



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO**



---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DE RIESGO MEDIANTE EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE  
RESPUESTA COMBINADO CON ALGORITMOS GENÉTICOS  
EN UNA PRESA DE TIERRA MEXIQUENSE**

**TESIS**

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

**PRESENTA:  
UBALDO MARTÍNEZ OSUNA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. DAVID JOAQUÍN DELGADO HERNÁNDEZ**

**TOLUCA, MÉXICO, MARZO DE 2010**

## CONTENIDO

### **INTRODUCCIÓN**

Antecedentes de la investigación .....	7
Planteamiento del problema .....	7
Justificación .....	8
Objetivos .....	9
Relevancia y originalidad del trabajo .....	10
Metodología .....	10
Estructura de la tesis .....	11

### **CAPÍTULO 1: SITUACIÓN ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA EN MÉXICO**

1.1. Introducción .....	12
1.2. Importancia de las presas en el desarrollo de un país .....	12
1.3. Infraestructura hidráulica del país .....	13
1.4. Principales presas de México .....	15
1.5. La necesidad de evaluar riesgos en presas .....	20

### **CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE**

2.1. Introducción .....	22
2.2. Simulación de Monte-Carlo .....	23
2.3. Método del Elemento Finito .....	24
2.4. Estados Límite .....	26
2.4.1. Estado Límite Último .....	26
2.4.2. Estado Límite de Servicio .....	27
2.5. Método de Superficie de Respuesta .....	28
2.5.1. Modelo de Primer Orden .....	30
2.5.2. Modelo de Segundo Orden .....	300
2.6. Algoritmos Genéticos .....	32
2.7. Análisis de los Métodos .....	35

### **CAPÍTULO 3: FILOSOFÍA DEL MSRY LOS AG'S**

<b>3.1.</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.</b>	<b>Filosofía del Método de Superficie de Respuesta .....</b>	<b>37</b>
3.2.1.	Modelos de Superficie de Respuesta .....	38
3.2.2.	Gráficas de Contorno .....	38
3.2.3.	Diseños Experimentales de Superficie de Respuesta .....	39
3.2.4.	Prueba de Significancia de los Coeficientes Estimados en el MSR .....	41
3.2.5.	Prueba de Falta de Ajuste .....	43
3.2.6.	Método de Máxima Pendiente .....	44
3.2.7.	Procedimiento Secuencial para la Aplicación del MSR .....	45
<b>3.3.</b>	<b>Filosofía de los Algoritmos Genéticos .....</b>	<b>46</b>
3.3.1.	Población Inicial .....	48
3.3.2.	Operador Selección de los Individuos .....	48
3.3.3.	Operador de cruce .....	48
3.3.4.	Operador Mutación .....	49
3.3.5.	¿Cuándo aplicar un Algoritmo Genético? .....	50
<b>3.4.</b>	<b>Comentarios finales .....</b>	<b>50</b>

### **CAPÍTULO 4: EL MODELO Y SU APLICACIÓN**

<b>4.1.</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.</b>	<b>Descripción del Caso en Estudio .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.</b>	<b>Formulación del Modelo .....</b>	<b>54</b>
<b>4.4.</b>	<b>Las variables del modelo .....</b>	<b>55</b>
4.4.1.	Mantenimiento .....	55
4.4.2.	Factor de seguridad .....	56
4.4.3.	Tubificación .....	59
<b>4.5.</b>	<b>Red Bayesiana .....</b>	<b>61</b>
<b>4.6.</b>	<b>Aplicación del modelo y análisis de resultados .....</b>	<b>63</b>
<b>4.7.</b>	<b>Trabajo a futuro .....</b>	<b>71</b>

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
---	-----------

<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>75</b>
---	-----------

<b>ANEXO A: Ejemplo Numérico del MSR .....</b>	<b>81</b>
--	-----------

<b>ANEXO B: Ejemplo Numérico de los AG's .....</b>	<b>84</b>
--	-----------

<b>ANEXO C: Rutina Principal de los AG's Programada en Python .....</b>	<b>88</b>
---	-----------

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Usos del agua en México (Adaptado de: CNA, 2008).....	14
Figura 1.2 Volumen almacenado en las principales presas de México, serie anual de 1990-2007 en millones de m <sup>3</sup> (CNA, 2008) .....	16
Figura 1.3 Principales presas en México por su capacidad de almacenamiento (CNA 2007).....	16
Figura 2.1 Superficie de respuesta en dos dimensiones.....	30
Figura 2.2 Superficie de respuesta tridimensional (Fernández y Piñeiro, 2009) .....	31
Figura 3.1 Ejemplo de gráficas de contorno o curvas de nivel (Design Expert, 2009) .....	39
Figura 3.2 Diseño aumentado 2 <sup>k</sup> con observaciones de centro (Gupta y Manohar, 2004).....	40
Figura 3.3 Diseño compuesto central de tres Factores $x_1, x_2, x_3$ (Gupta y Manohar, 2004) .....	40
Figura 3.4 Funcionamiento de un algoritmo genético (Adaptado de Ribeiro et al., 2009) .....	47
Figura 3.5 Cruce con punto simple cuya posición en la cadena se elige aleatoriamente.....	48
Figura 3.6 Cruzamiento con dos puntos (Adaptado de Ribeiro et al., 2009) .....	49
Figura 3.7 Cruzamiento uniforme (Adaptado de Ribeiro et al., 2009).....	49
Figura 3.8 Gen sometido a mutación (Adaptado de Ribeiro et al., 2009).....	50
Figura 4.1 Sección Transversal de la presa José Antonio Alzate (Adaptado de SRH, 1976).....	52
Figura 4.2 Vertedor de la Presa José Antonio Alzate .....	53
Figura 4.3 Obra de toma de la presa José Antonio Alzate .....	53
Figura 4.4 Diagrama de flujo del modelo propuesto, en el que se combina el MSR y los AG's .....	55
Figura 4.5 Función de distribución para el Factor de Seguridad (Adaptado de Pérez, 2009).....	57
Figura 4.6 Descripción general del Método Sueco (Adaptado de Pérez, 2009) .....	58
Figura 4.7 Filtraciones iniciales (Ahedo y Sánchez, 2003).....	59
Figura 4.8 Iniciación del tubo aguas abajo (Ahedo y Sánchez, 2003) .....	60
Figura 4.9 Tubificación completa (Ahedo y Sánchez, 2003) .....	60
Figura 4.10 Modelo general de la Red Bayesiana (Adaptado de Pérez, 2009) .....	62
Figura 4.11 Modelo general de la Red Bayesiana y los histogramas que la componen (Pérez, 2009) .....	63
Figura 4.12 Superficie de respuesta obtenida a partir de las variables mantenimiento, factor de seguridad y tubificación (Design Expert, 2009).....	68
Figura 4.13 Gráfica de contorno de la superficie de respuesta obtenida (Design Expert, 2009) .....	68
Figura A.1 Superficie de respuesta obtenida (Design Expert, 2009).....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Crecimiento relativo de la infraestructura de riego en México de 1999 a 2007 (CNA, 2008) .....	14
Tabla 1.2 Distritos de riego transferidos parcialmente hasta el 2007 (CNA, 2008) .....	15
Tabla 1.3 Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presas de México (CNA, 2007)..	18
Tabla 1.4 Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presas de México (CNA, 2007) [continuación] .....	19
Tabla 3.1 Análisis de varianza (Adaptado de Cornell, 1990) .....	42
Tabla 4.1 Principales características de la presa Jose Antonio Alzate (Adaptado de SRH, 1976) .....	52
Tabla 4.2 Media y desviación estándar obtenida de la Red Bayesiana de Pérez (2009) .....	64
Tabla 4.3 Codificación de las variables de interés.....	65
Tabla 4.4 Criterio de entrada del modelo con las variables codificadas.....	65
Tabla 4.5 Datos de entrada para Design Expert.....	66
Tabla 4.6 Análisis de varianza del modelo .....	67
Tabla 4.7 Comparación de los resultados del MSR contra los valores actuales de la Presa José Antonio Alzate y los obtenidos por el modelo combinado.....	70
Tabla 4.8 Estimación de la divergencia entre el modelo, el RSM y los valores actuales de presa José Antonio Alzate .....	71
Tabla A1 Datos de entrada para codificar las variables de interés .....	81
Tabla A2 Datos empleados durante el proceso para ajustar a un modelo de primer orden .....	82
Tabla A3 Análisis de varianza para el modelo de primer orden (Adaptado de Montgomery, 1991)	82
Tabla A4 Experimentos de máximo ascenso (Adaptado de Montgomery, 1991).....	83
Tabla A5 Datos para el segundo modelo de primer orden (Adaptado de Montgomery, 1991).....	83
Tabla A6 Análisis de varianza para el segundo modelo de primer orden (Adaptado de Montgomery, 1991) .....	84
Tabla B1 Proceso de selección del AG.....	85
Tabla B2 Replica de los individuos más aptos .....	85
Tabla B3 Asignación de parejas para el cruce .....	86
Tabla B4 Población resultante después del cruce.....	86
Tabla B5 Proceso de mutación.....	87
Tabla B6 Segunda iteración del algoritmo .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS

AG: Algoritmo Genético  
AG's: Algoritmos Genéticos  
CAD: Diseño Asistido por Computadora  
CENECAM: Centro Estatal de Emergencias de Campeche  
CIEMAD: Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional  
CNA: Comisión Nacional del Agua  
CONACYT: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología  
CYPECAD: Cálculo de Estructuras de Concreto y Metálicas, Programa Comercial  
DM: Departamento de Matemáticas, Universidad de Buenos Aires  
EL: Estados Límite  
ELS: Estados Límite de Servicio  
ELU: Estado Límite Último  
EP: Elaboración Propia  
FCE: Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina  
FS: Factor de seguridad  
FUNGLODE: Fundación Global Democracia y Desarrollo  
ICOLD: International Commission of Large Dams  
IDH: Índice de Desarrollo Humano  
IP: Índice plástico  
MEF: Método del Elemento Finito  
MSR: Método de Superficie de Respuesta  
NAME: Nivel de Aguas Máximo Extraordinario  
NAMO: Nivel de Aguas Máximo Ordinario  
NRF: Fundación Nacional de Investigación Coreana  
OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico  
PIB: Producto Interno Bruto  
RCDF: Reglamento de Construcciones del Distrito Federal  
SMC: Simulación de Montecarlo  
SRH: Secretaría de Recursos Hidráulicos  
*SSE*: Suma de Cuadrados Residual  
*SSEP*: Suma de Cuadrados del Error Puro  
*SSFA*: Suma de Cuadrados de la falta de Ajuste  
*SSR*: Suma de Cuadrados debido a la Regresión  
SST: Suma de Cuadrados Totales  
UNAUSA: Asociación Norteamericana de las Naciones Unidas  
VA : Variables Aleatorias

## SIMBOLOGÍA

$\sigma^2$ : Varianza  
 $\alpha$ : Nivel de Confianza  
 $\beta$ : Angulo de inclinación del talud  
 $\beta_0, \beta_1, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ : Parámetros desconocidos del modelo de regresión generado con el MSR  
 $\varepsilon$ : Error Aleatorio  
 $\varepsilon_u$ : Valores del Error  
 $n$ : Número de Experimentos  
 $u$ : 1,2, N  
1D: Primera Dimensión  
2k: Diseño Factorial  
A: Uso Público  
b: Presa que Forma Parte del Sistema de Aguas del Cutzamala  
C: Control de Avenidas  
 $C_d$ : Límite Admisible para el Estado a Comprobar  
 $d$ : Distancia del centro del círculo de falla a el centroide de la masa de suelo analizado  
Ec: Ecuación  
 $E_d$ : Acciones Sobre la Estructura  
 $F$ : Estadístico de Prueba  
G: Generación de Energía Eléctrica  
G:Centroide de la masa de suelo analizada  
 $H$ : Altura del talud  
I: Irrigación  
 $l_i$ : Espesor de la sección analizada (ancho, que se mide de forma perpendicular al plano y generalmente es unitario)  
N: Número de Elementos  
O: Centro del círculo de falla (propuesto)  
 $p$ : Número de términos del Modelo  
 $R$ : Radio del círculo de falla  
 $R^2$ : Regresión Ajustada  
 $R_d$ : Resistencia Estructural  
 $S_d$ : Fuerzas Actuantes en la Estructura  
 $S_u$ : Fuerza resistente  
 $W$ : Peso del suelo de la sección analizada  
 $X_1, X_2, \dots, X_k$ : Factores de Superficie  
Y: Variable Respuesta  
 $Y_{lu}$ : U-ésima observación del  $l$ -ésimo punto de diseño  
 $Y_u$ : Valor observado en la  $u$ -ésima corrida  
 $\bar{Y}$ : Promedio de las  $N$ 's  
 $\bar{Y}_l$ : Promedio de las  $r_l$  en el  $l$ -ésimo punto de diseño  
 $\hat{Y}_u$ : Valor predicho de la respuesta en el  $u$ -ésimo punto de diseño  
 $\hat{Y}_l$ : Valor predicho de la respuesta en el  $l$ -ésimo punto de diseño

---

# INTRODUCCIÓN

---

## Antecedentes de la investigación

Hoy en día las estructuras que construye el ingeniero civil deben cubrir dos requisitos indispensables: economía y seguridad. Ya no es válido diseñar estructuras robustas como las de nuestros antepasados (ej: catedrales y edificios coloniales), en los que los elementos de soporte eran de grandes dimensiones y, por lo tanto, costosos. Esta situación, aunada a los desarrollos científicos en materia de métodos para calcular estructuras, ha conducido a la edificación de construcciones más esbeltas y económicas.

Sin embargo, existe evidencia que pone en duda la relación entre la teoría y la práctica reciente de la ingeniería. Prueba de ello es el sismo de 1985 que afectó gravemente el centro de la ciudad de México, en donde la forma de construcción o la manera de emplear la teoría, fueron las causas por las que distintos edificios colapsaron. En aquel evento se observó que, en general, las estructuras más robustas permanecieron de pie, mientras que otras más esbeltas no sobrevivieron al suceso. Esto produjo cuantiosos daños económicos y de pérdida de vidas humanas.

Por ello, surge la necesidad de evaluar los riesgos en obras de infraestructura. En este sentido, las presas son construcciones grandes e importantes para el desarrollo del país, por lo que es necesario analizar sus riesgos de falla. Así, el presente proyecto de investigación se desarrolla una metodología numérica para evaluar dichos riesgos, y ofrecer a los dueños y administradores de presas, herramientas cuantitativas que les permitan mejorar la toma de decisiones cuando tienen que asignar presupuestos a las actividades de mantenimiento.

Es importante mencionar que este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto “Risk Assessment for Structures by the Improved Response Surface Method Combined with Genetic Algorithm: the case of a Mexican dam “, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y por la Fundación Nacional de Investigación Coreana (NRF), y llevado a cabo en conjunto por las Facultades de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, y de la Universidad de Daejin, Corea.

## Planteamiento del problema

Cuando una presa tiene más de 15 m de altura, y almacena más de 3 millones de m<sup>3</sup>, se considera grande (ICOLD, 2009). Así, en el mundo existen aproximadamente 80,000 grandes presas. De ellas, la mitad tienen más de 50 años en servicio, y el 10% tienen más de 8 décadas (Delgado y Cho, 2008). Un análisis estadístico de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 1995), mostró que en el siglo XX, más de 8,000 personas murieron como consecuencia de la falla de grandes presas. También reveló que las presas que más comúnmente fallaron, durante esos 100 años, fueron las de tierra (85% de los casos estudiados), seguidas por las de gravedad (10%), las de arco (3%), y por último los diques (2%).

Desafortunadamente, de acuerdo con Fuentes (2009), debido al aumento de 0.2 grados centígrados de temperatura por década en el planeta, se han incrementado los riesgos en estas y otras obras, como resultado de la presencia de lluvias y eventos meteorológicos extraordinarios,



que pueden ocurrir durante su vida útil, y causar daños estructurales de gran magnitud. Por ejemplo, más del 80% de las pérdidas económicas por desastres en México durante los últimos años, han sido causadas por las lluvias, deslaves y desbordamiento de ríos y presas (Fuentes, 2009).

Aunque algunos investigadores han canalizado sus esfuerzos hacia temas relacionados con la seguridad de presas, la gran mayoría se limita al estudio de sus funciones hidráulicas, dejando a un lado la evaluación de riesgos y la conservación de estructuras viejas, siendo este un problema que debe atenderse con prontitud, si no se quieren sufrir las consecuencias en el futuro.

En la actualidad existen diferentes técnicas que permiten modelar las condiciones en las cuales se encuentra una obra de ingeniería civil y, por medio de su análisis, obtener resultados confiables para adoptar medidas preventivas sobre posibles colapsos. Entre los métodos que comúnmente se utilizan para la evaluación de riesgos en infraestructura se pueden destacar: la Simulación de Montecarlo (SMC), el Método del Elemento Finito (MEF), y las Funciones de Estado Límite (FEL).

Los enfoques mencionados presentan ciertas limitaciones en cuanto a dos aspectos importantes de la evaluación de riesgos en estructuras: convergencia y rapidez. Por ello en este trabajo, se propone combinar el Método de Superficie de Respuesta (MSR) y los Algoritmos Genéticos (AG's) para realizar dicha evaluación, en especial en presas de tierra, y de manera particular en las ubicadas en el Estado de México. Pero, ¿cuáles son las ventajas de estos dos enfoques sobre sus contrapartes?

El MSR reduce el número de cálculos para estimar los riesgos, y tiene una alta capacidad de convergencia. Los AG's, por su parte, pueden operar con varias soluciones de forma simultánea (Coello, 2009), lo que permite obtener resultados más precisos. En adición, una vez programados en una computadora, los AG's se adaptan a la situación que se les presenta por fácil o compleja que esta sea (Marczyk, 2004). Tomando como punto de partida estos beneficios, surge la siguiente pregunta de investigación, ¿se pueden combinar los métodos de superficie de respuesta y los algoritmos genéticos para evaluar riesgos en presas de tierra del Estado de México, y capitalizar las ventajas de ambos?

## **Hipótesis**

Para dar respuesta a la pregunta planteada, se propone la siguiente hipótesis:

El método de superficie de respuesta, combinado con los algoritmos genéticos, ofrece una herramienta más precisa que el método de superficie de respuesta tradicional aplicado aisladamente (en particular para el análisis de riesgos en presas de tierra).

## **Justificación**

Los impactos del colapso de una presa pueden ser enormes, y van desde la destrucción de viviendas, redes de transporte, infraestructura pública, instalaciones industriales, hasta terrenos agrícolas. Las pérdidas también pueden incluir daños a la vida y salud humanas, así como graves perturbaciones en el suministro de servicios (ej: agua, luz, teléfono, etc.), dando lugar a importantes pérdidas económicas (Rivero, 2009).

Así, en el presente trabajo se desarrolla una herramienta para evaluar riesgos (mediante la combinación del MSR y los AG's) en una presa localizada en el Estado de México. Se espera que esta herramienta innovadora permita la optimización de las variables que intervienen en la evaluación de riesgos en presas. Pero quizás lo más importante, es que ayude a que se mejore el proceso de toma de decisiones en las prácticas de la administración de riesgos en infraestructura hidráulica. Esto último, a través de la generación de un conjunto de recomendaciones que permitan a los tomadores de decisiones elegir alternativas de acción con base en datos duros.

No menos importante es la motivación personal del autor para la realización de esta investigación, que se basa en la necesidad de adquirir más conocimientos sobre la identificación de las variables que intervienen en las fallas de presas. Aunado a esto, se encuentra el desafío de combinar dos técnicas de gran alcance (MSR y AG's) en la evaluación de riesgos de presas de tierra en el Estado de México.

## **Objetivos**

El objetivo general del trabajo es:

➤ Desarrollar una herramienta de evaluación de riesgos en obras de infraestructura, con base en la combinación del MSR, y los AG's, para evaluar riesgos de falla en presas de tierra del Estado de México.

En específico se espera evaluar la presa José Antonio Alzate, ya que es la que cuenta con mayor información disponible en la literatura y resulta ser una de las más cercanas a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México.

En lo que se refiere a los objetivos específicos de la tesis, estos son:

- a) Establecer el estado del arte en materia de herramientas para evaluar riesgos en infraestructura,
- b) Combinar el MSR y los AG's, para generar un nuevo modelo de evaluación de riesgos,
- c) Determinar el nivel de riesgo de una presa en el Estado de México con la herramienta desarrollada, y
- d) Proponer un conjunto de recomendaciones, para que se tomen medidas preventivas de seguridad y mantenimiento, y consecuentemente se minimicen los riesgos de falla.

## **Alcance**

Así, la presente tesis propone una herramienta para evaluar los riesgos en presas de tierra, mediante la combinación de las técnicas mencionadas. Para efectos de este trabajo se considera que un riesgo es función de dos variables: la probabilidad de falla y el costo de las consecuencias ( $R = P_f \times C$ ). Si bien esta es una forma simplificada de analizar los riesgos, de manera intuitiva se observa que entre mayor sea la probabilidad de falla de un sistema, mayor será su riesgo. De manera similar, si crece el costo de las consecuencias, crece el riesgo.

En particular, dentro del presente documento la evaluación de riesgo anunciada, comprende únicamente el cálculo del costo de consecuencias asociado a la falla potencial de la presa mexiquense. Así, se asume que la probabilidad de falla es constante, y solo se cuantifica la parte del costo. Se considera que este enfoque es válido por que con los resultados que genera la herramienta propuesta, los tomadores de decisiones pueden identificar el nivel de costos esperados por la falla de una presa, y compararlo con la de otras estructuras similares. Se espera que este ejercicio permita jerarquizar las presas en función de los costos de consecuencias de falla esperados y, por ende, en función de sus riesgos (asumiendo una probabilidad de falla constante e igual para todas las presas que se pudieran estar estudiando).

Además, esta investigación se limita a la evaluación de riesgos en la Presa José Antonio Alzate, ubicada en el Estado de México. No obstante, la herramienta propuesta pretende ser de utilidad para evaluar otras presas e incluso otro tipo de estructuras. En cuanto a su audiencia, se espera que pueda ser empleada tanto por administradores de presas, como por alumnos, profesores e investigadores de la comunidad académica interesada en el tema.

### **Relevancia y originalidad del trabajo**

La técnica aquí propuesta es relevante, ya que puede mejorar la toma de decisiones en la asignación de recursos relacionados con las actividades de mantenimiento en presas de tierra, una actividad poco explorada en el Estado de México. No menos importante es la aportación que se hace desde el punto de vista académico, pues el hecho de combinar los métodos estudiados y emplear datos locales contribuye a la generación de nuevo conocimiento.

Es importante resaltar que, hasta donde el autor conoce, a pesar de que ya se han combinado con anterioridad el MSR y los AG's, no existe una aplicación para determinar los riesgos en presas del Estado de México. Con base en la literatura revisada, es evidente que en dicha entidad no se han realizado estudios sobre la evaluación de riesgos en presas de tierra, por lo menos de una manera cuantitativa, razón por la cual la presente investigación es original. De esta forma, para lograr los objetivos planteados se sigue la siguiente metodología.

### **Metodología**

Para llevar a cabo la investigación, primero se revisan los métodos existentes en materia de evaluación de riesgos, con énfasis especial en aquellos relacionados con obras de infraestructura. Con base en su análisis, se determinan sus bondades y limitaciones, para justificar la elección de los métodos de interés. Después, se ahonda en ellos y se describe el funcionamiento interno de cada uno.

Acto seguido, se propone la combinación de ambos, y se emplean herramientas computacionales para sistematizar el proceso de evaluación de riesgos. Posteriormente, la nueva técnica es aplicada al caso de estudio en el Estado de México, para determinar los niveles actuales de riesgo de la presa en cuestión. Una vez establecido dicho nivel, se comparan los resultados obtenidos mediante la combinación de métodos, con los que produce el MSR tradicional, para probar o rechazar la hipótesis, y validar el modelo propuesto.

Por último, se formulan un conjunto de recomendaciones, con la finalidad de que los responsables de la estructura puedan tomar decisiones basadas en cálculos, en lo que se refiere a las acciones de conservación de la estructura.

### **Estructura de la tesis**

El documento está estructurado en cuatro capítulos, en el primero se expone la situación actual de la Infraestructura hidráulica en el país, donde se destaca la importancia de las presas en el desarrollo del mismo. También se menciona el inventario de infraestructura hidráulica en México, reportando las principales presas de la República, y se discute la necesidad de evaluar riesgos en presas.

En el segundo capítulo, se hace una revisión de la literatura, donde se exponen los métodos que podrían ser empleados en la evaluación de riesgos, en particular: la Simulación de Montecarlo, el Método del Elemento Finito, las Funciones de Estado Límite, el Método de Superficie de Respuesta y los Algoritmos Genéticos. Al final del capítulo se realiza un análisis sobre dichos métodos y se resalta la importancia de los dos últimos para dar respuesta a la pregunta de investigación.

En el capítulo tres, se expone de forma detallada la filosofía del MSR y de los AG's. Así mismo se describen las características de la presa estudiada y se muestra el modelo propuesto, indicando cada una de las variables que lo alimentan. Finalmente, en el capítulo cuatro, se expone la aplicación del modelo en la presa José Antonio Alzate. De la misma manera, se realiza un análisis y la discusión de los resultados obtenidos, para proceder a la presentación de las recomendaciones y conclusiones de la investigación.

# CAPÍTULO 1

---

## SITUACIÓN ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA EN MÉXICO

---

### 1.1. Introducción

En el mundo actual, existe una gran preocupación sobre el manejo y cuidado de los recursos naturales, como el agua. A nivel internacional, una de las formas más comúnmente empleadas para su almacenamiento y distribución son las presas, que por su magnitud requieren de una gran cantidad de insumos para su construcción, por lo que suelen ser muy costosas en comparación con otro tipo de obras de ingeniería civil. Es por ello que las presas tienen una gran importancia para el desarrollo de un país, y su conservación es fundamental para que este se mantenga de manera sustentable.

Así, en este primer capítulo, se justifica la relevancia tanto social como económica de las presas. Se presentan además algunos datos generales de la situación actual de la infraestructura hidráulica en México, resaltando las principales presas del país. Acto seguido, se establece la necesidad de evaluar riesgos en infraestructura, y particularmente en las presas que como ya se dijo, son una de las obras de infraestructura con las que mayor cuidado se debe tener debido a su magnitud e importancia.

### 1.2. Importancia de las presas en el desarrollo de un país

La mayor parte del planeta está cubierto por agua, recurso indispensable del cual el ser humano hace uso para regular algunas funciones metabólicas, realizar actividades cotidianas, producir alimentos, y otras acciones relevantes. Por ello, los gobiernos deben formular políticas adecuadas, para dotar de dicho recurso natural a cada uno de los habitantes de una nación, lo que demanda la construcción de obras de infraestructura hidráulica.

En este sentido, las presas juegan un papel primordial en el almacenamiento y abastecimiento del vital líquido. No solo eso, también tienen por objetivo mitigar los daños producidos por lluvias torrenciales como inundaciones y sequías. De acuerdo con la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 2009), cuando una presa tiene más de 15 m de altura, y almacena más de 3 millones de m<sup>3</sup>, se considera grande. Así, las grandes presas a nivel internacional regulan unos 4,000 km<sup>3</sup> de agua al año, lo que representa aproximadamente el 31% de los recursos mundiales disponibles del vital líquido (Berga, 2009).

De nuevo, el agua almacenada y regulada por los embalses produce una gran variedad de beneficios para las comunidades cercanas, que van desde el abastecimiento del recurso a las poblaciones vecinas, hasta el riego de zonas agrícolas de la localidad. De hecho, entre los objetivos más importantes de las presas, se pueden mencionar también: el control de avenidas, la generación de energía hidroeléctrica (que es una fuente renovable, limpia, y medioambientalmente amigable), la piscicultura, la acuicultura, las actividades recreativas, y el turismo. Es por ello, que estas estructuras son de gran importancia para el ser humano, y su adecuada preservación debe ser estudiada y analizada para lograr que cumplan sus propósitos.

En materia económica, las presas son fuentes de riqueza, ya que tienen un impacto positivo tanto en el Producto Interno Bruto (PIB), como en el Índice de Desarrollo Humano -IDH- (FUNGLODE, 2009). Lo anterior, se debe a que esta infraestructura es la responsable, por ejemplo, de generar electricidad, actividad económica esencial para el desarrollo de las naciones.

Cabe mencionar que, en general, mientras los países desarrollados tienen una gran cantidad y variedad de infraestructura hidráulica, aquellos en vías de desarrollo deben enfocar sus esfuerzos a la construcción de nuevas obras, para alcanzar un nivel apropiado de almacenamiento de agua y producción de energía, logrando con ello la mejora de su desarrollo socio-económico. No menos importante es el hecho de vigilar y garantizar la seguridad de sus presas.

Habiendo establecido la importancia de las presas en el desarrollo de las naciones, ahora se procede a describir, en términos generales, la infraestructura existente en México en materia de presas. Posteriormente, se identifican las principales estructuras del país.

### **1.3. Infraestructura hidráulica del país**

Para entender la evolución de la infraestructura hidráulica en México, aquí se analizan los cambios registrados en la última década. La historia reciente indica que, hasta 1999, se contaba en la República con 160 grandes presas, más de 1,200 presas medianas, y 2,090 presas derivadoras, que en suma con otras obras hidráulicas permitían almacenar y regular 155 km<sup>3</sup> de agua. En contraste, naturalmente se contaba con 14 km<sup>3</sup> de almacenamiento en los lagos y lagunas dentro del territorio nacional (Castelán, 1999). Además, se contaba con una superficie de embalses de aproximadamente 500,000 hectáreas, las cuales eran empleadas para el desarrollo de la acuicultura, actividades recreativas y turísticas.

En cuanto al riego, de acuerdo con Castelán (1999), hasta ese año, el país ocupaba el séptimo lugar a nivel internacional en materia de infraestructura hidráulica. Por ejemplo, el 70 % de los 6.3 millones de hectáreas de zonas agrícolas (repartidas en 80 distritos de riego y 2500 unidades de agricultura de riego), eran irrigadas con agua proveniente de presas. Dicha área, a su vez, representaba el 30 % de la utilizada para actividades agrícolas, el 50 % del valor de la producción agrícola nacional, y el 70 % de las exportaciones agrícolas. En términos económicos, esto se puede traducir como el 5 % del PIB de ese año, y en materia laboral dicha actividad generó 6.5 millones de empleos directos.

A nivel país, más de 20 millones de personas (22 % del total de la población hasta 1999) recibían agua para usos domésticos proveniente de presas. Más aun, aproximadamente el 40 % del agua utilizada en la industria provenía de algún aprovechamiento superficial, donde las presas nuevamente, tenían entre sus funciones regular los flujos correspondientes, siendo los principales usuarios los ingenios azucareros, el sector petroquímico y el de alimentos.

En lo que se refiere a la hidroelectricidad, se contaba en el país con 64 centrales que generaban el 20% de la producción nacional y permitían cubrir la sobredemanda de energía, principalmente en horas pico, teniendo al sector doméstico como el más importante con una participación de casi el 90% de usuarios. Con respecto al control de avenidas, las presas eran esenciales para el desarrollo de las regiones afectadas por inundaciones, especialmente en la vertiente del Golfo de México (Castelán, 1999).

De hecho, en general, como resultado de la construcción de infraestructura para el control de avenidas, ha sido posible añadir más de 500,000 hectáreas a las zonas productivas

(principalmente agrícolas y ganaderas) ya existentes. Es decir, las nuevas obras han permitido que el agua se aproveche no sólo para el control mencionado, sino también para riego.

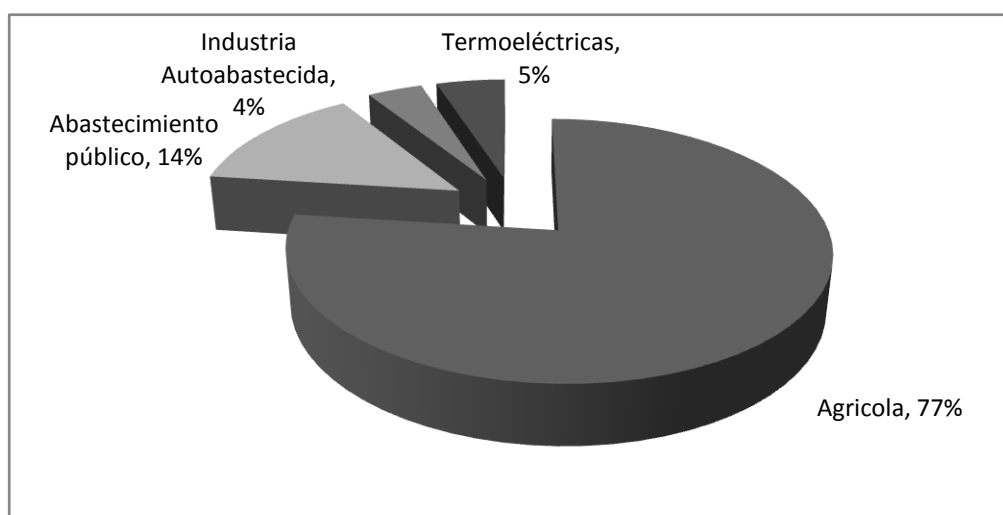
Históricamente, en México las actividades y asentamientos humanos se han dado en zonas donde el agua es escasa. Para equilibrar esta situación, ha sido necesario invertir importantes sumas de recursos en la construcción de infraestructura para regular los escurrimientos en las cuencas del país, situación que ha permitido mejorar las condiciones durante los últimos años. Para completar el panorama hasta ahora descrito, se presentan enseguida cifras más recientes, que permiten mostrar la evolución en este rubro durante prácticamente una década.

Hasta el 2008, la infraestructura de la nación, de acuerdo con el documento “Estadísticas del Agua en México”, de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2008), incluía 4,000 presas de almacenamiento, 6.46 millones de hectáreas de riego (de las cuales 3.5 pertenecen a 85 distritos de riego, y 2.96 a más de 39 mil unidades de riego). La Tabla 1.1 muestra los crecimientos relativos de la infraestructura para riego en el país, registrados entre los años de 1999 y 2007.

**Tabla 1.1 Crecimiento relativo de la infraestructura de riego en México de 1999 a 2007 (CNA, 2008)**

Año	No. de presas	Área de riego (ha)	Distritos de riego	Unidades de riego
1999	3,450.00	6,300,000.00	80	39,492.00
2007	4,000.00	6,460,000.00	85	más de 39,000
% de crecimiento	15.94%	2.54%	6.25%	-----

Cabe mencionar que los distritos de riego, han sido proyectos promovidos por el Gobierno Federal desde 1926, y nacieron en paralelo con la Comisión Nacional de Irrigación. En esencia, se componen de distintas obras, entre las que se pueden mencionar: vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos y canales. La Figura 1.1 resume la distribución de los usos que se le da al agua en México, donde se aprecia que la agricultura, con un 77 % del total predomina sustancialmente sobre las otras tres categorías de aplicación que son: abastecimiento público (14 %), plantas termoeléctricas (5 %), e industria autoabastecida (4%).



**Figura 1.1 Usos del agua en México (Adaptado de: CNA, 2008)**

Es importante mencionar que, a partir de 1992, la CNA comenzó a transferir los distritos de riego a los usuarios. El proceso tomó 15 años, ya que para Diciembre del mismo año, ya se había cedido el 99 % de la superficie total de los distritos de riego, excepto por 3 de ellos, los

cuales se indican en la Tabla 1.2. En paralelo, en las planicies tropicales y subtropicales del territorio, donde se tienen altos niveles de humedad e inundaciones frecuentes, el gobierno federal constituyó los denominados “distritos de temporal tecnificado”, que incluyen obras hidráulicas para desalojar excedentes de agua. De hecho, al igual que los distritos de riego, los 2.74 millones de hectáreas de temporal tecnificado en el país, se han repartido gradualmente a los usuarios.

**Tabla 1.2 Distritos de riego transferidos parcialmente hasta el 2007 (CNA, 2008)**

No. de Distrito	Nombre	Entidad Federativa	Porcentaje Transferido
3	Tula	Hidalgo	53.87%
18	Colonias Yaquis	Sonora	83.39%
100	Alfajayucan	Hidalgo	98.16%

En otro tenor de ideas, las plantas potabilizadoras han sido útiles para mejorar la calidad del agua de las fuentes superficiales y subterráneas, que finalmente se destinan para el uso público urbano. De acuerdo con la CNA (2008), México logró potabilizar, en 2007, 86.4 m<sup>3</sup>/s en las 541 plantas operando dentro del país. Asimismo, se trataron 79.3 m<sup>3</sup>/s de agua en las 1,710 plantas en operación, es decir, el 38.3% de los 207 m<sup>3</sup>/s recolectados en los sistemas de alcantarillado.

En materia de generación de energía, de acuerdo con la CNA (2008), varios tipos de centrales como las de vapor, las duales, las carboeléctricas, las de ciclo combinado, las de turbogás y las de combustión, que forman parte del ramo de las termoeléctricas, generaron en conjunto, durante 2007, 198.79 TW-h (lo que representó el 87 % de la producción nacional). Similarmente, las plantas hidroeléctricas emplearon un volumen de agua de 122.8 miles de millones de m<sup>3</sup>, y generaron el 13 % restante de la producción del país, lo cual representó 29.7 TW-h. Con este panorama en mente, y teniendo en cuenta los datos generales de la infraestructura hidráulica descritos, ahora se presentan las principales presas del país.

#### **1.4. Principales presas de México**

Hasta 2007, en el territorio nacional existían alrededor de 4 mil presas (CNA, 2008), de las cuales 667 estaban clasificadas como grandes presas, de acuerdo con la definición de la ICOLD (2009). Así mismo, la capacidad de almacenamiento de todas las presas de la nación era de 150 km<sup>3</sup>. En la Figura 1.2 se muestra el volumen almacenado en dichos embalses, durante el periodo 1990-2007. Así mismo, se observa que han habido fluctuaciones en los volúmenes representados, situación que depende de los niveles de precipitación que se registran en el país en un año dado.



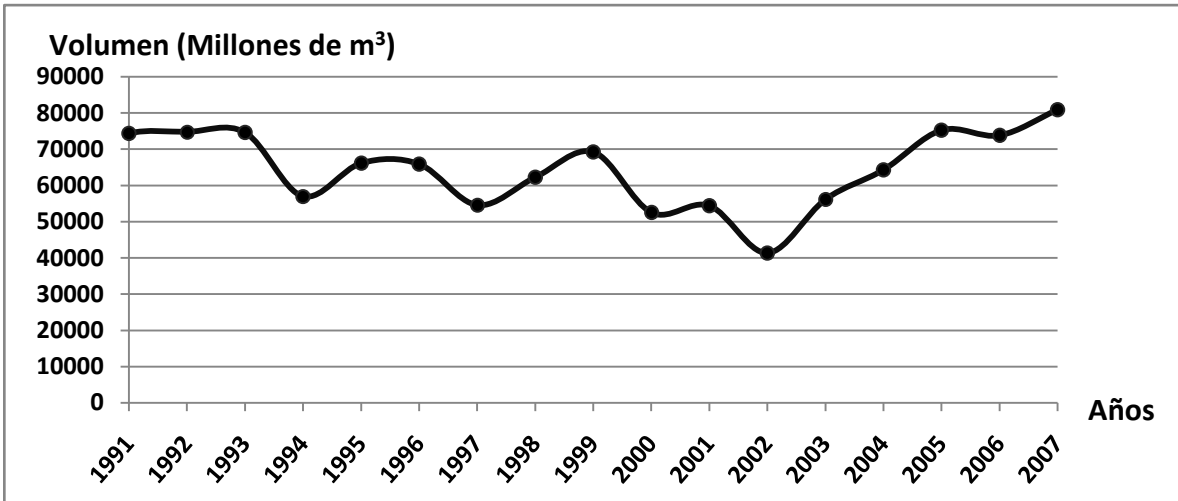


Figura 1.2 Volumen almacenado en las principales presas de México, serie anual de 1990-2007 en millones de m<sup>3</sup> (CNA, 2008)

De acuerdo con la CNA (2008), las 52 presas del país con mayor capacidad de almacenamiento representan casi el 70 % de la capacidad total. Su ubicación a lo largo de la República Mexicana, se muestra en la Figura 1.3.

Pese a que aparentemente el sur de la república presenta condiciones más favorables en términos de humedad para la construcción de presas, la realidad indica lo contrario, ya que en el norte se ubican la mayor parte de las obras de infraestructura (73 % del total). Esto puede deberse a la escasez de lluvias que se tiene en la región norte de México en comparación con el sur, lo que hace indispensable el almacenamiento del líquido.



Figura 1.3 Principales presas en México por su capacidad de almacenamiento (CNA 2007)

Por otro lado, en las Tablas 1.3 y 1.4, se presenta el uso y la capacidad de almacenamiento de las 52 principales presas del país. Como es evidente, las presas más jóvenes tienen una edad promedio de 9 años (excepto El Cajón de Nayarit, terminada en 2006), y se nota un predominio de estructuras en el Estado de Sinaloa (13.5% del total).

La irrigación y la generación de energía eléctrica (96 % del total) representan los principales usos del agua proveniente de presas. Cabe aclarar que la presa de mayor capacidad efectiva es Chicoasén (2,400 MW), la de mayor altura es Zimapán (297 m), y la de mayor volumen útil es La Angostura (11,872.54 hm<sup>3</sup>). Finalmente, el total de las presas alcanzan una capacidad al Nivel de Aguas Máximo Extraordinario (NAME) de 150,767.92 hm<sup>3</sup> y una capacidad efectiva de 10,636.56 MW (CNA, 2007).

Tabla 1.3 Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presas de México (CNA, 2007)

Nombre Oficial	Nombre Común	Capacidad al NAME (hm <sup>3</sup> )	Capacidad al NAMO (hm <sup>3</sup> )	Altura de la cortina (m)	Año de terminación	Región Hidrológico-Administrativa	Entidades Federativas	Usos	Capacidad Eléctrica (MW)	Quién Opera	Corriente en la que se ubica la presa	Volumen útil 2007 (hm <sup>3</sup> )
Dr. Belisario Domínguez	La Argostura	19 736	10 727	143.00	1974	XI	Chiapas	G	900	CFE	Río Grijalva	11 872.54
Nezahualcoyotl	Malpasos	14 056	9 605	136.00	1964	XI	Chiapas	G	1090	CNA	Río Grijalva	8 149.94
Infiernillo	Infiernillo	12 164	9 340	148.50	1963	IV	Guerrero - Michoacán	G, C	1000	CFE	Río Balsas	8 392.50
Presidente Miguel Alemán	Tenasascal	9 106	8 119	75.75	1955	X	Oaxaca	G, C	354	CNA	Río Tonto	5 436.62
General Vicente Guerrero	Aguamilpa	6 950	5 540	185.50	1993	VIII	Nayarit	G, I, A	960	CFE	Río Santiago	2 121.40
General Venustiano Carranza	Las Adjuntas	5 495	3 900	60.00	1971	VI	Tamaulipas	G, I, A	66	CNA	Río Solo la Marina	1 870.57
Internacional La Amistad	La Amistad	7 069	3 887	77.00	1969	VI	Coahuila - Texas	G, I, A, C	32	CILA	Río Bravo	3 340.06
Internacional Falcón	Falcón	5 038	3 273	50.00	1953	III	Tamaulipas - Texas	A, C, G	90	D.R. # 010	Río Humaya	2 155.16
Adolfo López Mateos	El Humaya	4 035	3 087	105.50	1964	III	Sonora	G, I	19	CNA	Río Humaya	2 313.10
Alvaro Obregón	El Oviachic	4 200	2 989	90.00	1952	II	Sonora	G, I	135	CFE	Río Yarequi	2 489.00
Plutarco Elías Calles	El Novillo	3 693	2 925	138.50	1964	II	Sonora	G, I	60	D.R. # 075	Río Yarequi	2 801.95
Miguel Hidalgo y Costilla	El Maitone	3 917	2 908	81.00	1956	III	Sinaloa	G, I	422	CNA	Río Comchos	2 095.10
Luis Donatelo Colosio	Huiles	4 568	2 903	164.75	1916	VI	Sinaloa	G, I	0	CNA D.R.	Río Comchos	2 140.03
La Boquilla	Lago Toronto	3 350	2 873	80.00	1946	VII	Chihuahua	I, C	750	D.R. # 17	Río Nazas	1 879.84
Lázaro Cárdenas	El Palmito	4 438	2 872	104.70	2006	VIII	Durango	G	100	CFE	Río Santiago	1 867.26
Leonardo Rodríguez Alcázar	El Cajón	2 383	2 250	186.00	1953	III	Nayarit	G, I	92	D.R. # 010	Río San Lorenzo	2 232.13
José López Portillo	El Combeiro	3 388	2 250	134.00	1983	III	Sinaloa	G, I	600	D.R. # 063	Río Sinaloa	1 289.04
Gustavo Díaz Ordaz	Bacurato	2 900	1 860	116.00	1981	IV	Guerrero	G	2400	CFE	Río Balsas (D)	814.20
Carlos Ramírez Ufesa	El Caracol	1 581	1 414	126.00	1988	IV	Guerrero	G	232	CFE	Río Balsas (D)	533.64
Manuel Moreno Torres	Chocasoán	1 443	1 376	261.00	1980	XI	Chiapas	G	2400	CFE	Río Grijalva	533.64
Ing. Fernando Hirat	Zimapan	1 426	1 360	297.00	1996	IX	Hidalgo - Querétaro	G	232	D.R. # 04	Río Moztzuma	1 115.90
Venustiano Carranza	Don Martín	1 385	1 313	35.00	1930	VI	Coahuila	G, I, A, C	360	CNA	Río Sotero	923.30
Miguel de la Madrid	Centro de Oro	4 400	1 250	70.00	1985	X	Oaxaca	G, I	430	CNA	Río Santo Domingo	1 809.52
Cuauhtémoc Cárdenas	El Cochillo	1 864	1 823	65.00	1956	VI	Guerrero León	A, I	430	CFE	Río San Juan	1 823.05
Antonio Ruiz Curiel	El Cerrito	1 864	1 823	65.00	1956	VI	Chiapas	G, I	10	CNA	Río Grijalva	1 823.05
Adolfo Ruiz Cortines	Mexcalá	1 836	960	62.00	1955	II	Sonora	G, I	10	CNA	Río Tero	1 826.76
Benito Juárez	El Mirador	1 940	947	85.50	1961	V	Sonora	G, I	10	D.R. # 019	Río Tero	541.83
Benito Juárez	El Azúcar	2 304	824	49.00	1946	VI	Tamaulipas	I	867.73	CNA	Río San Juan	845.93
Manuel R. Gómez	Solis	980	728	51.70	1980	VIII	Guerrero	I, A	14	CNA	Río Yarequi	845.93
Lázaro Cárdenas	La Argostura	1 268	703	73.20	1942	III	Sonora	G, I	14	CNA	Río Yarequi	659.39
Szalona	Szalona	971	673	81.00	1948	III	Sinaloa	G, I	14	CNA	Río Tamazula	659.39
Constitución de Apaxtla	Chilalón	806	601	105.00	1989	IV	Jalisco	I	10 156.00	CNA	Río Tepalcates	456.03
<b>SUBTOTAL</b>	<b>52</b>	<b>140 206.76</b>	<b>95 742.57</b>									

El Volumen útil histórico es al 1o de octubre, en millones de metros cúbicos.  
 I: Irrigación  
 A: Uso público  
 C: Control de avenidas  
 b: Esta presa forma parte del sistema Cutzamala operado por el Organismo de Cuenca de Agua del Valle de México  
 1 millón de metros cúbicos equivale a 1 hm<sup>3</sup>  
 G: Generación de energía eléctrica.  
 FUENTE: CONAGUA, Subdirección General de Programación, Elaborado a partir de datos de la Subdirección General Técnica.

Tabla 1.4 Capacidad de almacenamiento y uso de las principales presas de México (CNA, 2007) [continuación]

Nombre Oficial	Nombre Común	Capacidad al NAME (hm³)	Capacidad al NAMMO (hm³)	Altura de la corona (m)	Año de terminación	Región Hidrológico-Administrativa	Entidades Federativas	Usos	Capacidad Efectiva (MW)	Quién Opera	Corriente en la que se ubica la presa	Volumen útil 2007 (hm³)
Estudiante Ramiro Caballero	Las Animas	671	571	31.20	1976	IX	Tamaulipas	I		D.R. # 082	Arroyo Las Animas	480.53
José María Morelos	La Villa	710	541	73.00	1968	IV	Michoacán - Guerrero	G, I	280	CFE	Río Balsas	142.30
Joséfa Ortiz de Domínguez	El Sabino	590	514	44.00	1967	III	Sinaboa	I		D.R. # 076	Río Alamos	505.73
Colón de Peña	Tomatlán	703	467	68.00	1976	VIII	Jalisco	I		D.R. # 09	Río Tomatlán	399.87
Chicayán	Paso de Piedras	570	457	30.00	1976	IX	Veracruz	I		D.R.	Río Chicayán	67.54
El Gallo	El Gallo	585	441	30.00	1991	IV	Guerrero	G	60	D.R. # 057	Río Cutzamala	223.58
Tepuxtepec	Tepuxtepec	538	425	43.00	1972	VIII	Michoacán	G, I	79.5	CFE	Río Lerma	502.01
Valle de Bravo	Valle de Bravo	458	418	56.00	1944	IV	México	A		CNA	Río Valle de Bravo	281.02
Ing. Aurelio Benavente V.	El Salto	810	415	73.00	1966	III	Sinaboa	I		D.R. # 108	Río Etoa	363.90
Manuel M. Dieguez	Santa Rosa	420	403	114.00	1964	VIII	Durango	G	61	CFE	Río Santiago	296.66
Francisco Zarco	Las Tortugas	438	365	39.50	1968	VII	Durango	C, I		DR # 017	Río Nazas	93.36
Luis L. León	El Gradero	850	356	62.00	1963	VI	Chihuahua	I, C		D.R. # 090	Río Conchos	236.45
Plutarco Elías Calles	Calles	391	350	67.00	1931	VIII	Aguascalientes	I		DR # 001	Río Blanco	126.74
Francisco J. Madero	Las Virgenes	544	348	57.00	1949	VI	Chihuahua	I		D.R. # 005	Río Conchos	225.40
Manuel Avila Camacho	Valsequillo	390	304	85.00	1946	IV	Puebla	I		DR # 030	Río Atoyac	284.75
Manuel Guillermo Blake Aguilera	El Sabinal	487	300	81.20	1985	III	Sinaboa	C, I		D.R. # 063	Arroyo Ocoroni	108.99
José López Portillo	Cerro Prieto	393	300	50.00	1984	VI	Nuevo León	A, I		CNA	Río Pabillo y C.	256.42
General Ramón Corona Madrigal	Trigomil	324	250	107.00	1993	VIII	Jalisco	I		D.R. # 084	Río Ayuquila	225.16
Vicente Guerrero	Palos Altos	300	250	66.50	1968	IV	Guerrero	I		D.R. # 057	Río Polutla	211.80
Federalismo Mexicano	San Gabriel	390	247	43.60	1981	VI	Durango	I, A		D.R. # 103	Río Florido	218.81
<b>SUBTOTAL</b>	<b>52</b>	<b>10 561.16</b>	<b>7 722.33</b>						<b>480.50</b>			

El Volumen útil histórico es al 1o de octubre, en millones de metros cúbicos.  
 I: Irrigación  
 A: Uso público  
 NAME: Nivel de Aguas Máximo Extraordinario  
 C: Control de avenidas  
 NAMMO: Nivel de Aguas Máximo Ordinario  
 b: Esta presa forma parte del sistema Cutzamala operado por el Organismo de Cuenca de Agua del Valle de México  
 1 millón de metros cúbicos equivale a 1 hm³  
 G: Generación de energía eléctrica  
 FUENTE: CONAGUA, Subdirección General de Programación, Elaborado a partir de datos de la Subdirección General Técnica.

Una vez presentadas las características de las principales presas de México, se procede a explicar la importancia de evaluar los riesgos en este tipo de estructuras. Cabe mencionar, que en el Capítulo 3, se presentan más detalles de la presa en estudio localizada en el Estado de México.

### **1.5. La necesidad de evaluar riesgos en presas**

Aunque algunos investigadores han canalizado sus esfuerzos hacia temas relacionados con la seguridad de presas, la gran mayoría se limita al estudio de sus funciones hidráulicas. Desafortunadamente, las solicitaciones de tipo natural, representan un riesgo para estas y otras obras, debido principalmente a la presencia de sismos, lluvias y eventos meteorológicos extraordinarios, que pueden ocurrir durante su vida útil, y causar daños estructurales de gran magnitud.

De nuevo, las presas forman parte de la infraestructura hidráulica del país, y su operación se traduce en desarrollo y bienestar económico para las comunidades, por lo que es importante evaluar sus posibles riesgos de falla. Además, es necesario proponer técnicas de mantenimiento adecuadas, ya que el posible colapso en dichas estructuras puede ocasionar grandes pérdidas humanas, ambientales y económicas (Rivero, 2009).

Por ejemplo, entre las catástrofes más lamentables en la industria de las presas, se puede mencionar la inundación de Johnstown, el 31 de mayo de 1889, causada por la falla de la presa South Fork en Estados Unidos. En aquel acontecimiento, se destruyó la ciudad de Johnstown y murieron más de 2,200 personas, como consecuencia de la inundación originada por el colapso de la presa que tenía una altura de 22 m, y cuya estructura estaba formada por materiales graduados (CNA, 1999).

En lo que se refiere a México, un estudio realizado por Aguirre (2004), concluyó que en el país los eventos sísmicos son más estudiados que los hidrometeorológicos, por lo que es notoria la falta de sistemas públicos de alerta, que puedan prevenir masiva y oportunamente a la población, sobre los riesgos mencionados en los párrafos anteriores. Según ese autor, no se cuenta con planes de desalojo para comunidades amenazadas por inundación. En este sentido, Aguirre (2004) afirma 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 atención de las autoridades correspondientes.

Aunque la literatura en materia de daños provocados por eventos meteorológicos es relativamente escasa en comparación con los sísmicos, en el trabajo titulado “Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2001”, Bitrán et al. (2002) exponen los daños que han ocasionado las lluvias torrenciales, deslaves y desbordamientos de ríos y presas, a lo largo del territorio nacional. Aquí, sobresale el resumen de los daños registrados en 2001, que resultaron ser: 95 muertos; 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 términos económicos, esto representó alrededor de 360 millones de pesos en pérdidas totales.

Por lo anterior, Fuentes (2009) afirma que *“México es considerado un país de alta vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos, al estar situado entre dos océanos y al contar con más de 11 mil kilómetros de litorales”*. Dicho autor también sostiene que los fenómenos

naturales que con mayor frecuencia se presentan en México son la sequía, las tormentas de granizo, las heladas, los frentes fríos, las inundaciones y los huracanes.

Como se mencionó en la introducción, debido al incremento de 0.2 grados celcius de temperatura por década en el planeta, el número de huracanes por año ha tendido a aumentar. Prueba de ello, es el hecho de que más del 80% de las pérdidas económicas por desastres en el país durante los últimos años, han sido causadas por las lluvias (Fuentes, 2009). El mismo autor ha manifestado que el peor año fue el 2007, por la magnitud de las inundaciones en Tabasco (que afectaron a tres cuartas partes del Estado), y por los graves daños debidos a los deslaves que bloquearon parcialmente el río Grijalva. En aquel año, a nivel nacional, resultaron afectadas más de 250 mil viviendas y 5,500 escuelas, lográndose así identificar a 17 entidades ubicadas en zonas de peligro, donde vive casi la mitad de la población del país.

En paralelo, la CNA (2008) expresó que entre 1970 y 2007, 162 ciclones impactaron en México, de ellos, 45 fueron huracanes moderados y 19 huracanes intensos, mientras que los demás solo fueron tormentas o depresiones.

Es importante mencionar que las consecuencias más graves de estos sucesos afectan mayoritariamente a la población de escasos recursos, quienes, debido a su pobreza y a que habitan viviendas precarias o ubicadas en zonas de alto riesgo, son generalmente afectadas por la ocurrencia de dichos eventos. Consecuentemente, son quienes mayores pérdidas humanas y económicas reportan cuando se presentan los fenómenos.

Por ello, Merrit et al. (1999) mencionan que los profesionales de la ingeniería civil deben de tomar en cuenta los factores que ponen en riesgo la salud o seguridad pública y que tienen el potencial de provocar pérdidas económicas a la comunidad en el momento de elaborar sus proyectos.

En este tenor de ideas, se han generado esfuerzos de investigación por parte de académicos, profesionistas, instituciones y gobiernos, encaminados a evaluar los riesgos de falla en presas y tratando de buscar nuevos enfoques, que permitan modelar el comportamiento de esas estructuras, para predecir las consecuencias y tomar medidas preventivas oportunamente. Así, en el siguiente capítulo se presentan algunos de ellos, se evalúan críticamente, y se seleccionan los que, con base en el análisis, puedan contribuir a la evaluación de riesgos en presas de la Entidad Mexiquense.

# CAPÍTULO 2

---

## ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1. Introducción

Para resolver problemas relacionados con la evaluación de riesgos en presas, existe una gran variedad de métodos. Carrasco (2005) sostiene que estos se pueden clasificar en 2 grandes grupos: determinísticos y probabilísticos. Los primeros son los que se abordan en los reglamentos y normas técnicas para el diseño de estructuras, y normalmente consisten en pasos bien definidos que, si se siguen cabalmente, producen los resultados esperados. Ejemplos de estos son la respuesta estructural de una columna, que depende de su geometría, materiales de construcción y de las solicitaciones o acciones externas que sobre ella actúan.

En estos métodos, es común emplear coeficientes de seguridad que reducen las resistencias de los materiales, y otros que amplifican las acciones<sup>1</sup>. En dichos coeficientes se tiene implícito un riesgo, que se determina con base en los niveles de peligro asumidos por la sociedad al llevar a cabo ciertas actividades. Por ejemplo, al usar un avión los pasajeros están expuestos a un riesgo de muerte, que se ha cuantificado como de 0.000012 al año, es decir, que 12 personas de cada 100,000 que emplean las líneas aéreas del mundo, pierden la vida al año por esta actividad (Gómez y Alarcón, 1992 como se cita en Carrasco, 2005).

Estos métodos, contenidos en reglamentos, pueden ser limitados para evaluar los riesgos de otras estructuras, ya que generalmente están asociados a ciertos tipos de elementos estructurales, como vigas o columnas. Sin embargo requieren adaptaciones para poder emplearse en nuevos elementos, por lo que es necesario recurrir a otro tipo de técnicas que permitan llevar a cabo la evaluación requerida, que en el caso del presente documento son las presas de tierra. En este sentido, se cuenta con los denominados métodos probabilísticos (Carrasco, 2005).

Los métodos probabilísticos, hacen uso de estadísticas (primero y segundo momento estadístico) para representar las variables aleatorias que intervienen en la resistencia y solicitaciones a las que se ve sometida una estructura. En este enfoque, se consideran las incertidumbres geométricas, de resistencias de materiales y de cargas que actúan sobre la estructura de interés, y con base en estas consideraciones se calcula la seguridad de la misma.

Cabe destacar que los métodos probabilísticos parecen más aceptables que los determinísticos para la evaluación de riesgos en presas de tierra, y de hecho entidades como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1992), los han utilizado para evaluar y analizar riesgos en sistemas acuáticos. En el caso de las presas, la utilidad de estos métodos se debe a que las resistencias de los materiales que las componen tienen variaciones, así como las fuerzas a las que se ven sometidas.

Por otro lado, como métodos que pueden ser empleados para evaluar riesgos en presas, se puede mencionar a la simulación de Montecarlo (SMC), el Método de Elemento Finito (MEF),

---

<sup>1</sup> En el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), por ejemplo, se conocen como Factores de Reducción y Factores de Carga respectivamente.

las Funciones de Estado Límite (FEL), el Método de Superficie de Respuesta (MSR), y a los Algoritmos Genéticos (AG's), entre otros. Es importante mencionar que, no necesariamente estos métodos nacieron con la intención de evaluar riesgos, pero se exponen aquí porque se pueden emplear como herramientas que contribuyan a realizar análisis de riesgos. Así, cada uno de ellos será brevemente descrito a continuación.

## 2.2. Simulación de Monte-Carlo

De acuerdo con Vázquez (2008), la SMC es una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística y de las computadoras para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales. La SMC fue bautizada así por su analogía con los juegos de ruleta de los casinos, siendo el más célebre el de Monte Carlo, ubicado en el Principado de Mónaco, en Europa, que fue inaugurado en 1861 (Faulín y Angel, 2009).

En esencia, la SMC consiste en crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad que se quiere analizar, identificando las variables cuyo comportamiento aleatorio determina su comportamiento (FCE, 2005). Una vez definidas dichas variables, se lleva a cabo un experimento que consiste en generar muestras aleatorias para dichas variables, y analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados. Tras repetir "n" veces este experimento, se dispone de "n" observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual es de utilidad para entender su funcionamiento. Entre más grande sea el número "n", mayor será la precisión alcanzada.

De acuerdo con la FCE (2005), el algoritmo de la SMC está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de transformación inversa, el cual a su vez está basado en las distribuciones acumuladas de frecuencias. Una de las primeras aplicaciones de la SMC fue en el problema de las Agujas de Bufón<sup>2</sup> (Vazquez, 2008). Posteriormente fue utilizado para solucionar integrales que no se pueden resolver por métodos analíticos, a través de la implementación de números aleatorios (DM, 2006). Otros usos posteriores de la SMC fueron: el problema de Fermi, la dispersión Compton, la ecuación de Boltzman, así como la descripción matemática del problema de transporte de fotones (IPV, 2009).

Actualmente es empleado para resolver ciertos problemas estocásticos y determinísticos, donde el tiempo no juega un papel importante (FCE, 2005). Más aun, de acuerdo con la FCE (2005), los principales campos de aplicación del SMC son: la criptografía, la cromodinámica cuántica, la densidad y flujo de tráfico, el diseño de reactores nucleares, los diseños de integración a gran escala, la econometría, la evolución estelar, y la física de materiales. Cabe aclarar que la SMC también es empleada como método cuantitativo de organización industrial, así como en el diseño de programas de computadora, que permiten dar pronósticos sobre temas como: el índice de la bolsa, las prospecciones en explotaciones petrolíferas y el control de radioterapia contra el cáncer.

En otras aplicaciones, se ha empleado en la determinación de las propiedades de retículos poliméricos y las características de los recipientes necesarios para el transporte de neutrones. No menos importante resulta la teoría de colas a problemas comerciales como almacenamiento,

---

<sup>2</sup> Las agujas de Bufón es un método para calcular el número  $\pi$ , dicho número se calculó trazando un círculo y dividiendo lo que mide su circunferencia entre lo que mide su diámetro, si se desea tener más información sobre este tema se puede consultar la siguiente liga: [http://es.wikipedia.org/wiki/Aguja\\_de\\_Buffon](http://es.wikipedia.org/wiki/Aguja_de_Buffon)



sustitución, mantenimiento de equipos y gestión de seguros. Como se puede apreciar, las aplicaciones del SMC son múltiples, lo cual se debe a sus bondades, descritas enseguida.

Entre las principales ventajas que ofrece la SMC sobresale el hecho de que proporciona soluciones “aproximadas” a una gran variedad de problemas matemáticos, posibilitando la realización de experimentos con muestreos de números pseudoaleatorios en una computadora (Faulín y Angel, 2009). Así mismo, el método es prácticamente aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico, además de ser muy versátil, por lo tanto puede usarse para solucionar una amplia gama de situaciones (IPV, 2009).

En contraste, los resultados que ofrece la SMC no son del todo precisos ya que tienen asociado un error inevitable debido a la discretización que requiere para operar (DM, 2006). En adición, cuando el tamaño de las muestras es relativamente reducido, los resultados obtenidos en la simulación pueden ser muy sensibles a las condiciones iniciales. En el extremo opuesto, cuando los valores buscados son excesivamente pequeños (ej: probabilidades de falla del orden de  $10^{-8}$ ), requiere la inversión de mucho tiempo en su estimación, ya que el período de cálculo es inversamente proporcional al orden del valor buscado (Delgado y Cho, 2008). Pese a estas limitaciones, es innegable que la SMC es una herramienta muy poderosa por su versatilidad.

### **2.3. Método del Elemento Finito**

De acuerdo con Cortínez y Girón (2009), se trata de un método general para la solución de problemas que involucran ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución.

Es importante notar que el comportamiento en el interior de cada elemento, queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las funciones adecuadas de interpolación o funciones de forma. Es, por lo tanto, una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos (CIEMAD, 2009).

Las ideas básicas de este método se originaron para resolver problemas de análisis estructural de la industria aeronáutica en la década de los 50's. Por lo que en la década de los 60's el método fue generalizado para los análisis de tensión, flujo de fluidos y transferencia de calor (Cortínez y Girón, 2009). Así mismo, el primer libro sobre elementos finitos fue escrito por Zienkiewicz y Cheung, y publicado en 1967 (De La Colina, 2009). Posteriormente, en la década de los 70's, el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del medio continuo (Vélez et al., 2009). Hoy el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante el proceso descrito.

A pesar de que en la actualidad es una herramienta ampliamente usada, en sus orígenes el Método del Elemento Finito (MEF) no tuvo una aceptación general en la práctica de la ingeniería, debido principalmente a la escasa disponibilidad de computadoras, y a la necesidad de contar con conocimientos profundos de la técnica y de la programación computacional (Cortínez y Girón, 2009). Si bien al principio dicho método resolvía problemas estructurales de ingeniería civil (Vélez et al., 2009), rápidamente se detectó su eficacia, y comenzó a emplearse en otros ambientes.

Debido a la precisión de los resultados que genera el MEF, se ha empleado en sectores como el aeroespacial, el nuclear, el militar, el automotriz y el transporte (Botello, 2009). Esta amplitud de aplicaciones ha traído como consecuencia la creación de nuevos elementos 2D, 3D, y

métodos de integración para problemas no lineales, que se han unido a los elementos originales (ej: barras y placas). Actualmente, su desarrollo y aplicación son extensos, ya que las computadoras personales modernas manejan sin inconvenientes programas poderosos de cálculo que emplean el MEF como base.

Es importante resaltar que el MEF es una virtualización de los problemas físicos reales, por lo que es responsabilidad del analista hacer las suposiciones pertinentes, para lograr la mejor aproximación a la solución del problema, en un periodo corto, siempre satisfaciendo los objetivos del cálculo. Con estas premisas, se aprecia que el MEF es un método adecuado para diseñar estructuras o productos, y para analizar distintos escenarios de cargas. En lo que se refiere al análisis de riesgo, el MEF se puede emplear para calcular los efectos de cargas extraordinarias en una estructura y observar su comportamiento.

Por ejemplo, en el caso de las presas de tierra, se podría generar un modelo MEF que se sometería a variaciones de cargas provocadas por la presencia hipotética de sismos o tormentas, lo que permitiría identificar los elementos críticos de dicha obra. Si resulta que la cimentación es el elemento mayormente esforzado, entonces se tendrían que tomar acciones para mitigar el riesgo de falla de la presa como consecuencia del colapso de su cimentación.

Si la presa esta por diseñarse, entonces los ejercicios de análisis con el modelo MEF son de gran utilidad ya que permiten considerar distintos escenarios de carga durante el diseño. Por otro lado, si la estructura ya ha sido construida, se pueden tomar acciones de mantenimiento con base en los resultados del ejercicio de análisis con el modelo MEF.

Una de las principales ventajas de este método es la facilidad de implementación en un programa computacional. De hecho, su programación es una condición básica para utilizarlo, pues se requiere un número muy elevado de operaciones para resolver los sistemas algebraicos implícitos en el método (Cortínez y Girón, 2009). En el mismo tenor de ideas, Fernández (2009) establece otras ventajas, como la de realizar optimizaciones de producto en tiempos cortos y a costos razonables. No menos importante es la posibilidad de evaluar alternativas de diseño, nuevas funciones o sensibilidades de parámetros, e interrelaciones entre los mismos, que de otra manera serían inabordables.

Adicionalmente, el MEF reduce el número de prototipos y de ensayos experimentales requeridos para un determinado análisis, debido a que permite la manipulación matemática de un modelo antes de construir prototipos (Botello, 2009). También contribuye a mejorar la calidad y robustez de los diseños, debido a que puede encontrar una variedad de soluciones, dando al analista la posibilidad de elegir la que más le convenga. Finalmente, reduce los riesgos de falla en nuevos diseños y ayuda a soportar la toma de decisiones en términos de mantenimiento.

En el otro extremo, según Fernández (2009), las desventajas del MEF son: (i) el método requiere la elaboración de modelos discretos cuya construcción puede llegar a complicarse, (ii) es recomendable que se cuente con ensayos experimentales que se puedan emplear para definir las condiciones de frontera del modelo MEF, (iii) para obtener resultados coherentes es indispensable introducir datos “precisos” sobre los materiales, cargas, y condiciones de contorno (iv) entre mayor precisión se requiera, es necesario incrementar el número de elementos que constituyen el modelo, lo cual se traduce en más tiempo de cálculo (v) el MEF requiere de recursos humanos especializados, que sepan los fundamentos del enfoque y la utilización del software correspondiente, para que se puedan interpretar los resultados de manera adecuada, y (vi) la

capacitación del personal y la adquisición de software puede llegar a ser costosa. Pese a estas limitaciones, el MEF es un método de gran utilidad para llevar a cabo análisis de distinta índole en la ingeniería civil.

## 2.4. Estados Límite

El diseño por Estados Límite (EL) es una metodología cuyo objetivo es reducir la probabilidad de falla de una estructura, mediante la obtención de valores aceptables, y considerando numerosas fluctuaciones en dichos estados. En esencia, estos estados son aquellos en los que la estructura deja de cumplir la función para la que fue proyectada (Gutiérrez, 2005). Los EL son: Estado Límite Último (ELU) y Estado Límite de Servicio (ELS), mismos que se describen a continuación.

### 2.4.1. Estado Límite Último

Los ELU se basan en la seguridad y capacidad de carga última de la estructura y comprenden aspectos como resistencia a (Gutiérrez, 2005):

- fluencia,
- fractura,
- pandeo,
- volcamiento,
- pérdida de equilibrio,
- plastificación,
- deformaciones excesivas y mecanismos de falla,
- transformación de la estructura,
- rotura de elementos estructurales o de sus uniones,
- inestabilidad de elementos estructurales incluyendo los originados por efectos dependientes del tiempo como la corrosión, y
- fatiga.

Cuando estos estados son superados, constituyen un riesgo para las personas, ya que podrían producir daños a la estructura que van desde la detención del servicio que ofrecen, hasta su colapso parcial o total (CYPECAD, 2009).

En la comprobación del ELU causado por la fractura de una sección o elemento estructural, se debe satisfacer la siguiente condición (FE, 2009):

$$R_d \geq S_d \quad (1)$$

Donde:

$R_d$  : Resistencia estructural, y

$S_d$  : Fuerzas actuantes en la estructura

Cuando se cumple la desigualdad establecida en (1), se dice que la estructura es razonablemente segura ya que la resistencia es mayor que las fuerzas que actúan sobre ella. En caso contrario, existe el riesgo de una falla, ya que las solicitaciones a que está sometida superan su resistencia. En este tenor de ideas, existe también el estado límite de servicio, explicado enseguida.

#### 2.4.2. Estado Límite de Servicio

Los ELS incluyen a los límites de comportamiento de la estructura asociados a su uso y ocupación. Esto implica sucesos que pueden ocurrir bajo cargas de servicio como (Gutiérrez, 2005):

- fatiga,
- deflexiones,
- deslizamientos,
- vibraciones,
- agrietamientos,
- deformaciones (flechas, asientos o desplomes) que afecten la apariencia de la obra,
- hundimientos,
- corrosión,
- desgaste, e
- incendios.

De hecho, se puede afirmar que cuando los estados de la lista anterior se presentan, y superan la resistencia de la estructura, causan efectos no solo sobre el confort y el bienestar de los usuarios, sino también sobre el correcto funcionamiento y/o apariencia de la construcción. Los ELS pueden ser reversibles e irreversibles. La reversibilidad se refiere a las deformaciones que no exceden los límites admisibles, y que por razones de flexibilidad estructural se eliminan una vez que desaparecen las acciones que las producen (CYPECAD, 2009). En contraste, la irreversibilidad se presenta cuando los daños permanecen en la obra, ya que los límites admisibles de carga fueron superados.

En la comprobación de los ELS se debe satisfacer la siguiente condición (FE, 2009):

$$C_d \geq E_d \quad (2)$$

Donde:

$C_d$  : Límite admisible para el estado a comprobar (ej: deformaciones, vibraciones, tamaño de fisura, etc.)

$E_d$  : Acciones sobre la estructura (ej: deformaciones, vibraciones, tamaño de fisura, etc.)

El proceso general de diseño por EL, consiste en dimensionar los elementos estructurales, teniendo como referencia el estado límite más crítico. Acto seguido, se revisa que no se alcancen otros tipos de EL (Gutiérrez, 2005). Por ejemplo, se puede dimensionar una columna para soportar

vibraciones, pero la geometría propuesta debe también ser capaz de resistir agrietamientos, hundimientos, corrosión, etc. La principal aplicación que se le ha dado a las funciones de EL, está relacionada con la seguridad estructural en puentes, edificios, y cimentaciones

Una ventaja de los EL es que tienen la capacidad para adecuar los cálculos a las condiciones de un lugar determinado, de tal manera que se pueden modificar los índices para realizar los diseños, sin que se cambie la metodología (Gutiérrez, 2005).

Por otro lado, los EL toman en cuenta la variabilidad en la calidad de los materiales (a través de su módulo de elasticidad y de su capacidad de carga), lo cual conduce a diseños realistas. En adición, considera secciones completas para el análisis y no solo fibras aisladas, por lo que refleja mejor el comportamiento de los materiales. Igualmente permite obtener resultados que le indican al analista el nivel de seguridad de la estructura que diseña, y permite tomar decisiones con base en cálculos que toman en cuenta la calidad de los elementos estructurales (Gutiérrez, 2005).

Al ser un método con fundamentos racionales, el ingeniero puede entender y controlar de mejor manera el comportamiento de las estructuras, lo cual lleva a diseños más económicos y a estructuras más confiables. Además, tiene amplio sentido y coherencia en el diseño sísmico ya que el proyectista puede manipular las magnitudes de las cargas en función de la intensidad del sismo de diseño, lo cual se traduce en geometrías capaces de soportarlos. Debido a la flexibilidad de la técnica, es posible incorporar nuevos avances tecnológicos en la estimación de las cargas y resistencias, lo cual conduce a una mejora en las especificaciones del proyecto (Gutiérrez, 2005).

Por otro lado, también cuenta con ciertas desventajas, siendo una de las principales el hecho de que no toman en cuenta el factor de incertidumbre ocasionado por el error humano. Además, las funciones pueden resultar complicadas (CYPECAD, 2009). Los resultados que se obtienen con los EL, suelen ser inciertos si no hay estudios estadísticos, por lo que tienden a ser subjetivos al estimar probabilidades. De igual manera, implican un gasto económico para investigar la fluctuación y esparcimiento de las variables aleatorias que se emplean en el diseño (Gutiérrez, 2005). Así, hay que tener en cuenta estas limitaciones cuando se emplean los EL para el cálculo de estructuras.

## **2.5. Método de Superficie de Respuesta**

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) consiste en un conjunto de técnicas matemáticas, utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influenciada por varios factores de carácter cuantitativo. Por ejemplo, imagine el lector que existe un puente construido en una zona altamente sísmica, y que el tránsito durante el día es lo suficientemente pesado como para tener a la estructura cargada constantemente por lapsos continuos de hasta cinco horas. El puente está instrumentado para medir desplazamientos verticales, con un Sistema de Posicionamiento Global (SPG).

En este caso, los factores de carácter cuantitativo que el ingeniero civil debe considerar son: sismo y carga viva. A su vez, la respuesta de interés es el desplazamiento vertical que tiene el puente al ser sometido a distintas combinaciones de magnitudes de sismos y cargas vivas. Con el MSR se registrarían datos experimentales de estas tres variables, tomados de un sismógrafo, un

aforador de tráfico y el SPG, y se emplearían para generar un modelo matemático, a través de un ejercicio de regresión estadística (Montgomery, 2000).

Si se consideran dos variables independientes ( $x$ =sismo,  $y$ =carga viva), y una dependiente ( $z$ =desplazamiento vertical), se puede generar una superficie  $z=f(x,y)$ ; por ello la denominación de MSR. Es importante resaltar, que el principal objetivo de esta técnica, es optimizar la variable de respuesta. En el ejemplo presentado, la intención sería minimizar los desplazamientos verticales ante la presencia combinada de sismo y carga viva.

El MSR, fue originalmente propuesto por Box y Wilson en el año de 1951 (como se cita en Gupta and Manohar, 2004). Por lo que en un principio fue desarrollado para representar la relación entre la entrada y salida de un experimento de física, a través de una expresión matemática simple. Bucher (1988), aplicó por primera vez una versión modificada, en la que los puntos experimentales se eligieron en torno a los valores medios de las variables aleatorias que forman una matriz llamada matriz de diseño, y utilizó un polinomio de segundo grado para ajustar los puntos experimentales.

En términos numéricos, básicamente el método se compone de las etapas de desplazamiento y modelado, las cuales son repetidas varias veces, mapeando la superficie de respuesta obtenida, en la dirección de la región del punto óptimo deseado.

De nuevo, el propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable de respuesta  $y$ , a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos (Gutiérrez, 2005). Por lo que se emplean diseños factoriales, que consisten en un número pequeño y predeterminado de experimentos, los cuales permiten que los resultados sean ajustados usando expresiones matemáticas. Por otro lado, el modelado se realiza ajustando los modelos más simples.

Para ello, se propone una ecuación ajustada, generalmente polinomial, y se selecciona un conjunto de tratamientos sobre los que se harán observaciones experimentales (Bayramov et al., 2003). Se realizan, entonces, contrastes sobre las estimaciones de los parámetros y sobre el ajuste del modelo, y si el modelo se considera adecuado, puede utilizarse como una función de aproximación. En tal caso, el estudio de la superficie de respuesta se hace en términos de la superficie ajustada, pues su análisis será aproximadamente equivalente al del sistema real (Fernández y Piñeiro, 2009).

Se insiste que el objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable de respuesta (Fernández y Piñeiro, 2009), ya sea utilizando un modelo lineal, cuadrático, cúbico o alguno de mayor orden. Para los diseños experimentales, el MSR combina tanto métodos estadísticos, como matemáticos, de análisis de regresión, de optimización y de evaluación de procesos (Bayramov et al., 2003).

En la construcción de modelos de superficie de respuesta, es común la codificación de los valores reales, lo que facilita considerablemente los cálculos que deben llevarse a cabo para obtener el modelo de aproximación e incrementar el ajuste en la estimación de los coeficientes (Fernández y Piñeiro, 2009). Como ya se mencionó, los polinomios más frecuentemente usados como funciones de aproximación son los de órdenes uno y dos, que proporcionan,

respectivamente los siguientes modelos: lineal y cuadrático, descritos a continuación (Fernández y Piñeiro, 2009).

### 2.5.1. Modelo de Primer Orden

Cuando no se tiene suficiente información acerca de la forma que presenta la superficie de respuesta, el primer intento de ajuste se hace, generalmente, aproximando a través de un modelo de primer orden (ver Figura 10). El modelo de primer orden es representado por medio de la siguiente expresión:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (3)$$

Donde:

$Y$ : Variable de respuesta

$\beta_0, \beta_i$ : Parámetros de regresión

$X_i$ : Variables independientes

$\varepsilon$ : Error aleatorio

En la Figura 2.1 se presenta una gráfica que representa una superficie de respuesta en dos dimensiones ( $x, y$ ), situación que se presentaría en un análisis en el que solo se estudia una variable independiente y una variable dependiente, es decir  $y=f(x)$ . Debido a que los datos experimentales no necesariamente se ajustan a un modelo lineal como este, el MSR también considera regresiones de ordenes mayores, como la de segundo orden.

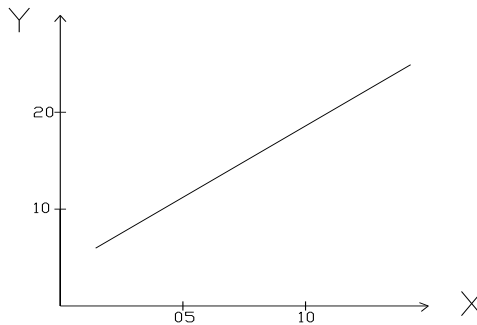


Figura 2.1 Superficie de respuesta en dos dimensiones

### 2.5.2. Modelo de Segundo Orden

Este tipo de aproximación es útil cuando existe curvatura en la superficie de respuesta, ya que el modelo de primer orden resulta ser una aproximación inadecuada, por lo que es necesario buscar un modelo que se ajuste mejor a los datos experimentales (ver Figura 2.2).

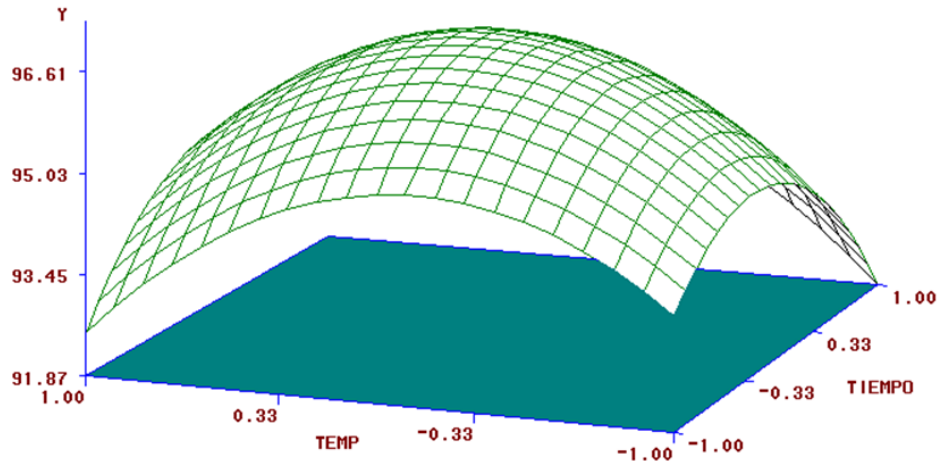


Figura 2.2 Superficie de respuesta tridimensional (Fernández y Piñeiro, 2009)

El modelo de segundo orden, es representado a través de la siguiente expresión (Fernandez y Piñeiro, 2009):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{\substack{j=2 \\ j>i}}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4)$$

En donde:

Y: Variable de respuesta

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ : Parámetros de regresión

$X_i, X_j$ : Variables independientes

$\varepsilon$ : Error aleatorio

En la Figura 11 se presenta una superficie, generada con base en experimentos donde la eficiencia de una reacción química (Y), depende simultáneamente de dos variables: tiempo y temperatura (Fernández y Piñeiro, 2009). Observar que el dominio en la variable temperatura va de [-1, 1], al igual que en la variable tiempo. Estos valores han sido codificados con base en la metodología propuesta por Montgomery (2000), misma que se detalla en el siguiente capítulo.

El MSR tiene múltiples aplicaciones que van desde la optimización de algunos procesos industriales, pasando por el control de inventarios, los tratamientos térmicos con microondas, la optimización de procesos de producción agrícola, y la determinación de probabilidades de falla en estructuras, hasta estudios de procesos de filtración de agua para consumo humano. En lo que se refiere a la evaluación de riesgos, el RSM también ha resultado ser una herramienta útil para estimar la confiabilidad de una estructura (Delgado y Cho, 2008).

Como se puede apreciar, se trata de un medio eficaz para resolver una gran variedad de problemas industriales (Gayton et al., 2003). Se reitera que en ciertas aplicaciones de la industria, las superficies de respuesta se exploran para determinar la combinación de los factores que proporcionan una condición operativa óptima, como la combinación de temperatura y tiempo que maximiza una producción química (Figura 11).



El MSR también puede ser utilizado en estudios analíticos de procesos fundamentales; por ejemplo, suele usarse en biología para investigar la influencia mutua de dos factores sobre la variable de respuesta, como la interacción entre el nitrógeno y el fósforo en el crecimiento de las plantas. Su uso se ha extendido a otros campos, en especial al de la medicina y la ingeniería, que implican la ejecución de códigos de análisis complejos a través de computadoras (Kaymaz and McMahan, 2004).

El método tiene múltiples ventajas. Por un lado, permite disponer de un modelo matemático de la superficie de respuesta, lo que facilita la realización de análisis que contribuyen a tener un mejor entendimiento de la correlación entre las variables de interés. Por otro lado, la técnica es lo suficientemente flexible como para que el analista elija el polinomio que mejor se ajuste a los datos experimentales con los que cuenta (Gayton et al., 2003). Además, el tiempo de cálculo es reducido, pues puede llegar a converger en pocas iteraciones (4 o 5). Pero quizás más importante es el hecho de que produce resultados precisos, sobre todo cuando se cuenta con una muestra de datos amplia, generados con base en diseños experimentales (Pham, 2008).

A diferencia de otros enfoques, el MSR evita diseños empíricos y, a través de la codificación, permite generar superficies que representan adecuadamente a los problemas que modelan (Falsone e Impollania, 2004; Gayton et al., 2003). Asimismo, el método cuenta con la flexibilidad para aproximar estados no lineales (Roos et al., 2006). En general, las ventajas del MSR se pueden resumir con tres palabras: precisión, innovación y rapidez.

No obstante, también tiene ciertas limitaciones. El problema principal que presenta el MSR es la alta sensibilidad de la respuesta de superficie, a las posiciones de punto de muestreo. Esto significa que, diferentes datos experimentales producen distintas superficies por lo que el analista debe tener cuidado al momento de llevar a cabo los experimentos u observaciones que generan los datos de entrada para la técnica (Falsone e Impollania, 2004). El método es complicado cuando se quieren realizar regresiones simples, y herramientas tradicionales como los mínimos cuadrados pueden ser de mayor utilidad en esos casos (Pham, 2008).

Habiendo descrito, en términos generales, las aplicaciones, ventajas y desventajas del MSR, ahora se procede a la presentación de otra técnica de optimización que también puede usarse en la evaluación de la seguridad de obras de infraestructura. Se trata de los algoritmos genéticos (AG's), los cuales se basan en teorías de evolución para encontrar soluciones óptimas.

## **2.6. Algoritmos Genéticos**

*“Son algoritmos matemáticos altamente paralelos que transforman un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud” (Coello, 2009)”*.

La definición anterior indica que los AG's son técnicas de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin (Coello, 2009). Para Merelo (2009), es un método sistemático que se

emplea en la solución de problemas de búsqueda y optimización, en el cual, los individuos más aptos de una población son los que sobreviven, al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno. Actualmente se sabe que estos cambios se efectúan en los genes (unidad básica de codificación de cada uno de los atributos de un ser vivo) de un individuo, y que los atributos más deseables del mismo se transmiten a sus descendientes, cuando éste se reproduce sexualmente.

Los AG's emplean una analogía directa con el comportamiento de la naturaleza. Trabajan con una población de "individuos", cada uno representando una posible solución para el problema a tratar. A cada individuo le es asignado un valor, en función de la calidad de solución que representa para el problema. La mayoría de las nuevas soluciones posibles se obtienen por la selección del mejor individuo en la generación actual, y su combinación con otro, produciendo un nuevo conjunto de individuos. Esta nueva generación posee una alta proporción de las características de los mejores individuos de la generación anterior. Si el AG es bien diseñado, entonces la población converge hacia la solución óptima del problema (Ribeiro et al., 2009).

Antes de que un AG se pueda emplear en un problema, se necesita un método para probar las soluciones potenciales, de forma que una computadora pueda procesarlas. Un enfoque común es codificar dichas soluciones como cadenas binarias (secuencias de unos y ceros), donde el dígito de cada posición representa el valor de alguna respuesta. Otro método similar consiste en codificarlas como cadenas de enteros o números decimales, donde cada posición, de nuevo, representa algún aspecto particular de la solución. Este último enfoque permite una mayor precisión que el anterior, pues las combinaciones binarias son restringidas (Marczyk, 2004).

Básicamente, un AG actúa a través de la mejora constante de un conjunto de individuos iniciales, que normalmente se generan de forma aleatoria, y que son evaluados cuantitativamente mediante una función de aptitud, lo que ayuda a seleccionar a los mejores. Así, durante el ejercicio, se descarta a los individuos menos aptos, y los que sobreviven se cruzan y reproducen para generar mejores candidatos (Marczyk, 2004).

Con la intención de mejorar aún más a los sobrevivientes, se introducen cambios aleatorios a través de un proceso de mutación. Posteriormente, los descendientes se agrupan en otra generación, la cual se somete nuevamente al proceso de evaluación de aptitud (Merelo, 2009). El proceso se repite hasta que el algoritmo converge en la solución más óptima, partiendo del conjunto de individuos generados.

Uno de los principales beneficios de los AG's, es que por su robustez pueden ser utilizados en diversos problemas, incluyendo aquellos que tienen cierta dificultad para su solución por otros métodos. Pese a que no garantizan encontrar una solución óptima para resolver el problema, procuran en general, una buena solución y de una manera rápida (Ribeiro et al., 2009).

Aunque las ideas expuestas pueden parecer asombrosas, los algoritmos genéticos han demostrado ser una estrategia enormemente poderosa y exitosa para resolver problemas, comprobando la utilidad de los principios evolutivos (Marczyk, 2004). De hecho, se han utilizado en una amplia variedad de campos para resolver problemas tan o más complejos que los abordados por los seres humanos. Además, las soluciones que consiguen son frecuentemente más eficientes, elegantes y complejas que las que produciría un analista. En consecuencia, no es raro

encontrar casos en los que se han producido soluciones tan buenas, que incluso dejan perplejos a los programadores que desarrollaron los AG's en primera instancia.

Los principios básicos de lo que en la actualidad se conoce como AG's, aparecieron a finales de los 50's y principios de los 60's, y fueron programados primitivamente en computadoras por biólogos evolutivos que buscaban modelar aspectos de la evolución natural (Marczyk, 2004). A ninguno de ellos se le ocurrió que esta estrategia podría aplicarse de manera más general a una gran variedad de problemas, pero ese reconocimiento no tardó en llegar cuando un investigador de la Universidad de Michigan llamado John Holland, visualizó la importancia de la selección natural, y a finales de los 60's desarrolló una técnica que permitió incorporar los AG's en un programa computacional.

Su objetivo era lograr que las computadoras aprendieran por sí mismas. A la técnica que inventó Holland se le llamó originalmente "planes reproductivos", pero se hizo popular a partir de 1975 con la publicación del libro "Adaptación en Sistemas Naturales y Artificiales", razón por la que otras publicaciones posteriores introdujeron la idea de la población evolutiva. Es importante mencionar que en años recientes, las estrategias evolutivas se encuentran en pleno desarrollo por ingenieros y científicos (Coello 2009). Estos hechos motivan a la búsqueda de nuevos enfoques al respecto.

A principios y a mediados de los 80's, los algoritmos genéticos fueron empleados en la resolución de problemas matemáticos abstractos como el "problema de la mochila" (bin-packing), y la coloración de grafos, así como en la resolución de asuntos tangibles de ingeniería y control de flujos en una línea de ensamble. Posteriormente se usaron en el reconocimiento, clasificación de patrones y optimización en el diseño de estructuras civiles (Marczyk, 2004).

Entre algunas de las aplicaciones más sofisticadas de los GA's se pueden mencionar: el diseño automatizado de equipamiento industrial, el de sistemas de comercio en el sector financiero, la optimización de carga de contenedores, el diseño de sistemas de distribución de aguas, las topologías de circuitos impresos y las topologías de redes computacionales (Marczyk, 2004). No sólo eso, se emplean también en teoría de juegos, en el aprendizaje de comportamiento de robots, para establecer reglas de lógica difusa, en el análisis de redes de comunicaciones móviles, en la optimización de estructuras moleculares y en la bioinformática, que es quizás la rama del conocimiento que más los ha explotado.

Como se puede apreciar, los AG's han tocado virtualmente todos los campos del conocimiento, y aun así se siguen descubriendo nuevas aplicaciones mientras las investigaciones siguen su curso<sup>3</sup>. Una de las razones por las que los AG's llevan la delantera con respecto a otras técnicas (ej., los Algoritmos Metrópolis, y la Búsqueda Tabú), es que resultan ser intrínsecamente paralelos (Marczyk, 2004). En otras palabras, mientras otros enfoques buscan soluciones en una sola dirección, los AG's lo hacen simultáneamente en varias, dado que un conjunto de individuos son usados para ello y van evolucionando en paralelo.

En adición, no necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver (Coello, 2009), y solo basta con especificar los dominios de las variables independientes y

---

<sup>3</sup> De hecho este proyecto es un ejemplo de esta afirmación.

aclarar si se quiere maximizar, minimizar o buscar un valor específico de la variable de respuesta, para que la solución sea buscada. Así mismo, se desenvuelven bien en problemas con un paisaje adaptativo-complejo (función de aptitud discontinua, ruidosa, que cambia con el tiempo, o tiene muchos óptimos locales). Además, tienen la capacidad de manipular muchos parámetros simultáneamente (Marczyk, 2004).

Cuando se maximiza una función objetivo, los AG's resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones) en comparación con las técnicas tradicionales como: el método del gradiente, el método hill climbing, los algoritmos metrópolis y la técnica del recocido simulado, entre otros (Coello, 2009). Más aun, las computadoras modernas permiten que su uso sea viable aun para problemas muy complejos (Merelo, 2009). En general, ofrecen nuevas y buenas soluciones a partir de varias iteraciones (Benasús y Vanrell, 2009).

A pesar de los beneficios mencionados hasta ahora, los AG's también cuentan con ciertas restricciones. Una de ellas es que en ocasiones pueden tardar en converger, lo cual depende en cierta medida de los parámetros que se utilicen, como por ejemplo el tamaño de la población y el número de generaciones (Coello, 2009). En el otro extremo, una situación desfavorable resulta cuando convergen prematuramente, lo cual puede obedecer a una serie de problemas de diversa índole tales como la mala declaración de una función de aptitud, o por errores de programación.

Así mismo, existen funciones de aptitud que tienen óptimos locales, y los AG's pueden encontrar uno de ellos y no necesariamente el óptimo global. Esta situación es engañosa para el analista, por lo que tiene que proponer distintas generaciones de individuos para analizar la función en distintas partes su dominio, es decir, explorar la mayor cantidad de respuestas posibles y detectar o descartar la existencia de varias soluciones al problema.

A pesar de estas desventajas, los AG's han demostrado empíricamente que son capaces de encontrar soluciones de un nivel muy aceptable, lo que hace al método muy competitivo comparado con otros algoritmos de optimización (Marczyk, 2004). Una vez descritos los AG's y las técnicas previamente presentadas, ahora se procede a su análisis.

## **2.7. Análisis de los Métodos**

Después de contrastar y analizar los métodos hasta ahora expuestos, se observa que para resolver problemas relacionados con la evaluación de riesgos en presas, existen una gran variedad de métodos incluyendo los determinísticos y los probabilísticos (Carrasco, 2005).

En lo que se refiere a la SMC, se trata de una herramienta poderosa que es aplicable a una gran variedad de problemas, ya sean estocásticos o determinísticos (DM, 2006). Aunque también es importante decir que los resultados que genera pueden no ser precisos, ya que tienden a ser sensibles a las condiciones iniciales establecidas por el analista, sobre todo cuando el tamaño de la muestra es reducido (FCE, 2005). Es decir, si la muestra es limitada, los valores obtenidos con la SMC no son precisos.

Ahora bien, el MEF puede implementarse en un programa computacional. No obstante, para mejorar la calidad y robustez de los diseños de la ingeniería estructural (Fernández, 2009), requiere de una gran cantidad de datos, lo cual consume tiempo en la construcción de los modelos por analizar (Ayneto, 2009). Por ello, en su implementación se requieren recursos humanos especializados, que sepan manejar adecuadamente las metodologías y el software

correspondiente, lo cual se traduce en inversiones económicas en cursos de capacitación (Fernandez, 2009).

Por su parte, las FEL asumen que todas las cargas tienen distintas probabilidades de ocurrencia, por lo que reflejan mejor y más exactamente el comportamiento de los materiales de construcción. Desafortunadamente, su principal desventaja es que no toman en cuenta el factor de incertidumbre debido al error humano, además de que también necesitan inversiones económicas en capacitación de especialistas, para determinar mediante modelos matemáticos la dispersión de las variables aleatorias requeridas en el diseño (Gutiérrez, 2005).

Como se puede apreciar, los enfoques descritos presentan ciertas limitaciones en cuanto a dos aspectos importantes de la evaluación de riesgos en estructuras: convergencia y rapidez. Por ello, en esta investigación se propone combinar al MSR y los AG's para realizar dicha evaluación, en especial en presas de tierra, y de manera particular en las ubicadas en el Estado de México.

Es importante mencionar, entonces, las ventajas que presentan estas dos técnicas con respecto a sus contrapartes. En esencia, el MSR permite disponer de una expresión analítica, lo que reduce el número de cálculos para estimar los riesgos, esto hace que los resultados sean muy precisos aun con una muestra limitada (Pham, 2008). No solo eso, la principal ventaja de este método es la flexibilidad para la aproximación de estados altamente no lineales y las funciones de estado límite (Roos et al., 2006).

Los AG's, por su parte, pueden operar con varias soluciones de forma simultánea (Coello, 2009). Más aun, ofrecen nuevas y buenas soluciones, a partir de varias iteraciones (Benasús and Vanrell, 2009). Adicionalmente, dichos algoritmos tienen gran habilidad para manipular muchos parámetros simultáneamente (Marczyk, 2004). Pese a ello, también requieren el uso de personal y software especializado, pero esta situación es válida prácticamente para cualquier técnica que se analice.

Habiendo estudiado y analizado distintos enfoques que pueden ser útiles para la evaluación de riesgos en presas, ahora se procede con una descripción detallada del MSR y los GA's que han sido seleccionados como herramientas principales de este proyecto.

# CAPÍTULO 3

---

## FILOSOFIA DEL MSR Y LOS AG'S

---

### 3.1. Introducción

Existen diversas técnicas numéricas para resolver problemas en el campo de la Ingeniería, como las desarrolladas por Pitágoras, Newton y Descartes, quienes establecieron los fundamentos con las que hoy se desarrollan grandes proyectos. Pese a sus aportaciones en el mundo moderno, ha sido necesario reforzar las bases matemáticas con técnicas computacionales, las cuales evitan en gran medida el error humano.

En cuanto a Ingeniería Civil, es importante mencionar que los Ingenieros son los responsables de proyectar las edificaciones que demanda la sociedad, por lo que requieren de poderosos programas de diseño para que de una manera rápida y eficiente obtengan resultados bien elaborados, en un intervalo de tiempo relativamente corto. En este sentido, en el presente capítulo se describen los Métodos de Superficie de Respuesta y los Algoritmos Genéticos, que gracias a las bondades que presentan han resultado ser muy eficientes en la solución de problemas complejos.

### 3.2. Filosofía del Método de Superficie de Respuesta

Como ya se había adelantado, la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) consiste en un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable es influenciada por otras. El objetivo es optimizar las variables propuestas a partir de las variables de interés. Esto se logra cuando se determinan las condiciones óptimas de operación del sistema, es decir, la combinación adecuada para maximizar o minimizar la función objetivo.

Para dar inicio con el proceso de cálculo, el MSR hace uso de experimentos factoriales. Así, es común utilizar este tipo de diseños para determinar el número de datos experimentales necesarios para tener idea de la influencia de las variables (factores) en la respuesta de interés. Una vez que dichas variables son identificadas y medidas, se puede obtener una aproximación de la superficie de respuesta. Esta superficie se usa como guía para variar gradualmente los factores que afectan la solución, de tal manera que se mejore el valor de la respuesta. Cuando el cambio de los factores no origina una mejora notable en la variable de respuesta, se puede aplicar un método de experimentación más sofisticado, para encontrar la superficie de respuesta final.

En términos matemáticos, la respuesta de la superficie puede ser modelada por:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (5)$$

Donde:

$\eta$ : superficie de respuesta  
 $X_1, X_2, \dots, X_k$ : factores de superficie

De tal manera que la variable respuesta puede expresarse como:

$$Y = \eta + \epsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \epsilon \quad (6)$$

Donde

$\epsilon$ : es el error observado en la respuesta.  
 $\eta$ : superficie de respuesta

La relación  $\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$  existente entre  $\eta$  y los niveles de los  $k$  factores puede representarse a través de una superficie, la cual se define como superficie de respuesta. Si se construye un modelo de primer orden, se adoptaría la siguiente forma (Cornell, 1990):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (7)$$

Donde:

$Y$ : Superficie de respuesta  
 $\beta_0, \beta_1, \beta_k$ : Coeficientes de regresión  
 $x_1, x_2, x_k$ : Variables independientes o factores de interés  
 $\epsilon$ : Error aleatorio

Para obtener los coeficientes de regresión es necesario recurrir al diseño de experimentos. Aunque una explicación completa de los diseños factoriales (ej:  $2^k$  y  $3^k$ ) se puede encontrar en Montgomery (2000), aquí se describen sucintamente. El diseño  $2^k$  es aquel en el que se analiza el efecto de  $k$  factores en una respuesta. En este caso particular, cada factor puede asumir dos estados cuantitativos o cualitativos (ej: 1 y 2, alto y bajo, frío y caliente, etc). Extendiendo esta idea, resulta claro que en el diseño  $3^k$ , cada factor asume tres estados (ej: 0, 1 y 2; bajo, medio y alto). Más adelante se hace referencia a estos diseños, para construir las superficies de respuesta.

### 3.2.1. Modelos de Superficie de Respuesta

Como ya se estableció en el capítulo anterior, cuando no se tiene suficiente información acerca de la forma que presenta la superficie de respuesta, el primer intento de ajuste se hace aproximando los datos a través de un modelo de primer orden. Cuando existe curvatura en la superficie de respuesta, el modelo de primer orden no es una aproximación adecuada y, por lo tanto, es necesario utilizar una expresión que se ajuste mejor. Se emplea entonces un modelo de segundo orden o bien modelos más complejos para representar la superficie de respuesta (Montgomery y Myers, 1995). Independientemente del orden del modelo a construir, en el MSR es necesario definir las curvas de nivel o gráficas de contorno de la superficie, para conocer su forma.

### 3.2.2. Gráficas de Contorno

Las gráficas de contorno, permiten visualizar la forma de la superficie de respuesta en tres dimensiones (siempre y cuando se tenga una variable de respuesta y dos factores que la influyen, ya que cuando existen tres o más factores la representación gráfica no se puede

construir). En ellas, las curvas de los valores de respuesta se grafican en un plano donde los ejes coordenados representan los distintos niveles de los factores. Dichas gráficas resultan útiles para estudiar los puntos o niveles en los que se da un cambio en la forma o altura de la superficie de respuesta. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de este tipo de gráficas.

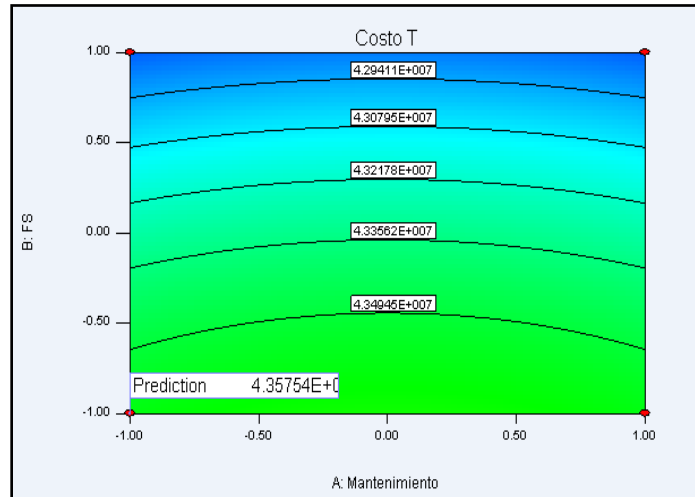


Figura 3.1 Ejemplo de gráficas de contorno o curvas de nivel (Design Expert, 2009)

Este tipo de gráficas nacen a partir del análisis de la superficie, misma que tiene su origen en los datos generados a partir de los diseños experimentales. La generación de estas se describe a continuación.

### 3.2.3. Diseños Experimentales de Superficie de Respuesta

Estos diseños permiten el análisis de las superficies de respuesta y, en consecuencia, contribuyen a lograr el ajuste de los datos experimentales a un modelo de regresión. Además tienen las siguientes características (Villalobos, 2009):

- Proporcionan una buena distribución de puntos en toda la región de interés,
- Permiten adecuar los datos a una superficie,
- Posibilitan la ejecución de experimentos secuenciales,
- Permiten la creación de diseños de mayor orden, y
- Proporcionan un estimado de error.

Dos de los diseños experimentales MSR más comunes incluyen:

- $2^k$  aumentado con observaciones de centro, y
- Diseños compuestos centrales.

El diseño aumentado  $2^k$  consiste en agregar observaciones adicionales al bosquejo original, es decir, puntos de centro<sup>4</sup> ( $n_c$ ) al diseño regular  $2^k$ , para estimar la curvatura de la superficie sobre el dominio que se considera. En la Figura 3.2 aparece una representación gráfica de este diseño.

<sup>4</sup> Se establecen varios puntos de centro, para estimar el error de la aproximación. Así, para la misma combinación de factores se toman distintas medidas, lo cual permite calcular dicho error.



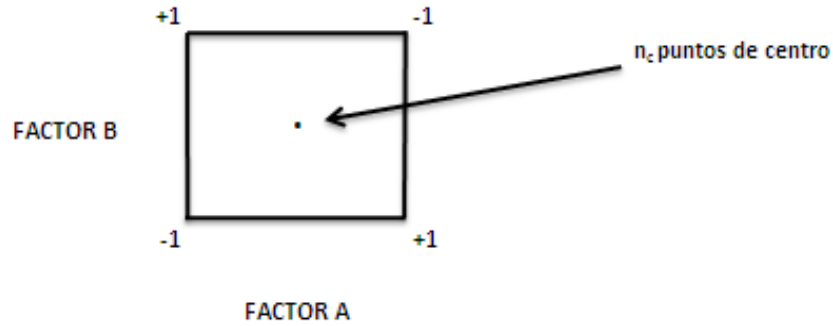


Figura 3.2 Diseño aumentado  $2^k$  con observaciones de centro (Gupta y Manohar, 2004)

Para la construcción de superficies de respuesta, es muy común la codificación de las variables reales, ya que la distancia medida desde los ejes de las variables codificadas en el espacio k-dimensional se convierten en estándar, esto facilita los cálculos para obtener el modelo de aproximación. A continuación se presenta una forma para obtener las variables codificadas en función de las variables reales.

$$x = 1 - \frac{2(X_{sup} - X)}{(X_{sup} - X_{inf})} \quad (8)$$

Donde:

- $x$ : Valor de la variable codificada
- $X_{sup}$ : Valor real superior
- $X_{inf}$ : Valor real inferior
- $X$ : Valor de la variable real

Por otro lado, el diseño compuesto central consiste en un  $2^k$  factorial con corridas ( $n_f$ ), corridas axiales ( $2^k$ ) o corridas en estrella, y corridas de centro ( $n_c$ ). Una representación gráfica del experimento de tres factores se muestra en la Figura 3.3.

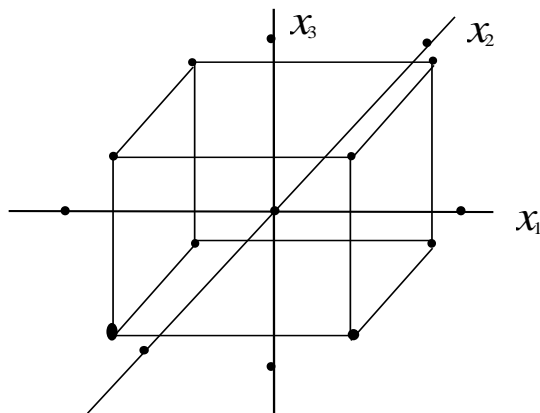


Figura 3.3 Diseño compuesto central de tres Factores  $x_1, x_2, x_3$  (Gupta y Manohar, 2004)

Como se puede apreciar, para determinar la forma que adopta la superficie de respuesta es necesario generar varios puntos, que se basan en los resultados de los experimentos realizados. Intuitivamente se puede deducir que entre mayor sea la cantidad de puntos empleados, mayor

será la precisión del ejercicio de regresión. En términos estadísticos, para evaluar que tan bueno es el ajuste obtenido, se requiere la aplicación de pruebas de significancia.

### 3.2.4. Prueba de Significancia de los Coeficientes Estimados en el MSR

De acuerdo con Cornell (1990), el proceso de estimación de los coeficientes de regresión del modelo de ajuste requiere  $N \geq k+1$  valores de respuesta ( $Y$ ). El análisis de los datos de las corridas, es representado en una tabla de análisis de varianza. En ella se presentan las diversas fuentes de variación que impactan en la variabilidad total de los datos. Dicha variación recibe el nombre de "Suma de Cuadrados Totales" (SST), y se expresa de la siguiente manera (Cornell, 1990):

$$SST = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

Donde

**SST**: Suma de Cuadrados Totales

$Y_u$ : Valor observado en la  $u$ -ésima corrida

$\bar{Y}$ : Promedio de las  $N$  observaciones

$u$ : Corridas 1,2,  $N$

$N$ : Número de observaciones

Existen además otras dos sumas: (i) la suma de cuadrados debido a la regresión (SSR) y (ii) la suma de cuadrados debida a la parte no tomada en cuenta por el modelo ajustado (SSE). La expresión matemática para obtener la SSR es (Cornell, 1990):

$$SSR = \sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2 \quad (10)$$

Donde:

**SSR**: Suma de Cuadrados debida a la Regresión

$\hat{Y}_u$ : Valor predicho de la respuesta en el  $u$ -ésimo punto de diseño

$\bar{Y}$ : Promedio de la  $N$  observaciones

$u$ : Corridas 1,2,  $N$

$N$ : Número de observaciones

La suma de cuadrados residual o SSE, se calcula mediante (Cornell, 1990):

$$SSE = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2 \quad (11)$$

Donde:

**SSE**: Suma de Cuadrados Residual

$Y_u$ : Valor observado en la  $u$ -ésima corrida

$\bar{Y}$ : Promedio de las  $N$  observaciones

$u$ : Corridas, 1,2,  $N$   
 $N$ : Número de observaciones

En la Tabla 3.1 se presentan los datos que debe llevar el análisis de varianza (Cornell, 1990):

**Tabla 3.1 Análisis de varianza (Adaptado de Cornell, 1990)**

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados
Regresión	p-1	SSR	SSR/p-1
Residuo	N-p	SSE	SSE/N-p
Total	N-1	SST	

p: número de términos del modelo

La prueba de significancia de la ecuación de regresión ajustada se hace sobre los coeficientes de regresión ( $\beta$ ), a través de las siguientes hipótesis:

$H_0$ : Todas las  $\beta_s$  (excluyendo  $\beta_0$ ) son cero  
 $H_A$ : Al menos una de las  $\beta_s$  (excluyendo  $\beta_0$ ) es diferente de cero

Para comprobar las hipótesis se ocupa el estadístico de prueba F, que asume normalidad en el error. F se calcula con la siguiente expresión (Cornell, 1990):

$$F = \frac{SSR/(p - 1)}{SSE/(N - p)} \quad (12)$$

Donde:

**F**: Estadístico de Prueba  
**SSR**: Suma de Cuadrados debida a la Regresión  
**SSE**: Suma de Cuadrados Residual  
**p**: Número de términos del modelo  
**N**: Número total de observaciones

La fórmula anterior se compara con una  $F_{(\alpha, p-1, N-p)}$ , considerando que si la **F** calculada excede este valor, la hipótesis nula se rechaza con un nivel de confianza ( $\alpha$ ). Esto significa que la parte explicable del modelo, es significativamente mayor que la parte inexplicable. Además, en esta etapa se debe llevar a cabo un análisis de ajuste del modelo, que se calcula con la siguiente expresión (Cornell, 1990):

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (13)$$

Donde:

**R<sup>2</sup>**: Coeficiente de correlación  
**SSR**: Suma de Cuadrados debida a la Regresión  
**SSE**: Suma de Cuadrados Residual

Este coeficiente se interpreta de la misma forma que el coeficiente de regresión tradicional, que va de -1 a 1 significando el primer valor que existe una correlación totalmente negativa entre las variables, y el segundo refleja que dicha relación es totalmente positiva.

### 3.2.5. Prueba de Falta de Ajuste

La falta de ajuste se presenta cuando la superficie de respuesta muestra alguna curvatura o, cuando esta no es plana, la curvatura no se detecta debido a la omisión de los términos cuadráticos, cúbicos, o productos cruzados que representan la interacción entre los factores. La prueba de falta de ajuste debe de satisfacer los siguientes requisitos, de acuerdo con lo propuesto por Cornell (1990):

- a) El número de puntos de diseño ( $n$ ), debe ser mayor que el número de términos en el modelo ajustado, es decir  $n > k-1$ ,
- b) Dos réplicas (experimentos) deben realizarse en uno o más puntos de diseño para estimar la varianza del error, y
- c) Los valores del Error Aleatorio ( $\epsilon_u$ ) deben asumir una distribución normal e independiente con una varianza común ( $\sigma^2$ ).

Cuando se cumplen las condiciones a) y b), la Suma de Cuadrados Residuales (SSE) se compone de dos fuentes de variación; la primera es la falta de ajuste del modelo ajustado (debido a la exclusión de términos de mayor grado), y la segunda es la varianza debida al Error Puro. Para obtenerlas, se calcula la Suma de Cuadrados del Error Puro (SSEP), que equivale a la Suma de Cuadrados obtenida de las réplicas, y este valor se sustrae de la Suma de Cuadrados Residual (SSE), para obtener la Suma de Cuadrados de la Falta de Ajuste (SSFA). Es decir (Cornell, 1990):

$$SSEP = \sum_{l=1}^n \sum_{u=1}^{r_l} (Y_{lu} - \bar{Y}_l)^2 \quad (14)$$

Donde:

**SSEP:** Suma de Cuadrados del Error Puro

$Y_{lu}$ : U-ésima observación del l-ésimo punto de diseño

$\bar{Y}_l$ : Promedio de las  $r_l$  en el l-ésimo punto de diseño

$u=1, 2, \dots, r_l$

$l=1, 2, \dots, n$

$r_l$ : Observaciones

De manera similar, con la expresión (15) se obtiene la suma de cuadrados de la falta de ajuste (Cornell, 1990):

$$SSFA = SSE - SSEP \quad (15)$$

Donde:

**SSFA:** Suma de Cuadrados de la Falta de Ajuste

**SSE:** Suma de Cuadrados Residual

**SSEP:** Suma de Cuadrados del Error Puro

Es decir:

$$SSFA = \sum_{l=1}^n r_l (\hat{Y}_l - \bar{Y}_l)^2 \quad (16)$$

Donde:

**SSFA:** Suma de Cuadrados de la Falta de Ajuste

$\hat{Y}_l$ : Valor predicho de la respuesta en el  $l$ -ésimo punto de diseño

$\bar{Y}_l$ : Promedio de las  $r_l$  en el  $l$ -ésimo punto de diseño

$r$ : Número de réplicas

$l$ : 1, 2...  $n$

$n$ : Número de puntos del diseño

Por lo que la prueba de significancia para el modelo ajustado se realiza con la siguiente expresión (Cornell, 1990):

$$F = \frac{SSFA/(n - p)}{SSEP/(N - n)} \quad (17)$$

Donde:

**F:** Estadístico de Prueba

**SSFA:** Suma de Cuadrados del Error Puro

**SSFA:** Suma de Cuadrados de la Falta de Ajuste

**p:** Número de términos del modelo

**N:** Número total de observaciones

**n:** Número de puntos del diseño

La hipótesis de suficiencia de ajuste con un nivel  $\alpha$  de significancia, se rechaza cuando el valor calculado del estadístico es mayor a  $F_{(\alpha, n-p, N-n)}$ . Cuando la  $F$  calculada no es mayor, el cuadrado medio residual es utilizado para estimar  $(\sigma^2)$ , y también se usa para probar la significancia del modelo ajustado.

Cuando la hipótesis de suficiencia de ajuste se rechaza, se debe de elevar el grado del modelo, lo que implica la inclusión de más términos de productos cruzados y/o términos de mayor grado en  $x_1, x_2 \dots x_k$ , (Cornell, 1990). Si se requieren puntos experimentales adicionales para estimar todos los coeficientes, estos se añaden. Así, en este último caso se tendrían que coleccionar los datos y se volvería a hacer el análisis. Si no se rechaza la hipótesis se puede inferir que la superficie es plana. Una vez que se tiene la ecuación y se ha probado el ajuste, se buscan los valores de las variables  $x_1, x_2 \dots x_k$  que la optimizan. Para lograrlo, es común emplear el método de la máxima pendiente, presentado a continuación.

### 3.2.6. Método de Máxima Pendiente

Esta técnica consiste en ejecutar una secuencia de experimentos a lo largo de la línea de máximo incremento en la respuesta. Si el modelo ajustado de primer orden es adecuado, se utiliza para determinar una dirección en la cual se espera observar mayores valores de la variable de respuesta.

A medida que se avanza sobre la superficie ajustada en la dirección en que se incrementan los valores de la respuesta, y se va llegando a una región en la que haya curvatura en la superficie real, el incremento en la respuesta se estabilizará en el punto más alto de la superficie ajustada. Si se continúa en esta dirección y la altura de la superficie disminuye, se realiza un nuevo conjunto de experimentos, y se ajusta de nuevo el modelo de primer orden.

Después, se determina una nueva dirección hacia valores crecientes de la respuesta y se ejecuta otra secuencia de experimentos en la dirección determinada. Este proceso continúa hasta que se alcanza el punto máximo, situación que se hace evidente ya que no se pueden obtener más incrementos en la respuesta, o estos son muy pequeños.

Si los análisis de ajuste detectan, mediante la prueba de ajuste descrita, que puede haber curvatura en la superficie, se aumenta un grado al modelo y se completa el diseño de primer orden empleando los puntos necesarios para ajustar el nuevo modelo de segundo orden. Si el modelo de segundo orden se ajusta adecuadamente, este se utiliza para describir la forma de la superficie por medio de la gráfica de contornos (curvas de nivel) en la región experimental.

Se emplea entonces el modelo ajustado de segundo orden para localizar el lugar en el que la pendiente de la superficie ajustada es cero, es decir, las coordenadas del punto estacionario, que es el punto que proporciona el valor óptimo de la variable respuesta. Si se detecta que éste se encuentra dentro de los límites de la región experimental, se pasa a determinar su naturaleza, es decir, se identifica si se trata de un punto máximo, mínimo o silla.

Si, por el contrario, el punto estacionario no se encuentra dentro de la región experimental, se debe ejecutar una nueva experimentación en la dirección en la que éste se localice. Una vez que se ha ubicado el punto que proporciona el valor óptimo de la variable respuesta, se culmina con el proceso.

La elección de un diseño adecuado del experimento es fundamental para modelar y explorar la superficie de respuesta, mediante un modelo polinomial que se ajusta al conjunto de datos empleados en los puntos del diseño. Para ilustrar numéricamente estas ideas, enseguida se describe el proceso para aplicar el MSR.

### **3.2.7. Procedimiento Secuencial para la Aplicación del MSR**

Es importante resaltar que el MSR es una técnica secuencial. Frecuentemente, la estimación inicial de las condiciones óptimas de operación está alejada del óptimo real, así que el objetivo es, usando un método lo más simple y menos costoso posible, moverse rápidamente hacia las cercanías del óptimo. A continuación se presenta un procedimiento secuencial basado en el trabajo de Villalobos (2009), donde se resume la metodología para determinar la superficie de respuesta.

#### **Fase I: Fase de búsqueda**

- 1)** Seleccionar los factores a investigar,
- 2)** Diseñar y ejecutar un experimento factorial de dos niveles en una región localizada de la superficie de respuesta (que pueden ser complementados con puntos centrales en el diseño),
- 3)** Determinar los factores significativos,
- 4)** Calcular los efectos y los coeficientes del modelo lineal de la expresión siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (18)$$

Donde:

$Y$ : Superficie de respuesta

$\beta_0, \beta_1, \beta_k$ : Coeficientes de regresión

$x_1, x_2, x_k$ : Variables independientes o factores de interés

$\epsilon$ : Error aleatorio

- 5) Seleccionar un factor de referencia para determinar los pasos apropiados para seguir moviéndose sobre la trayectoria de máxima pendiente,
- 6) Seleccionar algunas condiciones experimentales a lo largo de la trayectoria de máxima pendiente y hacer pruebas para determinar si la respuesta se sigue incrementando. Si esta deja de crecer, se debe generar una nueva trayectoria,
- 7) Si es necesario utilizar una nueva trayectoria, hay que diseñar y ejecutar un nuevo experimento factorial de dos niveles,
- 8) Todos los pasos anteriores se repiten hasta que se deje de obtener una mejora sustancial en la respuesta. Acto seguido, se ejecuta la Fase II.

#### **Fase II: Fase de optimización**

- 1) Diseñar y ejecutar un experimento factorial de tres niveles o diseños de superficie de respuesta sobre la región de máxima pendiente hasta que ya no haya mejoras importantes en la respuesta, y
- 2) Determinar los valores que optimizan la respuesta del modelo.

Usando el modelo anterior, se puede determinar la naturaleza del punto estacionario de la superficie de respuesta, que es aquel donde se desvanece el gradiente.

### **3.3. Filosofía de los Algoritmos Genéticos**

Como ya se mencionó, los AG's son métodos que pueden ser utilizados para encontrar la solución de problemas de optimización y búsqueda. Así, parten del principio genético de los organismos biológicos para resolver problemas mediante la generación de poblaciones sucesivas a las que se aplican operadores de mutación y cruce. Cada individuo representa una solución, y se trata de encontrar al individuo que represente la mejor.

Al ser un método numérico robusto, los AG's pueden ser utilizados en diversos problemas, incluyendo aquellos que presentan dificultades para ser solucionados mediante otros métodos. Cabe aclarar que los AG's no garantizan encontrar una solución óptima para resolver el problema, pero procuran en general, una buena y rápida solución. En la figura 3.4 se presenta el funcionamiento general de un algoritmo genético.

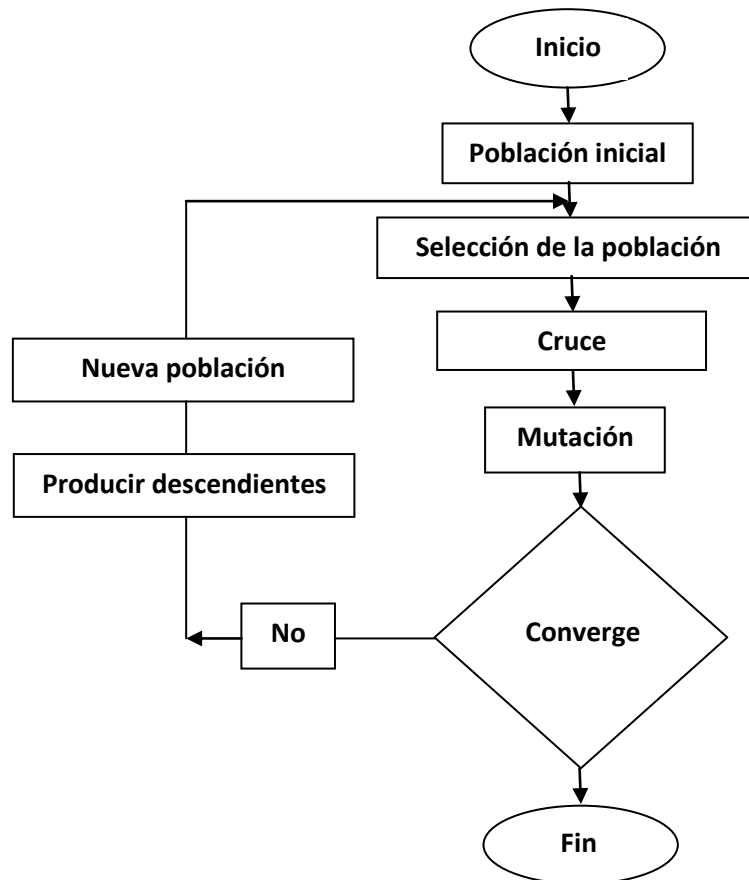


Figura 3.4 Funcionamiento de un algoritmo genético (Adaptado de Ribeiro et al., 2009)

Además de los operadores genéticos tradicionales (cruce, mutación y selección), existen otros dos aspectos importantes en la teoría de los AG's: la codificación y la función de aptitud. La primera tiene como objetivo establecer el mecanismo de obtención de las posibles soluciones al problema. Para lograrlo, se parte del supuesto de que los individuos pueden representarse como un conjunto de parámetros que se denominan genes, los cuales agrupados forman una cadena de valores llamados cromosomas. El enfoque más común, aunque no por eso el más poderoso, emplea cadenas de números binarios. Su éxito radica en su facilidad de implementación. No obstante, existen otras formas de codificación que también se han utilizado y las cuales recurren a números reales y letras para representar a los genes y cromosomas.

En lo que respecta a la función de aptitud, se trata de la función objetivo del problema de optimización. Una característica de dicha función es que debe ser capaz de "eliminar" a las malas soluciones, y de "seleccionar" a las buenas, de forma que estas últimas sean las que sobrevivan en el proceso de evolución. Esta función debe ser formulada de manera particular para cada problema a resolver.



La función de aptitud debe producir un valor que represente la capacidad de cada individuo para su supervivencia en el medio. Dicho valor debe corresponder a la “habilidad” del individuo, representado por el cromosoma, de generar descendientes aptos para mejorar las generaciones de descendientes. Así, los AG’s pueden emplearse tanto para maximizar como para minimizar funciones objetivo, e incluso para encontrar valores específicos (Golberg, 1999). Con estos antecedentes, ahora se procede a la descripción de los operadores ya mencionados.

### 3.3.1. Población Inicial

Como un primer paso para dar inicio con el proceso de búsqueda de los AG’s, se genera aleatoriamente una población inicial. En esta fase es muy importante que el analista defina el dominio, o los valores válidos, que las variables que desea optimizar pueden asumir. De no hacerlo así, se corre el riesgo de que el AG obtenga soluciones que caen fuera de los rangos permisibles para las variables.

La primera población puede tener  $n$  individuos, mismos que serán seleccionados mediante la función de aptitud, para que puedan reproducirse y mutarse con la finalidad de generar una nueva población mejorada.

### 3.3.2. Operador Selección de los Individuos

Este es un operador muy importante para el desempeño de los AG’s, ya que es el encargado de elegir solo a aquellos individuos de la población que se comportan mejor al ser probados con la función de aptitud. La intención de este proceso es generar una nueva población, generalmente conocida como población de trabajo<sup>5</sup>, la cual es sometida a los operadores de cruce y mutación para asegurar que los individuos que la componen mejoran de una generación a otra.

### 3.3.3. Operador de cruce

Este operador genético, básicamente, consiste en seleccionar dos individuos de la población y elegir aleatoriamente una posición para realizar el intercambio de genes de cada individuo. Esta técnica es conocida como cruce en un punto simple. En la Figura 3.5, se presenta un ejemplo del cruzamiento con punto simple. Como se puede apreciar, se emplean números binarios para representar a los individuos. Suponga el lector que el de la derecha es el padre y el de la izquierda corresponde a la madre. Al llevar a cabo el proceso de cruce, se generan dos hijos, el primero contiene los primeros cuatro genes del padre y los últimos seis de la madre, mientras que con el segundo se presenta la situación inversa.

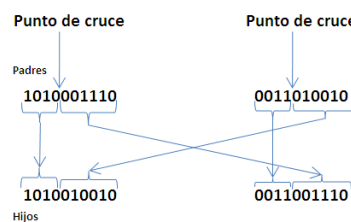


Figura 3.5 Cruce con punto simple cuya posición en la cadena se elige aleatoriamente (Adaptado de Ribeiro et al., 2009)

<sup>5</sup> Esta se conoce en la literatura como “mapping pool”

Existen otras técnicas para realizar el cruce de los individuos, una involucra la presencia de dos puntos, y consiste en dividir en tres intervalos el segmento del cromosoma, para llevar a cabo el intercambio de genes. En la Figura 3.6 se presenta un ejemplo de cruce con dos puntos. En este caso los hijos toman aleatoriamente dos partes del padre (madre) y una parte de la madre (padre). Sea  $P = P1 + P2 + P3$  el padre y  $M = M1 + M2 + M3$ . El hijo H1 puede generarse como  $H1 = P1 + M2 + P3$ , y un segundo hijo H2 podría quedar compuesto por  $H2 = M1 + P2 + M3$ . Notar que, por ejemplo P1 puede ser la cadena 100100, P2 puede ser 11100 y así sucesivamente.

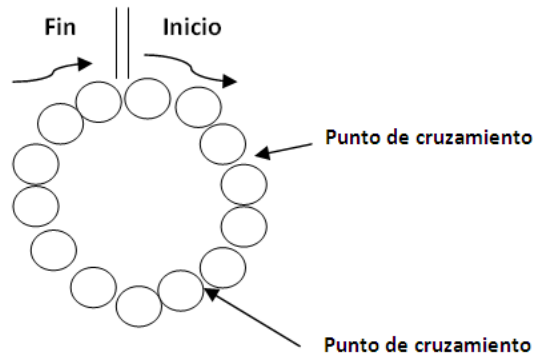


Figura 3.6 Cruzamiento con dos puntos (Adaptado de Ribeiro et al., 2009)

Alternativamente se puede emplear el cruce uniforme, en el que se genera un código de cruce a partir de 1's y 0's, donde la presencia del 1 implica que el padre heredará ese gen al hijo, y la presencia del 0 implica que la madre lo hará. Se conoce uniforme por que tanto el 1 como el 0 tienen un 50% de probabilidad de ser elegidos en el código de cruce. En la Figura 3.7 se representa este proceso.

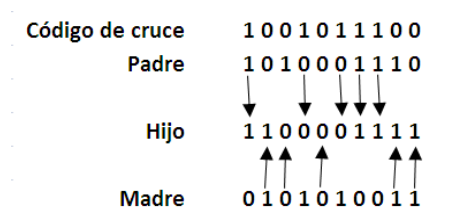


Figura 3.7 Cruzamiento uniforme (Adaptado de Ribeiro et al., 2009)

Una vez, descritas algunas formas de codificación de los AG's, ahora se procederá a la presentación del operador mutación.

### 3.3.4. Operador Mutación

Este se lleva a cabo después del cruce, y consiste en cambiar de forma aleatoria 0's por 1's en un cromosoma. En la Figura 3.8 se ilustra el proceso, que puede consistir en el cambio de uno o más genes en la cadena.

	Gen sometido a mutación
	↓
Descendiente	1 0 1 0 0 1 0 0 1 0
Descendiente cambiado	1 0 1 0 1 1 0 0 1 0

**Figura 3.8 Gen sometido a mutación (Adaptado de Ribeiro et al., 2009)**

Este operador puede o no emplearse en un problema dado, todo dependerá de las características de las soluciones buscadas. Al realizar la o las mutaciones se pretende mejorar al individuo. Para ilustrar las ventajas de este operador, suponga el lector que el AG converge muy rápidamente a un valor que es un óptimo local. Como se trata ya de un valor óptimo, los hijos serán muy parecidos a los padres (de hecho serán sus clones), y si no se aplica el proceso de mutación, entonces la descendencia ya no cambiará. Así, con las mutaciones se pueden tener ahora padres diferentes que al reproducirse generarán nuevas poblaciones de individuos.

### 3.3.5. ¿Cuándo aplicar un Algoritmo Genético?

Se insiste en que la aplicación más común de los AG's ha sido la solución de problemas de optimización, en donde han mostrado ser muy eficientes y confiables. Sin embargo, esta técnica no necesariamente es apropiada para resolver todos los problemas de optimización, por lo que se deben tomar en cuenta las siguientes características antes de usarlos:

- Debe establecerse un rango de búsqueda para cada problema,
- Debe definirse una función de aptitud que evalúe las respuestas potenciales, y
- Las soluciones deben codificarse para que un programa de computadora las pueda operar.

### 3.4. Comentarios finales

Como se ha podido apreciar a lo largo de este capítulo, tanto el MSR como los AG's son metodologías de optimización, que le permiten al analista identificar los valores adecuados para que una función objetivo sea maximizada, minimizada o ajustada a un valor específico. Con estas ideas en mente, ahora se procede a la presentación y aplicación del modelo objeto de este trabajo, que combina ambas herramientas para rescatar sus bondades en la evaluación de riesgos en presas.

En esencia, como se describe en el siguiente capítulo, el MSR es empleado para ajustar los datos de la presa bajo estudio a un modelo de regresión polinomial, en el cual se optimizan los coeficientes de regresión. Acto seguido, dicho modelo es utilizado como función de aptitud para que los AG's busquen los valores óptimos de las variables independientes de interés.

# CAPÍTULO 4

---

## EL MODELO Y SU APLICACIÓN

---

### 4.1. Introducción

La evaluación de riesgos en presas de tierra, mediante un enfoque cuantitativo, ha sido poco explorada en el Estado de México. De acuerdo con Pérez (2009), son pocos los estudios que se han realizado en esta materia, por lo que se ha detectado la necesidad de generar herramientas matemáticas que permitan a los administradores de estas obras, analizar los riesgos de falla a través del uso de datos duros.

Rivero (2009) presentó un modelo matemático basado en Redes Bayesianas Continuas No Paramétricas, en el que investigó la situación de siete presas de tierra en la entidad Mexiquense. Dichas presas son: Embajomuy, El Guarda, La Gavia, José Trinidad Fabela, San Joaquín, José Antonio Alzate e Ignacio Ramírez. Con la finalidad de generar más conocimiento en cuanto a las posibilidades de riesgo en estas estructuras, se ha decidido emplear una de ellas para aplicar el modelo aquí propuesto.

En el presente capítulo se expone las características de la presa bajo estudio, después se describe el modelo propiamente dicho y, con base en los datos reales investigados, el modelo es aplicado para diagnosticar la situación actual, en materia de riesgos, de la obra de interés. Con base en el análisis, se propone algunas recomendaciones y finalmente en el siguiente capítulo se concluye la tesis.

### 4.2. Descripción del Caso en Estudio

Después de un riguroso análisis de las posibles presas a estudiar para los fines de la investigación, se eligió a la Presa José Antonio Alzate (San Bernabé) debido a que es una de las que posee mayor información reportada en la literatura. No menos importante es el hecho de ser una de las más cercanas a la ciudad de Toluca. A continuación, se describe brevemente las características principales de dicha estructura

Construida bajo la dirección de la Secretaría de Recursos Hidráulicos entre 1960 y 1962, con capacidad para albergar 35.3 millones de m<sup>3</sup> de agua, está ubicada en la comunidad de Tlachaloya 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 (SRH, 1976; CONAGUA, 1993). Su cuerpo de agua es alimentado por el cauce del río Lerma que pasa por 1988 localidades (Pérez, 2009). La presa beneficia principalmente a los municipios de Ixtlahuaca, Atlacomulco, y Almoloya de Juárez. En la Tabla 4.1 se presentan algunas características técnicas de la estructura.

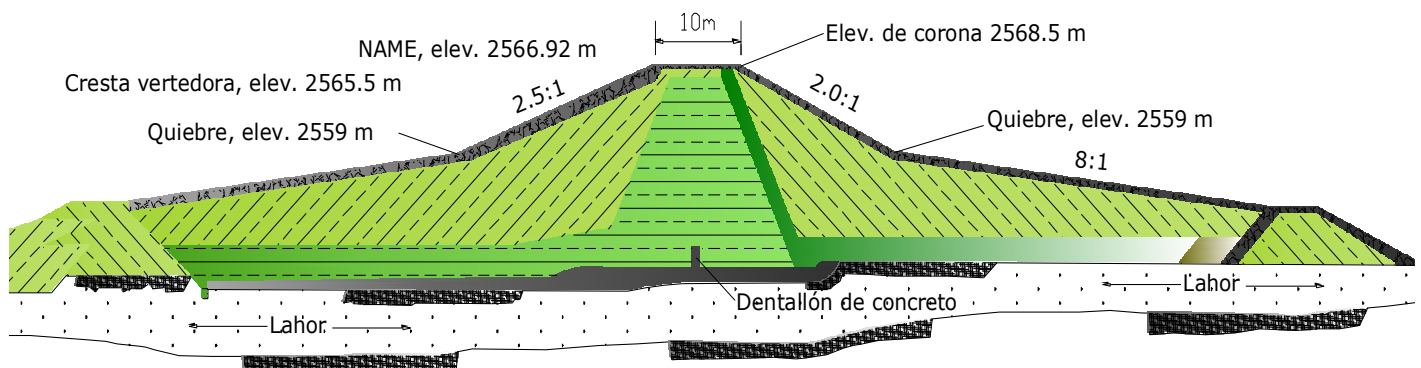
La presa comenzó a operar en 1962, con su capacidad de almacenaje de diseño, hasta el nivel 2565.50 msnm, y un almacenamiento de 17.2 millones de m<sup>3</sup> hasta la elevación 2566.92 msnm. Según los registros históricos, el costo de la obra, actualizada para ese año fue de: \$ 4'437,000 en obras conexas y varias, \$ 437,000 en caminos, y \$ 12'810,000 en la cortina, para hacer un total de \$17'640,000 (Rivero, 2009).

**Tabla 4.1 Principales características de la presa Jose Antonio Alzate (Adaptado de SRH, 1976)**

Presa Jose Antonio Alzate			
Corriente:	Jerma	Vaso	
Estado:	México	Capacidad de Azolves:	8.0 hm <sup>3</sup>
Año de terminación:	1962	Capacidad útil:	27.3 hm <sup>3</sup>
Constructor:	S.R.H.	Super-Almacenamiento:	17.2 hm <sup>3</sup>
Propósito:	Irrigación	Capacidad Total:	52.5 hm <sup>3</sup>
Cuenca		Vertedor	
Area:	2100 km <sup>2</sup>	Tipo:	L
Gasto Max. Registrado:	92 m <sup>3</sup> /s	Carga máxima:	1.42 m
Escurrem. Med. Anual:	190.4 hm <sup>3</sup>	Longitud de cresta:	75 m
Gasto Max. Probable:	800 m <sup>3</sup> /s	Capacidad:	254 m <sup>3</sup> /s
Presa			
Tipo:	Tierra		
Altura:	24 m		
Long. de corona:	282 m		
Volumen:	168000 m <sup>3</sup>		
Factor de seguridad:	1.95		

Los principales factores que originaron su construcción fueron dos: el aprovechamiento de las aguas del río Jerma para actividades de riego, y el control de avenidas (CONAGUA, 1993). Su cuenca de captación cubre un área de 2100 km<sup>2</sup> por lo que se considera una de las presas más grandes en el Estado de México destinadas al riego. La geología regional tiende a ser lacustre, con grandes afluentes que nacen en la zona oriente de la sierra de las cruces, y en las áreas pantanosas del municipio de Jerma. Esta cuenca presenta un escurrimiento anual de aproximadamente 190.4 hm<sup>3</sup> (ver Tabla 4.1).

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 (Lahor), resistente al oleaje y a la erosión mediante chapas de roca en los dos paramentos (CONAGUA, 1993). La Figura 4.1 muestra la sección transversal de la cortina, donde se especifican algunas elevaciones de diseño (SRH, 1976).



**Figura 4.1 Sección Transversal de la presa José Antonio Alzate (Adaptado de SRH, 1976)**

Como se aprecia en la Figura 24, los 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 (CONAGUA, 1993).

La obra de excedencias se ubica en el lado izquierdo, y corresponde al tipo de “cresta libre” con una longitud de 75m. Es básicamente un canal lateral tipo Creager, que descarga el agua en otro canal colector paralelo al cimacio, conduciendo a su vez hacia un tanque amortiguador. El vertedor tiene una capacidad máxima de 254 m<sup>3</sup>/s. La Figura 4.2 muestra dos imágenes, en donde se aprecia la situación actual de la cortina tanto aguas abajo, como aguas arriba (vertedor).



(a) Aguas arriba



(b) Aguas abajo

Figura 4.2 Vertedor de la Presa José Antonio Alzate

Por otro lado, la obra de toma consiste en un túnel profundo de 147 m de longitud y 2.5 m de diámetro, perforado a través de la ladera derecha (ver Figura 4.3). Además cuenta, en su extremo aguas arriba, con una estructura de entrada con rejilla, que tiene 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 m<sup>3</sup>/s. Así mismo, cuenta en el extremo aguas abajo con un tanque amortiguador de sección trapezoidal de 1.60 m de profundidad, 12 m de longitud y 5 m de ancho de plantilla, revestido con concreto.



(a) Salida de la obra de toma



(b) Obra de toma aguas abajo

Figura 4.3 Obra de toma de la presa José Antonio Alzate

En las inmediaciones del embalse existen pequeñas viviendas y algunos sembradíos de maíz y frijol. Cabe aclarar que la mayor parte de la población de esa zona se dedica a la agricultura y a la ganadería. En términos de obras de infraestructura, en las cercanías, las principales corresponden a estructuras para el suministro de energía eléctrica, y también se cuenta con vías de comunicación.

Aguas abajo de la presa se encuentran algunas poblaciones, entre las que destacan: Ixtlahuaca de Rayón, el parque industrial de Atlacomulco de Fabela, San Jerónimo Ixtapantongo, San Lorenzo Tlacotepec, La Concepción de los Baños, Santo Domingo de Guzmán y San Cristóbal de los Baños. Así mismo, se ubica la carretera que comunica a la Ciudad de Toluca con Atlacomulco, Morelia, Guadalajara, y la carretera México-Querétaro. Como se puede observar, la seguridad de la presa Alzate es relevante por las posibles consecuencias que conllevaría su eventual falla, en la infraestructura existente debajo de la cortina.

Por otro lado, la función de la presa ha cambiado, ya que las actividades de irrigación se han disminuido, lo que ha provocado que en la actualidad su función principal sea el control de avenidas, para prevenir inundaciones en las poblaciones referidas. Es importante aclarar que la cortina es utilizada también como puente vehicular para comunicar a las comunidades localizadas en los municipios de Temoaya y Almoloya de Juárez. Habiendo presentado las principales características de la presa de interés, ahora se continúa con la descripción del modelo que evalúa el nivel de riesgo de dicha estructura.

### **4.3. Formulación del Modelo**

La literatura (Foster et al., 2000) reporta distintos factores que pueden ocasionar el colapso de una presa, entre los que se pueden mencionar: el desbordamiento, la tubificación, el deslizamiento de taludes, las fallas estructurales provocadas por sismos, la formación de brechas y las fallas provocadas por la falta de mantenimiento. Notar que los tres primeros, son los principales modos de falla en presas de tierra (Pérez, 2009).

Para dar inicio con la construcción del modelo, el primer paso es seleccionar aquellas variables que se desea analizar, y que tienen influencia en el nivel de seguridad de una presa. Para el presente estudio se emplean aquellas sobre las cuales el ingeniero civil tiene control. En este caso, de las variables mencionadas en el párrafo anterior, las que cumplen con este criterio son: el mantenimiento, el factor de seguridad<sup>6</sup> y la tubificación. Para definir las, se usan las descripciones operacionales que fueron presentadas por Pérez (2009), y que son reproducidas más adelante en la sección denominada “variables del modelo”.

Acto seguido, se diseña un experimento y se seleccionan los puntos centrales y axiales, que son la base para generar los datos de entrada del modelo. Posteriormente se aplica el MSR a los datos para obtener una ecuación de regresión que contenga los coeficientes de un polinomio optimizado, que para efectos de este trabajo es aquel que mejor se ajusta a los datos experimentales. La expresión obtenida se convierte entonces en la función de aptitud, que es la

---

<sup>6</sup> El factor de seguridad está directamente relacionado con las fallas por deslizamiento de taludes, como lo propone Pérez (2009).

usada en los AG's para obtener los valores de las variables de interés que optimizan la respuesta buscada. La Figura 4.4 presenta el diagrama de flujo a seguir para realizar el proceso descrito.

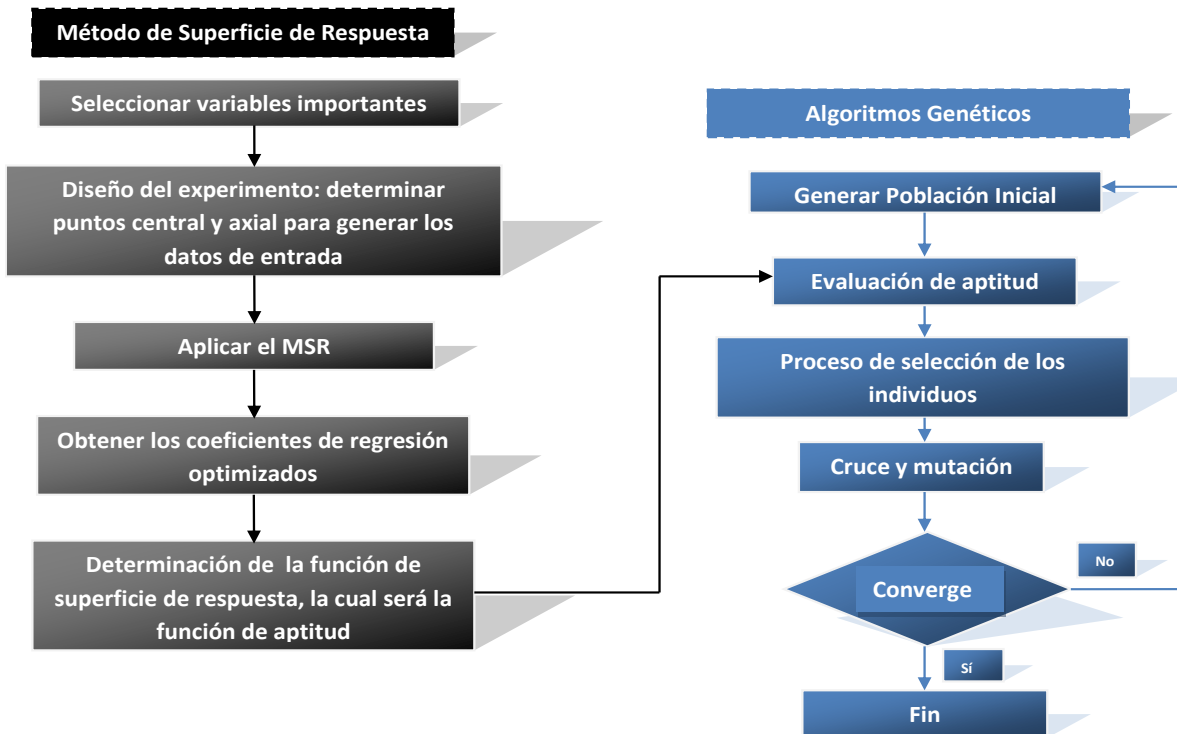


Figura 4.4 Diagrama de flujo del modelo propuesto, en el que se combina el MSR y los AG's

Su implementación práctica involucra el uso del programa comercial "Design Expert 7", que contiene un módulo específico para realizar los cálculos involucrados en el MSR. De la misma manera, se continúa con la descripción de las variables empleadas en el modelo.

#### 4.4. Las variables del modelo

Con la intención de probarlo, en esta investigación se han tomado en cuenta algunos factores que comúnmente ocasionan la falla en presas de tierra. Después de un análisis exhaustivo de las variables propuestas por Pérez (2009), se han elegido las tres siguientes: mantenimiento, factor de seguridad y tubificación, las cuales tienen un efecto en los costos totales esperados debido a la eventual ruptura de una presa (Foster et al., 2000). Cabe aclarar que estas variables fueron elegidas por que son las que el ingeniero civil puede controlar. Otra razón para analizarlas, se debe a que han sido poco estudiadas en cuanto a la evaluación de riesgos, en contraste con las demás variables que pueden ocasionar la falla en presas, tales como el desbordamiento, el sismo y el abrechamiento. Para dejar claras cada una de las variables consideradas en el modelo, a continuación se resalta su importancia.

##### 4.4.1. Mantenimiento

De acuerdo con Pérez (2009), operacionalmente esta variable se puede entender como "el número de años entre las actividades de mantenimiento, que se requerirían para conservar a las presas en óptimas condiciones (como nuevas)".



En México, solo 265 presas de las 4000 que opera la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2008) han sido rehabilitadas, lo que implica un riesgo latente para la población que habita aguas abajo de los complejos hidráulicos y su entorno, sobre todo en las estructuras más antiguas. Así, existe el peligro de que se presenten descargas extraordinarias del líquido, por falta de mantenimiento (ej: obstrucciones en la obra de toma o en la obra de excedencias).

De esta forma, la CNA (2009) afirma que en las presas Mexicanas existen muchas deficiencias en la operación de compuertas, válvulas, instalaciones eléctricas y equipos de bombeo. De acuerdo con el documento revisado, el problema se agrava por la falta de recursos para realizar los trabajos de rehabilitación. La institución advierte que la mitad de las presas que hay en el país tienen más de 40 años, lo cual indica que están a una década de llegar al final de su vida útil.

Al problema anterior se suma el desconocimiento de la cantidad de sedimentos que se encuentran acumulados en el fondo de las presas, lo cual puede repercutir en: la capacidad de los embalses, el desfogue de agua, la calidad del líquido, e incluso la falla total de la estructura (Cruz, 2009).

Actualmente el organismo tiene una lista de 40 presas que requieren atención inmediata y que fueron incorporadas al Programa de Mantenimiento del 2009. Sin embargo, ese número es 30% menor al total de presas rehabilitadas en 2008, que fue de 66 estructuras (Cruz, 2009). Como se puede apreciar, en el país existen grandes deficiencias en cuestión del mantenimiento en presas, por tal razón esta variable fue considerada en el modelo aquí propuesto. A continuación se enfatiza la importancia de estudiar al factor de seguridad.

#### **4.4.2. Factor de seguridad**

Para comprender la definición operacional de esta variable, es necesario poner al lector en contexto. Pérez (2009), estudio los factores de seguridad de las siete presas mexiquenses antes mencionadas. Para ello consultó los datos de diseño y empleó el método Sueco o de Fellenius para obtener los factores de seguridad de las presas para las que la literatura no reportaba dichos valores. Así mismo, se debe mencionar que Pérez no utilizó al factor de seguridad propiamente dicho, sino el deslizamiento de taludes, el cual hizo operacional a través de la siguiente definición: *“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 método Sueco”* (Pérez, 2009). Notar que el factor de seguridad es adimensional.

Los taludes de una presa de tierra deben ser estables aún en las condiciones más desfavorables de esfuerzo que puedan presentarse. El factor de seguridad se puede considerar como una proporción entre la resistencia de la estructura y las cargas aplicadas. Esta condición implica que los esfuerzos cortantes originados por el propio peso de la presa, y las fuerzas de filtración no deben exceder a los esfuerzos cortantes que los materiales del terraplen y la cimentación pueden soportar. La expresión que resume estos conceptos es (Juárez y Rico, 1996):

$$FS = \frac{\sum \text{Momento resistente}}{\sum \text{Momento motor}} \quad (19)$$

Donde :

**FS:** Factor de seguridad

$\Sigma$  **Momento resistente:** La oposición que ofrecen las partículas al desplazamiento

$\Sigma$  **Momento motor:** Esfuerzos debido al peso de la estructura y las cargas aplicadas

En este caso, la probabilidad de falla se expresa como se muestra en la ecuación (26):

$$P_F = \int_0^1 f_{\theta}(\theta) d\theta = F_{\theta}(1) \quad (20)$$

Gráficamente, la ecuación anterior se representa por medio de la Figura 4.5, donde el área bajo la curva define la probabilidad de falla.

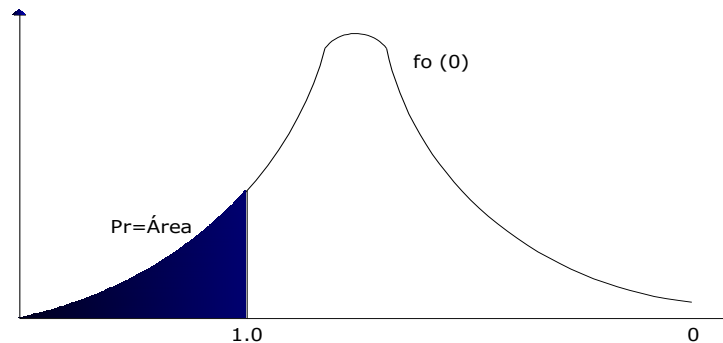


Figura 4.5 Función de distribución para el Factor de Seguridad (Adaptado de Pérez, 2009)

En esta figura, los valores que son mayores a 1, indican que la estructura es razonablemente segura, mientras que los que son menores o iguales a 1 (parte sombreada), representan la región en la cual la estructura no soportará los esfuerzos que sobre ella actúan. En ingeniería, el Factor de Seguridad (FS), se emplea para el diseño de diferentes elementos estructurales.

En este sentido, es importante mencionar que las presas de tierra por lo regular deben diseñarse con factores de seguridad superiores a 1.5 (Juárez y Rico, 1996). Dicho valor fue propuesto por Fellenius en 1926, y se ha mantenido como un valor aceptable para el caso de estructuras permanentes. En esencia, el cálculo del FS normalmente se realiza mediante iteraciones, con base en diferentes valores de las características del talud, hasta alcanzar el nivel de seguridad requerido.

En la Figura 4.6 se presenta una descripción gráfica general del método Sueco o de Fellenius, para la obtención del FS. Si el lector está interesado en conocer más detalles del método, puede consultar Juárez y Rico (1996). Pérez (2009) empleó este método y concluyó que la presa José Antonio Alzate tenía un FS = 1.95, lo que ratifica el valor obtenido en SRH (1976).

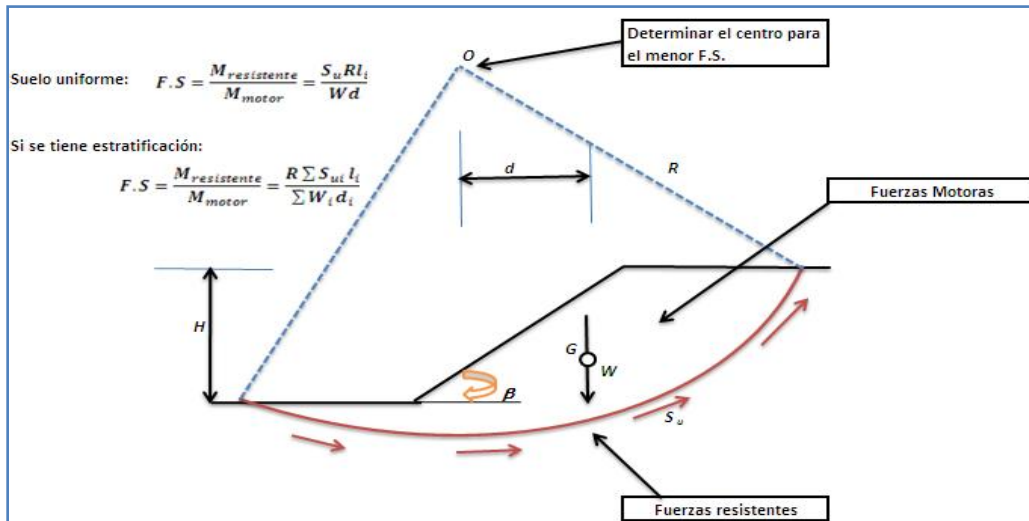


Figura 4.6 Descripción general del Método Sueco (Adaptado de Pérez, 2009)

Donde:

**FS:** Factor de seguridad

**$\beta$ :** Angulo de inclinación del talud

**H:** Altura del talud

**O:** Centro del círculo de falla (propuesto)

**R:** Radio del círculo de falla

**d:** Distancia del centro del círculo de falla al centroide de la masa de suelo analizado

**W:** Peso del suelo de la sección analizada

**G:** Centroide de la masa de suelo analizada

**$l_i$ :** Espesor de la sección analizada (ancho, que se mide de forma perpendicular al plano y generalmente es unitario)

**$S_u$ :** Fuerza resistente

El método está basado en las siguientes hipótesis (Ahedo y Sánchez, 2003):

- 1) La superficie de falla es cilíndrica,
- 2) El prisma deslizante se desplaza como cuerpo rígido, girando sobre el eje del cilindro,
- 3) Cada dovela funciona independientemente de sus vecinas,
- 4) El valor del factor de seguridad del conjunto de dovelas es el promedio de los valores de todas las dovelas.

Es importante hacer notar que la práctica ha demostrado que el método Sueco proporciona excelentes resultados. Lo anterior es válido sobre todo en los casos en que se le emplea con las restricciones propias de las imprecisiones que se derivan de las hipótesis mencionadas. No obstante, mientras no se disponga de procedimientos que permitan conocer la distribución real de esfuerzos dentro de la masa del talud, el método Sueco seguirá siendo una herramienta útil para la ingeniería. Por ello es importante estudiar las distintas condiciones de trabajo a las que están sometidos los materiales, durante la vida de la presa, pues su conocimiento permitirá que se

tengan buenos diseños. Una vez explicado brevemente el método de Fellenius, se procede ahora a la descripción de la variable tubificación.

#### 4.4.3. Tubificación

La tubificación consiste en el flujo de agua que se introduce en la cortina y se mide en litros por segundo (l/seg). Pérez (2009) la define como: *“el 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”*.

El agua, al fluir a través de la tierra, genera fuerzas erosivas que tienden a empujar las partículas del suelo, arrastrándolas en la dirección del flujo. Al momento en que se produce este arrastre se dice que ha comenzado el fenómeno de tubificación. Es decir, al estar almacenado el líquido detrás de una presa de tierra, una parte comienza a filtrarse a través del cuerpo de la presa o de su cimentación, siguiendo la trayectoria que por lo general se inicia del lado de aguas arriba. La filtración a través de la presa o la cimentación depende, principalmente, de la capacidad de los suelos para resistir el paso del agua.

En algunos casos, la velocidad del agua llega a provocar el arrastre de partículas de suelo, iniciando así la formación de un ducto o tubo que progresa en la dirección hacia aguas abajo, hasta que alcanza a establecer la comunicación entre ambos lados de la presa, por lo que el agua provoca el arrastre de material, ampliando considerablemente la sección del tubo formado. El trabajo erosivo del agua progresa rápidamente, provocando en algunas ocasiones la falla completa de la presa, lo que se conoce comúnmente como falla por tubificación. En las Figuras 4.7, 4.8, y 4.9 se representan las trayectorias de desarrollo de la tubificación en una presa de tierra.

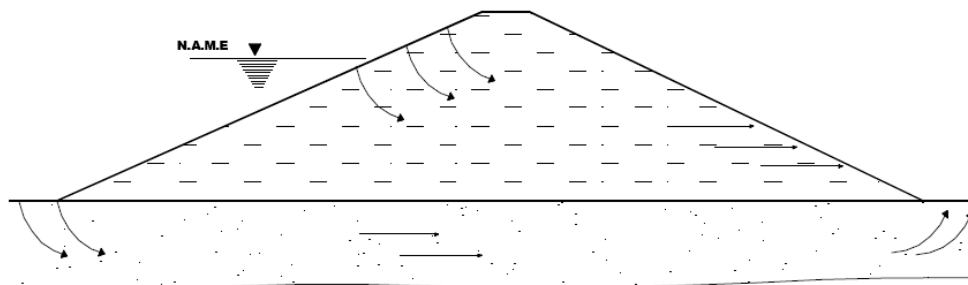


Figura 4.7 Filtraciones iniciales (Ahedo y Sánchez, 2003)

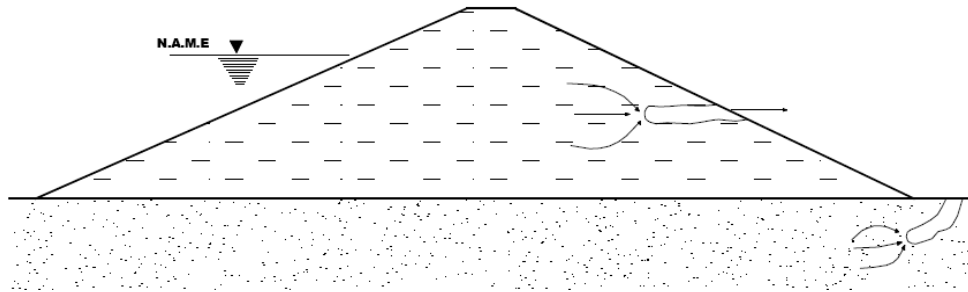


Figura 4.8 Iniciación del tubo aguas abajo (Ahedo y Sánchez, 2003)

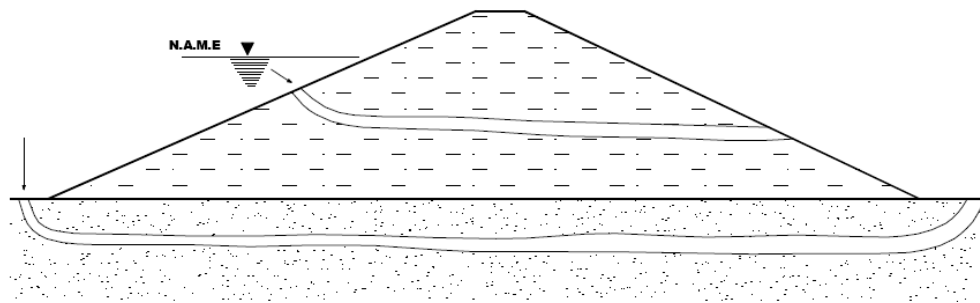


Figura 4.9 Tubificación completa (Ahedo y Sánchez, 2003)

En ocasiones el problema de la tubificación se presenta desde la puesta en servicio de la presa, por lo que se manifiesta posteriormente sin poder solucionar el problema una vez que se ha originado. Esto se debe principalmente a la falta de monitoreo constante, a la insuficiencia de compactación de los materiales del talud, al tipo y a la calidad de los materiales que componen la estructura, y a rupturas de obras como los tubos o galerías al interior de la cortina. En la práctica, se ha observado una relación directa entre la tubificación y el Índice Plástico (IP) del material de la cortina, por lo que dicho valor es un buen indicador de que tan propensa es una presa a tener tubificación (Juárez y Rico, 1996).

En algunos casos la formación del ducto se inicia a través del terraplén de la presa, es decir por medio de los muros de contención o conductos de obras de toma que atraviesan el cuerpo de la cortina. Los movimientos ocasionados por el asentamiento del terraplén a largo plazo, llegan a provocar la separación entre la tierra y el elemento rígido de la mampostería, dando lugar a la formación de algún tubo. La evidencia empírica ha mostrado que no todos los suelos son susceptibles a los daños causados por la tubificación, lo cual depende de la adherencia de las partículas del suelo, el tamaño y el peso de cada una (Foster et al., 2000).

Así, las arcillas de alta plasticidad, son poco susceptibles a la tubificación. Las gravas, los cantos rodados y los enrocamientos, no son fáciles de arrastrar por el agua, a menos que esta fluya con gran velocidad. En cambio, los suelos formados por granos pequeños, como las arenas finas y los limos de baja plasticidad, ofrecen una mínima resistencia a la erosión y, por lo tanto, son los más susceptibles a fallar (Foster et al., 2000).

Un ejemplo de tubificación en México, se presentó en la presa La Laguna, ubicada en el Estado de Puebla que falló en 1983. En ella, se registró la ruptura del empotramiento izquierdo de

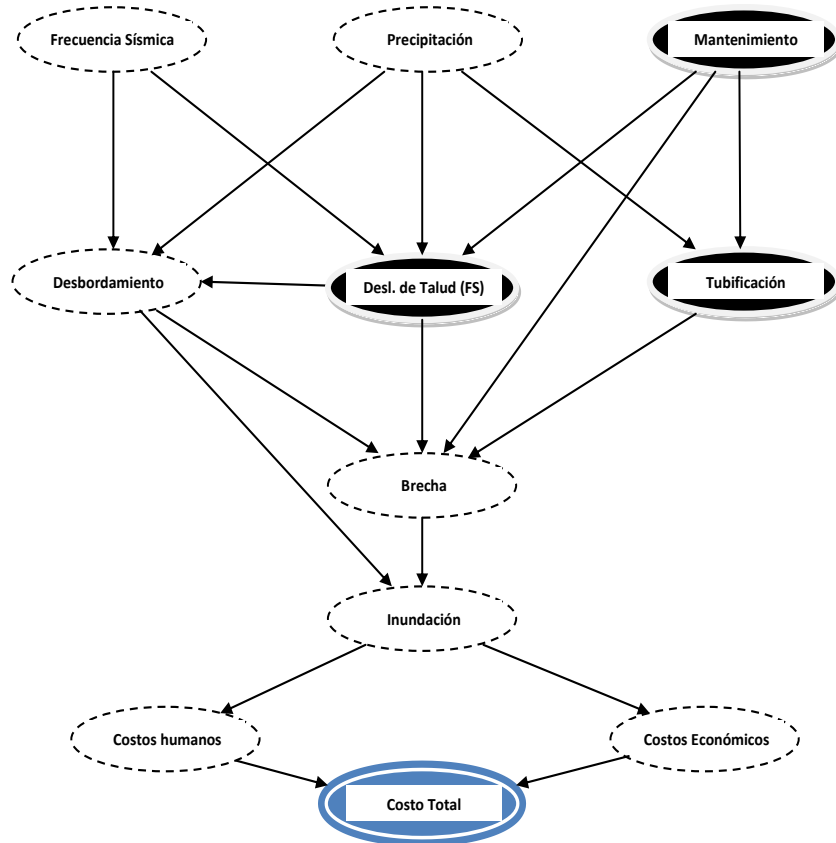
la cortina a causa de diversas tubificaciones, provocando grandes orificios, así como la formación de distintas brechas en el cuerpo de la estructura. Esos daños, provocaron a su vez la destrucción de caminos, y el deslizamiento masivo de taludes aguas abajo (Pérez, 2009).

De este modo, solo por debajo del desbordamiento con un 48% de las fallas, la tubificación es la segunda causa de falla más frecuente en presas de tierra en el mundo, con un 25% del total de estas entre 1964 y 1983 (Pérez, 2009). Pese a su importancia, las investigaciones en el área son relativamente escasas. A continuación se presenta una breve descripción de la Red Bayesiana desarrollada por Pérez (2009), la cual es empleada para generar los datos experimentales que requiere el MSR.

#### **4.5. Red Bayesiana**

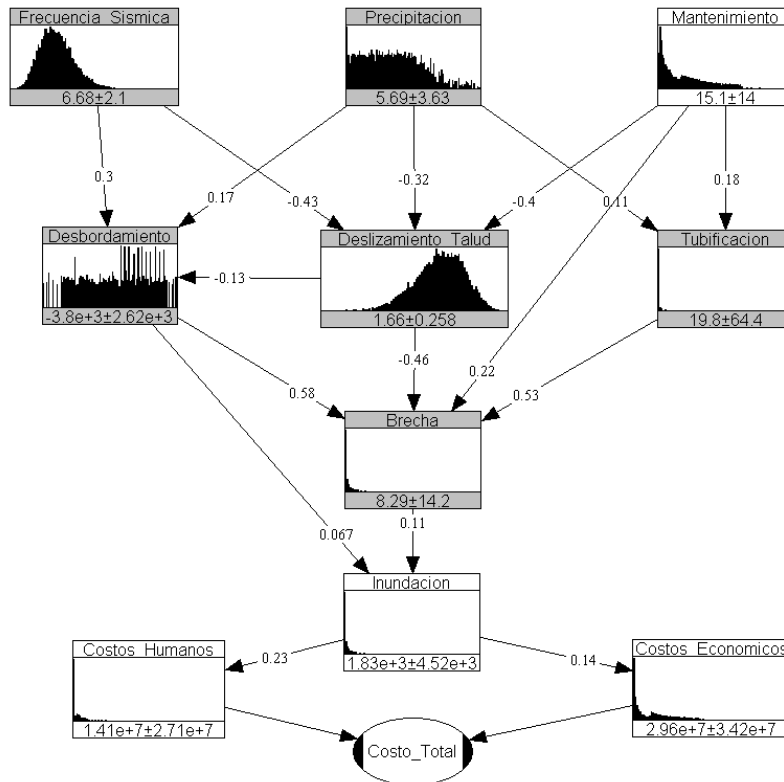
Son gráficos dirigidos acíclicos, formados por nodos y arcos en los que se representan las variables de interés y sus correlaciones respectivamente. En la figura 4.10 se muestra una representación gráfica de la Red Bayesiana de Pérez (2009). Como se puede apreciar, el modelo consta de 11 nodos, 10 de ellos ya han sido explicados en otras investigaciones (Pérez, 2009) y representan los modos de falla más sobresalientes que, de acuerdo con las estadísticas internacionales (Foster et al., 2000), son significativas para predecir la eventual falla de la cortina de una presa de tierra.

En esencia las variables del modelo están correlacionadas, por lo que una puede conducir a otra generando una secuencia de eventos que producen la falla de la estructura, generando costos. Como se puede observar, los nodos de color negro representan las variables estudiadas en este documento, que a su vez influyen en la variable denominada costo total.



**Figura 4.10 Modelo general de la Red Bayesiana (Adaptado de Pérez, 2009)**

Cabe aclarar que la red fue construida a partir de histogramas de probabilidad, los cuales a su vez fueron elaborados por medio de un procedimiento que se basa tanto en las experiencias teóricas como prácticas de expertos en el área. La finalidad de emplear los histogramas se debe a que con ellos se pueden observar, esquemáticamente, las formas que adoptan las distribuciones de probabilidad, y brindar al analista la posibilidad de identificar visualmente el comportamiento de las variables. En la Figura 4.11, se representa la Red Bayesiana y los histogramas que la componen.



**Figura 4.11 Modelo general de la Red Bayesiana y los histogramas que la componen (Pérez, 2009)**

Como se puede apreciar, el resultado final del modelo son los costos totales, calculados mediante la consideración de las interrelaciones de todas las variables estudiadas. Cabe señalar que dichos costos no son necesariamente la suma aritmética de sus predecesoras, ya que su valor final depende del valor de los coeficientes de correlación empleados en las flechas que unen los nodos “costos humanos” y “costos económicos” con el de “costos totales”, que no son lineales.

La Red Bayesiana es utilizada en este trabajo porque se cree firmemente que produce resultados “confiables” sobre la presa en estudio, por el hecho de considerar sus datos como parte de la red. Por otro lado, el MSR requiere de una serie de datos experimentales que en esta investigación resulta muy costoso llevar a cabo, por tal motivo, se insiste en su uso. Teniendo claras las tres variables de interés para el presente estudio, y con base en los pasos propuestos para combinar el MSR y los AG’s, ahora se expone la aplicación del modelo en la presa bajo estudio. Así mismo, se reitera que si el lector desea saber más sobre las Redes Bayesianas puede consultar a Perez (2009) y Rivero (2009).

#### 4.6. Aplicación del modelo y análisis de resultados

Como primer paso para cumplir con los objetivos de la investigación, el modelo se pone a prueba con los datos producidos por la Red Bayesiana desarrollada por Pérez (2009). De nuevo, dicha red fue generada a partir de los histogramas correspondientes de las variables estudiadas en su investigación, las cuales incluyen, entre otras: mantenimiento, factor de seguridad, tubificación



y costo total. En ese estudio, se consideraron datos pertenecientes a la presa José Antonio Alzate, por lo que se cree que los resultados que genera son válidos y aplicables al presente trabajo.

Cabe aclarar que de dicha red se utilizan los valores correspondientes al 50 percentil de cada uno de los histogramas de las variables de interés, pues al tratarse de la mediana, se brinda una buena idea de los valores esperados. Siguiendo los pasos que indica el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.4 se emplea la rutina desarrollada para encontrar un polinomio de regresión que se ajuste a los datos generados por la Red Bayesiana.

En este caso se eligieron como variables de influencia: mantenimiento, factor de seguridad y tubificación, mientras que la respuesta consiste en el Costo Total. Este último concentra tanto a las pérdidas humanas como a las económicas. De nuevo, las primeras tres variables fueron seleccionadas ya que son las que el ingeniero civil puede controlar. Dado que uno de los objetivos de esta investigación es obtener el valor mínimo de la variable Costo Total, a partir de la optimización de los valores de las variables de influencia, se empleará la rutina ya descrita para tal fin. Cabe recordar que, como se estableció en el alcance de la tesis, el costo es útil para determinar el nivel de riesgo de la presa.

Así, primero se ordenan los datos de entrada del modelo, para posteriormente realizar el diseño factorial requerido por el MSR. Con base en los cálculos que realiza la Red Bayesiana, se obtiene el valor inicial de la media y de la desviación estándar de cada variable, tal y como se presentan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2 Media y desviación estándar obtenida de la Red Bayesiana de Pérez (2009)**

	<b>Mantenimiento=<math>X_1</math> (Años)</b>	<b>FS(<math>X_2</math>)</b>	<b>Tubificación=<math>X_3</math> (l/s)</b>
Media	15.13	1.65	19.76
Desv. Estandar	13.98	0.26	64.38

Como se puede observar, el mantenimiento tiene una media de 15.13 años con una desviación estándar de 13.98 años. Esto significa que, en promedio, a las siete presas estudiadas en el Estado de México, se les da mantenimiento cada 15 años. En realidad se considera este como un valor sesgado, ya que algunas de esas presas han concluido ya su vida útil, y por lo tanto no han recibido mantenimiento en varios años. Por ejemplo, la presa Embajomuy cumplió 65 años en 2009, y en la actualidad se encuentra en malas condiciones.

En lo que se refiere al factor de seguridad, en promedio las presas tienen valores de 1.65 para esta variable, y con respecto a la tubificación la media es de 19.73 l/s. En este último caso es importante aclarar que no significa que las siete presas presenten el fenómeno de la tubificación, sino que en caso de presentarlo se esperaría que el gasto fuera del orden de esos 19 l/s.

En cuanto al diseño experimental, para llevar a cabo la codificación, el MSR requiere los siguientes valores codificados, para generar los puntos axiales y el central: -1.68, -1, 0, 1, 1.68. Haciendo la codificación correspondiente para cada variable, se obtienen los datos presentados en la Tabla 20.

**Tabla 4.3 Codificación de las variables de interés**

Valores codificados	Mantenimiento= $X_1$ (Años)	FS( $X_2$ )	Tubificación= $X_3$ (l/s)
-1.68	0.65	1.22	0.00
-1	1.15	1.39	0.00
0	15.13	1.65	19.76
1	29.11	1.91	84.15
1.68	38.64	2.09	128.04

Para ejemplificar el proceso, se obtiene el valor codificado de la variable FS correspondiente a -1.68. Primero se suma su media (1.65) a el producto de -1.68 por su desviación estándar (0.26), dando como resultado final 1.22; de la misma manera, para el valor codificado -1, se suma la media del FS (1.65) a el producto de -1 por su desviación estándar (0.26), dando como resultado final el valor de 1.39. Lo mismo sucede con los demás valores y variables.

Como se aprecia, el valor mínimo de la variable mantenimiento es de 0.65 y el máximo es de 38.64 años; para la variable FS los valores son 1.22 y 2.09 respectivamente, y para la Tubificación 0 y 128.04 l/s. Una vez que se obtienen los datos mencionados se ordenan utilizando el criterio de la Tabla 4.4, que corresponde a un diseño experimental  $2^3$  aumentado con 6 puntos centrales y 6 puntos axiales.

**Tabla 4.4 Criterio de entrada del modelo con las variables codificadas**

Mantenimiento= $X_1$ (Años)	FS( $X_2$ )	Tubificación= $X_3$ (l/s)
1	1	1
1	-1	-1
0	0	1.68
0	0	-1.68
-1.68	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
1	-1	1
-1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1
0	0	0
0	0	0
0	1.68	0
1.68	0	0
1	1	-1
0	-1.68	0
-1	1	-1
-1	-1	1

Como se puede apreciar, el origen (0,0,0) o punto central se repite 6 veces para determinar el error estándar de la regresión. Los datos de entrada para el MSR quedan ordenados como se muestra en la Tabla 4.5, y con la Red Bayesiana se obtienen las respuestas (costo total) para cada caso, mediante la sustitución en dicha red de los valores de mantenimiento, factor de seguridad y tubificación indicados en la misma tabla. El costo total se mide en pesos (\$) y va de \$ 42'608,000 a \$ 44'606,000. Esto quiere decir que en la eventualidad de que la presa de estudio

llegue a fallar, se esperarían costos de ese orden. Es importante aclarar que Rivero (2009) mostró que los resultados de la Red Bayesiana se acercaban a datos reales de presas que habían fallado.

Tabla 4.5 Datos de entrada para Design Expert

Mantenimiento= $X_1$ (Años)	FS( $X_2$ )	Tubificación= $X_3$ (l/s)	Costo T.=R (\$)
29.11	1.91	84.15	43815000.00
29.11	1.39	0.00	43364000.00
15.13	1.65	128.04	44302000.00
15.13	1.65	0.00	43023000.00
0.65	1.65	19.76	44049000.00
15.13	1.65	19.76	44041000.00
15.13	1.65	19.76	44041000.00
15.13	1.65	19.76	44041000.00
29.11	1.39	84.15	44594000.00
1.15	1.91	84.15	43821000.00
15.13	1.65	19.76	44041000.00
1.15	1.39	0.00	43370000.00
15.13	1.65	19.76	44041000.00
15.13	1.65	19.76	44041000.00
15.13	2.09	19.76	43255000.00
38.64	1.65	19.76	44039000.00
29.11	1.91	0.00	42608000.00
15.13	1.22	19.76	44606000.00
1.15	1.91	0.00	42613000.00
1.15	1.39	84.15	44600000.00

Notar que en este caso el valor de la respuesta es el mismo para los 6 experimentos que consideran el origen, pues la Red Bayesiana simula un experimento en el cual no hay imprecisión o error de lectura. Una vez obtenidas las variables de entrada, se procede a la aplicación del MSR en el paquete Design Expert®. De esta forma, se obtiene la ecuación de superficie correspondiente a los Costos Totales, en función del: mantenimiento, factor de seguridad y tubificación, la cual resulta ser la que se muestra enseguida. Cabe resaltar que se trata de una función no-lineal, pues el polinomio de segundo grado es el que mejor se ajusta a los datos observados.

$$\begin{aligned}
 R = & 44049751.80 - 2915.60x_1 - 391239.59x_2 + 514467.89x_3 \\
 & + 125.00x_1x_2 - 125.00x_1x_3 - 5625.00x_2x_3 \\
 & - 56137x_1^2 - 96265.31x_2^2 - 191017.62x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Donde:

$R$ : Costo Total

$x_1$ : Mantenimiento

$x_2$ : Factor de Seguridad

$x_3$ : Tubificación

Este modelo se eligió después de probar que era el que mejor se ajustaba a los datos de entrada. También se probaron otros modelos como el lineal, el cúbico y el cuartico. El análisis de varianza del modelo se presenta en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Análisis de varianza del modelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F estimada	Prob>F	
Modelo	3.33E-03	9	3.70E-04	17.02	< 0.0001	Significativo
x <sub>1</sub> -Mantenimiento	2.73E-10	1	2.73E-10	1.25E-05	0.9972	
x <sub>2</sub> -FS	1.09E-03	1	1.09E-03	50.31	< 0.0001	
x <sub>3</sub> -Tubificación	1.90E-03	1	1.90E-03	87.42	< 0.0001	
x <sub>1</sub> -x <sub>2</sub>	6.51E-11	1	6.51E-11	3.00E-06	0.9987	
x <sub>1</sub> -x <sub>3</sub>	6.51E-11	1	6.51E-11	3.00E-06	0.9987	
x <sub>2</sub> -x <sub>3</sub>	2.76E-10	1	2.76E-10	1.27E-05	0.9972	
x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	2.50E-05	1	2.50E-05	1.15	0.3090	
x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	7.30E-05	1	7.30E-05	3.36	0.0968	
x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	2.80E-04	1	2.80E-04	12.89	0.0049	
Residual	2.17E-04	10	2.17E-05			
Falta de ajuste	2.17E-04	5	4.35E-05			
Error puro	0.00	5	0.00			
Correlación Total	3.55E-03	19				

Como se puede apreciar, el análisis de varianza revela que el modelo cuadrático es estadísticamente significativo para la superficie y por consiguiente el polinomio es usado para el ajuste y análisis. La asociada Prob>F estimada para el modelo es menor que 0.05 ( $\alpha=0.05$ , o 0.95% confidencial) indicando que el modelo es estadísticamente significativo. Por otro lado, el MSR permite identificar los valores que minimizan al Costos Total. Empleando el paquete Design Expert, se determina que dichos valores son:

**Mantenimiento (x<sub>1</sub>)= 1.15 años**

**Factor de Seguridad (x<sub>2</sub>)= 1.39**

**Tubificación (x<sub>3</sub>)=0 l/s**

Sustituyendo cada uno de ellos en la expresión (21), se obtiene el Costo Total Mínimo que es de **\$ 43'242,540.24**. En la Figura 4.12, se presenta la superficie de respuesta obtenida a partir de las variables consideradas. En dicha Figura se ha dejado el valor de la Tubificación como constante e igual a 0 l/s, para poder graficar las otras tres variables de interés.

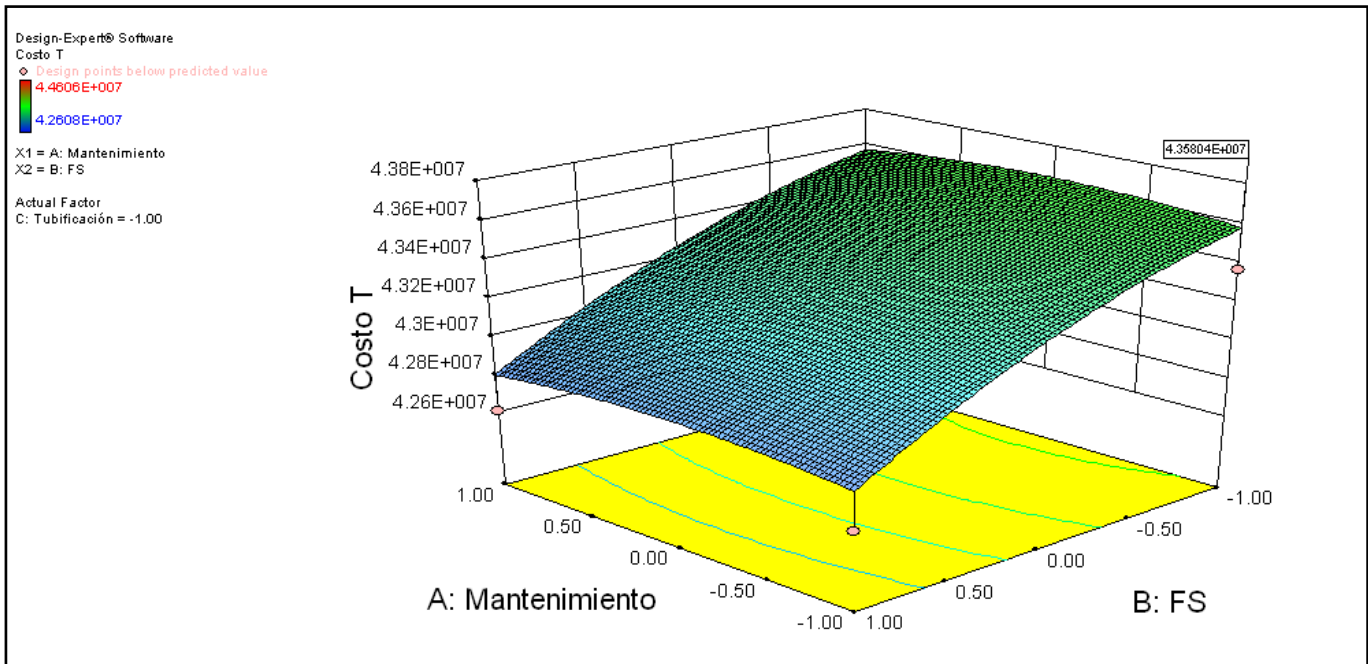


Figura 4.12 Superficie de respuesta obtenida a partir de las variables mantenimiento, factor de seguridad y tubificación (Design Expert, 2009)

Así mismo, en la Figura 4.13 se presentan las gráficas de contorno (o curvas de nivel) de la superficie encontrada, las cuales permiten conocer la ubicación del valor óptimo (mínimo) que produce el MSR para el costo total, en función de las variables mantenimiento, factor de seguridad y tubificación. De nuevo se ratifica que el valor corresponde a \$ 43,242,540.24.

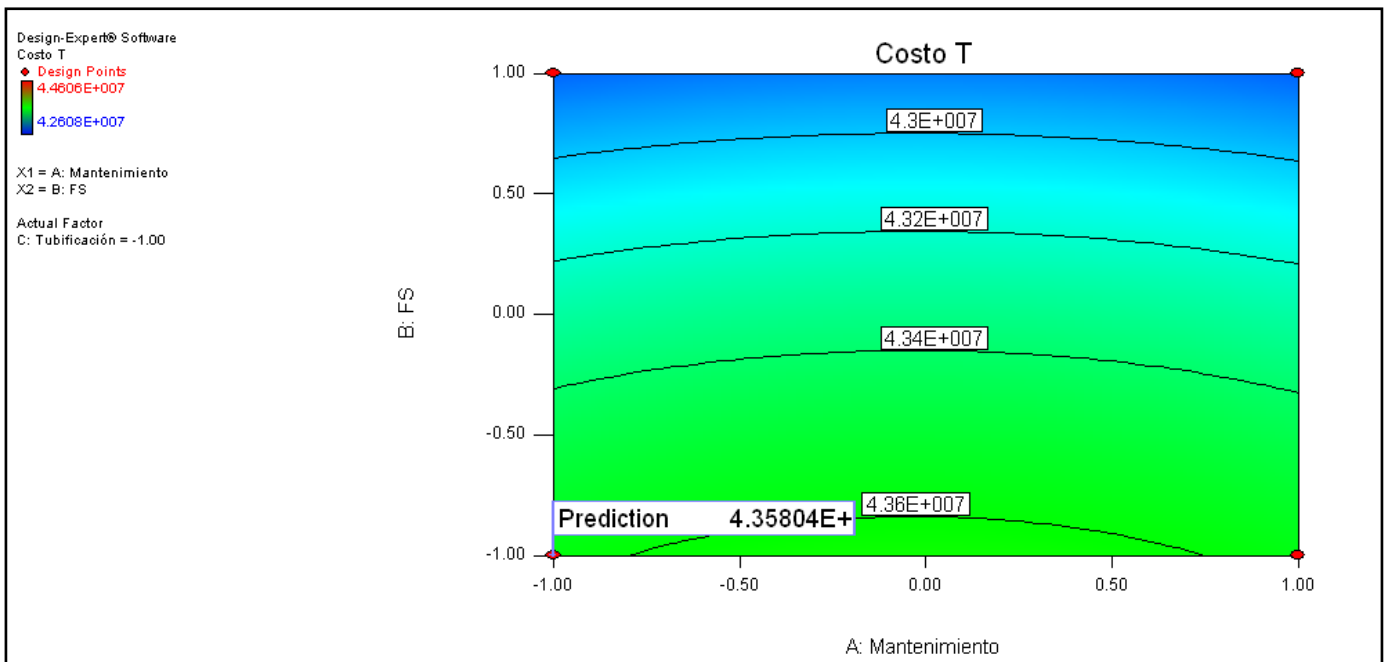


Figura 4.13 Gráfica de contorno de la superficie de respuesta obtenida (Design Expert, 2009)

En otro tenor, la combinación del MSR y de los AG's fue programada en el lenguaje de programación python, debido al conocimiento previo que se tenía de este lenguaje y a su relativa

sencillez para manipularse. Sin embargo, existen otros paquetes que también pueden emplearse para el mismo fin, como es el caso del Visual Basic, FORTRAN y C++. Así, con base en el diagrama de flujo presentado en la Figura 4.4, se generó la rutina principal que se encuentra en el Anexo C. No es la intención de este capítulo discutir en detalle los comandos de la rutina, sino ponerla a prueba para generar los resultados buscados.

Es importante mencionar que, debido a las limitaciones de tiempo para realizar este proyecto, la rutina no pudo ser perfeccionada para manejar distintos objetivos simultáneamente. Esto significa que cada variable se tuvo que optimizar de manera aislada, dejando las otras dos constantes y determinando el mejor valor en cuestión que minimizaba el costo total buscado (en la sección denominada “trabajo a futuro” se discute más este aspecto). De esta forma, considerando los mismos datos producidos por la red bayesiana, y utilizando el modelo combinado, se obtienen los valores óptimos que minimizan los costos totales en la ecuación (21), que son:

**Mantenimiento ( $x_1$ )= 0.65 años**  
**Factor de Seguridad ( $x_2$ )= 2.09**  
**Tubificación ( $x_3$ )=0 l/s**

Sustituyendo cada uno de estos valores en dicha expresión, se obtiene el Costo Total Mínimo que es de **\$ 42'861,976.89**. Como se puede observar, este valor ha disminuido en un 1.07% con respecto al obtenido mediante el MSR, lo cual confirma la hipótesis planteada al inicio de la tesis. El análisis completo se presenta más adelante, pero por ahora es importante reconocer que existe una variación entre la aplicación aislada del MSR y el modelo compuesto.

Por otro lado, se investigaron los valores de las tres variables utilizadas en el modelo, para la presa José Antonio Alzate. Cabe aclarar que estos valores fueron proporcionados al autor por la CNA, Delegación Estado de México, ya que es la institución que administra dicha presa. En lo que se refiere al mantenimiento, se especificó que este se daba de forma anual; en cuanto al valor del factor de seguridad brindado por la institución, se ratificó la cantidad obtenida con la memoria de cálculo de la SRH (1976), que a su vez coincide con el valor calculado por Pérez (2009) a través del método Sueco; y por último se indicó que no se tenían registros actuales de tubificación. En este tenor de ideas, se puede decir entonces que los valores actuales de la presa son:

**Mantenimiento ( $x_1$ )= 1 año**  
**Factor de Seguridad ( $x_2$ )= 1.95**  
**Tubificación ( $x_3$ )= 0 l/s**

Al sustituir estos tres valores en la ecuación (27), se obtiene un costo total esperado de: **\$ 42,861,976.89** el cual es mayor en un 0.18 % que el costo mínimo previamente estimado por el modelo propuesto (\$42,786,121.33). En la Tabla 4.7 se comparan los resultados obtenidos por el modelo combinado contra los obtenidos por el MSR y los actuales de la presa bajo estudio.

Tabla 4.7 Comparación de los resultados del MSR contra los valores actuales de la Presa José Antonio Alzate y los obtenidos por el modelo combinado

VARIABLES A CONSIDERAR	MSR	ACTUAL	MSR+GA's
Mantenimiento (Años/mantenimiento)	1.15	1	0.65
Factor de Seguridad	1.39	1.95	2.09
Tubificación (l/Seg)	0.00	0.00	0.00
Costo Total (\$)	\$43'242,540.24	\$ 42'861,976.89	\$ 42'786,121.33

Como se observa, la frecuencia "real" de mantenimiento de la presa Alzate es de 1 año, lo cual resulta más favorable que el valor óptimo obtenido por el MSR que resulto ser de 1.15 años. Por ello se observa una reducción del costo total esperado de dicha estructura con respecto al valor generado por el MSR. Continuando con el análisis de la variable mantenimiento, también se puede notar que el valor actual es superior al óptimo encontrado con la combinación del MSR y los AG's, que fue de 0.65 años. Esto significa que la técnica propuesta recomienda una frecuencia de mantenimiento alta, equivalente a casi un ejercicio cada 8 meses ( $0.65 \cdot 12$  meses). Desde luego que esto implica una inversión mayor en el corto plazo, pero los resultados esperados en el largo plazo para los costos totales potenciales de falla, son menores que los obtenidos con el MSR.

En lo que se refiere al factor de seguridad, se observa que el RSM determinó como valor óptimo al 1.39, mientras que la combinación propuesta determinó el 2.09. Este resultado se interpreta intuitivamente, ya que a mayor factor de seguridad, menor es el costo esperado de falla y por lo tanto el riesgo. La presa bajo estudio presenta un valor intermedio tanto para el factor de seguridad como para el costo, como se esperaba. Cabe mencionar que estos resultados, tienen que ser tomados con cautela por los tomadores de decisiones, y se tiene que llevar a cabo una evaluación de costos profunda antes de decidir que el 2.09 es un factor de seguridad conveniente para una estructura, ya que la inversión requerida para alcanzar dicho nivel puede sobrepasar el presupuesto que se destinará a la construcción o al mantenimiento de una presa. Aquí, el buen juicio del ingeniero juega un papel fundamental en la toma de decisiones, y los resultados obtenidos pueden ser la base sobre la que se base la realización de análisis económicos y de seguridad estructural más detallados.

En cuanto a la tubificación, el valor óptimo obtenido tanto por el RSM como por la combinación propuesta es de 0 l/s, siendo el valor de la estructura en estudio también el mismo. Por lo que al no presentarse el fenómeno de la tubificación, se cree que la presa Alzate tiene bajo riesgo de fallar por esta causa. Así, el resultado de costo obtenido con el modelo y el que se genera con los datos de la presa Alzate demuestra que dicha estructura es razonablemente segura, al menos al considerar estas tres variables, en comparación con el resultado que genera el MSR. Esto ratifica, la conclusión obtenida por Pérez (2009) y Rivero (2009). No obstante, es importante mencionar que el valor de la presa se encuentra por encima del óptimo generado con la combinación de métodos. Así, se recomienda que la estructura se cuide para no incrementar el costo total esperado de falla.

Para tener una idea de la magnitud de las variaciones entre el uso del MSR aislado, y de la combinación de este con los AG's, en la tabla 4.8 se presenta un resumen numérico. Como se puede apreciar, la divergencia entre el modelo propuesto y el MSR es del orden del 1.07%, que en dinero equivale a **\$456,418.91**, por lo que se puede afirmar que los resultados obtenidos con la combinación propuesta son mejores que aquellos que se generan a partir del uso aislado del MSR.

Nuevamente se sostiene que esta variación confirma la validez de la hipótesis planteada al inicio de la investigación, por lo menos con los datos empleados en este trabajo.

**Tabla 4.8 Estimación de la divergencia entre el modelo, el RSM y los valores actuales de presa José Antonio Alzate**

Diferencia	MSR+GA´s vs MSR	MSR+GA´s vs Actual	RSM vs Actual
(%)	-1.07%	-0.18%	0.88%
(\$)	-\$456,418.91	-\$75,855.56	\$380,563.35

Por otro lado, se observa una diferencia del 0.18%, equivalente a \$75,855.56, entre los resultados obtenidos por el modelo combinado y los valores actuales de la presa en estudio. Es decir, la presa José Antonio Alzate, desde el punto de vista económico, genera un costo total potencial esperado de falla intermedio entre lo calculado con el MSR, y el obtenido por el modelo propuesto.

Cabe resaltar que, las variaciones encontradas son mínimas, y en términos de ingeniería civil se podrían incluso considerar como despreciables. No obstante, la tesis pretende demostrar cuantitativamente que la combinación del MSR y los AG´s supera la aplicación aislada del primero, situación que se ha cumplido satisfactoriamente.

De esta forma, se percibe que la principal ventaja de la conjunción es que mejora el resultado del MSR. Además, se logra la convergencia esperada. Sin embargo, el costo es alto ya que se requiere desarrollar una rutina que cumpla con las restricciones establecidas para cada variable y para cada objetivo, lo cual consume tiempo de programación, e incluso tiempo de ejecución cuando se tienen un gran número de iteraciones (con 6,000 generaciones la rutina tarda 1 minuto, y con 600,000 iteraciones lo hace hasta 12 horas).

Al contrastar estas bondades y limitaciones con la aplicación aislada del MSR, se observa que el resultado de la combinación es más preciso, pero solo vale la pena cuando dicha precisión se requiere por motivos bien definidos y claros. Cuando únicamente se necesita tener una idea aproximada de los valores de interés, no se justifica la inversión en tiempo que demanda la combinación (en horas de programación) con respecto al uso exclusivo del MSR.

A pesar de los resultados favorables, se considera que la investigación se puede ampliar, considerando los puntos mencionados a continuación.

#### **4.7. Trabajo a futuro**

Como toda investigación, la aquí presentada cuenta con algunas limitaciones. Por ello se proponen las siguientes ideas de trabajo para que en el futuro se pueda mejorar el modelo aquí expuesto. En primer lugar, la rutina generada no permitió encontrar los valores óptimos para las variables cuando se tiene más de un objetivo (optimización multi-objetivos). Esto significa que no se puede encontrar un costo total mínimo con la programación actual (ver Anexo C), cuando se quiere minimizar la variable mantenimiento, y al mismo tiempo maximizar al factor de seguridad. Para lograrlo se tienen que incluir más comandos en la rutina, e incluso cambiar de lenguaje de programación debido a que el python podría resultar limitado para ese fin de acuerdo con un experto consultado durante la investigación.



En lo que se refiere a la experimentación, en este trabajo se utilizaron como datos de entrada los resultados producidos por la red bayesiana desarrollada por Pérez (2009), pero sería interesante poder hacer experimentos en laboratorio, o mediciones en campo para comenzar con el manejo matemático de la información. Sin lugar a dudas que esto requerirá tiempo y recursos económicos, pero se cree que se pueden tener resultados más precisos que los aquí reportados.

En el mismo tenor de ideas, se sugiere obtener información relativa a los costos totales de falla esperados para presas con las características de la aquí estudiada. Esto, en virtud de que el modelo desarrollado fue poco sensible a las variaciones de las variables, lo cual se refleja en las pequeñas diferencias absolutas y relativas encontradas al comparar el desempeño de las técnicas.

Por último, se menciona que la limitación de tiempo que se tuvo impidió que se realizaran más análisis con el modelo. Así, no se pudo verificar su comportamiento con el uso de otras variables independientes como: frecuencia sísmica, intensidad de lluvia, abrechamiento de la cortina, desbordamiento e inundación. Por ello, se recomienda a los investigadores interesados, seguir estas líneas que podrían revelar cuestiones interesantes. Así, se ha llegado al final del documento y enseguida se presentan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Después de un minucioso análisis de los métodos que podrían ser empleados para evaluar riesgos en presas, se determinó que el MSR podría combinarse con los AG's para cumplir con el objetivo planteado en un principio, es decir, evaluar riesgos en presas. Posteriormente se formuló un modelo que combina los principios de ambas técnicas, y se aplicó a la Presa José Antonio Alzate para determinar su nivel de riesgo, medido a través de los costos totales esperados por su eventual falla. El resultado indica que dicha estructura, para las tres variables analizadas (frecuencia de mantenimiento, factor de seguridad y tubificación), cuenta con valores adecuados, que al ser analizados revelan lo que le ha permitido operar durante más de 45 años sin mayores complicaciones.

De acuerdo con los resultados del estudio, se determina que se cumplió el objetivo de la tesis, y se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Se estableció el estado del arte en materia de herramientas para evaluar riesgos en infraestructura,
- Se propuso y desarrolló una herramienta de evaluación de riesgos en obras de infraestructura, con base en la combinación del MSR y los AG's, para analizar los riesgos de falla en presas de tierra del Estado de México,
- Se analizó el nivel de riesgo de la Presa José Antonio Alzate, con la herramienta desarrollada, mismos que se deben comparar con los valores establecidos por los

tomadores de decisiones en función de su aversión o afinidad al riesgo. Es importante aclarar, entonces, que los niveles de riesgo obtenidos no se pueden calificar ni como buenos ni como malos, sino solo especificar que son los tomadores de decisiones quienes determinan su calidad,

- El costo total mínimo, calculado por el MSR resultó ser de \$ 43'242,540.24, dicha cantidad fue obtenida con un valor de mantenimiento de 1.15 años, un factor de seguridad de 1.39 y con una tubificación de 0.00 l/s,
- El costo total mínimo, calculado por el modelo combinado propuesto resultó ser de \$ 42'786,121.33, dicha cantidad fue obtenida con un valor de mantenimiento de 0.65 años, un factor de seguridad de 2.09 y con una tubificación de 0.00 l/s,
- El costo total potencial de la presa José Antonio Alzate resultó ser de \$ 42'861,976.89, el cual fue calculado con los valores actuales de mantenimiento, factor de seguridad y tubificación, que son: 1 año, 1.95 y 0.00 l/s respectivamente,
- Así, se determinó que la combinación del MSR y los AG's produce un valor más bajo de costo total de falla que el MSR aislado, aunque las variaciones obtenidas con las dos herramientas propuestas son pequeñas (apenas del 1.07 %). No obstante, se ha demostrado que la hipótesis planteada es válida y que, efectivamente, la combinación del MSR y los AG's produce mejores resultados que el MSR aislado,
- En la investigación fue inviable recolectar datos e información directamente en campo, por los costos en tiempo, dinero y personal que eso representaba, por lo que los resultados presentados deben tomarse con las precauciones del caso, y las sugerencias presentadas en la sección denominada "trabajo a futuro", que resaltan los aspectos que no se cubrieron en este trabajo, denotan esta situación. Por ello se brindan las siguientes recomendaciones.

## **Recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos, 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. Por ello, a continuación se presentan una serie de recomendaciones, enfocadas a facilitar el camino de investigadores interesados en el tema, con base en la experiencia adquirida en este proyecto:

- Tomando en cuenta los resultados de la investigación, el autor considera que la mejora producida por la combinación del MSR y los AG's es mínima con respecto a lo que genera la primera técnica sola, por lo que para el caso particular estudiado no parece tan conveniente desarrollar la rutina de los AG's pues aunque matemáticamente hay una diferencia, en términos ingenieriles se puede considerar despreciable.
- A pesar de que la variación fue mínima, no debe descartarse la posibilidad de combinar las técnicas propuestas para analizar otras variables u otras obras, pues con los resultados

aquí encontrados no se puede afirmar que las diferencias por encontrar serán poco significativas,

- Dado que las presas representan desarrollo, bienestar y progreso para los habitantes del Estado de México, y en general de cualquier país, su conservación es fundamental y para ello se recomienda hacer uso de herramientas matemáticas como la aquí presentada, para obtener valores numéricos de las variables que pueden ser causa potencial de falla en este tipo de estructuras,
- Dado que la principal causa de falla en presas de tierra es el desbordamiento, es importante realizar un estudio sobre las etapas de construcción y operación, en donde se considere un análisis de riesgo que permita tomar acciones preventivas que minimizan la probabilidad de falla por esa causa, situación que no fue considerada en este trabajo,
- Debido a que en esta investigación solo se analizaron tres factores de influencia, se recomienda que, para investigaciones futuras, se empleen más variables (desbordamiento, agrietamiento, sismo, y precipitación). De hecho, se cree firmemente que el modelo puede manipular más variables, lo que permitiría generar resultados más completos,
- Se sugiere ampliar la aplicación del modelo a otras estructuras (presas de concreto, edificios, carreteras y puentes), con el fin de evaluar sus riesgos de falla asociados.

Así, se espera que la exposición presentada sea de ayuda para las personas interesadas en el tema. Finalmente, se tiene la firme confianza de que este trabajo contribuirá a la generación de nuevos conocimientos en las áreas referentes a la evaluación de riesgos en obras de infraestructura.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. 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
2. Ahedo, D.A y Sanchez, J.E.R., (2003), *"Estabilidad de Taludes en Presas de Tierra y Enrocamiento"*, Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional
3. Ayneto G.X., (2009), *"Simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF) en el diseño de producto"*, Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Barcelona, España
4. Bayramov, F., Tasdemir, C., and Tasdemir, M.A., (2003), *"Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method"*, Department of Civil Engineering, Istanbul Technical University, Maslak, 80626 Istanbul, Turkey
5. Benasús, Sh., and Vanrell, M., (2009), *"Algoritmos genéticos"*, disponible en <<http://www.fing.edu.uy/inco/grupos/invop/mh/material/presentG6-GA.ppt>>, consultado el 26 de Agosto de 2009
6. Berga, L. (2009), *"El papel de las presas y embalses en el desarrollo sostenible de las naciones"*, disponible en: <<http://www.hoy.com.do/opiniones/2009/3/12/269913/El-papel-de-las-presas-y-embalses-en-el-desarrollo-sostenible-de-las>>, consultado el 15 de julio de 2009
7. Bitrán, B.D., Acosta C.L., Eslava M.H., Gutiérrez M.C., Salas S.M.A., Vázquez C.M.T. (2002), *"Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2001"*, Sistema Nacional de Protección Civil-Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México
8. Bucher, C.G., (1988), *"Adaptive sampling—an iterative fast Monte Carlo procedure"*, Structural Safety, Vol. 5 No. 2, pp. 119–26
9. Carrasco, G.E., (2005), *"Modelos simplificados de respuesta probabilista para la evaluación estructural a flexión de puentes"*, Tesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña, España
10. Castelán, C.J. (1999), *"Los Consejos de Cuenca en el Desarrollo de las Presas en México"*, Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A.C., Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, pp. 1-12
11. CIEMAD, (2009), *"Introducción al análisis por el método de elemento finito"*, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, México
12. CNA, (1999), *"Importancia de la Seguridad de Presas"*, Manual para la Capacitación en Seguridad de Presas, Comisión Nacional del Agua, México
13. CNA, (2007), *"Infraestructura Hidráulica", Capítulo 4 de "Estadísticas del Agua en México 2007"*, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, México, pp. 65-92
14. CNA, (2008), *"Estadísticas del Agua en México 2008"*, Comisión Nacional del Agua, México

15. CNA, (2009), "*Estadísticas del Agua en México 2009*", Comisión Nacional del Agua, México
16. CONAGUA, (1993), "*Presas de México*", Volumen 5, Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, CONAGUA-SARH, México
17. CYPECAD, (2009), "*Estados límites*", Curso de CYPECAD Hormigón, lección 2, tutorial 6, disponible en: <<http://www.adrformacion.com/cursos/cypecad/leccion2/tutorial6.html>>, consultado el 5 de Septiembre de 2009
18. Coello, C.A., (2009), "*Introducción a los algoritmos genéticos*", redcientífica.com, disponible en <<http://www.redcientifica.com/doc/doc199904260011.html>>, consultado el 27 de Agosto de 2009
19. Cortínez, V., y Girón, P., (2009), "*El método de los elementos finitos en la ingeniería práctica*", Grupo Análisis de Sistemas Mecánicos, Argentina, disponible en: <<http://www.frbb.utn.edu.ar>>, consultado el 17 de Junio de 2009
20. Cornell, J.A., (1990), "*How to Apply Response Surface Methodology*", Revised Edition, ASQC: Milwaukee, US
21. Cruz, S. N., (2009), "*Problemas de mantenimiento en presas de México*", El Universal, México
22. De La Colina, M.J., (2009), *Introducción al Método del Elemento Finito*, Editorial de la Universidad Autónoma del Estado de México, México
23. Delgado, H.D. and Cho, T.J. (2008), "*Risk Assessment for Structures by the Improved Response Surface Method Combined with Genetic Algorithm: the case of a Mexican dam*", Research Protocol, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) and Korean Science and Engineering Foundation (KOSEF)
24. DM, (2006), "*Probabilidades y Estadística (C) Trabajo Práctico 2do cuatrimestre del 2006*", Departamento de Matemáticas, Universidad de Buenos Aires, disponible en: <[http://www.dm.uba.ar/materias/probabilidades\\_estadistica\\_C/2006/2/TPR20062.pdf](http://www.dm.uba.ar/materias/probabilidades_estadistica_C/2006/2/TPR20062.pdf)>, consultado el 22 de Julio de 2009
25. DNR, (2007), "*Indiana dam safety inspection manual*", Department of Natural Resources Division of Water Indianapolis, Indiana, US
26. Falsone, G., and Impollonia, N., (2004), "*About the accuracy of a novel response surface method for the analysis of finite element modeled uncertain structures*", Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate (DiCTA), Università di Messina, Salita Sperone 31, 98166 S.Agata-MESSINA, Italy
27. Faulín J., y Angel, J., (2009), "*Simulación de Monte Carlo con Excel*", Universidad Abierta de Cataluña (UOC), España, disponible en <[http://www.x-trader.net/phpBB2/files/simulacion\\_mc\\_excel\\_151.pdf](http://www.x-trader.net/phpBB2/files/simulacion_mc_excel_151.pdf)>, consultada el 17 de Julio de 2009
28. FCE, (2005), "*Simulación Método de Montecarlo*", Investigación Operativa I, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina
29. FE, (2009), "*Capítulo II: principios generales y método de los estados límite*", Título 1: Bases de proyecto, disponible en: <<http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/C4BA31CF-3B24-4B70-8C63-03A85C749F74/8481/cap3.pdf>>, consultado el 7 de Septiembre de 2009

30. Fernandez, J.L., (2009), "*Simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF) en el diseño de producto*", disponible en <<http://www.citean.com/Actualidadydifusion/Articulos/Articulo/simulacion/numerica/tabid/348/itemid/73/type/noticia/Default.aspx>>, consultado el 18 de Julio de 2009
31. Fernández, M.C., y Piñeiro, B.M., (2009), "*Superficie de respuesta, métodos y diseño*", disponible en <[http://bellman.ciencias.uniovi.es/d\\_experimentos/d\\_experimentos\\_archivos/sr.pdf](http://bellman.ciencias.uniovi.es/d_experimentos/d_experimentos_archivos/sr.pdf)>, consultado el 18 de Mayo de 2009
32. Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M., (2000), "*The statistics of embankment dam failures and accidents*", Canadian Geotechnical Journal, vol. 37, pp. 1000-1024
33. Fuentes, M.L., (2009), "*México: alto riesgo ante desastres naturales*", Especiales nacional, diario excelsior, México, disponible en: <[http://www.exonline.com.mx/diario/noticia/primer/especiales\\_nacional/mexico:\\_alto\\_riesgo\\_ante\\_desastres\\_naturales/660876](http://www.exonline.com.mx/diario/noticia/primer/especiales_nacional/mexico:_alto_riesgo_ante_desastres_naturales/660876)>, consultado el 19 de Agosto de 2009
34. FUNGLODE, (2009), "*En el mundo hay 1,200 grandes presas en construcción*", Fundación Global Democracia y Desarrollo, disponible en: <<http://www.funglode.org/SalaPrensa/Detalledelarticulo>>, consultado el 15 de Julio de 2009
35. Gayton, N., Bourinet, J.M., y Lemaire, (2003) "*CQ2RS: a new statistical approach to the response surface method for reliability analysis*", Laboratoire de Recherches et Applications en Mécanique Avancée, IFMA, UBP, Clermont-Ferrand, France
36. Goldberg, D.E., (1999), "*Genetic Algorithms*", Illinois Genetic Algorithms Laboratory, disponible en: <<http://gal4.ge.uiuc.edu/>>, consultado el 24 de Agosto de 2009
37. Gutiérrez, J.O., (2005), "*Structural design probabilistic's approach for limit states*", Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Vol 14 No 19, pp. 58-67
38. Gupta, S., and Manohar, C.S., (2004), "*An improved response surface method for the determination of failure probability and importance measures*", Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, 560012, India
39. ICOLD, (1995), "*Dam Failure Statistical Analysis*", International Commission on Large Dams (ICOLD), Bulletin 99
40. ICOLD, (2009), "*Large Dam Definition, International Commission on Large Dams*", US, disponible en: <<http://www.icold-cigb.net>>, consultado el 21 de Julio de 2009
41. IPV, (2009), "*Método de Monte Carlo Parte II, Principales Usos del Método Monte Carlo*", Industria Petrolera de Venezuela, Venezuela, disponible en: <[http://industria-petrolera.blogspot.com/2009\\_01\\_01\\_archive.html](http://industria-petrolera.blogspot.com/2009_01_01_archive.html)>, consultado el 17 de Julio de 2009
42. Juárez, B.E., y Rico, R.A., (1996) "*Mecánica de suelos*", Tomo II "teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos", Limusa, México
43. Kaymaz, I., and McMahon, Ch.A., (2004), "*A response surface method based on weighted regression structural reliability analysis*", Department of Mechanical Engineering, Ataturk University, Erzurum 25240, Turkey

44. Marczyk, A., (2004), "*Algoritmos genéticos y computación evolutiva*", disponible en: <<http://the-geek.org/docs/algen/>>, consultado el 26 de Agosto de 2009
45. Merelo, G.J., (2009), "*Informática evolutiva: Algoritmos genéticos*", disponible en <<http://geneura.ugr.es/~jmerelo>>, consultado el 26 de Agosto de 2009
46. Merritt, F.S., Kent Loftin, M. and Ricketts, J.T. (1999), "*Manual del Ingeniero Civil*", Mc Graw Hill, México
47. Montgomery, D.C., (1991), "*Diseño y Análisis de Experimentos*", Grupo Editorial Iberoamérica, México
48. Montgomery, D.C., (2000), "*Design and Analysis of Experiments*", Fifth edition, John Wiley & Sons, New York, NY
49. Montgomery, D.C., and R.H., Myers (1995), "*Response Surface Methodology: Process and Product in Optimization Using Designed Experiments*", John Wiley & Sons, New York, NY
50. OCDE, (1992), "*Informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico*", disponible en disponible en: <<http://www.eic.es/noticias/notas/Garcia%20John,%20E.pdf>>, consultado el 15 de Septiembre de 2009
51. Perez, P.B., (2009), "*Análisis de riesgo y confiabilidad en presas de tierra: un caso en el Estado de México*", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería de la UAEM, Toluca, Edo. de México
52. Pham, D., (2008), "*Design for Reliability and Robustness through Probabilistic Methods in COMSOL Multiphysics with OptiY*", Report D-63741, Aschaffenburg, Germany
53. Ribeiro, G.R., Liñero, S.L., y Sánchez, G.J.A., (2009), "*Comparación de la Aplicación de Métodos de Primer y Segundo Orden para el Aprendizaje de Redes Neuronales*", disponible en <<http://www.dca.fee.unicamp.br/~gudwin/ftp/publications/informatica98.pdf>>, consultado el 18 de Septiembre de 2009
54. Rivero, S.J. (2009), "*Evaluación de costos por fallas en presas de tierra: Un caso en el Estado de México*", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México
55. Roos D., Adam, U., and Bayer, V., (2006), "*Design Reliability Analysis*", CADMEF, DYNARDO and Institute of Structural Mechanics, Bauhaus - University, Weimar, Germany
56. SRH, (1976), "*Presas construidas en México*", Secretaría de Recursos Hidráulicos, México
57. Vázquez, G.M., (2008), "*Simulación: ¿nos vamos a Monte Carlo?* ", Universidad Politécnica de Madrid, España
58. Vélez, W., Gómez, D., y Thomson, P., (2009), "*Ajuste de modelos de elementos finitos*", Revista Dyna, Medellín, Colombia, Vol 76 No 158, pp. 177-189
59. Villalobos, J.R., (2009), "*¿Qué es la Metodología de Superficie de Respuesta, y Cómo Puede Usarse para Mejorar Procesos?*", disponible en <<http://tisconsulting.org/rsmesp.doc>>, consultado 14 de Agosto de 2009

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alonso, E., (2008), "*Presa Alzate, cuerpo de agua más contaminado*", El Universal, disponible en <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/89044.html>, consultado, el 22 de Septiembre de 2009, México
2. Bailey, M.A., et al (2000), "*Using Reliability Methods to estimate the prediction uncertainty of a catchment hydrological model*", Coperative researchs centre for catchment hydrological, Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Victoria 3168, Australia
3. CENECAM, (1999), "*Lluvias Intensas*", Protección Civil en Funciones. Revista del CENECAM (Centro Estatal de Emergencias de Campeche), México, Vol. 2 No. 8, pp. 25
4. Hernández, U. A., (2009), "*Informe sobre el pronóstico de la temporada de ciclones 2009 Tercera versión*", Servicio Meteorológico Nacional, México
5. UNAUSA, (1997), "*Acts of Nature, Acts of Man, Policy Studies Panel on International Disaster Relief*", The Global Response to Natural Disasters, United Nations Association of the United States of America, US
6. Wikipedia, (2009), "*Algoritmos genéticos*", disponible en [http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_gen%C3%A9tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_gen%C3%A9tico), consultado el 26 de Agosto de 2009



# ANEXOS

## ANEXO A: Ejemplo Numérico del MSR

Para ejemplificar el proceso del MSR, se utilizará el siguiente problema adaptado de Montgomery (1991):

Un ingeniero civil desea determinar las condiciones de construcción que maximicen la resistencia a la compresión de una columna de concreto reforzado. Dos variables controlables influyen en esta: tipo de concreto y tipo de acero. Actualmente las columnas se construyen con un concreto cuya resistencia es de 35 kg/cm<sup>2</sup> y la del acero es de 155 kg/cm<sup>2</sup>, lo que produce una resistencia de columna de 40 kg/cm<sup>2</sup>.

El ingeniero decide que la región de exploración sea (30, 40) kg/cm<sup>2</sup> para el concreto, y (150, 160) kg/cm<sup>2</sup> para el acero. Para simplificar los cálculos, las variables independientes se codifican en un intervalo (-1, 1). Para el caso bajo estudio, se tienen los datos mostrados en la Tabla A1:

Tabla A1 Datos de entrada para codificar las variables de interés

Variables	Concreto	Acero
$X_{sup}$	40	160
$X_{inf}$	30	150

Sustituyendo estos valores en la expresión (8), queda de la siguiente manera:

$$x_1 = \frac{(X_1 - 35)}{5} \quad (22)$$

$$x_2 = \frac{(X_2 - 155)}{5} \quad (23)$$

En donde:

$X_1$ : Variable que representa la resistencia del concreto (real)

$x_1$ : Variable que representa la resistencia del concreto (codificada)

$X_2$ : Variable que representa la resistencia del acero (real)

$x_2$ : Variable que representa la resistencia del acero (codificada)

En la Tabla A2 se muestran los datos generados a través de un conjunto de experimentos que utiliza un diseño factorial 2<sup>2</sup> aumentado en cinco puntos centrales. Las observaciones centrales sirven para estimar el error experimental, y permiten probar la adecuación del modelo de primer orden.

Tabla A2 Datos empleados durante el proceso para ajustar a un modelo de primer orden  
(Adaptado de Montgomery, 1991)

Variables reales		Variables codificadas		Respuesta
$X_1$	$X_2$	$x_1$	$x_2$	Y
30	40	-1	-1	39.30
30	160	-1	1	40.00
40	150	1	-1	40.90
40	160	1	1	41.50
35	155	0	0	40.30
35	155	0	0	40.50
35	155	0	0	40.70
35	155	0	0	40.20
35	155	0	0	40.60

Con el método de mínimos cuadrados se obtiene:

$$Y = 40.44 + 0.775x_1 + 0.325x_2 \quad (24)$$

En la Tabla A3 se muestra el análisis de varianza, donde se observa que el estadístico  $F_0$  de regresión global es significativo al 1%.

Tabla A3 Análisis de varianza para el modelo de primer orden (Adaptado de Montgomery, 1991)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Fo
Regresión ( $\beta_1, \beta_2$ )	2.8250	2	1.413	47.83
Residuo	0.1772	6	0.000	
Falta de ajuste	0.0052	2	0.0026	0.06
Error puro	0.1720	4	0.0430	
Total	3.0022	8		

El modelo indica que hay que desplazarse 0.775 unidades en dirección de  $x_1$  por cada 0.325 unidades en dirección de  $x_2$ . Se sabe que la trayectoria pasa por el punto ( $x_1=0, x_2=0$ ) y tiene pendiente  $0.325/0.775$ . Se utiliza  $5 \text{ kg/cm}^2$  como incremento en la resistencia del concreto, lo que es equivalente a la variable codificada  $\Delta x_1=1$ . Los incrementos a lo largo de la trayectoria son  $\Delta x_1=1$  y  $\Delta x_2=(0.325/0.775)=0.42$ .

El ingeniero calcula puntos a lo largo de esa trayectoria y mide la resistencia a la compresión de la columna de concreto en cada punto hasta notar un decremento en la respuesta. Los resultados aparecen en la Tabla A4. Los incrementos se muestran tanto para las variables codificadas como para las reales. Es importante notar que se emplean las variables codificadas por la sencillez que representan para hacer los cálculos, aunque son las reales las que deben usarse para interpretar los resultados.

Tabla A4 Experimentos de máximo ascenso (Adaptado de Montgomery, 1991)

Incrementos	Variables codificadas		Variables reales		Respuesta
	$x_1$	$x_2$	$X_1$	$X_2$	Y
Origen	0	0	35	155	----
$\Delta$	1	0.42	5	2	----
Origen + $\Delta$	1	0.42	40	157	41.00
Origen +2 $\Delta$	2	0.84	45	159	42.90
Origen +3 $\Delta$	3	1.26	50	161	47.10
Origen +4 $\Delta$	4	1.68	55	163	49.70
Origen +5 $\Delta$	5	2.1	60	165	53.80
Origen +6 $\Delta$	6	2.52	65	167	59.90
Origen +7 $\Delta$	7	2.94	70	169	65.00
Origen +8 $\Delta$	8	3.36	75	171	70.40
Origen +9 $\Delta$	9	3.78	80	173	77.60
Origen +10 $\Delta$	10	4.23	85	175	80.30
Origen +11 $\Delta$	11	4.62	90	177	76.20
Origen +12 $\Delta$	12	5.04	95	179	75.10

Se observa un aumento en la respuesta hasta el décimo incremento, y a partir del onceavo se produce un ligero decremento en la resistencia de la columna. Por lo tanto se debe ajustar otro modelo de primer orden en la cercanía del punto ( $X_1=85$ ,  $X_2=175$ ). La región de exploración para  $x_1$  es (80, 90) y para  $x_2$  es (170, 180). Por lo tanto las variables codificadas son:

$$x_1 = \frac{(X_1 - 85)}{5} \quad (25)$$

$$x_2 = \frac{(X_2 - 175)}{5} \quad (26)$$

Nuevamente se utiliza un diseño  $2^2$  con cinco puntos centrales. Los datos se muestran en la tabla A5.

Tabla A5 Datos para el segundo modelo de primer orden (Adaptado de Montgomery, 1991)

Variables reales		Variables codificadas		Respuesta
$X_1$	$X_2$	$x_1$	$x_2$	Y
80	170	-1	-1	76.50
80	180	-1	1	77.00
90	170	1	-1	78.00
90	180	1	1	79.50
85	175	0	0	79.90
85	175	0	0	80.30
85	175	0	0	80.00
85	175	0	0	79.70
85	175	0	0	79.80

El modelo de primer orden ajustado es:

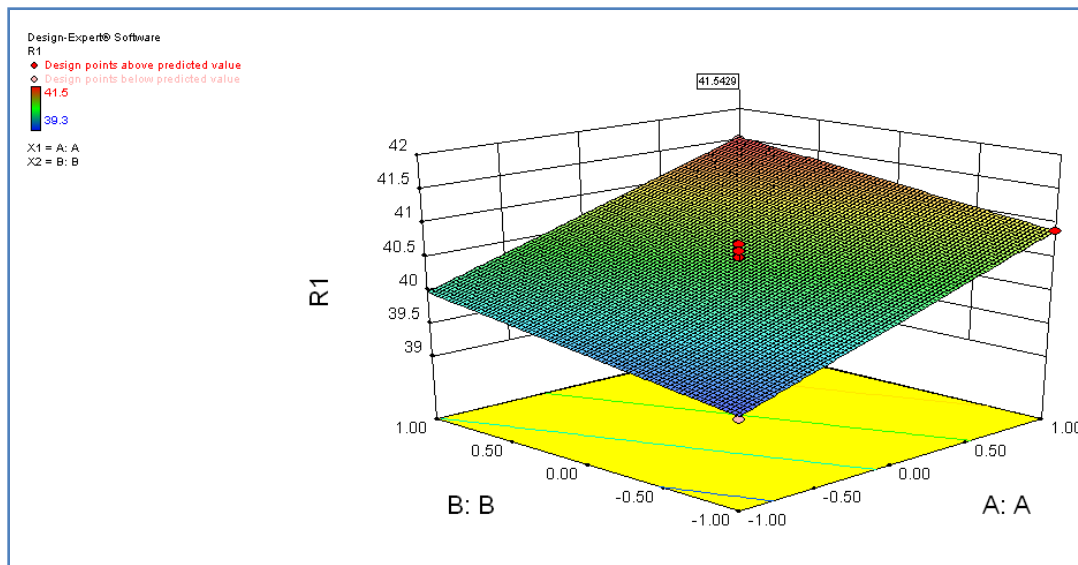
$$Y = 78.97 + 1.0x_1 + 0.50x_2 \quad (27)$$

En la tabla A6 se presenta la prueba de falta de ajuste.

**Tabla A6 Análisis de varianza para el segundo modelo de primer orden (Adaptado de Montgomery, 1991)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Fo
Regresión ( $\beta_1, \beta_2$ )	5.0000	2	2.500	1.35
Residuo	11.1200	6	0.000	
Falta de ajuste	10.9080	2	5.454	102.91
Error puro	0.2120	4	0.053	
Total	16.1200	8		

El resultado de la prueba de falta de ajuste permite afirmar que el modelo de primer orden es una aproximación adecuada, por lo que se trata de una superficie sin curvatura. La Figura A1 muestra la gráfica del plano generado por el MSR.



**Figura A1 Superficie de Respuesta obtenida (Design Expert, 2009)**

## ANEXO B: Ejemplo Numérico de los AG's

Supóngase que se tiene la siguiente función  $f(x)=x^3$  y que se desea obtener el valor de  $x$  que maximice dicha función, obligando a que este valor sea un entero comprendido entre 0 y 15. Un cálculo sencillo permite identificar que el máximo se tendrá en  $x=15$ , en donde  $f(x)= 3375$ . En realidad para deducir este resultado no son necesarios los AG's, pero se cree conveniente tener un problema en el que se conoce a-priori la solución para ilustrar los pasos correspondientes.

Para encontrar el valor que maximiza  $f(x)$ , primero se genera una población inicial, que en este caso constará de seis individuos entre  $[0, 15]$ , generados aleatoriamente (ver Tabla B1). Después, se tiene que elegir la forma de codificación de las posibles soluciones. Una manera de hacerlo es a través de la codificación binaria, previamente descrita, aunque se puede hacer uso de cualquier otra metodología (ej: números reales o letras).

**Tabla B1 Proceso de selección del AG**

Individuo	Codificación binaria	Valor de x	F(x)=x <sup>3</sup>	Aleatorio (1-6)	Pareja
1	0011	3	27	6	(1-6)
2	1100	12	1728	5	(2-5)
3	1100	12	1728	4	(3-4)
4	0100	4	64	3	(4-3)
5	1101	13	2197	2	(5-2)
6	1010	10	1000	1	(6-1)

Una vez establecido el enfoque de codificación, se convierten los números reales a números codificados, que en este caso serán binarios. Por ejemplo, para codificar en notación binaria a un individuo cuyo valor es  $x=12$ , que es un número entero aleatorio entre 0 y 15, es necesario que la cadena del cromosoma a emplear permita el manejo de cuatro genes (\_\_\_\_). Esto obedece a que el rango  $[0, 15]$  comprende los números binarios que van del 0000 al 1111. En este caso, el 12 real equivale al 1100 en codificación binaria<sup>7</sup>.

El siguiente paso es la selección, en la cual los individuos compiten entre sí, mediante la asignación de rivales. Estos se asignan aleatoriamente y la idea es que existan parejas de competidores. En la Tabla 12 se presenta la población completa de individuos. Como se puede apreciar, ya se han asignado los competidores y se han generado tres parejas (1-6, 2-5 y 3-4).

Para que un individuo sobreviva después de competir contra su rival, se evalúan ambos en la función de aptitud, que en este caso es  $f(x)=x^3$ , y el que sea mayor después de ser sustituido, será el ganador. Para el caso de la pareja (1-6), donde el primer número es 3 y el segundo es 10, la función produce los siguientes valores respectivamente: 27 y 1000. Así, el ganador resultó ser el individuo 6 (el número 10) ya que 1000 está muy por encima del valor obtenido por su rival (el número 3), cuyo valor es de 27. Lo mismo se realiza con las demás parejas (ver Tabla 12).

Se puede apreciar que el mejor individuo es el quinto cuyo valor es  $x=13$  y su asociada  $f(x)= 2197$ . Es importante recordar este dato, ya que posteriormente se comparará con los resultados obtenidos después de efectuar el proceso de cruce. Una vez que todos los individuos compitieron en parejas, los ganadores se duplican, mientras que los perdedores son eliminados. Para este ejemplo, sobreviven el 10, 12 y 13, por lo cual se han duplicado como se muestra en la Tabla B2.

**Tabla B2 Replica de los individuos más aptos**

Individuo	Codificación binaria	Valor de x
1	1010	10
2	1010	10
3	1101	13
4	1101	13
5	1100	12
6	1100	12

<sup>7</sup> Recordar que el 15 real corresponde a la suma de  $(1) 2^3 + (1) 2^2 + (1) 2^1 + (1) 2^0 = 8 + 4 + 2 + 1 = 15$ . Así, los números entre paréntesis (1111) representan al 15 en codificación binaria. El número 10 equivale al 1010 ya que resulta de sumar  $(1) 2^3 + (0) 2^2 + (1) 2^1 + (0) 2^0 = 8 + 0 + 2 + 0 = 10$ .

Tras llevar a cabo la selección descrita, se procede a realizar el cruce, que también se efectúa mediante la formación de parejas aleatoriamente designadas. Dada una pareja, se establece un punto de cruce aleatorio, que corresponde a un número aleatorio entre 1 y n-1, donde n es el número de genes que tiene el cromosoma de los individuos. En este caso hay cuatro genes por cromosoma, por lo que el punto de cruce se hará entre 1 y 3, que son los espacios que existen entre los 1's y 0's que conforman las cadenas numéricas. En la Tabla B3 se presenta la asignación tanto de parejas como de puntos de cruce.

**Tabla B3 Asignación de parejas para el cruce**

Individuo	Codificación binaria	Aleatorio (1-6)	Pareja	Aleatorio entre 1 y 3
1	1010	5	(1-5)	2
2	1010	4	(2-4)	1
3	1101	6	(3-6)	2
4	1101	2	(4-2)	3
5	1100	1	(5-1)	1
6	1100	3	(6-3)	2

Por ejemplo, en la pareja (2-4) el punto de cruce es 1, esto significa que el descendiente de la pareja hereda el primer gen (bit) del padre (1010), y tres de la madre (1101), generando así al hijo (1101). La población resultante se muestra en la Tabla B4.

**Tabla B4 Población resultante después del cruce**

Individuo	Codificación binaria	Valor de x	F(x)=x <sup>3</sup>
1	1000	8	512
2	1110	14	2744
3	1101	13	2197
4	1010	10	1000
5	1100	12	1728
6	1101	13	2197

En la nueva población, el individuo más fuerte ahora es el segundo, con una x=14 y una f(x)= 2744, cantidad mayor que el valor obtenido antes de realizar la selección y el cruce (que fue el quinto individuo de la primera población con x=13 y f(x)= 2197). Esto significa que la nueva generación de individuos es mejor después de llevar a cabo estas transformaciones. Cabe resaltar que a través de varias iteraciones, cada vez los individuos convergen hacia el valor máximo de x=15 y f(x)=3375, que es la solución del problema.

Una vez que se han efectuado la selección y el cruce, se procede al proceso de mutación, es decir, se cambian algunos genes (bits) de 1 a 0 y viceversa de forma aleatoria en la codificación binaria. Así, en este ejemplo se mutó aleatoriamente al individuo 1 y 5. Los resultados se muestran en la Tabla B5.

Tabla B5 Proceso de mutación

Individuo	Codificación binaria	Valor de x	$F(x)=x^3$
1	1001	9	729
2	1110	14	2744
3	1101	13	2197
4	1010	10	1000
5	1101	13	2197
6	1101	13	2197

De nuevo es importante aclarar que si no se realizara este proceso, la población tiende a homogeneizarse, lo que resulta en una población con individuos idénticos. Este hecho impediría que el algoritmo siguiera explorando nuevas soluciones, con lo que se puede quedar estancado en un óptimo local, que no necesariamente corresponde con el buscado.

El siguiente paso consiste en tomar como población inicial a la recientemente generada (Tabla 16), y realizar el proceso de selección, cruce y mutación, tantas veces como sea necesario para lograr la convergencia hacia el valor óptimo. Para terminar la descripción del ejemplo, después de llevar a cabo el proceso de iteración mencionado, se llegó al punto óptimo en  $x=15$  con una  $f(x)=3375$ , valor alcanzado por el quinto individuo de siguiente generación. Los pasos subsiguientes se resumen en la Tabla B6.

Tabla B6 Segunda iteración del algoritmo

Paso 1. Asignación de parejas					
Individuo	Codificación binaria	Valor de x	$F(x)=x^3$	Aleatorio (1-6)	Pareja
1	1001	9	729	4	(1-4)
2	1110	14	2744	6	(2-6)
3	1101	13	2197	2	(3-5)
4	1010	10	1000	1	(4-1)
5	1101	13	2197	5	(5-3)
6	1101	13	2197	3	(6-2)
Paso 2. Selección					
Individuo	Codificación binaria	Valor de x			
1	1010	10			
2	1010	10			
3	1110	14			
4	1110	14			
5	1101	13			
6	1101	13			
Paso 3. Cruce					
Individuo	Codificación binaria	Aleatorio (1-6)	Pareja	Punto de cruce (1-3)	
1	1010	5	(1-4)	2	
2	1010	4	(2-6)	1	
3	1110	6	(3-5)	3	
4	1110	2	(4-1)	2	
5	1101	1	(5-3)	3	
6	1101	3	(6-2)	1	



Paso 4. Resultados de cruce			
Individuo	Codificación binaria	Valor de x	F(x)=x <sup>3</sup>
1	1010	10	1000
2	1101	13	2197
3	1110	14	2744
4	1010	10	1000
<b>5</b>	<b>1111</b>	<b>15</b>	<b>3375</b>
6	1100	12	1728

De nuevo, los AG's no garantizan la mejor solución, pero si se llevan a cabo distintos ejercicios, se pueden encontrar soluciones razonablemente buenas, por lo que se recomienda guardarlas para finalmente quedarse con la mejor.

### ANEXO C: Rutina Principal de los AG's Programada en Python

```
# $Id: RSM_dam.py 150 2010-01-13 19:29:13Z Hector Alejandro Montes $
from pyevolve import G1DList
from pyevolve import GSimpleGA
from pyevolve import Selectors
from pyevolve import Initializators, Mutators
from pyevolve import Scaling
from pyevolve import Consts
from pyevolve import DBAdapters
from pyevolve import Statistics

import math

# Fitness function. Given by the RSM method
def RSM(xlist):
    A44 = 44049763.617597
    B44 = -2915.62969353
    C44 = -391239.59415574
    D44 = 514467.89296153
    E44 = 124.99999999344
    F44 = -125.00000000651
    G44 = -5625.0000000064
    H44 = -56137.000377418
    I44 = -96265.310209754
    J44 = -191017.61888875

#    B46 = xlist[0]
#    B46 = 1.151
#    C46 = xlist[0]
#    C46 = 1.9120299999999999
#    D46 = xlist[0]
```

```

D46 = 0.0
E46 = B46*C46
F46 = B46*D46
G46 = C46*D46
H46 = B46*B46
I46 = C46*C46
J46 = D46*D46

score=
A44+B44*B46+C44*C46+D44*D46+E44*E46+F44*F46+G44*G46+H44*H46+I44*I46+J44*J46

return score

# Genome instance
genome = G1DList.G1DList(1)
#genome.setParams(rangemin=-10, rangemax=10, bestRawScore=30000000.00,
roundDecimal=2)
#genome.setParams(rangemin=1.39337, rangemax=1.91203)
#genome.setParams(rangemin=0.0, rangemax=85.0)
genome.setParams(rangemin=1.3934, rangemax=1.912)

# Change the initializer to Real values
genome.initializator.set(Initializators.G1DListInitializatorReal)

# Change the mutator to Gaussian Mutator
genome.mutator.set(Mutators.G1DListMutatorRealGaussian)

# Removes the default crossover
genome.crossover.clear()

# The evaluator function (objective function)
genome.evaluator.set(RSM)

# Genetic Algorithm Instance
ga = GSimpleGA.GSimpleGA(genome)
ga.selector.set(Selectors.GRouletteWheel)

ga.minimax = Consts.minimaxType["minimize"]

pop = ga.getPopulation()
pop.scaleMethod.set(Scaling.SigmaTruncScaling)

ga.setGenerations(6000)
ga.setMutationRate(0.05)
#ga.terminationCriteria.set(GSimpleGA.RawScoreCriteria)

sqlite_adapter = DBAdapters.DBSQLite(identify="rsm")
ga.setDBAdapter(sqlite_adapter)

```

```
csv_adapter = DBAdapters.DBFileCSV(filename="stats.csv", identify="run1", frequency = 1,  
reset = True)  
ga.setDBAdapter(csv_adapter)  
  
# Do the evolution, with stats dump  
# frequency of 10 generations  
ga.evolve(freq_stats=100)  
  
# Best individual  
best = ga.bestIndividual()  
print "\nBest individual score: %.2f" % (best.score,)  
print best
```