

- *En mi opinión el mantenimiento es nulo, hay que tener en cuenta dos conceptos que son el mantenimiento y la conservación*
- *Mantenimiento*
 - *Preventivo*
 - *Correctivo*
- *Conservación: llevar a la presa a su condición original*
- *La seguridad no es toma da en cuenta en las presas en México*
- *En 100 años de uso si se dan un mantenimiento máximo se realiza en dos ocasiones*
- *Una presa debe tener un mantenimiento completo cada 5 años y un mantenimiento preventivo cada año (mantenimiento ideal)*

Variable de Interés P2

Ing. Claudia Guzmán Vilchis

- *Considerando de ahora a 50 años, la edad de la presa, casi nada, mínimo.*

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *Sería más correcto que las unidades de la infiltración, o tubificación como le llaman, para éste caso, es decir las presas en estudio, fueran en litros por mes (l/mes) o metros cúbicos por mes (m^3 /mes)*
- *En la trinidad Fabela existen gastos del orden de 600 lts / seg.*

Ing. Rafael López Albarrán

- *Para las presas de estudio, las filtraciones están en función de la capacidad de almacenamiento.*
- *Calculando una permeabilidad considerando 20 m de cortina y cimentaciones promedio con una longitud para determinar un gradiente hidráulico de 25/L. 1.2×10^{-5} (permeabilidad del suelo) $\times 20 \times 0.11 \times 300$ (promedio de la longitud de la corona de las presas de estudio) $\times 86400 = 684.288$ (m³/día) $\times 30 = 20,500$ m³/mes*
- *Tiene mucho que ver la permeabilidad del suelo.*

Ma. José Maya Ambrosio

- *Influye el material del corazón para la falla por tubificación y la compactación*

Variable de Interés P3

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *Se toman consideraciones según la época del año*
- *Se deja un factor de seguridad regulando el gasto del vaso.*

Ing. Rafael López Albarrán

- *La consideración es que no debe presentarse por diseño hidrológico y que opere el vertedor, quizás podría presentarse en las 4 pequeñas.*
- *Se supone que siempre se mantendrán en números negativos por la operación entre épocas de avenidas.*

Ma. José Maya Ambrosio

- *Se calcularon tomando en cuenta los azolves de las presas*

Variable de Interés P4

Ing. Claudia Guzmán Vilchis

- *No queda muy claro lo que queremos conseguir, quizás sería mejor preguntar en m³, quizás en dos tipos de falla: Total y Parcial.*

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *Se toma la afectación total .Las presas de mayor impacto serian la Alzate y la Ignacio Ramírez esto debido a la cercanía que existe entre ellas además que se considera que la condición de los vasos es sensible.*

Ing. Rafael López Albarrán

- *Se supone la media con la capacidad útil, la máxima con la capacidad extraordinaria (súper almacenamiento) y la topografía (Valle de Ixtlahuaca) (Antonio Alzate) 105.83 millones de m³*

Variable de Interés P5

Ing. Claudia Guzmán Vilchis

- *Hablando de aguas contaminadas se requiere más atención que agua limpia, no es igual el costo económico.*

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *Se considera la vida útil de la presa que sea de 70 años, considerando 5 metros de agua con una duración de 30 días, pérdidas humanas de 30 a 40 personas valor. Se considera atención médica (120000 por día) en base a apreciación personal por indemnización.*

Ing. Rafael López Albarrán

- *No hay pérdida de vidas humanas, no hay casas debajo de estas presas y hay tiempo de avisarle a la población.*
- *Problemas de salud que implican costos médicos.
7 presas - 10,000 hab
Vacunas = \$100.00 / hab
Desinfecciones = \$60.00 /familia, 1t gal de cloro por familia suponiendo 2000 por familias*

Ma. José Maya Ambrosio

- *Se toma en cuenta la población de 5,000 hab., aproximadamente el 20% de daños en un promedio de 15 días*

Variable de Interés P6

Ing. Claudia Guzmán Vilchis

- *Una o varias presas? Una reparación ya cuesta millones, cortina, daños en el vertedor, etc.*
- *¿Quieren considerar el posible costo de más de una presa suponiendo que pueda haber algún afectado y vuela la presa o falla más de una?*

Ma. Luis Eduardo Mejía Pedrero

- *Los costos no incluyen la reparación de la presa dañada.*
- *Por la ubicación geográfica de las 7 presas, se considera que estas pueden fallar por zona con alta precipitación y podría decirse que la falla de las presas sería en pares: El Guarda y Embajomuy, Fabela y San Joaquín, y Alzate, Ramírez y Dolores.*
- *En su momento, el costo de construcción de las presas fueron: Alzate = 11'600 millones de pesos, Embajomuy al igual que El Guarda = 650 millones de pesos.*

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *Considera la inundación mayor afectando la zona industrial que esta zona aguas debajo de la estructura en cuestión (costo de instalaciones dentro de lo agrícola no hay mucha afectación).*

- *El Ingeniero considera un ancho de inundación en las márgenes del río que son de 500 metros a los lados del cauce del río Lerma esto es en base al conocimiento de la topografía que existe en la zona de afectación.*

Ing. Rafael López Albarrán

- *Promedio entre autopista y carreteras libres considerando puentes \$1250.00 x km*
- *Afectación de 5km totales a un ancho promedio de 10 m.*
- *Maíz = \$2,500 ton*
- *Frijol = \$4,000 ton*
- *Haba = \$6,000 ton*
- *Tomando en cuenta el cauce del río Lerma, \$62,500,000 de vías*
- *La afectación en hectáreas sería de 600 de maíz, 100 de frijol, y 20 de haba*
 600×3.5 (ton promedio) $\times 2500 = \$5'250,000.00$, $100 \times 0.8 \times 4000 = \$320,000.00$
 $20 \times 6.1 \times 6000 = \$732,000$
- *Infraestructura = \$10,000,000.00*
- *Vivienda = \$100,000,000.00 (500 casas dañadas)*
- *Total = \$178,800,000.00*

Correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango P7

Ing. Claudia Guzmán Vilchis

- *La variable mantenimiento si se puede controlar, pero las demás variables salen de nuestro control.*

Ing. Miguel Valdez

- *Un factor de gran importancia que se considera para dar respuesta a la pregunta anterior es “el bombeo en la corona”, en el ejercicio que se está realizando (el modelo) no se aprecia con claridad donde se está considerando éste.*
- *Los estudios de círculos de falla se hacen suponiendo diferentes condiciones de falla: material saturado y frecuencia sísmica.*

Correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango P11 y P15

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *Se debe considerar también el posible fenómeno de licuación*

Correlaciones de rango y correlaciones condicionales de rango P15

Ing. Miguel Valdez Sinto

- *En una opinión personal, los factores que impactan en mayor medida a la tubificación, son: Los materiales de construcción (tipos, calidad, manejo, bancos), Mala compactación durante la construcción, El inadecuado proceso constructivo (durante su construcción).*
- *Estos factores son aún más importantes que la precipitación, en mi experiencia profesional he visto que estos factores propician en mayor medida una tubificación.*

Comentarios generales

Ing. Claudia Guzmán Vilchis

- *Muy general el modelo*
- *Descripciones no adecuadas a mi criterio, porque en mi opinión, se esta dando una descripción de lo que queremos y no de los conceptos en general, lo cual sería apropiado para quien lea el documento.*

Ing. Mejía Pedrero

- *Muy general el modelo No es lo mismo que falle una presa a que falle otra, es decir, cada presa provocaría resultados diferentes.*
- *Ya se ve que la tubificación es un factor de gran importancia en una cortina de tierra; el pasado 17 de septiembre de 2008 el bordo de protección del Rio Lerma a la altura de la Comunidad de San Mateo Atenco y el camino viejo a San Pedro Tultepec, falló debido a tubificación que progresó rápidamente a lo largo de pocos días (una semana aproximadamente).*

Ing. Miguel Valdez

- *Es importante que se tome en cuenta que las presas que se están estudiando son “presas viejas” por decirlo así; ya casi dieron todo lo que tenían que dar, a que va todo esto; una presa joven (de menos de 5 años) tiene más riesgo de falla y más probabilidad de verse afectada por cualquiera de estas variables en estudio. Por que se dice todo esto, pues porque ya todas estas presas a lo largo de su vida han pasado por condiciones para las que fueron diseñadas y tal vez algunas otras para las que no fueron diseñadas, es decir ya pasaron la “prueba de fuego y es difícil que a esta edad fallen, a excepción claro que no se lleve un manejo, control y mantenimiento mínimos.*
- *Es diferente un vertido a lo largo de toda la corona de la cortina que un vertido en un punto, éste último es mucho más peligroso.*
- *Datos que se deben de obtener para la Evaluación de una presa:*
 - Observar.*
 - Comparar entre planos y lo construido.*
 - Edad de la cortina*
 - Comportamiento: (Embalse, Vertedor, Obra de toma, Fugas)*
- *Población aguas abajo*
- *Tipo de cultivo*
- *Clasificación del Riesgo (alto, medio, bajo)*
- *Etc...*