



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SIMULACIÓN CON REGISTROS SINTÉTICOS DE LA  
POLÍTICA DE OPERACIÓN DE LA PRESA “EL  
INFIERNILLO MICH.” CON PROPÓSITOS DE  
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**JUAN CARLOS RAMÍREZ MIRANDA**



DIRECTORA DE TESIS:

**DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ**

CDMX

2016



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/006/16

Señor  
JUAN CARLOS RAMÍREZ MIRANDA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"SIMULACIÓN CON REGISTROS SINTÉTICOS DE LA POLÍTICA DE OPERACIÓN DE LA PRESA EL INFIERNILLO, MICH. CON PROPÓSITOS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD"**

- INTRODUCCIÓN
- I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- II. ANTECEDENTES
- III. METODOLOGÍA
- IV. APLICACIÓN DE RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 26 de enero del 2016.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

“El agua es el elemento y  
principio de las cosas”

Tales de Mileto

## **Agradecimientos**

A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas de este campus tan hermoso, brindarme todos los elementos y darme las oportunidades para mi desarrollo profesional.

A la Facultad de Ingeniería por haberme forjado como profesionista.

A la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez, por todo su apoyo, tiempo, dedicación, su paciencia y conocimientos que me compartió a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A mis padres por haberme apoyado incondicionalmente a lo largo de toda mi vida, por hacer muchos sacrificios por mí, nunca dejarme solo y siempre me dan la fortaleza para superar cualquier adversidad, sin ellos no estaría en donde estoy.

A mi hermana, por haberme apoyado en todo momento y darme los mejores consejos.

A mi novia Denis, por su apoyo y porque siempre me motiva para salir a delante en todo momento.

Gracias a todos ustedes.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1    Introducción.....	3
1.2    Objetivos.....	4
1.3    Descripción del sitio.....	4
1.3.1    Características generales.....	4
CAPÍTULO 2.    ANTECEDENTES.....	9
2.1    Estudios previos realizados en México .....	9
2.2    Estudios similares en otros países.....	11
2.3    Conceptos básicos de la Hidrología.....	12
2.3.1    Elementos de un aprovechamiento hidroeléctrico.....	14
2.3.2    Conceptos básicos de probabilidad y estadística.....	15
2.3.3    Funciones de probabilidad usadas en la Hidrología.....	18
2.3.3.1    Distribución normal.....	18
2.3.3.2    Distribución lognormal.....	18
2.3.3.3    Distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros.....	18
2.3.3.4    Distribución Gumbel.....	19
2.3.3.5    Funciones de distribución Doble Gumbel.....	19
2.3.3.6    Métodos de estimación de parámetros de funciones de distribución.....	20
CAPÍTULO 3.    METODOLOGÍA.....	24
3.1    Generación de datos sintéticos.....	24
3.1.1    Modelos ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average).....	25
3.1.2    Método de fragmentos de Svanidze.....	25
3.1.3    Método de Svanidze.....	26
3.1.3.1    Programa para la generación de las series.....	26
3.1.3.2    Programa para generar los años aleatorios y las fracciones aleatorias....	28
3.1.4    Método de Svanidze modificado.....	29
3.2    Curva guía.....	30
3.3    Política de operación.....	31
3.4    Simulación del funcionamiento de vaso.....	31
3.4.1    Procedimiento de cálculo.....	35

3.4.2	Programa para simular el funcionamiento quincenal de una presa.....	37
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN Y RESULTADOS.....		42
4.1	Introducción.....	42
4.2	Registro de datos de entrada al modelo de simulación.....	42
4.2.1	Series sintéticas.....	47
4.2.2	Generación de números sintéticos Gumbel.....	49
4.3	Simulación de políticas de operación con los registros sintéticos.....	56
4.4	Resultados de la simulación.....	63
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		67
REFERENCIAS.....		69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sitio de estudio. Presa Adolfo López Mateos (C.H. Infiernillo).....	7
Figura 3.1	Resultados reportados por el software AX.....	27
Figura 3.2	Archivo de datosAN.txt con el registro hidrológico con los años acomodados en orden cronológico.....	28
Figura 3.3	Archivo de resultados ARCH.RES con la selección aleatoria de años para la serie 01.....	29
Figura 3.4	Formato del archivo DATOSGE.....	38
Figura 3.5	Formato del archivo VOLPRE.....	38
Figura 3.6	Formato del archivo ARPOLVS.....	39
Figura 3.7	Formato de archivo SIQPRE.....	39
Figura 3.8	Formato de archivo SUPGUIAP.....	40
Figura 4.1	Datos medidos y calculados.....	46
Figura 4.2	Función de distribución Extrema, Gumbel.....	46
Figura 4.3	Comparación entre la media del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01.....	50
Figura 4.4	Comparación entre la desviación estándar del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01.....	51
Figura 4.5	Comparación entre el coeficiente de asimetría del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01.....	51
Figura 4.6	Comparación entre el coeficiente de variación del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01.....	52
Figura 4.7	Comparación entre el coeficiente de correlación del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01.....	52
Figura 4.8	Comparación entre la media del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series.....	53
Figura 4.9	Comparación entre la desviación estándar del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series.....	54
Figura 4.10	Comparación entre el coeficiente de asimetría del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series.....	54

Figura 4.11	Comparación entre el coeficiente de variación del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series.....	55
Figura 4.12	Comparación entre el coeficiente de correlación del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series.....	55
Figura 4.13	Archivo ARPOLVS.....	56



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Características generales Presa Adolfo López Mateos (C.H. Infiernillo) Michoacán.....	6
Tabla 4.1	Ingresos históricos, serie mensual en hm <sup>3</sup> . Estadísticos.....	43
Tabla 4.2	Volumen total anual.....	44
Tabla 4.3	Datos medidos y calculados obtenidos del AX (hm <sup>3</sup> ).....	45
Tabla 4.4	Fracción de serie de 100 años.....	48
Tabla 4.5	Registro sintético de 100 años (hm <sup>3</sup> ).....	49
Tabla 4.6	Registro quincenal obtenido a partir de la serie 01.....	57
Tabla 4.7	Resultado de la simulación para el registro sintético de la serie 01, archivo SIQPRE.....	58
Tabla 4.8	Resumen simulación del funcionamiento de vaso con cada serie sintética generada.....	64
Tabla 4.9	Numero de años en los que se superó al curva guia.....	65

## **INTRODUCCIÓN**

### **Título**

Simulación con registros sintéticos de la política de operación de la presa “El Infiernillo, Mich.” Con propósitos de generación de electricidad.

### **Hipótesis**

Usar una política de operación óptima en el largo plazo en la operación de la presa “El Infiernillo, Mich.” Disminuirá escenarios futuros de derrames y de déficit en el sistema, con los mayores beneficios por generación de energía eléctrica.

### **Objetivo**

Aplicar el método de Svanidze para generar 10 series sintéticas de igual longitud que el registro histórico, y 10 series sintéticas de 100 años de los volúmenes de ingreso a la presa “El Infiernillo, Mich.” y simular dichos registros con una política de operación óptima que considera una curva guía. Para analizar el posible comportamiento del sistema en el largo plazo.

### **Introducción**

El estudio de la hidrología ha sido muy importante para saber el comportamiento del agua superficial así como la subterránea, y así poder aprovechar sus inmensos beneficios para la humanidad.

Juega un papel muy importante en la operación efectiva de estructuras hidráulicas, especialmente aquellas que se destinan a la generación de energía y control de avenidas, donde se requiere con frecuencia de pronósticos de avenidas y sequias. (Aparicio, 2011)

El hombre siempre ha querido manipular todo lo que le rodea, el caso del agua no es la excepción, por ello consigue almacenarla de manera natural o artificial y poder aprovecharla al máximo y controlar avenidas.

La forma más común es bloqueando el paso del agua con una barrera llamada cortina para acumularla en un sitio que será un vaso de almacenamiento, y que dicha agua se podrá disponer en épocas de estiaje.

Las políticas de operación estructuran los criterios para definir dos factores para la asignación de agua, uno asociado al aseguramiento del agua y otro relacionado con la probabilidad de ocurrencia de los escurrimientos.

En la realización de esta tesis se trata de determinar la política de operación óptima que considera una curva guía aplicando el método de Svanidze con la generación de 10 series sintéticas de 100 años, al igual que los registros sintéticos.

Se divide en los siguientes capítulos:

En el **CAPÍTULO 1**, se describen los problemas de que cuando no se operan adecuadamente las presas pueden presentarse condiciones de riesgo en los sitios aguas debajo de la cortina, hipótesis, objetivos, así como la descripción del sitio.

En el **CAPÍTULO 2**, se describen los antecedentes, así como estudios similares hechos en México y otros países sobre la generación de series sintéticas periódicas.

En el **CAPÍTULO 3**, se revisa la teoría de algunos métodos para generar registros sintéticos en particular el método de Svanidze, se describe paso a paso el método para la generación de las 10 series sintéticas y determinar la política de operación óptima, así como la ubicación y características generales de la presa.

En el **CAPÍTULO 4**, se hizo la aplicación del método de Svanidze y la revisión de los resultados, se generan las series sintéticas con dicho método, se comparan con los estadísticos históricos. Se realiza la simulación del funcionamiento de vaso para la presa “El infiernillo Mich.” con la política de operación, para analizar el comportamiento del almacenamiento mínimo, déficit derrames y energía promedio generada, en el largo plazo.

En el **CAPÍTULO 5**, se mencionan las conclusiones derivadas del estudio, así como algunas recomendaciones.

## **CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Introducción**

El agua como recurso natural renovable es esencial para el funcionamiento de una presa, sobre todo porque dichas presas tienen varios propósitos de suma importancia, tales como el riego, control de avenidas, almacenamientos y generación de energía eléctrica, y por el hecho de ser muy importante, también puede resultar muy peligroso en cantidades muy grandes y causar mucho daños aguas abajo, tales como inundaciones, en casos más críticos.

Con el fin de regular los escurrimientos naturales de un río y dado que el agua ingresa al vaso de manera aleatoria, es necesario adecuar el régimen de extracciones a los requerimientos de la demanda, así como controlar los gastos extraordinarios, entonces se crea una presa, se almacenan volúmenes de agua en época de lluvias y de avenidas para usarse en épocas de estiaje.

A fin de establecer reglas para tomar decisiones en el caso de una presa, se establecen las políticas de operación y de ellas depende la funcionalidad de la presa. Determinar políticas de operación adecuadas es relativamente sencillo si se cuenta con las demandas y los volúmenes de ingreso. En el caso de México, comúnmente se cuenta con registros históricos de pocos años. Por ello, para ampliar la visión a largo plazo es importante tener registros más largos que los históricos y obtener políticas de operación óptimas (Peña, 2010).

La simulación a partir de la generación de registros sintéticos de los volúmenes de ingreso con mayor número de años que los registros históricos aumenta la información sobre el funcionamiento del sistema (generación, déficit y derrames a largo plazo), en comparación a la obtenida de los registros históricos que suelen ser menores a 50 años (Peña, 2010).

En este trabajo se realizó la generación de registros sintéticos generados con el método de Svanidze para simular el funcionamiento de vaso a largo plazo en el sistema con una política de operación obtenida para la presa “El infiernillo, Mich.”.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general es aplicar el método de Svanidze para generar 10 series sintéticas de igual longitud que el registro histórico y 10 series sintéticas de 100 años de los volúmenes de ingreso a la presa “El Infiernillo” y simular dichos registros con una política de operación óptima que consideren una curva guía. Para analizar el posible comportamiento del sistema en el largo plazo.

## **1.3 Descripción del sitio**

La empresa constructora ICA fue la encargada de dar vida al proyecto hidroeléctrico de La Presa “El infiernillo, Mich.” construida por la Secretaría de Recursos Hidráulicos para la Comisión Federal de Electricidad. Esta presa se realizó entre 1960 y 1964, es parte del Sistema llamado Adolfo López Mateos, es una presa ubicada en el cauce del Río Balsas entre los límites de los estados de Guerrero y Michoacán, México, forma parte del sistema hidroeléctrico Presidente Adolfo López Mateos.

El vaso del infiernillo tiene 120 km de largo, una cortina de 149 m de altura, cubre una superficie de 400 km<sup>2</sup>, su capacidad es de 12x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, la planta Central Hidroeléctrica de generación con potencia instalada de 1200 MW, 2 líneas de transmisión de 400 kW.

([digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf](http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf))

### **1.3.1 Características generales**

La presa de 145 m de altura, es de enrocamiento con núcleo central de arcilla compactada (Tabla 1.1).

Cuenta con tres túneles vertedores capaces de descargar un caudal de 13,400 m<sup>3</sup>/s. Cada uno de ellos tiene a la entrada tres compuertas radiales de 7.5 x 15 m; su diámetro interior es de 13 m. Dichos túneles y otros dos de 9 m de diámetro excavados en la ladera derecha, se utilizaron para desviar el río durante la construcción de la presa con el auxilio de dos ataguías, de 70 m la de aguas arriba y

50 m la de aguas abajo; la capacidad de desviación prevista fue de 10,000 m<sup>3</sup>/s caudal máximo registrado en la estación de aforos El Infiernillo, antes de 1960.

Tres obras de toma alojadas en el estribo izquierdo alimentan a seis turbinas Francis que operan, cada una, con un gasto máximo de 194 m<sup>3</sup>/s; la carga de diseño es de 101 m. La casa de máquinas es subterránea y tiene las siguientes dimensiones: longitud 128 m, ancho 21 m y altura 40 m; aguas arriba se encuentra la cámara de válvulas y abajo de una batería de seis pozos de oscilación, excavados totalmente en roca. La subestación con los transformadores de potencia, reguladores de voltaje y demás equipo de transmisión está ubicada en una plataforma de la margen izquierda, arriba de la salida de los túneles vertedores.

La Central Hidroeléctrica comenzó a generar energía en octubre de 1964, durante 1965 quedaron instaladas las cuatro unidades de la primera etapa y a mediados de 1975 entraron en operación las dos turbinas de la segunda etapa. A finales de septiembre de 1967 ocurrió una creciente extraordinaria en el río Balsas, con gasto de entrada de 25200 m<sup>3</sup>/s debido al huracán Beulah y volumen total de 7500 millones de m<sup>3</sup>, que se regularizó a un caudal máximo de salida de 7500 m<sup>3</sup>/s; fue necesario operar las compuertas radiales parcialmente abiertas para reducir la descarga de los vertedores al valor indicado, a fin de proteger otra presa localizada aguas abajo (José Ma. Morelos), que estaba en proceso de construcción (CFE, 1969).

La cortina de la presa Adolfo López Mateos (C.H. Infiernillo) se instrumentó con dispositivos para observar su comportamiento durante la construcción y posteriormente, dándose referencia a la medición de deformaciones. No se instalaron celdas para registrar esfuerzos y la observación de presiones de poro comprende un número pequeño de puntos en el corazón impermeable y la cimentación.

La presa fue construida en el cañón del río Balsas, que en el sitio elegido fluye aproximadamente de sur a norte. Aguas abajo, el río cambia bruscamente su curso al suroeste (Figura 1.1).

<b>CUENCA</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Superficie	108	km <sup>2</sup>
Precipitación media anual	1023	Mm
Escurrimiento medio anual	15000x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Avenida máxima registrada	25200	m <sup>3</sup> /s
<b>VASO</b>		
Capacidad total	12000x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Capacidad mínima de operación	2250x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Capacidad útil	7090x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Capacidad para control de avenidas	2660x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Área máxima inundada	40000	Ha
<b>PRESA</b>		
Altura máxima	148.5	m
Longitud de corona	350	m
Bordo libre	3.6	m
Volumen total, presa	5.13x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Volumen total, ataguías	0.47x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
<b>VERTEDOR DE EXCEDENCIAS</b>		
Avenida de diseño	38800	m <sup>3</sup> /s
Caudal máximo descargado	7500	m <sup>3</sup> /s
Carga	22.4	m
Capacidad máxima de descarga	13800	m <sup>3</sup> /s
Elevación de la cresta vertedora	154.00	msnm
Compuertas 9 en total de ancho y alto	7.42 x 15	m , m
<b>CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>		
Número de unidades	6	Francis
Capacidad instalada	1200	MW
Carga de diseño	101	M
Caudal de diseño	193.40	m <sup>3</sup> /s
<b>GENERACIÓN MEDIA ANUAL</b>		
<b>NAME (original)</b>	176.40	msnm
<b>NAME (actual)</b>	183.2	msnm
NAMO (estiaje)	169.00	msnm
NAMO (avenidas)	165.00	msnm
<b>NAMINO</b>		
<b>CORONA (original)</b>	140.00	msnm
<b>CORONA (actual)</b>	180.00	msnm
	184.00	msnm

**Tabla 1.1 Características generales Presa Adolfo López Mateos (C.H. Infiernillo) Michoacán**



**Figura 1.1 Sitio de estudio. Presa Adolfo López Mateos (C.H. Infiernillo)**



## Referencias

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa. 2011.
2. Peña Delgado, Francisco. Simulación histórica y sintética de políticas de operación óptima de un sistema de tres presas en cascada en el Río Santiago, Nayarit México. Tesis Profesional. UNAM. 2010.
3. ([digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf](http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf)).

## **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Estudios previos realizados en México**

En el Estado de México durante los años 70's se realizó un estudio para la determinación de las políticas de operación de las presas La Juliana y Los Arcos por Correa A. Raúl en 1977 (Peña, 2010).

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha realizado estudios para la determinación de políticas de operación de distintos sistemas de presas dentro de la República Mexicana. Uno de estos estudios es el realizado en el Río Grijalva, Estudio integral de la cuenca alta del Río Grijalva, en donde se analizó un sistema de presas en cascada, que incluye a las siguientes plantas hidroeléctricas: La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas. Trabajo en el cual se toma en cuenta el concepto de curva guía y en el análisis se monitoreaba la energía generada, el almacenamiento mínimo y si presentaba algún derrame o déficit (Domínguez et al., 2009).

Otro ejemplo es el trabajo desarrollado en la tesis doctoral que lleva por título Metodología de selección de una política de operación conjunta de una presa y su vertedor (Domínguez, 1989). En ella se estableció una metodología que permitió estimar la función de distribución de probabilidades asociada a las consecuencias de tránsito de las avenidas por el vaso, la cual toma en cuenta la información histórica de las avenidas máximas anuales, considerando su valor máximo y su forma, además de estimar la influencia de la política de operación a largo plazo en el valor esperado de los daños causados por las avenidas. Para los ejemplos planteados en la tesis de (Domínguez, 1989). Se utilizan datos de la presa El Infiernillo ubicada en el Río Balsas.

Hay sistemas que están en continuo estudio en el Instituto de Ingeniería de la UNAM con el fin de ir actualizando información de los eventos hidrológicos y tomando en cuenta los avances en las técnicas de análisis. Un ejemplo es el caso del Río Grijalva

que también ha sido estudiado durante los 90's en el trabajo Operación integral del sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva (Domínguez et al., 1993), donde se definieron políticas de operación que evitaran inundaciones en poblados aguas abajo del sistema y maximizaran la generación eléctrica de todo el sistema.

A partir del año 2000, se han ido realizando aún más investigaciones al respecto como la revisión de las presas La Angostura y Malpaso en el Río Grijalva (Domínguez et al., 2001), donde se hicieron modificaciones al modelo anterior a partir de las restricciones de energía mínima planteadas por la Comisión Federal de Electricidad.

En el artículo Importancia de la generación de muestras sintéticas en el análisis del comportamiento de políticas de operación de presas (Domínguez et al., 2005), basado en el análisis hecho del sistema hidroeléctrico del Río Grijalva, los resultados permitieron observar diferencias significativas en comparación al simular solamente el registro histórico.

La generación de muestras sintéticas ha sido aplicada en muchos estudios como el planteado en el informe Determinación de políticas de operación del Río Santiago (Domínguez et al., 2009), sistema formado por las presas Santa Rosa, La Yesca, El Cajón y Aguamilpa. Otros trabajos que destacan sobre el Río Santiago son los hechos por Domínguez y Arganis en el 2009, solamente considerando El Cajón y Aguamilpa.

Sobre el Río Fuerte se tiene el trabajo Determinación de políticas de operación del Río Fuerte, Sinaloa (Domínguez et al., 2007). En donde se analizó el sistema compuesto por las presas Luis Donald Colosio (Huites), Miguel Hidalgo (El Mahone) y Josefa Ortiz de Domínguez (El Sabino).

Un ejemplo más es el trabajo realizado en la tesis que lleva por título, Efectos de una política de operación de una hidroeléctrica en el largo plazo usando registros sintéticos para su simulación (Mireles 2013), donde se aplicó el método de Svanidze para generar 10 series sintéticas de 100 años cada una, de volúmenes de ingreso por cuenca propia a la presa la Angostura, Son.

## **2.2 Estudios similares en otros países**

Varios casos en los que se han obtenido políticas de operación en el extranjero han sido con el fin de una optimización de la generación eléctrica de las presas maximizando la producción anual al aplicar varios modelos para la determinación de óptimas políticas de operación.

La revisión en diez presas de Vietnam sobre sus adecuadas políticas en un estudio realizado por la Universidad del sur de Australia, donde se revisó la seguridad de las presas y se evaluó la adecuación de las políticas. En este estudio se relaciona el correcto funcionamiento de una presa con el desarrollo de un país, lo cual se da debido a la implicación de términos económicos en las presas hidroeléctricas (Dam et al., 2012).

Otro de los ejemplos sobre determinación de políticas de operación es el caso de cuatro presas construidas en Turquía. Donde se tomaron como base para la modelación los datos históricos de cinco años, describiendo el método como una planificación adaptativa basado en modelos estocásticos (Dagli et al., 1980).

La maximización de la energía hidroeléctrica se ha logrado muchas veces gracias a la aplicación de un modelo de programación lineal. Ejemplo de esto es el estudio realizado en la presa Yongdam situada en el Río Geum en Corea del Sur, se examinó la función objetivo como una alternativa a una forma no lineal además del efecto en el almacenamiento de los embalses considerando la maximización de generación de energía hidroeléctrica (Yoo et al., 2009).

En el caso del lago Kariba, que utiliza el agua del Río Zambeze para producir energía hidroeléctrica que se suministra a Zambia y Zimbabue, se empleó la programación dinámica incremental y la programación dinámica estocástica con el objetivo de maximizar el potencial de la energía hidroeléctrica del sistema (Stam et al., 1998).

En el artículo *The optimization of single-purpose reservoir design with the application of dynamic programming to synthetic hydrology samples* se realizó un análisis que arrojaba una política de operación óptima para una presa usando programación dinámica (Hall et al., 1963). El procedimiento de programación dinámica ha sido un método eficiente para resolver una variedad de problemas de decisión.

### **2.3 Conceptos básicos de la Hidrología**

Mencionaremos algunos conceptos básicos de la Hidrología utilizados en esta tesis (Aparicio, 2011).

- **Hidrología**

Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos.

- **Ciclo hidrológico**

Es un término aplicable al movimiento del agua y su paso por diversos estados físicos, no tiene ni principio ni final.

- **Transpiración**

Es el agua en forma de vapor que las plantas envían a la atmosfera.

- **Evaporación**

Es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso y se transfiere a la atmosfera.

- **Evapotranspiración**

Es la combinación de la evaporación y la transpiración, es decir, la cantidad de agua transferida del suelo a la atmosfera por evaporación y por la transpiración de las plantas.

- **Precipitación**

Agua proveniente de la atmosfera.

- **Escurrimiento**

Es el agua proveniente de la precipitación que fluye sobre y debajo de la superficie terrestre, (superficial, sub superficial, subterráneo).

- **Infiltración**

Proceso por medio del cual el agua pasa por los estratos del suelo y se mueve hacia abajo (hacia el agua subterránea).

- **Meteorología**

Ciencia que estudia los fenómenos que ocurren en la atmosfera, tales como viento, temperatura, evaporación, precipitación, transpiración.

- **Clima**

Es el comportamiento de los fenómenos que ocurren en la atmosfera.

- **Cuenca**

Es el área que proporciona el flujo de la corriente principal y sus tributarios, y está delimitada por el parteaguas.

- **Parteaguas**

Línea imaginaria que va de los puntos de mayor nivel topográfico.

### **2.3.1 Elementos de un aprovechamiento hidroeléctrico**

- **Presa**

Es una barrera que se construye al paso de una corriente de agua, se construye para dar abastecimiento de agua a poblaciones para consumo humano, suministro a las áreas de riego y a las industrias. También se usa el cuerpo de agua con fines de navegación, deportivos y de pesca, así como para la generación de energía eléctrica, también es usada para evitar inundaciones.

- **Vaso de almacenamiento o embalse**

Lago artificial formado por la presa.

- **Cortina**

Obstáculo construido al paso de la corriente de agua para su almacenamiento.

- **Obra de Toma**

Conjunto de elementos que permite la extracción del agua del embalse para cumplir con los propósitos deseados.

- **Obra de Excedencias**

Estructura que da salida al agua que excede la capacidad útil del vaso sin permitir daño alguno a la presa.

- **Obra de control**

Protege la zona aguas abajo, controlando los excedentes.

- **Obra de desvío**

Es una obra que permite desviar y controlar la corriente principal de agua mientras se construye la presa.

- **Casa de máquinas**

Sitio donde se albergan las turbinas para la generación de electricidad.

### 2.3.2 Conceptos básicos de probabilidad y estadística

La probabilidad y la estadística juegan un papel muy importante en el análisis hidrológico, ya que los escurrimientos en los cauces se encuentran relacionados con eventos hidrológicos aleatorios. (Devore, 2008).

- **Probabilidad**

Es un proceso aleatorio, se define como la razón entre el número de casos favorables y el número de casos posibles. Al suponer que existe un número finito de eventos simples  $N$  que compone el espacio de eventos asociados a un experimento aleatorio, igualmente posibles, si un evento  $A$  del espacio de eventos se compone por eventos simples  $N(A)$ , entonces la probabilidad del evento se define como:

$$P(A) = \frac{N(A)}{N} \quad (2.1)$$

- **Estadística**

Se encarga de los métodos científicos para recolectar, organizar resumir, presentar y analizar datos, de la misma manera se ocupa de sacar conclusiones válidas y tomar decisiones en este análisis. Existe la estadística descriptiva que busca describir y analizar un grupo determinado, sin obtener conclusiones acerca de un grupo más grande; mientras la estadística inductiva o inferencial se ocupa de las condiciones bajo las cuales las conclusiones son válidas.



- **Variable aleatoria**

Es cualquier regla que asocia un número con cada resultado, no se sabe con certeza su ocurrencia, se rige por las leyes de la probabilidad. (Devore, 2008).

- **Población**

Conjunto de elementos que conforman una muestra.

- **Muestra**

Es una parte de la muestra.

- **Media**

Suma de todos sus valores, dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (2.2)$$

- **Mediana**

Valor que ocurre con una probabilidad de 0.5.

- **Moda**

Valor que ocurre con mayor frecuencia.

- **Desviación estándar**

Se define como la raíz cuadrada de la varianza y es una medida de centralización o dispersión.

$$S = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}\right)} \quad (2.3)$$

- **Coefficiente de asimetría**

Mide si la muestra se distribuye de igual manera a ambos lados de la media:

Si  $g < 0$ , la simetría es negativa, siendo mayor la dispersión hacia la izquierda de la media.

Si  $g = 0$ , la muestra es simétrica alrededor de la media.

Si  $g > 0$ , la simetría es positiva, siendo mayor la dispersión hacia la derecha de la media

$$g = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{n-1}{n}\right)^{3/2} S_x^3} = \frac{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i^3 - 3 \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i^2 + 2 n \bar{x}^3)}{\left(\frac{n-1}{n}\right)^{3/2} S_x^3} \quad (2.4)$$

- **Coefficiente de correlación**

Es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias.

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (2.5)$$

- **Periodo de retorno**

Es el tiempo T en que un evento de magnitud dada, puede presentarse o ser excedido por lo menos una vez, se mide en años, es el inverso de la probabilidad de excedencia P.

$$T = \frac{1}{P} \quad (2.6)$$

### 2.3.3 Funciones de probabilidad usadas en la Hidrología

Para eliminar la subjetividad en la Hidrología, se debe buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad teóricas la que se ajuste mejor a los datos medidos, y usar esta función para la extrapolación.

#### 2.3.3.1 Distribución normal

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.7)$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma$  son los parámetros de la distribución. Estos parámetros determinan la forma de la función  $f(x)$  y su posición en el eje  $x$ .

#### 2.3.3.2 Distribución lognormal

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} \quad (2.8)$$

Donde alfa y beta son los parámetros de la distribución.

#### 2.3.3.3 Distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros

Ésta se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}} \quad (2.9)$$

Donde  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  y  $\delta_1$  son los parámetros de la función y  $T(\beta_1)$  es la función Gamma.

#### 2.3.3.4 Distribución Gumbel

Supongase que se tienen  $N$  muestras, cada una de las cuales contiene  $n$  eventos, Si se selecciona el máximo  $x$  de los  $n$  eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que  $n$  aumenta, la función de distribución de probabilidad de  $x$  tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (2.10)$$

La función de densidad de probabilidad es entonces:

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}]} \quad (1.11)$$

Donde  $\sigma$  y  $\beta$  son los parámetros de la función.

#### 2.3.3.5 Funciones de distribución Doble Gumbel

La función de distribución de probabilidad Doble Gumbel permite analizar muestras de datos formadas por dos poblaciones distintas. Es muy útil cuando se tienen datos, por ejemplo, de gastos máximos provocados por los ciclones o las debidas a tormentas de invierno, las cuales sobresalen de los demás, ya que forman parte de la población.

$$F(x) = p(e^{-e^{-\alpha(x-\beta_1)}}) + (1-p)(e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}}) \quad (2.12)$$

La función Doble Dumbel y los 5 parámetros que la definen:  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  y  $P$ , en donde los subíndices 1 y 2 indican las poblaciones de la muestra.  $P$  y  $1-P$ , son las proporciones de datos de cada población (Jiménez, 1997).

### 2.3.3.6 Métodos de estimación de parámetros de funciones de distribución

El método de momentos consiste en estimar los parámetros de una función de distribución, para que se ajuste a un conjunto de datos, consiste en igualar los valores de las características estadísticas de la muestra con las de la población; esto es, hacer que la medida de los valores muestreados sea igual a la de la distribución (a la que se llamará primer momento), que las varianzas sean iguales (segundo momento), el coeficiente de asimetría (tercer momento), etc., hasta establecer tantas ecuaciones como parámetros tenga la función.

Existen varias reglas para ir modificando el ajuste de esta función de manera satisfactoria y se basan en la similitud que existe entre la función Gumbel sencilla, a la cual se le ha transformado previamente con los algoritmos para llevar a la ecuación de una recta:

$$F = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (2.13)$$

$$\ln \frac{1}{F} = -e^{-\alpha(x-\beta)} \quad (2.14)$$

$$-\ln \ln \frac{1}{F} = \alpha(x - \beta) \quad (2.15)$$

$$x = -\frac{1}{\alpha} \ln \ln \frac{1}{F} + \beta \quad (2.16)$$

$$x = -\ln \ln \frac{1}{F} \quad (2.17)$$

$$m = \frac{1}{\alpha} \quad (2.18)$$

$$b = \beta \quad (2.19)$$

$$y = x \quad (2.20)$$

$$\text{Entonces: } y = mx + b \quad (2.21)$$

Es decir, si se desea “tener una pendiente más pronunciada” en alguna de las dos poblaciones, se deberá disminuir su correspondiente parámetro  $\alpha$ .

Y si se quiere trasladar alguna de las curvas de cada población, se deberá aumentar o disminuir, según que se quiera subir o bajar, al parámetro  $\beta$ .

Otro método que existe, es el de máxima verosimilitud, se supone que el mejor parámetro de una función debe ser aquel que maximiza la probabilidad de ocurrencia de la muestra observada. Se utiliza la función de verosimilitud  $L(x)$ . Mientras mayor sea esta función mayor será el ajuste de la función de distribución a los datos.

La función de verosimilitud es el producto de los valores de la función de densidad de probabilidad teórica, calculada para cada valor de la muestra, es decir:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i) = f(x_1) * f(x_2) * f(x_3) * \dots * f(x_n) \quad (2.22)$$

Donde  $\Pi$  es el operador que indica el producto de los valores de la función de densidad evaluada en cada dato medido  $x_i$  desde  $i=1$  hasta  $n$

Debido a que varias funciones de densidad de probabilidad son exponenciales, es conveniente trabajar con la función logaritmo de la función de verosimilitud:

$$H = \ln L = \sum_{i=1}^n \ln[f(x_i)] \quad (2.23)$$

De esta manera para poder estimar los valores de los parámetros de la función que hacen máxima a la función H, se deriva dicha función con respecto a cada uno de los parámetros y el resultado se iguala a cero. Al igualar a cero cada una de las derivadas se tendrán tantas ecuaciones como parámetros tenga la función de probabilidad, y de estas se despejan los parámetros para hacer el ajuste respectivo.

Este método teóricamente es el más correcto para ajustar distribuciones de probabilidad a información, ya que produce los estimativos de parámetros más eficientes, aquellos que estiman los parámetros de la población con los menores errores promedio, sin embargo para algunas distribuciones de probabilidad, no existe una solución matemática y al maximizar la función logaritmo de verosimilitud resulta bastante complicado, es por ello que en general el método de los momentos es más fácil de aplicar que el método de la máxima verosimilitud y resulta ser el más apropiado para los análisis prácticos en Hidrología.

## Referencias

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa. 2011.
2. Dagli, C. H., Miles, J. F. Determining operating policies for a water resource system. Journal of Hidrology. 47 (1980). 297-306. Holanda.
3. Dam T. T., Burritt R. L., Pisaniello J. D. Adequacy of policy and practices for small agricultural dam safety accountability and assurance in Vietnam. Agricultural Water management. 112 (2012). 63-74. Australia.
4. Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L., González, V. F. Estudio integral de la cuenca alta del río Grijalva. 3. Manejo óptimo de las presas. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Informe final. Noviembre 2009.

5. Domínguez M.R., Cruickshank V.C., Arganis J.M.L. Importancia de la generación de muestras sintéticas en el análisis del comportamiento de políticas de operación de presas. Ingeniería del agua. 12. Marzo 2005.
6. Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L. Determinación de políticas de operación del río Fuerte, Sin. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Informe Final. Diciembre 2007.
7. Domínguez Mora, Ramón. Metodología de selección de una política de operación conjunta de una presa y su vertedor. Tesis Doctoral. UNAM.1989.
8. Domínguez, M. R., Mendoza R. R. Operación integral del sistema hidroeléctrico del río Grijalva. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Julio 1993.
9. Domínguez, M. R. Revisión de las políticas de operación quincenal de las presas Angostura y Malpaso, en el río Grijalva. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Informe Final. Noviembre 2001.
10. Hall W. A., Howell D. T. The optimization of single-purpose reservoir design with the application of dynamic programming to synthetic hydrology samples. Journal Hydrology. 1 (1963). 355-363. Holanda.
11. Peña Delgado, Francisco. Simulación histórica y sintética de políticas de operación óptima de un sistema de tres presas en cascada en el Río Santiago, Nayarit México. Tesis Profesional. UNAM. 2010.
12. Stam A., Salewicz K. A., Aronson J. E. An interactive reservoir management system for Lake Kariba. European Journal of Operational Research. 107(1998). 119-136. Austria.
13. Yoo, Ju-Hwan. Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model. Journal of Hydrology. 376 (2009). 182-187. Corea.
14. Devore J. L. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y ciencias. San Luis Obispo, USA: California Polytechnic State University. 2008.
15. Jiménez, E. M., et al. Manual de Operación de los Programas AX.EXE y CARACHID.EXE (para Hidrología). CENAPRED. México, 1997.



## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

### **3.1 Generación de datos sintéticos**

En México se cuenta con pocas hidrométricas y climatológicas que tengan 20 o más años de registro (en un estudio reciente se identificaron como 300 de ellas, Domínguez et al., 2014). Y para efecto de un análisis del funcionamiento de un embalse en el largo plazo es importante contar con un registro de datos de longitud mayor que los históricos.

Ahora gracias a las computadoras se puede analizar y reproducir series de datos en grandes cantidades que exhiban las variaciones que los datos naturales muestran.

El método de Svanidze hace uso de toda la información disponible. Los datos generados sintéticamente dependen principalmente de los datos históricos originales. Este método emplea los registros históricos como un ejemplo de la población total, mientras que los métodos convencionales consideran a los registros históricos como la población total. Los resultados están basados en estimaciones de lo que pudo haber pasado en lugar de lo que ha pasado.

Cualquier serie de tiempo de valores observados puede contener un componente estocástico. En el primer componente hay dependencia del tiempo y de la extensión de las series. Mientras el componente estocástico es estacionario, lo que significa que los estadísticos de la muestra no difieren de los estadísticos de la población, excepto como resultado de la variabilidad de muestreo, y son independientes del tiempo.

Si los componentes de tendencia y periódico son removidos de las series, se deja un componente estocástico estacionario. Ese componente contendría un elemento aleatorio y podría o no contener un elemento de correlación. La correlación en una serie describe cómo cada término en una serie es afectado por lo que ha sido antes (Wilson, 1990).

### 3.1.1 Modelos ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)

Box y Jenkins introdujeron una clase especial de modelos llamados Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA). Estos modelos fueron diseñados para series de tiempos lineales. Son aplicables al analizar series temporales de datos mensuales máximos (Yurekli, 2004).

### 3.1.2 Método de fragmentos de Svanidze

Concebido en 1961 (Svanidze, 1980) la esencia de este método está contenida en un doble proceso aleatorio. Los datos (por ejemplo, volúmenes anuales) promedio  $Q_i$  (primer muestreo) y los fragmentos  $Q_i(t)$  (el segundo muestreo).

En este método los datos mensuales se estandarizan año tras año, por lo que la suma de los flujos mensuales en un año es igual a la unidad. Esto se hace dividiendo los flujos mensuales en un año por el correspondiente flujo anual. De esta manera, a partir de un registro de  $n$  años, se tendrá  $n$  fragmentos de doce datos mensuales. Los datos anuales obtenidos a partir de un modelo anual pueden ser desagregados al seleccionar los fragmentos de forma aleatoria. Este método tiene la desventaja de que la correlación entre el primer mes de un año y el último mes de un año previo no será preservada.

Como los parámetros mensuales no se conservan bien, se realiza un intento para mejorarlos seleccionando el fragmento apropiado para cada flujo en la serie de flujo anual. Esto se hace de la siguiente manera, los flujos anuales del registro histórico (de  $n$  años largos) se clasifican de acuerdo con el aumento en la magnitud y se formaron  $n$  clases. La clase 1 tiene el límite inferior cero mientras que la clase  $n$  no tiene ningún límite superior. Se obtienen los límites de las clases intermedias haciendo el promedio de dos flujos sucesivos de las series clasificadas. El correspondiente fragmento se asigna a cada serie. Es decir, el fragmento obtenido de los flujos mensuales correspondiente al flujo anual más pequeño se asigna a la clase 1, el fragmento obtenido de los flujos mensuales correspondientes al segundo flujo

anual se asigna a la clase 2 y así sucesivamente. Los flujos anuales se revisan uno por uno para la clase a la que pertenecen y se desglosan utilizando el fragmento correspondiente (Svanidze, 1980).

### **3.1.3 Método de Svanidze**

Este método permite la generación de registros sintéticos con una longitud mayor o igual que la del registro histórico considerado, al calcular la fracción de cada etapa del año respecto al total anual se vuelve relativamente un método sencillo.

Contempla la función de distribución de la serie anual de valores totales, en la cual se realiza una doble sección aleatoria en la que se determina un volumen total anual sintético y la forma aleatoria de las fracciones que corresponden al año sintéticamente generado.

Para obtener un registro sintético de  $n$  años, es necesario repetir el proceso  $n$  veces. Los valores de cada año sintético se obtienen al multiplicar el volumen total anual sintético por la fracción aleatoria seleccionada.

Este método tiene como ventaja que sólo se necesita un algoritmo de selección del tipo ruleta Montecarlo para la realización del doble procedimiento aleatorio. Mientras que su principal desventaja radica en que no siempre se logran reproducir las correlaciones entre la última etapa del año aleatorio  $i$  con la primera etapa del año aleatorio  $i+1$ , por la forma en que el método selecciona a las fracciones. Este es el método que fue aplicado en la presente tesis, debido a su sencillez por reproducir adecuadamente los estadísticos (Domínguez et al., 2009).

#### **3.1.3.1 Programa para la generación de las series**

Para el primer procedimiento aleatorio se utilizó como apoyo el programa AX (Figura 3.1). A este programa se le introducen los valores del volumen total suma, para ver la función de distribución que más se ajustaba a los datos, el archivo que nos arroja es un archivo .aju. Este programa genera los archivos .etp, que contiene los valores extrapolados con Gumbel para distintos periodos de retorno, el .max, que tiene los datos medios, calculados y el tiempo de retorno, así como el archivo .rdg que contiene los parámetros de la función de ajuste.

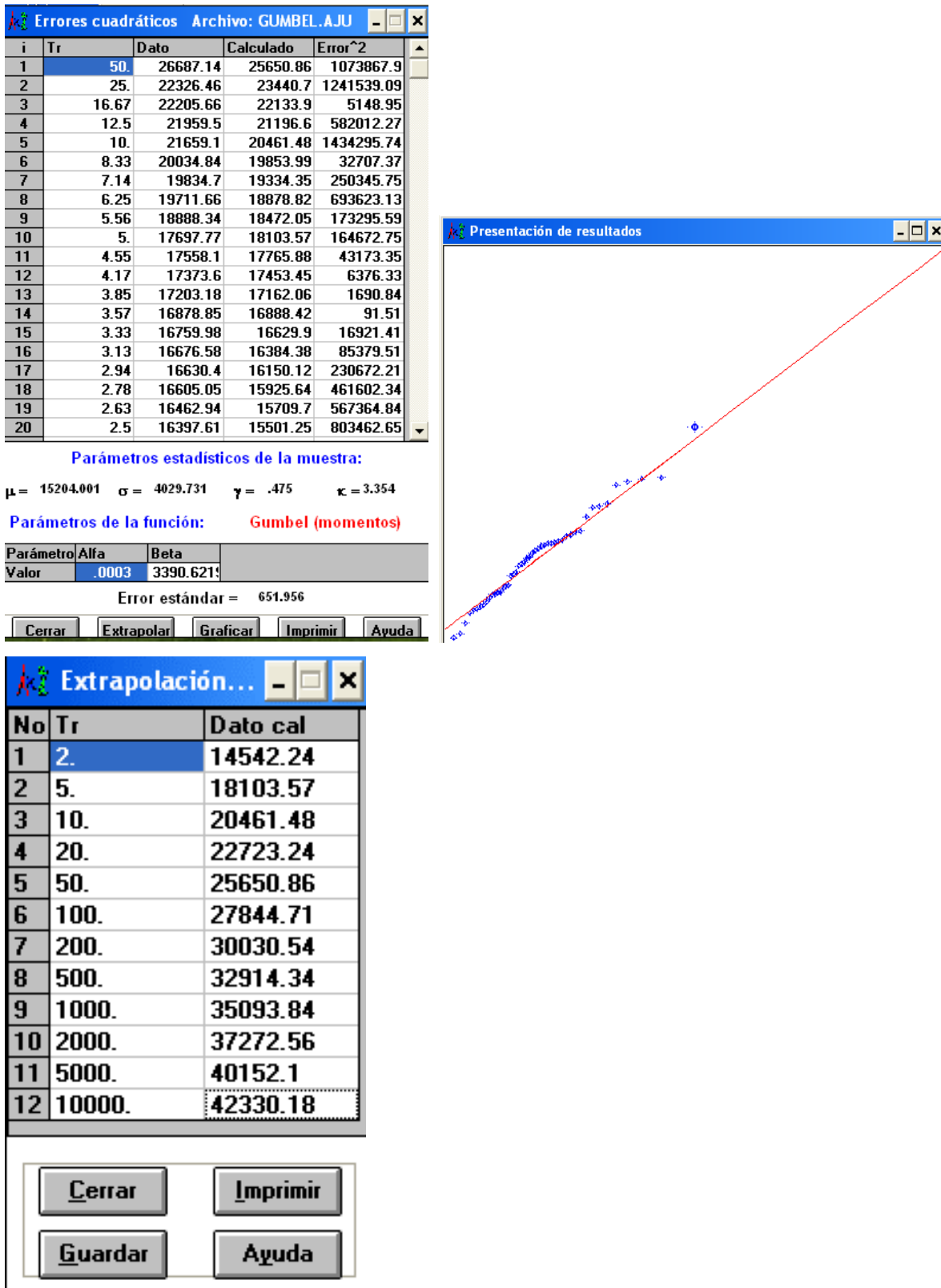
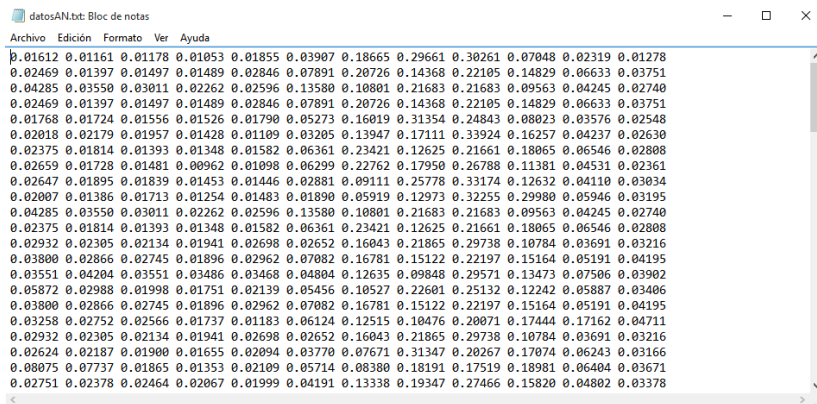


Figura 3.1 Resultados reportados por el software AX

El software AX también genera los parámetros de la función de distribución de probabilidad Gumbel  $\alpha_1$  y  $\beta_1$ . Posteriormente se utilizó el programa anhiNAO.bas, escrito en lenguaje Basic, el cuál necesita los parametros antes mencionados para generar las series. Este programa genera dos archivos de resultados, .RES y .txt, en el primero vienen los volúmenes totales anuales sintéticos y otros parámetros y en el segundo sólo vienen los volúmenes totales anuales sintéticos.

### 3.1.3.2 Programa para generar los años aleatorios y las fracciones aleatorias

Este ensayo se hizo con el programa anhiNAO.bas, este programa lee el archivo datosAN.txt (Figura 3.2), con los volúmenes totales anuales sintéticos y el registro en año cronológico.



**Figura 3.2 Archivo de datosAN.txt con el registro hidrológico con los años acomodados en orden cronológico**

El programa proporciona los archivos de resultados ARCH. RES (Figura 3.3), donde se tiene una selección de años diferente por considerar el umbral entre las dos poblaciones de los datos.

Archivo	Edición	Fgmat0	Ayer	
1	24	1988	15765.42	
2	26	1990	12990	
3	36	2000	11147.3	
4	26	1990	12990	
5	31	1995	17558.1	
6	44	2008	14153.89	
7	27	1991	12207.71	
8	29	1993	16878.85	
9	5	1969	18888.34	
10	34	1998	17373.6	
11	36	2000	11147.3	
12	27	1991	12207.71	
13	47	2011	13947.64	
14	4	1968	16149.32	
15	45	2009	8775.08	
16	16	1980	14962.99	
17	4	1968	16149.32	
18	38	2002	12932.8	
19	47	2011	13947.64	
20	1	1965	20034.84	
21	28	1992	16605.05	
22	35	1999	14821.5	

**Figura 3.3 Archivo de resultados ARCH.RES con la selección aleatoria de años para la serie 01**

### 3.1.4 Método de Svanidze modificado

Existen numerosas metodologías para obtener registros sintéticos a partir del registro histórico, tanto de series anuales como de series periódicas (semestrales, mensuales, diarias).

Este método se ha utilizado con éxito en la generación sintética de los volúmenes de escurrimiento de sistemas de presas que operan en cascada. Tiene la ventaja de que no se requiere que los datos sean normales y que logra reproducir las autocorrelaciones y las correlaciones cruzadas, pero el problema que tiene es la preservación de la correlación entre el último periodo del año  $i$  y el primer periodo del año  $i+1$ ; pero lo anterior se resuelve identificando los periodos de más baja correlación y redefiniendo los años (en lugar de usar años cronológicos, se utilizan años hidrológicos).

Los datos de entrada son las  $n$  series periódicas históricas analizadas; se calculan los totales anuales para cada serie, así como la suma de los  $n$  totales para cada año; para cada una de las series se obtiene la fracción de ingreso mensual con respecto al total anual, en forma adicional se determina, para cada total anual de cada serie, el porcentaje con respecto al total suma.

A la serie anual formada por la suma de los  $n$  totales se le hace un análisis estadístico para determinar la función de distribución que mejor ajuste, con la que se obtienen  $m$  valores aleatorios de la suma de los  $n$  volúmenes totales anuales. El segundo procedimiento es la selección aleatoria de entre  $m$  años históricos, para obtener el porcentaje sintético tanto de los totales anuales de cada serie, como de las fracciones mensuales correspondientes.

Se obtienen los totales anuales sintéticos para cada serie multiplicando el volumen total suma aleatorio por el porcentaje correspondiente al año seleccionado aleatoriamente. Se multiplica el total anual sintético de cada serie por las fracciones mensuales correspondientes al año seleccionado, con lo que se determinan las  $m$  series periódicas sintéticas.

### **3.2 Curva guía**

Las curvas guías son niveles (en elevación o en volumen) límite sugeridos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) que los embalses pueden alcanzar a lo largo del año (según la época del año), con el fin de evitar escenarios principalmente de derrames que pudieran poner en riesgo a los sitios ubicados aguas abajo de las presas.

Por otra parte, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) habla en términos de una curva guía baja, con el fin de considerar condiciones de carga convenientes para contar con la posibilidad de generar energía eléctrica que permita cubrir las demandas en las distintas épocas del año. Por ello se mencionan una curva guía alta (la sugerida por CONAGUA y que a la CFE se le pide respetar) y una curva guía baja (que le interesa a la CFE para poder generar).

Para las curvas guía se dibujan el eje horizontal el tiempo (quincenas, meses, por ejemplo), y en el eje vertical la elevación en msnm o el volumen en  $\text{hm}^3$ .

### 3.3 Política de operación

Es un conjunto de reglas, las cuales sirven para determinar las decisiones en función del estado del sistema, de ellas depende que se logren en mayor o menor medida los objetivos planteados.

Las políticas de operación para estos casos, determinan según la disponibilidad de agua, cuál debe ser el volumen de extracción o el volumen deseado al final de cada etapa.

Una función objetivo se puede realizar para obtener una política de operación óptima que cumpla con los objetivos de generación de electricidad en el caso de centrales hidroeléctricas, como es el caso de esta tesis, así minimizar déficit y derrames.

### 3.4 Simulación del funcionamiento de vaso

A partir de la obtención del conjunto de políticas óptimas es necesario realizar una simulación del funcionamiento de vaso para elegir la mejor. Los estudios de simulación ayudan a ver la sensibilidad de frente a la política de operación, ya que es una forma de ver las consecuencias de ésta.

La simulación de funcionamiento de vaso se realiza a partir de la ecuación de continuidad, expresada de la siguiente forma:

$$V_{i+1} = V_i + X_i + S_i - P_i \quad (3.1)$$

Sujeta a

$$VM^{(k)} \leq V_{i+1} \leq VU^{(k)} \quad (3.2)$$



Donde:

$V_{i+1}, V_i$  Volúmenes almacenados al final y al principio del mes  $i$  respectivamente, en  $hm^3$

$VM^{(k)}$  Volumen correspondiente al NAMINO en el mes  $k$  del año, en  $hm^3$

$VU^{(k)}$  Volumen correspondiente al NAMO en el mes  $k$  del año, en  $hm^3$

Considerando:

$$X_i = ICP + IT_i \quad (3.3)$$

$$S_i = VDEM_i \quad (3.4)$$

$$P_i = 1000(EVAP_i - hp_i)\bar{A}_i \quad (3.5)$$

Para:

$ICP$  Volumen de escurrimiento generado por cuenca propia que entra al vaso en el mes  $i$ , en  $hm^3$

$IT_i$  Volumen de entrada por transferencias desde otras cuencas en el mes  $i$ , en  $hm^3$

$VDEM_i$  Volumen extraído para satisfacer la demanda en el mes  $i$ , en  $hm^3$

$hp_i$  Lámina de precipitación sobre el vaso en el mes  $i$ , en  $hm^3$

EVAP<sub>i</sub> Lámina de evaporación en el vaso en el mes i, en hm<sup>3</sup>

A<sub>i</sub> Promedio de las áreas de superficie libre del vaso, en km<sup>2</sup>

El área promedio se calcula como  $\frac{A_{i+1}+A_i}{2}$  siendo A<sub>i+1</sub> y A<sub>i</sub> el área de la superficie libre del agua al final y al inicio del mes i, respectivamente.

Ademas de considerar que el volumen de demanda puede modificarse en los siguientes casos:

- a) Para evitar que el volumen almacenado en la presa sea inferior a VM<sup>(k)</sup>, se reduce la extracción de agua del vaso disminuyendo VDEM<sub>i</sub>.
- b) Cuando haya derrame se aumenta VDEM<sub>i</sub> al máximo posible con el objeto de turbinar un mayor volumen de agua.
- c) Cuando VDEM<sub>i</sub> excede al volumen turbinable máximo en el mes en estudio, se hace que VDEM<sub>i</sub> sea igual a dicho volumen.

Se considera lo siguiente para calcular el volumen máximo de agua que puede ser usado en la generación hidroeléctrica en cada mes.

$$P = K_i QH \quad (3.6)$$

Donde:

P potencia producida, en MW

Q gasto que pasa por las turbinas, en m<sup>3</sup>/s

H carga bruta, en m

K<sub>i</sub> coeficiente que contiene la eficiencia de la máquina, al peso específico del agua y un coeficiente de conversión de unidades. Su valor se considera constante (0.00981).

Debido a que el gasto es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la carga bruta:

$$Q = K_2(H)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Sustituyendo en la ecuación  $P = K_1QH$ , se tiene:

$$P = K_1K_2(H)^{\frac{3}{2}} = K_3(H)^{\frac{3}{2}} \quad (3.8)$$

$$K_1 = \frac{P_{INS}}{Q_{DIS}H_{BDIS}} \quad (3.9)$$

$$K_3 = \frac{P_{INS}}{H_{BDIS}^{\frac{3}{2}}} \quad (3.10)$$

Donde:

$P_{INS}$  potencia instalada en el sistema

$Q_{DIS}$  gasto de diseño

$H_{BDIS}$  carga bruta de diseño

La carga hidráulica bruta de diseño se calcula como:

$$H_1 = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} - DESF^{(K)} \quad (3.11)$$

Donde:

$h_i, h_{i+1}$  elevación de la superficie libre del agua al inicio y al final del mes  $i$

$DESF^{(K)}$  elevación media del desfogue en el mes  $k$  del año

Por lo tanto el volumen del agua máximo que pasa por las turbinas es igual a:

$$V_{\text{máx}} = Q_{DIS}\Delta t \quad \text{si} \quad H \geq H_{BDIS} \quad (3.12)$$

$$V_{\text{máx}} = \frac{\text{POTMAX}}{K_1 H} \Delta t \quad \text{si} \quad H < H_{\text{BDIS}} \quad (3.13)$$

Siendo:

$$\text{POTMAX} = P_{\text{INS}} \quad \text{si} \quad H \geq H_{\text{BDIS}} \quad (3.14)$$

$$\text{POTMAX} = K_3 H^{\frac{3}{2}} \quad \text{si} \quad H < H_{\text{BDIS}} \quad (3.15)$$

De tal manera que se necesita que para cada mes se calcule el  $V_{\text{máx}}$ , y en los casos en los que el  $V_{\text{DEM}_i}$  sea mayor que el  $V_{\text{máx}}$ , es necesario disminuirlo para que sean iguales (CFE, 1982).

### 3.4.1 Procedimiento de cálculo

- 1) Se obtienen, de la topografía del vaso, las curvas que relacionan la elevación del nivel de agua con el volumen y la elevación del nivel, con el área de la superficie libre.
- 2) Se fija un nivel inicial en el vaso. Generalmente el análisis empieza en el NAMO.
- 3) A partir del nivel inicial  $E_i$  y las curvas de E-V y E-A se obtiene  $V_i$  y  $A_i$ .
- 4) Se calcula el volumen final en una primera aproximación como:

$$V_{i+1}^k = V_i + l_i - O_i \quad (3.16)$$

Donde:

$l_i$  Volumen de entradas al vaso que no depende del nivel en el mismo durante el interalo considerado

$O_i$  Volumen de salidas del vaso que no depende del nivel en el mismo durante el intervalo considerado

- 5) Con la curva E-V se obtiene  $E_{i+1}$
- 6) Con  $E_{i+1}$  y la curva E-A se obtiene  $A_{i+1}$
- 7) Se determina el área media ( $\bar{A}$ ).
- 8) Se calcula  $E_{IIi}$ ,  $S_{ei}$ ,  $S_{il}$

$$E_{II} = hp\bar{A} \quad (3.17)$$

$$S_e = h_{ev}\bar{A} \quad (3.18)$$

Donde:

$E_{II}$  entradas por lluvia directa sobre el vaso

$hp$  altura de precipitación

$S_e$  volumen evaporado

$h_{ev}$  lamina de evaporación

$S_i$  volumen infiltrado en el vaso

- 9) Se calcula

$$P_i = E_{IIi} - S_{ei} - S_{il} \quad (3.19)$$

- 10) Se calcula el volumen final en la siguiente aproximación

$$V_{i+1}^{k+1} = V_i + I_i - O_i + P_i \quad (3.20)$$

- 11) si no se cumple que  $|V_{i+1}^{k+1} - V_{i+1}^k| \leq \frac{V_m}{100}$ ,  $k=k+1$  y se vuelve al paso 5). En el caso de que se cumpla la condicion anterior, se debe revisar que se cumpla que  $V_{i+1}^{k+1} < V_m$ . Si esto no se cumple:

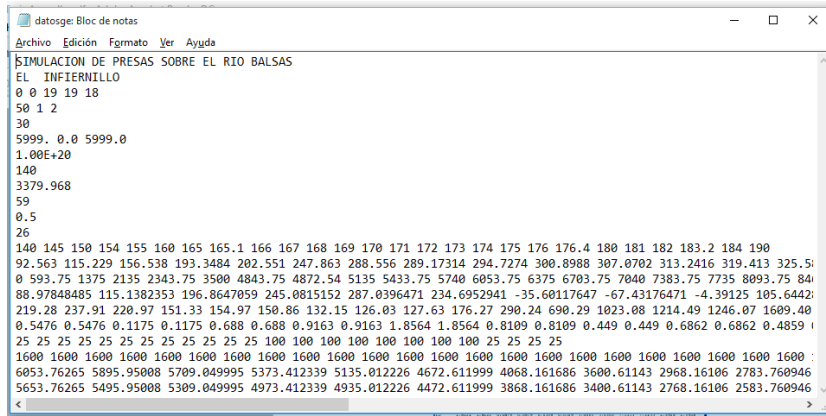
$$S_{de} = V_{i+1}^{k+1} - V_m \quad (3.21)$$

Entonces  $V_{i+1}^{k+1} > V_m$  y  $t = t + \Delta t$  volver al paso 4). En el caso de que se cumpla, se revisa otra condición en la que  $V_{i+1}^{k+1} = V_{min}$ . Si lo anterior se cumple  $t = t + \Delta t$ , volver al paso 4). Y si no se cumple Déficit =  $V_{min} - V_{i+1}^{k+1}$ , entonces  $V_{i+1} = V_{min}$  y  $t = t + \Delta t$ , volver al paso 4). (Aparicio 2011).

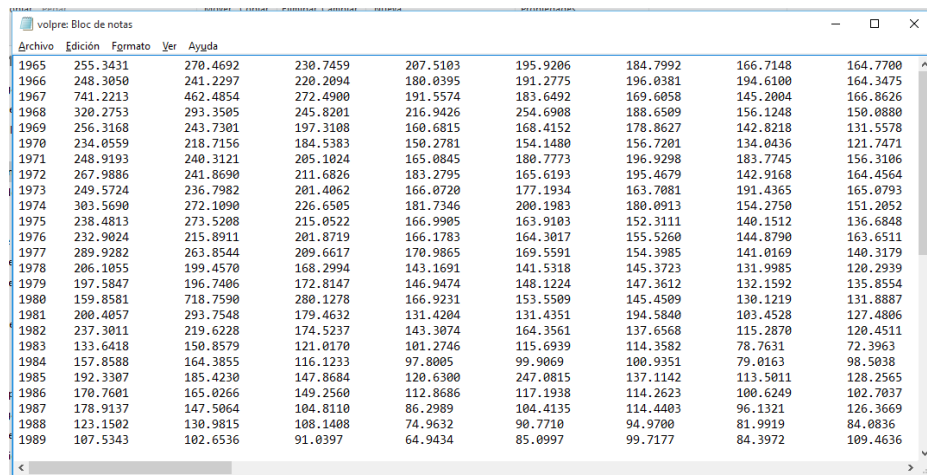
### 3.4.2 Programa para simular el funcionamiento quincenal de una presa

Para la simulación quincenal de una presa a partir de los datos del registro sintético generado a partir de cada una de las series, usamos un programa escrito en lenguaje Fortran, el programa es SIMQCOR.FOR (Mendoza, 2010).

Este programa necesita de algunos archivos base, uno de ellos tiene el nombre de DATOSGE (Figura 3.4), que contiene la información general de la presa que se analiza, el archivo VOLPRE (Figura 3.5) que contiene la información de los registros de los volúmenes de ingreso, expresado en  $hm^3$  y el archivo ARPOLVS (Figura 3.6), contiene las políticas de operación óptimas.



**Figura 3.4 Formato del archivo DATOSGE**



**Figura 3.5 Formato del archivo VOLPRE**

Column 1	Column 2
200.000000	50.000000
400.000000	50.000000
600.000000	50.000000
800.000000	50.000000
1000.000000	50.000000
1200.000000	50.000000
1400.000000	50.000000
1600.000000	50.000000
1800.000000	50.000000
2000.000000	50.000000
2200.000000	50.000000
2400.000000	50.000000
2600.000000	50.000000
2800.000000	50.000000
3000.000000	50.000000
3200.000000	100.000000
3400.000000	50.000000
3600.000000	100.000000
3800.000000	150.000000
4000.000000	200.000000
4200.000000	250.000000
4400.000000	300.000000
4600.000000	350.000000
4800.000000	400.000000
5000.000000	450.000000
5200.000000	500.000000
5400.000000	550.000000
5600.000000	600.000000
5800.000000	650.000000
6000.000000	700.000000
200.000000	50.000000
400.000000	50.000000

**Figura 3.6 Formato del archivo ARPOLVS**

Los resultados que genera es un archivo llamado SIQPRE (Figura 3.7), en el que se muestra la información detallada de la simulación. También muestra un resumen de los resultados promedio anuales y además un resumen que contiene el promedio quincenal.

QUINCENA	ALM. INICIAL MILL M <sup>3</sup>	INGRESO MILL M <sup>3</sup>	VOL EVAP MILL M <sup>3</sup>	EXT POL MILL M <sup>3</sup>	EXT MODIF MILL M <sup>3</sup>	EXT TOTAL MILL M <sup>3</sup>	DERRAME MILL M <sup>3</sup>	DEFICIT MILL M <sup>3</sup>	ENERGÍA (GWh)
***** SIMULACION DE PRESAS SOBRE EL RIO BALSAS *****									
PRESA: EL INFIERNILLO									
----- 1965 -----									
1Q OCT	5999.00	255.34	16.62	1499.50	1499.50	1499.50	.00	.00	396.13
2Q OCT	4738.22	270.47	15.28	869.11	782.92	782.92	.00	.00	200.89
1Q NOV	4210.50	230.75	14.06	126.31	90.74	90.74	.00	.00	23.12
2Q NOV	4336.44	207.51	14.24	142.06	100.84	100.84	.00	.00	25.79
1Q DIC	4428.87	195.92	9.84	153.61	133.20	133.20	.00	.00	34.16
2Q DIC	4481.75	104.00	9.89	160.22	153.48	153.48	.00	.00	39.41
1Q ENE	4503.18	166.71	12.49	162.90	156.17	156.17	.00	.00	40.11
2Q ENE	4501.23	164.77	12.49	162.65	148.26	148.26	.00	.00	38.08
1Q FEB	4505.26	182.22	16.18	163.16	143.13	143.13	.00	.00	36.78
2Q FEB	4528.17	237.32	16.27	166.02	163.74	163.74	.00	.00	42.14
1Q MAR	4585.48	199.04	27.93	573.18	578.24	578.24	.00	.00	147.88
2Q MAR	4178.35	556.36	27.25	522.29	537.45	537.45	.00	.00	136.43
1Q ABR	4170.00	726.79	34.21	521.25	660.74	660.74	.00	.00	167.80
2Q ABR	4201.84	810.08	34.48	525.23	797.66	797.66	.00	.00	202.61
1Q MAY	4179.78	3612.37	44.77	522.47	835.87	1748.39	912.52	.00	218.69

**Figura 3.7 Formato de archivo SIQPRE**



También genera el archivo llamado SUPGUIAP (Figura 3.8), donde se observa en qué quincenas y de qué años se superó la curva guía de la presa.

AÑO	QUINCENA	ALMACENAMIENTO (MILL M3)
1965	1Q ABR	4201.84
1965	2Q ABR	4179.78
1965	1Q MAY	5999.00
1965	2Q MAY	5999.00
1965	1Q JUN	5999.00
1965	2Q JUN	5999.00
1965	1Q JUL	5999.00
1965	2Q JUL	5493.57
1965	1Q AGO	4567.21
1965	2Q AGO	3775.25
1965	1Q SEP	3165.01
1966	1Q ABR	4735.17
1966	2Q ABR	4996.47
1966	1Q MAY	5430.78
1966	2Q MAY	5746.63
1966	1Q JUN	5641.05
1966	2Q JUN	5999.00
1966	1Q JUL	5491.47

**Figura 3.8 Formato de archivo SUPGUIAP**

## Conclusión

En este capítulo se dio una breve explicación de la metodología que usaremos para este tipo de estudios, en particular esta tesis, con el método de Svanidze, además de mencionar algunos métodos para generar registros sintéticos, así como los programas empleados en este estudio.

## Referencias

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. México, 2011.
2. Wilson, E. M. Engineering Hydrology. 4<sup>o</sup> Edición. Hong Kong: Macmillan. 1990.
3. Yurekli, Kadri. Prediction of daily maximum streamflow based on stochastic approaches. Journal of Spatial Hydrology. Vol. 4, No. 2. 2004.
4. Mendoza R.R. Manual del programa SIMULQ1P.FOR. Instituto de Ingeniería UNAM.2010.

5. Svanidze, G.G. Mathematical Modeling of Hydrologic Series. USA: Water Resources Publications. 1980.
6. Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L., González, V. F. Estudio integral de la cuenca alta del río Grijalva. 3. Manejo óptimo de las presas. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Informe final. Noviembre 2009.
7. Comisión Federal de Electricidad. Manual de diseño de obras civiles. Hidrotecnia. Hidrología. México.1982.
8. Dominguez 2014

## **CAPÍTULO 4. APLICACIÓN Y RESULTADOS**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se hace referencia a la generación de las series sintéticas con el método de Svanidze para los volúmenes de ingreso a la presa “El Infiernillo, Mich.”. Así como a los datos utilizados para aplicar el modelo de simulación del funcionamiento de vaso de la política de operación que se determinó a partir de los registros sintéticos, y de los cuales se realizó un análisis de la frecuencia en los derrames y déficit que podrían presentarse en el sistema de la presa antes mencionada, a largo plazo.

### **4.2 Registro de datos de entrada al modelo de simulación**

Se emplearon los datos mensuales (Tabla 4.1), para aplicar el método de Svanidze a los datos históricos de los volúmenes de ingreso, también se calcularon los estadísticos con los cuales se identificaron los meses con el valor más bajo del coeficiente de correlación para decidir si se trabajaría con un año hidrológico o cronológico.

En este caso se observan dos datos de correlación baja por lo que se usa el método de Svanidze con un año cronológico.

Al volumen total (Tabla 4.2) se le realizó también un análisis estadístico, así como también se muestran los datos medidos y calculados (Figura 4.1).

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	TOTAL
1965	525.812256	438.256224	380.719872	331.484832	419.547168	755.3952	1536.87197	6280.32701	4060.5408	3420.75226	1250.80157	634.332384	20034.8415
1966	489.534624	400.248864	387.315648	358.95744	466.64208	1489.44874	2469.14957	3713.38646	3543.36768	2383.30512	878.669856	623.152224	17203.1783
1967	1203.706656	464.047488	353.25504	312.062976	390.5496	1459.4351	2384.41018	3459.6625	8863.96522	5402.26022	1515.5519	878.2344	26687.1413
1968	613.62576	462.76272	443.341728	306.212832	478.347552	1143.67075	2710.07683	2442.10723	3584.67638	2448.82397	838.26576	677.412288	16149.3238
1969	500.046912	357.992352	347.277888	274.379616	273.095712	544.163616	1720.96877	4868.96918	6266.00275	2386.00253	776.373984	573.0696	18888.3429
1970	452.771424	334.816416	310.868064	255.790656	224.379936	1382.3473	3060.4271	4915.20355	4783.79434	2550.32582	946.791936	617.184576	19834.7011
1971	489.23136	370.186848	377.707104	340.085088	325.42992	1038.03984	2206.00973	3590.47728	5781.21149	5519.30371	1140.81178	781.001568	21959.4957
1972	509.857632	394.962048	361.0872	307.373184	397.10736	2209.65926	2800.19981	2587.03718	3356.6184	1527.56496	900.091008	622.830816	15974.3889
1973	486.370656	367.478208	340.901568	356.515776	477.70992	1090.83542	2687.72774	4369.69382	6179.96218	3857.80147	1340.33098	771.134688	22326.4624
1974	575.678016	408.385152	380.2896	305.48016	364.92768	2126.32128	3986.68694	2224.4112	3436.67923	1567.70467	734.271264	565.74288	16676.5781
1975	512.00208	382.042656	316.221408	276.835968	451.888416	1707.28733	2464.71984	3376.99325	4767.57878	1280.75645	682.058016	541.594944	16759.9791
1976	448.793568	368.050176	319.827744	308.53008	329.117472	602.064576	3000.41539	2481.2473	2404.34179	5110.96522	1492.82698	831.593952	17697.7742
1977	553.782528	380.64816	323.957664	281.334816	432.823392	1882.04602	1852.01078	2462.37062	3100.43894	1288.79338	713.660544	499.63824	13771.5051
1978	405.562464	311.468544	286.90416	252.29232	249.846336	1121.52643	2064.51418	2329.43731	4028.62637	3006.30096	808.441344	553.912992	15418.8334
1979	394.32528	317.83104	295.48368	268.014528	321.530688	440.491392	1310.63962	2001.40243	3781.04285	787.388256	479.915712	421.572384	10821.5689
1980	878.617152	447.05088	299.001888	262.010592	320.010912	816.387552	1575.08496	3381.81178	3760.54186	1831.84243	880.915392	509.714208	14962.9896
1981	494.16048	310.883616	326.019168	230.933376	203.577408	2310.19603	4426.76189	4089.35952	4931.75088	3209.68915	1077.47885	594.84672	22205.6571
1982	456.923808	317.83104	302.012928	235.73808	355.267296	464.24448	1482.82704	1281.86755	1174.53715	893.242944	394.374528	323.616384	7682.48323
1983	284.499648	222.291648	230.052096	151.159392	240.908256	486.690336	2307.93754	2393.19792	3336.21677	1232.40442	658.488096	385.661088	11929.5072
1984	322.244352	213.923808	200.841984	177.520032	234.82224	1306.03795	4137.5137	3442.90349	6838.128	1717.36675	668.385216	451.973952	19711.6615
1985	377.75376	268.498368	384.195744	241.757568	282.522816	1584.80928	3483.05789	4402.19318	2871.79862	1657.33085	475.819488	433.199232	16462.9368
1986	335.786688	262.12464	231.456096	203.328576	324.825984	1213.85347	1569.03869	1085.68512	1318.4761	1204.25098	331.215264	352.936224	8432.97782
1987	326.420064	191.109888	218.853792	222.499008	236.858688	712.634976	2438.316	2181.0073	1625.90198	1018.20672	296.155008	214.759296	9682.72272
1988	254.131776	183.104064	185.740992	166.075488	292.466592	616.002624	2942.61293	4676.1745	4770.85075	1111.07894	365.634432	201.548736	15765.4218
1989	210.187872	155.983104	184.817376	193.860864	280.79568	728.113536	1461.93091	2027.33021	4002.1344	1960.87392	700.378272	456.989472	12362.40956
1990	320.661504	181.51344	194.461344	193.437504	369.710784	1025.01936	2692.27093	1866.42835	2871.40032	1926.24394	801.583392	487.263168	12990.0024
1991	289.878912	221.493312	170.113824	164.571264	193.131648	776.48976	2859.21187	1541.26195	2644.29274	2205.3289	799.111008	342.828288	12207.7135
1992	1340.788032	1284.7464	209.760416	224.721216	350.242272	948.874176	1391.5031	3020.63645	2909.09146	3151.82707	1063.32134	609.539904	16605.0518
1993	448.74	291.619872	249.997536	162.439776	185.383296	1063.22371	3842.01792	3029.72918	4521.49085	1920.92083	764.777376	398.513088	16878.8534
1994	341.724096	228.680928	243.835488	191.903904	212.628672	937.141056	1182.57408	1958.16182	2556.61056	2339.85802	705.75408	400.169376	11299.0421
1995	310.4	302.7	273.2	267.9	314.3	925.8	2812.6	5505.2	4362	1408.7	627.9	447.4	17558.1
1996	484.5	310.6	278.3	256.8	229.7	1121.7	2867.3	2784.7	2148.4	3679.9	700.1	464.9	15326.9
1997	400	300.4	340.5	268.6	237.2	734.9	1742.4	1355.2	1808.5	2337.6	673.8	365.8	10564.9
1998	348.700032	240.799392	297.597888	217.80144	257.698368	328.30272	1028.39933	2253.90038	5603.80118	5208.60154	1033.00099	555.001632	17373.6049
1999	407.79936	352.400544	365.201568	306.40032	296.30016	621.202176	1976.89853	2867.4985	4070.8008	2344.69987	1171.697536	500.599872	14821.4992
2000	477.700416	395.696448	335.699424	252.199872	289.401984	1513.79885	1203.99782	2417.10307	2417.10307	1066.00147	473.19984	305.397216	11147.2995
2001	278.50176	321.997248	278.401536	270.998784	290.998656	1147.19933	1911.09974	2831.49907	2573.20195	1284.90192	593.599688	396.499968	12178.8999
2002	421.400448	355.898016	331.90128	224.598528	152.999712	792.001152	1618.59946	1354.80038	2595.8016	2255.99904	2219.50022	609.300576	12932.8004
2003	500.001984	289.799424	246.099168	265.499424	300.4992	1059.6096	2029.70102	2323.70035	4962.00038	2984.89882	909.298656	526.501728	16397.6098
2004	445.800672	317.300544	406.099872	364.809312	287.09856	976.898016	1789.7017	2419.49981	3484.5025	2924.8033	787.102272	434.999808	14638.6164
2005	405.100224	346.099392	355.500576	329.49936	308.801376	388.401696	2061.39859	2336.00026	3002.59786	1193.89939	469.099296	352.800576	11549.1986
2006	282.864096	229.760064	244.525824	219.45168	167.98752	517.28112	1294.80336	2076.1825	2992.2359	2620.63987	914.897376	815.381856	12376.0112
2007	435.10176	327.500064	311.41152	253.591776	265.422528	490.332096	970.841376	2855.10096	4246.05974	1392.64272	637.661376	489.107808	12674.7737
2008	285.571008	308.359872	276.983712	202.136256	156.909312	453.602592	1974.04733	2421.82656	4801.5167	2300.97888	599.730048	372.231936	14153.8942
2009	311.62752	368.862336	311.62752	305.922528	304.317216	421.556832	1108.72541	864.196128	2594.87971	1182.2896	658.690272	342.385056	8775.08012
2010	331.19712	1648.38931	418.770432	283.36176	292.232448	446.599008	3391.40477	4089.94186	2916.47174	1816.77859	589.94784	405.309312	16630.4042
2011	408.966624	321.541056	297.705024	270.776736	376.294464	369.898272	2237.56941	3049.62278	4147.80134	1504.05811	514.868832	448.539552	13947.6422
2012	389.384928	386.976096	328.4496	293.812704	242.838432	614.666016	2046.83933	2854.76659	1464.07392	1382.19232	456.66	445.43	10906.0899
2013	244.63	219.288633	283.737774	240.470181	176.647308	903.272193	1595.23	1948.53483	10345.5625	3385.84303	1623.09	692.79	21659.0964
2014	502.5197087												
Media	450.3077404	365.027171	304.857791	258.202808	298.647817	975.703515	2238.94191	2858.97446	3849.17103	2289.67231	810.940794	504.619265	
Desvest	205.1641402	244.639344	64.2321685	54.1861046	84.2436504	497.679529	847.639631	1159.45053	1775.44817	1197.40028	363.303052	153.714989	
Coef. Asim	2.830753039	4.21938956	-0.19112883	-0.03688308	0.40455596	0.98008481	0.71680209	0.85697373	1.46711256	1.25079221	1.64217563	0.50745096	
CV	0.455608736	0.67019489	0.21069551	0.2098587	0.2820836	0.5100725	0.37858938	0.40554771	0.46125468	0.52295705	0.44800194	0.30461578	
Coef. Correl	0.465881473	0.44807375	0.80413303	0.59524147	0.29818603	0.50838335	0.37732071	0.36429355	0.46851743	0.67148718	0.7552786	0.30605466	

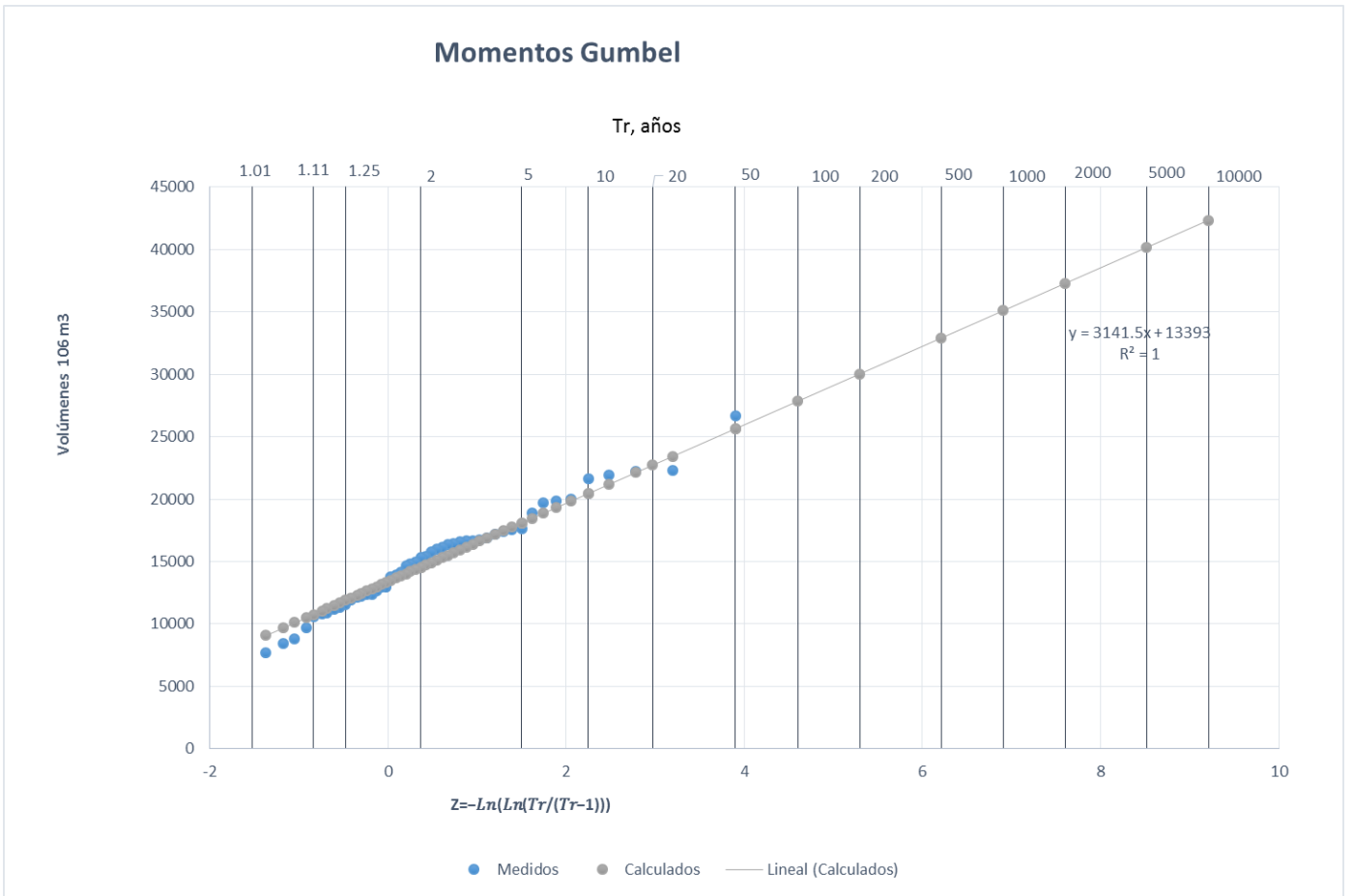
Tabla 4.1 Ingresos históricos, serie mensual en hm<sup>3</sup>. Estadísticos

Año	TOTAL
1965	20034.8415
1966	17203.1783
1967	26687.1413
1968	16149.3238
1969	18888.3429
1970	19834.7011
1971	21959.4957
1972	15974.3889
1973	22326.4624
1974	16676.5781
1975	16759.9791
1976	17697.7742
1977	13771.5051
1978	15418.8334
1979	10821.5689
1980	14962.9896
1981	22205.6571
1982	7682.48323
1983	11929.5072
1984	19711.6615
1985	16462.9368
1986	8432.97782
1987	9682.72272
1988	15765.4218
1989	12362.4956
1990	12990.0024
1991	12207.7135
1992	16605.0518
1993	16878.8534
1994	11299.0421
1995	17558.1
1996	15326.9
1997	10564.9
1998	17373.6049
1999	14821.4992
2000	11147.2995
2001	12178.8999
2002	12932.8004
2003	16397.6098
2004	14638.6164
2005	11549.1986
2006	12376.0112
2007	12674.7737
2008	14153.8942
2009	8775.08012
2010	16630.4042
2011	13947.6422
2012	10906.0899
2013	21659.0964
2014	
Media	15204.0011
Desvest	4029.73049
Coef. Asim	0.47467187
CV	0.26504408

**Tabla 4.2 Volumen total anual**

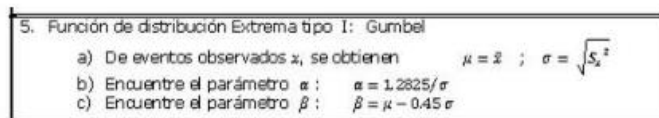
Gumbel	Momentos		Z
Tr	V, 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	V, 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	$\ln\left(\ln\left(\frac{Tr}{Tr-1}\right)\right)$
Años	Calculados	Datos	
10000	42330.18		9.21029037
5000	40152.1		8.517093183
2000	37272.56		7.600652407
1000	35093.84		6.907255071
500	32914.34		6.213607264
200	30030.54		5.295812143
100	27844.71		4.600149227
50	25650.86		3.901938658
20	22723.24		2.970195249
10	20461.48		2.250367327
5	18103.57		1.499939987
2	14542.24		0.366512921
50	25650.86	26687.14	3.901938658
25	23440.7	22326.46	3.198534261
16.67	22133.9	22205.66	2.782838829
12.5	21196.6	21959.5	2.48432751
10	20461.48	21659.1	2.250367327
8.33	19853.99	20034.84	2.056600865
7.14	19334.35	19834.7	1.891217213
6.25	18878.82	19711.66	1.746671079
5.56	18472.05	18888.34	1.618097878
5	18103.57	17607.77	1.499939987
4.55	17765.88	17558.1	1.393602483
4.17	17453.45	17373.6	1.293954231
3.85	17162.06	17203.18	1.201462112
3.57	16888.42	16878.85	1.11273242
3.33	16629.9	16759.98	1.029728121
3.13	16384.38	16676.58	0.954743076
2.94	16150.12	16630.4	0.877739454
2.78	15925.64	16605.05	0.807800601
2.63	15709.7	16462.94	0.737300068
2.5	15501.25	16397.61	0.671726992
2.38	15299.35	16149.32	0.606938313
2.27	15103.19	15974.39	0.543412642
2.17	14912.04	15765.42	0.481714464
2.08	14725.26	15418.83	0.422499087
2	14542.24	15326.9	0.366512921
1.92	14362.43	14962.99	0.306923616
1.85	14185.32	14821.5	0.251408559
1.79	14010.42	14638.62	0.200968797
1.72	13837.24	14153.89	0.138310385
1.67	13665.31	13947.64	0.090689559
1.61	13494.16	13771.51	0.029912449
1.56	13323.32	12990	-0.024208902
1.52	13152.27	12932.8	-0.070119918
1.47	12980.48	12674.77	-0.131278218
1.43	12807.37	12376.01	-0.183691047
1.39	12632.28	12362.5	-0.239734979
1.35	12454.48	12207.71	-0.300050307
1.32	12273.12	12178.9	-0.348588551
1.28	12087.16	11929.51	-0.418595693
1.25	11895.35	11549.2	-0.475884995
1.22	11696.11	11299.04	-0.538233722
1.19	11487.38	11147.3	-0.60687254
1.16	11266.39	10906.09	-0.683602509
1.14	11029.21	10821.57	-0.740575045
1.11	10770.02	10564.9	-0.837955035
1.09	10479.38	9682.72	-0.913937287
1.06	10140.45	8775.08	-1.054897094
1.04	9717.42	8432.98	-1.181143141
1.02	9104.64	7682.48	-1.369103856

**Tabla 4.3 Datos medidos y calculados obtenidos del AX (hm<sup>3</sup>)**



**Figura 4.1 Datos medidos y calculados**

Se recalculan los parámetros de alfa y beta con el método de momentos Gumbel (Figura 4.2).



**Figura 4.2 Función de distribución Extrema, Gumbel**

#### **4.2.1 Series sintéticas**

Se generan con el programa anhiNAO.bas 10 series aleatorias de 100 años en cada una, es decir, se ejecuta 10 veces el programa y se guardan las fracciones aleatorias de 100 año sintéticos cada una.

A continuación se muestra la primera fracción de serie de 100 años (Tabla 4.4).



SERIE 1												
1	0.01612	0.01161	0.01178	0.01053	0.01855	0.03907	0.18665	0.29661	0.30261	0.07048	0.02319	0.01278
2	0.02469	0.01397	0.01497	0.01489	0.02846	0.07891	0.20726	0.14368	0.22105	0.14829	0.06633	0.03751
3	0.04285	0.03550	0.03011	0.02262	0.02596	0.13580	0.10801	0.21683	0.21683	0.09563	0.04245	0.02740
4	0.02469	0.01397	0.01497	0.01489	0.02846	0.07891	0.20726	0.14368	0.22105	0.14829	0.06633	0.03751
5	0.01768	0.01724	0.01556	0.01526	0.01790	0.05273	0.16019	0.31354	0.24843	0.08023	0.03576	0.02548
6	0.02018	0.02179	0.01957	0.01428	0.01109	0.03205	0.13947	0.17111	0.33924	0.16257	0.04237	0.02630
7	0.02375	0.01814	0.01393	0.01348	0.01582	0.06361	0.23421	0.12625	0.21661	0.18065	0.06546	0.02808
8	0.02659	0.01728	0.01481	0.00962	0.01098	0.06299	0.22762	0.17950	0.26788	0.11381	0.04531	0.02361
9	0.02647	0.01895	0.01839	0.01453	0.01446	0.02881	0.09111	0.25778	0.33174	0.12632	0.04110	0.03034
10	0.02007	0.01386	0.01713	0.01254	0.01483	0.01890	0.05919	0.12973	0.32255	0.29980	0.05946	0.03195
11	0.04285	0.03550	0.03011	0.02262	0.02596	0.13580	0.10801	0.21683	0.21683	0.09563	0.04245	0.02740
12	0.02375	0.01814	0.01393	0.01348	0.01582	0.06361	0.23421	0.12625	0.21661	0.18065	0.06546	0.02808
13	0.02932	0.02305	0.02134	0.01941	0.02698	0.02652	0.16043	0.21865	0.29738	0.10784	0.03691	0.03216
14	0.03800	0.02866	0.02745	0.01896	0.02962	0.07082	0.16781	0.15122	0.22197	0.15164	0.05191	0.04195
15	0.03551	0.04204	0.03551	0.03486	0.03468	0.04804	0.12635	0.09848	0.29571	0.13473	0.07506	0.03902
16	0.05872	0.02988	0.01998	0.01751	0.02139	0.05456	0.10527	0.22601	0.25132	0.12242	0.05887	0.03406
17	0.03800	0.02866	0.02745	0.01896	0.02962	0.07082	0.16781	0.15122	0.22197	0.15164	0.05191	0.04195
18	0.03258	0.02752	0.02566	0.01737	0.01183	0.06124	0.12515	0.10476	0.20071	0.17444	0.17162	0.04711
19	0.02932	0.02305	0.02134	0.01941	0.02698	0.02652	0.16043	0.21865	0.29738	0.10784	0.03691	0.03216
20	0.02624	0.02187	0.01900	0.01655	0.02094	0.03770	0.07671	0.31347	0.20267	0.17074	0.06243	0.03166
21	0.08075	0.07737	0.01865	0.01353	0.02109	0.05714	0.08380	0.18191	0.17519	0.18981	0.06404	0.03671
22	0.02751	0.02378	0.02464	0.02067	0.01999	0.04191	0.13338	0.19347	0.27466	0.15820	0.04802	0.03378
23	0.02283	0.01688	0.01567	0.01290	0.01131	0.06969	0.15430	0.24781	0.24118	0.12858	0.04773	0.03112
24	0.03508	0.02997	0.03078	0.02853	0.02674	0.03363	0.17849	0.20227	0.25998	0.10338	0.04062	0.03055
25	0.02469	0.01397	0.01497	0.01489	0.02846	0.07891	0.20726	0.14368	0.22105	0.14829	0.06633	0.03751
26	0.02932	0.02305	0.02134	0.01941	0.02698	0.02652	0.16043	0.21865	0.29738	0.10784	0.03691	0.03216
27	0.04021	0.02764	0.02352	0.02043	0.03143	0.13666	0.13448	0.17880	0.22513	0.09358	0.05182	0.03628
28	0.01992	0.09912	0.02518	0.01704	0.01757	0.02685	0.20393	0.24593	0.17537	0.10924	0.03547	0.02437
29	0.01992	0.09912	0.02518	0.01704	0.01757	0.02685	0.20393	0.24593	0.17537	0.10924	0.03547	0.02437
30	0.02286	0.01856	0.01856	0.01976	0.01773	0.01357	0.04180	0.10462	0.16776	0.24178	0.21175	0.07393
31	0.01612	0.01161	0.01178	0.01053	0.01855	0.03907	0.18665	0.29661	0.30261	0.07048	0.02319	0.01278
32	0.03045	0.02168	0.02774	0.02492	0.01961	0.06673	0.12226	0.16528	0.23803	0.19980	0.05377	0.02972
33	0.03551	0.04204	0.03551	0.03486	0.03468	0.04804	0.12635	0.09848	0.29571	0.13473	0.07506	0.03902
34	0.02225	0.01400	0.01468	0.01040	0.00917	0.10404	0.19935	0.18416	0.22209	0.14454	0.04852	0.02679
35	0.03570	0.03548	0.03012	0.02694	0.02227	0.05636	0.18768	0.26176	0.13424	0.12674	0.04187	0.04084
36	0.02287	0.02644	0.02286	0.02225	0.02389	0.09420	0.15692	0.23249	0.21128	0.10550	0.04874	0.03256
37	0.03192	0.02472	0.02260	0.01924	0.02486	0.13833	0.17529	0.16195	0.21012	0.09563	0.05635	0.03899
38	0.03786	0.02843	0.03223	0.02542	0.02245	0.06956	0.16492	0.12827	0.17118	0.22126	0.06378	0.03462
39	0.02846	0.02327	0.02251	0.02087	0.02713	0.08658	0.14353	0.21585	0.20597	0.13854	0.05108	0.03622
40	0.03024	0.02024	0.02158	0.01698	0.01882	0.08294	0.10466	0.17330	0.22627	0.20708	0.06246	0.03542
41	0.01768	0.01724	0.01556	0.01526	0.01790	0.05273	0.16019	0.31354	0.24843	0.08023	0.03576	0.02548
42	0.02630	0.02020	0.01861	0.01636	0.01620	0.07274	0.13390	0.15108	0.26128	0.19498	0.05243	0.03592
43	0.03982	0.03108	0.02745	0.02411	0.03852	0.14394	0.18806	0.12874	0.15635	0.14280	0.03928	0.04185
44	0.03433	0.02584	0.02457	0.02001	0.02094	0.03869	0.07660	0.22526	0.33500	0.10988	0.05031	0.03859
45	0.01700	0.01262	0.01495	0.01568	0.02271	0.05890	0.11818	0.16399	0.32373	0.15861	0.05665	0.03697
46	0.03551	0.04204	0.03551	0.03486	0.03468	0.04804	0.12635	0.09848	0.29571	0.13473	0.07506	0.03902
47	0.03800	0.02866	0.02745	0.01896	0.02962	0.07082	0.16781	0.15122	0.22197	0.15164	0.05191	0.04195
48	0.02286	0.01856	0.01976	0.01773	0.01357	0.04180	0.10462	0.16776	0.24178	0.21175	0.07393	0.06588
49	0.01635	0.01085	0.01019	0.00901	0.01191	0.06626	0.20990	0.17466	0.34691	0.08712	0.03391	0.02293
50	0.01129	0.01012	0.01310	0.01110	0.00816	0.04170	0.07365	0.08996	0.47765	0.15632	0.07494	0.03199
51	0.02659	0.01728	0.01481	0.00962	0.01098	0.06299	0.22762	0.17950	0.26788	0.11381	0.04531	0.02361
52	0.03452	0.02449	0.02280	0.01832	0.02188	0.12750	0.23906	0.13339	0.20608	0.09401	0.04403	0.03392
53	0.02286	0.01856	0.01976	0.01773	0.01357	0.04180	0.10462	0.16776	0.24178	0.21175	0.07393	0.06588
54	0.02225	0.01400	0.01468	0.01040	0.00917	0.10404	0.19935	0.18416	0.22209	0.14454	0.04852	0.02679
55	0.03786	0.02843	0.03223	0.02542	0.02245	0.06956	0.16492	0.12827	0.17118	0.22126	0.06378	0.03462
56	0.03258	0.02752	0.02566	0.01737	0.01183	0.06124	0.12515	0.10476	0.20071	0.17444	0.17162	0.04711
57	0.01992	0.09912	0.02518	0.01704	0.01757	0.02685	0.20393	0.24593	0.17537	0.10924	0.03547	0.02437
58	0.01129	0.01012	0.01310	0.01110	0.00816	0.04170	0.07365	0.08996	0.47765	0.15632	0.07494	0.03199
59	0.04021	0.02764	0.02352	0.02043	0.03143	0.13666	0.13448	0.17880	0.22513	0.09358	0.05182	0.03628
60	0.02469	0.01397	0.01497	0.01489	0.02846	0.07891	0.20726	0.14368	0.22105	0.14829	0.06633	0.03751
61	0.02630	0.02020	0.01861	0.01636	0.01620	0.07274	0.13390	0.15108	0.26128	0.19498	0.05243	0.03592
62	0.02385	0.01863	0.01928	0.01267	0.02019	0.04080	0.19346	0.20061	0.27966	0.10331	0.05520	0.03233
63	0.02178	0.01646	0.01527	0.01597	0.02140	0.04886	0.12038	0.19572	0.27680	0.17279	0.06003	0.03454
64	0.03433	0.02584	0.02457	0.02001	0.02094	0.03869	0.07660	0.22526	0.33500	0.10988	0.05031	0.03859
65	0.02536	0.02080	0.01807	0.01743	0.01860	0.03402	0.16954	0.14020	0.13586	0.28879	0.08435	0.04699
66	0.02007	0.01386	0.01713	0.01254	0.01483	0.01890	0.05919	0.12973	0.32255	0.29980	0.05946	0.03195
67	0.02018	0.02179	0.01957	0.01428	0.01109	0.03205	0.13947	0.17111	0.33924	0.16257	0.04237	0.02630
68	0.02228	0.01686	0.01720	0.01549	0.01482	0.04727	0.10046	0.16350	0.26327	0.25134	0.05195	0.03557
69	0.02295	0.01631	0.02334	0.01468	0.01716	0.09627	0.21157	0.26740	0.17444	0.10067	0.02890	0.02631
70	0.01612	0.01161	0.01178	0.01053	0.01855	0.03907	0.18665	0.29661	0.30261	0.07048	0.02319	0.01278
71	0.02007	0.01386	0.01713	0.01254	0.01483	0.01890	0.05919	0.12973	0.32255	0.29980	0.05946	0.03195
72	0.02225	0.01400	0.01468	0.01040	0.00917	0.10404	0.19935	0.18416	0.22209	0.14454	0.04852	0.02679
73	0.02630	0.02020	0.01861	0.01636	0.01620	0.07274	0.13390	0.15108	0.26128	0.19498	0.05243	0.03592
74	0.02751	0.02378	0.02464	0.02067	0.01999	0.04191	0.13338	0.19347	0.27466	0.15820	0.04802	0.03378
75	0.03551	0.04204	0.03551	0.03486	0.03468	0.04804	0.12635	0.09848	0.29571	0.13473	0.07506	0.03902
76	0.04021	0.02764	0.02352	0.02043	0.03143	0.13666	0.13448	0.17880	0.22513	0.09358	0.05182	0.03628
77	0.02228	0.01686	0.01720	0.01549	0.01482	0.04727	0.10046	0.16350	0.26327	0.25134	0.05195	0.03557
78	0.02751	0.02378	0.02464	0.02067	0.01999	0.04191	0.13338	0.19347	0.27466	0.15820	0.04802	0.03378
79	0.02659	0.01728	0.01481	0.00962	0.01098	0.06299	0.22762	0.17950	0.2678			

### 4.2.2 Generación de números sintéticos Gumbel

Dada la ecuación siguiente:

$$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \text{LnLn} \frac{1}{F(x)} \quad (4.1)$$

Y con los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos anteriormente con el método de momentos, se generan 100 números sintéticos Gumbel para cada una de las series, y dado que,  $F(x)$  es el número aleatorio generado también por Excel anteriormente, se crean los 100 números sintéticos Gumbel para cada una de las 10 series, los cuales se multiplicaron por las fracciones de series que nos generó el programa anhiNAO.bas para así obtener las series sintéticas, volumen en millones de m<sup>3</sup> (Tabla 4.5).

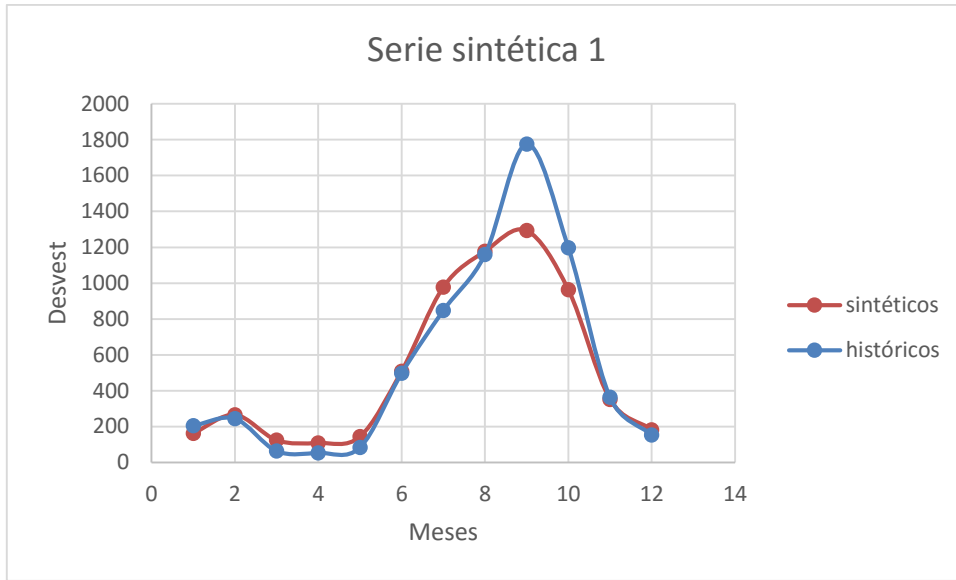
Año	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	total anual
1	218.583918	162.266414	192.225269	201.611519	292.002398	757.328986	1519.54396	2108.56333	4162.48069	2039.38795	728.398761	475.355732	12857.7489
2	390.611001	277.597622	397.248835	249.85488	292.064696	1638.52379	3600.93985	4551.17131	2968.98401	1713.41218	491.88052	447.798494	17020.0872
3	373.76107	311.515038	270.634921	235.73726	298.268171	536.996659	1092.65288	4465.04887	2886.81997	2432.01086	889.249374	450.963242	14243.6583
4	817.110612	613.588344	695.601559	548.625244	484.525442	1501.27349	3559.37354	2768.37766	3694.47952	4775.32736	1376.52707	747.183555	21581.9934
5	481.839354	373.153785	341.151923	290.431991	375.267116	2088.12149	2646.04074	2444.67053	3171.80717	1443.55568	850.615526	588.562544	15095.2179
6	725.283592	588.148467	543.564624	493.00973	591.333027	810.072508	2410.51306	3681.15259	6954.2834	1448.17876	882.720288	775.440416	19903.7005
7	240.752956	151.485006	158.842849	112.531719	99.2226791	1125.75	2157.03829	1992.67705	2403.09322	1563.97449	525.00375	289.87738	10820.2494
8	302.551989	248.149896	215.580222	207.944841	221.903272	405.868243	2022.66026	1672.62574	1620.84831	3445.34656	1006.31941	560.60402	11930.4028
9	384.589042	284.356681	263.973293	217.310497	190.525715	1173.98206	2599.30307	4174.55149	4062.864	2166.02974	804.048838	524.240516	16845.7749
10	293.010906	190.418521	163.200132	106.008459	120.995102	694.123994	2508.27915	1978.01646	2951.92785	1254.13957	499.297637	260.172527	11019.5903
.													
.													
.													
90	473.04374	357.497702	331.651878	346.855304	464.790451	1061.19913	2614.55488	4250.8779	6011.86901	3752.85711	1303.80237	750.180476	21719.18
91	364.174415	269.262555	249.961151	205.775294	180.412292	1111.66513	2461.32774	3952.95934	3847.20041	2051.05328	761.368586	496.412956	15951.5731
92	503.222431	408.565543	434.981419	390.294563	298.719527	920.153002	2303.02409	3692.93942	5322.35868	4661.30139	1627.43807	1450.23157	22013.2297
93	406.31374	351.222854	363.924774	305.289167	295.245789	618.997049	1969.97916	2857.48888	4056.63874	2336.56247	709.239759	498.919597	14769.822
94	289.159926	1438.83192	365.514404	247.353672	255.047184	389.756226	2960.26023	3569.93477	2545.68154	1585.73445	514.884667	353.756395	14515.9154
95	570.95491	430.620203	412.439797	284.87645	445.044327	1064.07965	2521.36693	2272.10004	3335.12793	2278.41059	779.954457	630.30417	15025.2795
96	456.415275	296.609851	254.212494	165.126549	188.470843	1081.21843	3907.07953	3081.10349	4598.13929	1953.53977	777.742614	405.263807	17164.922
97	398.990336	1985.33746	504.346218	341.304986	351.920693	537.795709	4084.64354	4925.88822	3512.59715	2188.03737	710.451166	488.122213	20029.435
98	432.543747	322.673387	267.171866	233.89927	381.714547	1442.33164	2082.15658	2852.80653	4027.54154	1081.9965	576.253044	457.462797	14158.5514
99	556.083806	325.633175	372.812044	379.080565	403.494805	1214.11356	4154.04995	3715.74836	2770.02648	1734.73073	504.615948	365.883679	16496.2731
100	251.37522	271.430428	243.776663	177.880978	138.144261	399.235669	1737.32914	2131.45758	4225.79434	2025.07778	527.788309	327.609925	12456.9003
Media	439.695464	381.606325	331.293374	280.085318	327.695021	973.275403	2509.55661	2957.60731	3777.22	2254.50047	805.794111	515.082583	15553.412
Desvest	162.27314	265.615235	124.342091	108.684503	144.17809	509.106807	978.445016	1178.29582	1293.5131	963.922505	351.717113	182.661321	3396.88658
Coef. Asim	1.14448293	3.84067488	0.95101495	1.12767911	0.93135934	1.00867713	0.39821396	1.02287359	0.75068027	1.37719803	3.16031492	1.73005371	0.14015997
CV	0.36905803	0.69604516	0.37532321	0.3880407	0.43997645	0.52308607	0.38988876	0.39839495	0.34245109	0.42755448	0.43648509	0.35462531	0.21840138
Coef. Correl	0.35771274	0.59121637	0.93049308	0.82469846	0.42239504	0.40824605	0.4242082	0.44018788	0.16124333	0.61953835	0.69404318	-0.0566216	

**Tabla 4.5 Registro sintético de 100 años (hm<sup>3</sup>)**

Tomando en cuenta el año cronológico y con los estadísticos del nuevo registro posteriormente se hicieron gráficas para comparar su variación con los estadísticos históricos. Esto se muestra a continuación (Figuras 4.3 a 4.7).



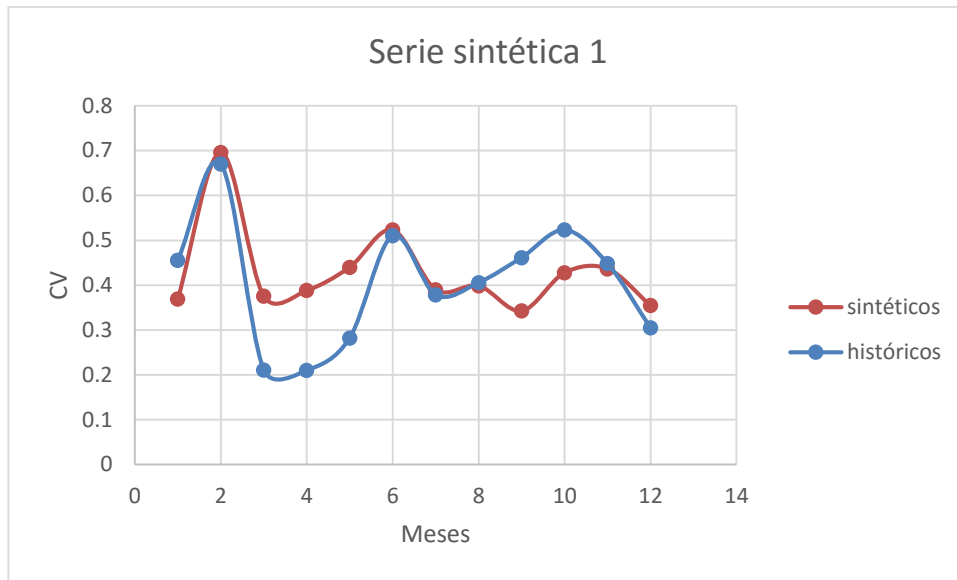
**Figura 4.3 Comparación entre la media del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01**



**Figura 4.4 Comparación entre la desviación estándar del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01**



**Figura 4.5 Comparación entre el coeficiente de asimetría del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01**

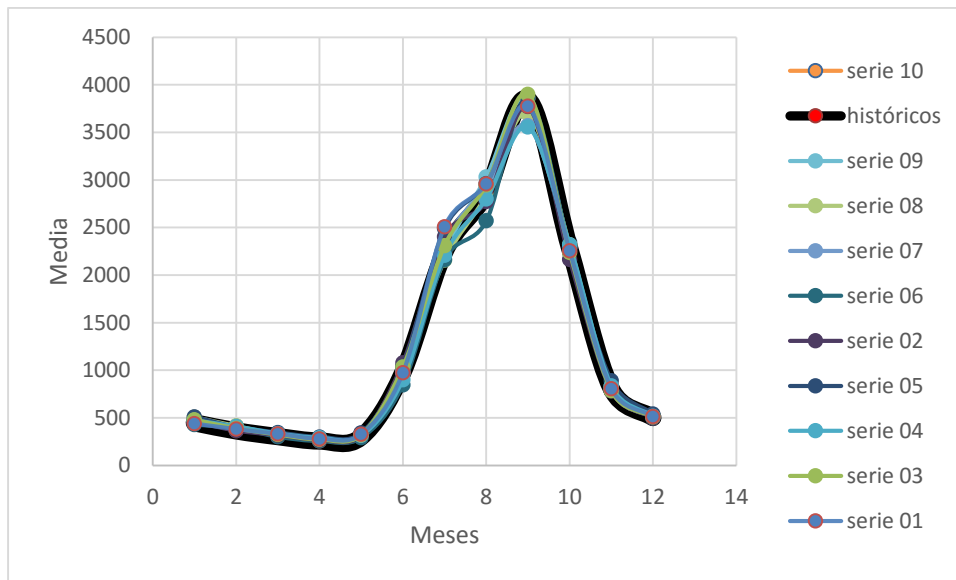


**Figura 4.6 Comparación entre el coeficiente de variación del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01**

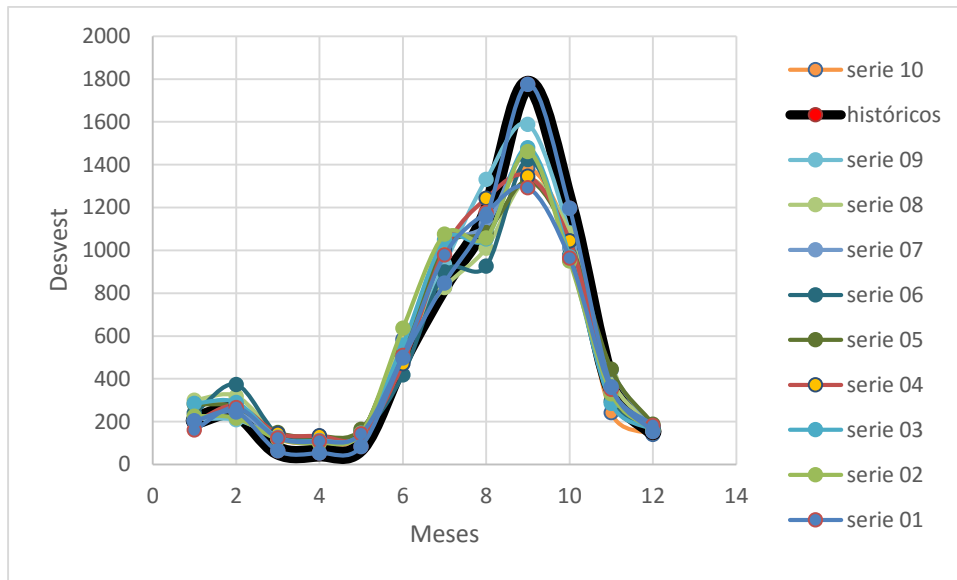


**Figura 4.7 Comparación entre el coeficiente de correlación del registro histórico y el registro sintético obtenido a partir de la serie 01**

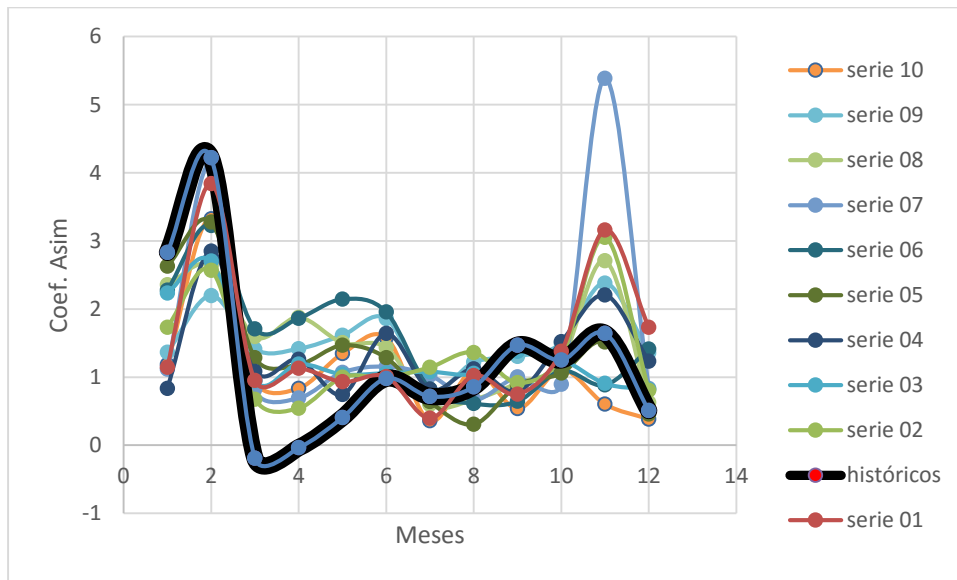
Al observar las comparaciones entre los estadísticos, se puede ver claramente que la media es la que mejor se reproduce, los estadísticos restantes en algunos meses presentan algunas diferencias importantes pero el patrón de comportamiento de los coeficientes de correlación es bastante similar al histórico notándose las mayores diferencias en los meses de Enero, Marzo, Agosto, Septiembre, Diciembre; se hizo el mismo procedimiento para los estadísticos de cada serie y posteriormente compararlos con los registros históricos, el resumen de todos ellos se muestra a continuación (Figuras 4.8 a 4.12).



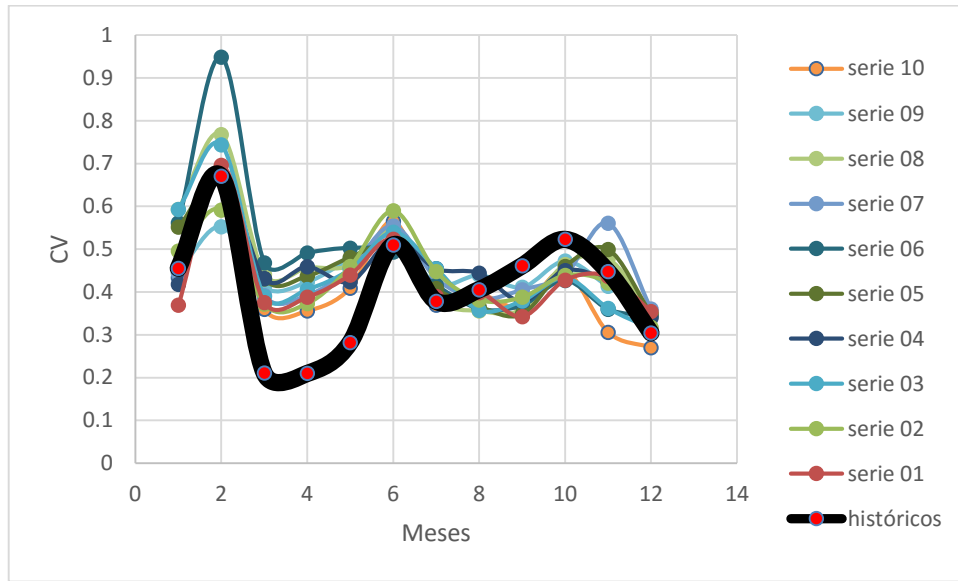
**Figura 4.8 Comparación entre la media del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series**



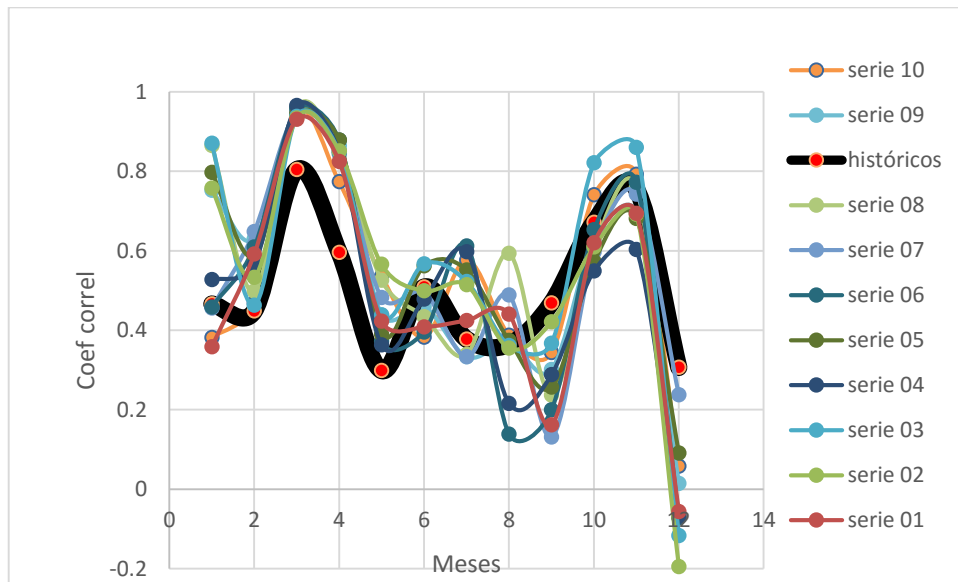
**Figura 4.9 Comparación entre la desviación estándar del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series**



**Figura 4.10 Comparación entre el coeficiente de asimetría del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series**



**Figura 4.11 Comparación entre el coeficiente de variación del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series**



**Figura 4.12 Comparación entre el coeficiente de correlación del registro histórico y el registro sintético de cada una de las 10 series**



### 4.3 Simulación de políticas de operación con los registros sintéticos

Se utilizó la política de operación óptima, obtenida con los datos de la presa en el estudio de Domínguez et al., 2014, parte de esta política que relaciona el estado de llenado de la presa en volumen contra la tracción propuesta se muestra en la figura siguiente (Figura 4.13).

200.000000	50.000000
400.000000	50.000000
600.000000	50.000000
800.000000	50.000000
1000.000000	50.000000
1200.000000	50.000000
1400.000000	50.000000
1600.000000	50.000000
1800.000000	50.000000
2000.000000	50.000000
2200.000000	50.000000
2400.000000	50.000000
2600.000000	50.000000
2800.000000	50.000000
3000.000000	50.000000
3200.000000	100.000000
3400.000000	50.000000
3600.000000	100.000000
3800.000000	150.000000
4000.000000	200.000000
4200.000000	250.000000
4400.000000	300.000000

**Figura 4.13 Archivo ARPOLVS**

A partir de la política de operación se empleó el programa SIMQCOR.FOR para simular el funcionamiento quincenal de la presa “El infiernillo, Mich”. Para la realización de esto, se dividieron los registros obtenidos en quincenas como se muestra en la figura tabla (Tabla 4.6).

Año	enero	enero	febrero	febrero	marzo	marzo	abril	abril	mayo	mayo	junio	junio
1	109.291959	109.291959	81.1332071	81.1332071	96.1126344	96.1126344	100.80576	100.80576	146.001199	146.001199	378.664493	378.664493
2	195.3055	195.3055	138.798811	138.798811	198.624417	198.624417	124.92744	124.92744	146.032348	146.032348	819.261897	819.261897
3	186.880535	186.880535	155.757519	155.757519	135.31746	135.31746	117.86863	117.86863	149.134085	149.134085	268.498329	268.498329
4	408.555306	408.555306	306.794172	306.794172	347.800779	347.800779	274.312622	274.312622	242.262721	242.262721	750.636743	750.636743
5	240.919677	240.919677	186.576893	186.576893	170.575962	170.575962	145.215996	145.215996	187.633558	187.633558	1044.06074	1044.06074
6	362.641796	362.641796	294.074234	294.074234	271.782312	271.782312	246.504865	246.504865	295.666514	295.666514	405.036254	405.036254
7	120.376478	120.376478	75.7425031	75.7425031	79.4214247	79.4214247	56.2658595	56.2658595	49.6113395	49.6113395	562.875002	562.875002
8	151.275994	151.275994	124.074948	124.074948	107.790111	107.790111	103.97242	103.97242	110.951636	110.951636	202.934122	202.934122
9	192.294521	192.294521	142.17834	142.17834	131.986647	131.986647	108.655248	108.655248	95.2628573	95.2628573	586.991028	586.991028
10	146.505453	146.505453	95.2092603	95.2092603	81.6000662	81.6000662	53.0042294	53.0042294	60.4975508	60.4975508	347.061997	347.061997
.												
.												
.												
90	236.52187	236.52187	178.748851	178.748851	165.825939	165.825939	173.427652	173.427652	232.395226	232.395226	530.599567	530.599567
91	182.087207	182.087207	134.631277	134.631277	124.980576	124.980576	102.887647	102.887647	90.2061461	90.2061461	555.832566	555.832566
92	251.611216	251.611216	204.282772	204.282772	217.490709	217.490709	195.147281	195.147281	149.359764	149.359764	460.076501	460.076501
93	203.15687	203.15687	175.611427	175.611427	181.962387	181.962387	152.644584	152.644584	147.622894	147.622894	309.498525	309.498525
94	144.579963	144.579963	719.415961	719.415961	182.757202	182.757202	123.676836	123.676836	127.523592	127.523592	194.878113	194.878113
95	285.477455	285.477455	215.310101	215.310101	206.219898	206.219898	142.438225	142.438225	222.522163	222.522163	532.039825	532.039825
96	228.207637	228.207637	148.304926	148.304926	127.106247	127.106247	82.5632746	82.5632746	94.2354215	94.2354215	540.609217	540.609217
97	199.495168	199.495168	992.668728	992.668728	252.173109	252.173109	170.652493	170.652493	175.960347	175.960347	268.897855	268.897855
98	216.271873	216.271873	161.336694	161.336694	133.585933	133.585933	116.949635	116.949635	190.857273	190.857273	721.165818	721.165818
99	278.041903	278.041903	162.816587	162.816587	186.406022	186.406022	189.540283	189.540283	201.747403	201.747403	607.05678	607.05678
100	125.68761	125.68761	135.715214	135.715214	121.888331	121.888331	88.9404892	88.9404892	69.0721306	69.0721306	199.617835	199.617835

**Tabla 4.6 Registro quincenal obtenido a partir de la serie 01**

julio	julio	agosto	agosto	septiembre	septiembre	octubre	octubre	noviembre	noviembre	diciembre	diciembre	
3	759.771982	759.771982	1054.28167	1054.28167	2081.24034	2081.24034	1019.69398	1019.69398	364.199381	364.199381	237.677866	237.677866
7	1800.46992	1800.46992	2275.58566	2275.58566	1484.492	1484.492	856.706089	856.706089	245.94026	245.94026	223.899247	223.899247
9	546.326441	546.326441	2232.52444	2232.52444	1443.40998	1443.40998	1216.00543	1216.00543	444.624687	444.624687	225.481621	225.481621
3	1779.68677	1779.68677	1384.18883	1384.18883	1847.23976	1847.23976	2387.66368	2387.66368	688.263534	688.263534	373.591777	373.591777
4	1323.02037	1323.02037	1222.33527	1222.33527	1585.90359	1585.90359	721.777842	721.777842	425.307763	425.307763	294.281272	294.281272
4	1205.25653	1205.25653	1840.57629	1840.57629	3477.1417	3477.1417	724.089382	724.089382	441.360144	441.360144	387.720208	387.720208
2	1078.51914	1078.51914	996.338527	996.338527	1201.54661	1201.54661	781.987243	781.987243	262.501875	262.501875	144.93869	144.93869
2	1011.33013	1011.33013	836.31287	836.31287	810.424155	810.424155	1722.67328	1722.67328	503.159705	503.159705	280.30201	280.30201
3	1299.65154	1299.65154	2087.27574	2087.27574	2031.432	2031.432	1083.01487	1083.01487	402.024419	402.024419	262.120258	262.120258
7	1254.13957	1254.13957	989.00823	989.00823	1475.96393	1475.96393	627.069787	627.069787	249.648818	249.648818	130.086264	130.086264
7	1307.27744	1307.27744	2125.43895	2125.43895	3005.93451	3005.93451	1876.42855	1876.42855	651.901187	651.901187	375.090238	375.090238
5	1230.66387	1230.66387	1976.47967	1976.47967	1923.60021	1923.60021	1025.52664	1025.52664	380.684293	380.684293	248.206478	248.206478
1	1151.51205	1151.51205	1846.46971	1846.46971	2661.17934	2661.17934	2330.6507	2330.6507	813.719036	813.719036	725.115786	725.115786
5	984.989578	984.989578	1428.74444	1428.74444	2028.31937	2028.31937	1168.28124	1168.28124	354.61988	354.61988	249.459799	249.459799
3	1480.13011	1480.13011	1784.96738	1784.96738	1272.84077	1272.84077	792.867227	792.867227	257.442334	257.442334	176.878198	176.878198
5	1260.68347	1260.68347	1136.05002	1136.05002	1667.56396	1667.56396	1139.2053	1139.2053	389.977228	389.977228	315.152085	315.152085
7	1953.53977	1953.53977	1540.55175	1540.55175	2299.06965	2299.06965	976.769884	976.769884	388.871307	388.871307	202.631904	202.631904
5	2042.32177	2042.32177	2462.94411	2462.94411	1756.29858	1756.29858	1094.01868	1094.01868	355.225583	355.225583	244.061107	244.061107
3	1041.07829	1041.07829	1426.40327	1426.40327	2013.77077	2013.77077	540.998251	540.998251	288.126522	288.126522	228.731399	228.731399
3	2077.02498	2077.02498	1857.87418	1857.87418	1385.01324	1385.01324	867.365367	867.365367	252.307974	252.307974	182.941839	182.941839
5	868.664568	868.664568	1065.72879	1065.72879	2112.89717	2112.89717	1012.53889	1012.53889	263.894155	263.894155	163.804963	163.804963

**Continuación Tabla 4.6 Registro quincenal obtenido a partir de la serie 01**

En la siguiente Tabla (4.7) se muestran los archivos con los resultados para el caso del registro sintético a partir de la serie 01, así como los datos del registro histórico.

```

***** SIMULACION DE PRESAS SOBRE EL RIO BALSAS *****
PRESA: EL INFIERNILLO
QUINCENA ALM.INICIAL INGRESO VOL EVAP EXT POL EXT MODIF EXT TOTAL DERRAME DEFICIT ENERGÖA
MILL M^3 MILL M^3 MILL M^3 MILL M^3 MILL M^3 MILL M^3 MILL M^3 MILL M^3 (GWH)
*****
1  *****
1Q OCT 5999.00 109.29 16.55 1499.50 1499.50 1499.50 .00 .00 395.13
2Q OCT 4592.25 109.29 14.93 796.12 699.15 699.15 .00 .00 178.22
1Q NOV 3987.46 81.13 13.60 98.43 50.97 50.97 .00 .00 12.86
2Q NOV 4004.03 81.13 13.62 100.50 34.52 34.52 .00 .00 8.71
1Q DIC 4037.02 96.11 9.36 104.63 63.30 63.30 .00 .00 16.00
2Q DIC 4060.48 96.11 9.39 107.56 90.18 90.18 .00 .00 22.80
1Q ENE 4057.02 100.81 11.85 107.13 90.94 90.94 .00 .00 22.99
2Q ENE 4055.03 100.81 11.84 106.88 74.44 74.44 .00 .00 18.82
1Q FEB 4069.55 146.00 15.39 108.69 71.16 71.16 .00 .00 18.01
2Q FEB 4129.01 146.00 15.49 116.13 111.72 111.72 .00 .00 28.32
1Q MAR 4147.80 378.66 26.89 518.47 518.16 518.16 .00 .00 131.02
2Q MAR 3981.41 378.66 26.40 497.68 574.63 574.63 .00 .00 144.28
1Q ABR 3759.05 759.77 32.74 469.88 548.25 548.25 .00 .00 137.55
2Q ABR 3937.83 759.77 33.41 492.23 779.77 779.77 .00 .00 196.08
1Q MAY 3884.42 1054.28 39.54 485.55 775.90 775.90 .00 .00 195.76
2Q MAY 4123.27 1054.28 40.57 515.41 1375.53 1375.53 .00 .00 346.27
1Q JUN 3761.45 2081.24 33.71 470.18 1285.15 1285.15 .00 .00 325.87
2Q JUN 4523.82 2081.24 35.62 565.48 1291.64 1291.64 .00 .00 336.24
1Q JUL 5277.81 1019.69 -5.48 1600.00 1689.98 1689.98 .00 .00 440.62
2Q JUL 4613.00 1019.69 -5.24 1600.00 1599.24 1599.24 .00 .00 408.19
1Q AGO 4038.69 364.20 -9.09 1519.35 1475.61 1475.61 .00 .00 364.73
2Q AGO 2936.37 364.20 -7.85 1468.19 1165.62 1165.62 .00 .00 276.72
1Q SEP 2142.81 237.68 -.44 471.40 100.00 100.00 .00 .00 23.39
2Q SEP 2280.92 237.68 -.45 540.46 121.34 121.34 .00 .00 28.56

```

**Tabla 4.7 Resultado de la simulación para el registro sintético de la serie 01, archivo SIQPRE**

CT	POL	EXT	MODIF	EXT	TOTAL	DERRAME	DEFICIT	ENERGÍA			
M <sup>3</sup>	MILL M <sup>3</sup>	M <sup>3</sup>	MILL M <sup>3</sup>	M <sup>3</sup>	MILL M <sup>3</sup>	MILL M <sup>3</sup>	MILL M <sup>3</sup>	(GWH)			
***	2	*****									
1Q	OCT	2397.71	195.31	11.01	198.85	100	100	0	0	23.65	
2Q	OCT	2482	195.31	11.19	241	150.37	150.37	0	0	35.65	
1Q	NOV	2515.74	138.8	10.93	25	25	25	0	0	5.95	
2Q	NOV	2618.62	138.8	11.13	25	25	25	0	0	5.97	
1Q	DIC	2721.28	198.62	7.8	25	25	25	0	0	6.01	
2Q	DIC	2887.11	198.62	8.03	25	25	25	0	0	6.05	
1Q	ENE	3052.7	124.93	10.36	31.59	26.33	26.33	0	0	6.41	
2Q	ENE	3140.94	124.93	10.51	42.62	25	25	0	0	6.11	
1Q	FEB	3230.36	146.03	13.83	46.21	25	25	0	0	6.14	
2Q	FEB	3337.56	146.03	14.07	32.8	28.4	28.4	0	0	7	
1Q	MAR	3441.13	819.26	25.44	430.14	429.83	429.83	0	0	106.93	
2Q	MAR	3805.11	819.26	26.53	475.64	704.16	704.16	0	0	176.67	
1Q	ABR	3893.69	1800.47	35.17	486.71	716.64	716.64	0	0	183.49	
2Q	ABR	4942.35	1800.47	37.88	617.79	1382.13	1382.13	0	0	362.64	
1Q	MAY	5322.81	2275.59	46.07	665.35	1432.5	1553.32	120.82	0	381.98	
2Q	MAY	5999	2275.59	47.86	749.88	1689.98	2227.72	537.74	0	455.19	
1Q	JUN	5999	1484.49	38.29	749.88	1689.98	1689.98	0	0	453.58	
2Q	JUN	5755.22	1484.49	37.75	719.4	1203.61	1203.61	0	0	323.04	
1Q	JUL	5998.35	856.71	-5.7	1600	1689.98	1689.98	0	0	449.58	
2Q	JUL	5170.77	856.71	-5.42	1600	1562.65	1562.65	0	0	405.72	
1Q	AGO	4470.25	245.94	-9.47	1600	1519.68	1519.68	0	0	380.79	
2Q	AGO	3205.98	245.94	-8.13	1600	1256.86	1256.86	0	0	300.62	
1Q	SEP	2203.2	223.9	-0.44	501.6	100	100	0	0	23.45	
2Q	SEP	2327.54	223.9	-0.45	563.77	141.3	141.3	0	0	33.3	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
*****	100	*****									
1Q	OCT	2263.4	125.69	10.66	131.7	100	100	0	0	3.46	
2Q	OCT	2278.43	125.69	10.69	139.21	100	100	0	0	3.48	
1Q	NOV	2293.42	135.72	10.47	25	25	25	0	0	3.89	
2Q	NOV	2393.66	135.72	10.68	25	25	25	0	0	3.91	
1Q	DIC	2493.7	121.89	7.43	25	25	25	0	0	3.94	
2Q	DIC	2583.16	121.89	7.56	25	25	25	0	0	3.96	
1Q	ENE	2672.49	88.94	9.66	25	25	25	0	0	3.98	
2Q	ENE	2726.77	88.94	9.76	25	25	25	0	0	3.99	
1Q	FEB	2780.95	69.07	12.72	25	25	25	0	0	3.01	
2Q	FEB	2812.3	69.07	12.8	25	25	25	0	0	3.01	
1Q	MAR	2843.57	199.62	22.25	355.45	350.61	350.61	0	0	4.09	
2Q	MAR	2670.33	199.62	21.58	333.79	349.15	349.15	0	0	3.10	
1Q	ABR	2499.21	868.66	27.65	312.4	329.17	329.17	0	0	8.94	
2Q	ABR	3011.05	868.66	30.11	376.38	713.82	713.82	0	0	3.58	
1Q	MAY	3135.79	1065.73	36.31	391.97	732.21	732.21	0	0	9.70	
2Q	MAY	3433	1065.73	37.6	429.12	1299.87	1299.87	0	0	9.18	
1Q	JUN	3161.26	2112.9	31.64	395.16	1220.75	1220.75	0	0	3.10	
2Q	JUN	4021.77	2112.9	34.44	502.72	1241.72	1241.72	0	0	8.22	
1Q	JUL	4858.5	1012.54	-5.33	1600	1689.98	1689.98	0	0	4.37	
2Q	JUL	4186.39	1012.54	-5.06	1600	1597.63	1597.63	0	0	1.52	
1Q	AGO	3606.35	263.89	-8.6	1600	1554.66	1554.66	0	0	6.14	
2Q	AGO	2324.18	263.89	-6.98	1162.09	825.11	825.11	0	0	1.21	
1Q	SEP	1769.95	163.8	-0.39	284.97	100	100	0	0	2.87	
2Q	SEP	1834.15	163.8	-0.4	317.07	100	100	0	0	2.95	

**Continuación Tabla 4.7 Resultado de la simulación para el registro sintético de la serie 01, archivo SIQPRE**

\*\*\*\*\* RESUMEN ANUAL \*\*\*\*\*

AÑO	DERRAME MILL M <sup>3</sup>	DEFICIT MILL M <sup>3</sup>	ING HIST MILL M <sup>3</sup>	EXT TOTAL MILL M <sup>3</sup>	ALMAC PRO MILL M <sup>3</sup>	ELEV PRO (MSNM)	ENER TOTAL (GWH)	
1	0	0	12857.75		16086.7	3866.59	161.36	4077.13
2	658.56	0	17020.09		16633	3788.8	161.07	4145.92
3	0	0	14243.66		13878	3341.49	159.31	3511.64
4	1368.62	0	21581.99		20549.4	4546.48	163.89	5040.6
5	0	0	15095.22		15518.2	3884.97	161.43	3957.45
6	2952.27	0	19903.7	19145.8	3947.78	161.67	4176.35	
7	0	0	10820.25		11684	2766.35	156.83	2840.7
8	0	0	11930.4	11021.2	2190.7	154.27	2624.96	
9	332.56	0	16845.77		15959.7	3517.63	160.07	4023.25
10	0	0	11019.59		11848.2	2826.28	157.09	2895.64
11	1361.87	0	19088.87		17271.1	3547.03	160.18	4137.72
12	0	0	7613.39	9056.8	2630.11	156.24	2150.92	
13	8520.62	0	26642.12		25042.2	3272.31	159.02	4291.42
14	1862.22	0	16597.52		16677.5	3414.9	159.63	3811.49
15	0	0	12589.36		11821.5	2668.96	156.41	2919.38
16	813.81	0	17758.49		17201.6	4087.38	162.19	4244.17
17	0	0	11655.79		12354.3	2881.23	157.32	3025.88
18	0	0	13087.54		12411.1	2756.61	156.79	3031.73
19	0	0	11755.09		11287.5	2523.44	155.78	2715.2
20	10.68	0	17275.67		16222	3588.33	160.33	4171.03
21	3193.42	0	19336.14		19091.4	4049.42	162.04	4126.23
22	195.06	0	16028.1	15811.7	3802.06	161.12	4027.9	
23	1102.3	0	19572.51		18822.8	4388.09	163.3	4601.76
24	2900.4	0	17736.66		18262.9	3770.9	161.01	3976.03
25	0	0	13289.02		12995	2825.92	157.09	3205.08
26	0	0	12955.4	12701.7	2841.51	157.15	3124.29	
27	2070.2	0	22523.3	21072.4	4050.8	162.05	4996.91	
28	0	0	14971.89		15120.7	3874.93	161.4	3838.1
29	1663.41	0	19250.17		18848.4	4172.8	162.5	4498.27
30	0	0	16184.01		15819.4	3918.14	161.56	4064.68
31	565.19	0	18258.01		17717.3	4223.35	162.69	4468.51
32	135.43	0	16411.11		16360.1	4006.54	161.88	4220.28
33	0	0	15643.44		15327.4	3849.82	161.3	3934.27
34	0	0	11667.72		11446.4	2681.34	156.46	2764.61

**Continuación Tabla 4.7 Resultado de la simulación para el registro sintético de la serie 01, archivo SIQPRE**

35	0	0	12288.07	12375.8	2996.56	157.82	3048.09
36	1367.49	0	19087.6	17673.6	3459.8	159.83	4202.82
37	0	0	13767.87	13502.6	3407.01	159.6	3412.59
38	0	0	14124.96	14211.8	3605.98	160.39	3573.59
39	0	0	10058.34	10571.8	2597.08	156.1	2536.19
40	0	0	10070.79	9785.6	2004.45	153.31	2311.48
41	0	0	16525.98	15144.1	3036.18	157.99	3806.13
42	148.71	0	16887.63	16564.3	3939.53	161.64	4241.14
43	0	0	8435.44	9462.5	2582.25	156.03	2260.76
44	0	0	16491.72	14758.2	2956.98	157.65	3722.91
45	0	0	15500.99	15171.3	3623.93	160.46	3862.83
46	0	0	10609.91	11170.7	2867.58	157.27	2724.82
47	0	0	17559.34	15682.2	3132.66	158.41	3959.47
48	1794.75	0	19481.16	19288.6	4227.05	162.71	4555.65
49	0	0	16107.53	16207.8	4132.33	162.35	4171.92
50	0	0	11359.09	11871.3	2774.47	156.86	2901.17
51	671.36	0	16749.49	15417.8	3322.91	159.23	3759.15
52	0	0	17937.77	17528.4	4419.94	163.42	4552.63
53	2031.06	0	19545.46	19116.8	4054.72	162.06	4449.02
54	0	0	14828.29	14880.9	3679	160.67	3794.59
55	0	0	14269.29	14187.3	3451.85	159.79	3568.86
56	572.94	0	17191.45	16382.1	3604.61	160.39	4096.51
57	0	0	13308.08	13542.8	3281.01	159.05	3381.09
58	275.19	0	17537.96	16175.2	3850.08	161.3	4081.98
59	0	0	15821.35	15755.4	3757.21	160.96	4027.08
60	4138.68	0	21244.9	20412.8	3757.72	160.96	4191.34
61	0	0	16224.97	16230.7	4003.22	161.87	4155.01
62	0	0	9268.92	10116.4	2661.2	156.37	2430.08
63	0	0	15896.26	14590.8	3103.73	158.29	3703.92
64	0	0	11452.32	11792.8	2813.52	157.03	2875.99
65	657.04	0	19503.58	17940.2	3716.08	160.8	4474.72
66	189.91	0	16375.95	16540.6	3967.32	161.74	4227.53
67	122.92	0	17296.71	16556.9	3737.37	160.88	4236.71
68	0	0	10675.76	11568.7	3156.2	158.51	2844.67
69	2163.61	0	19595.66	18190	3587.36	160.33	4145.4
70	0	0	11612.71	12221.1	2946.13	157.6	3004.77
71	211.35	0	17552.26	16480.6	3681.71	160.68	4231.5

**Continuación Tabla 4.7 Resultado de la simulación para el registro sintético de la serie 01, archivo SIQPRE**

72	0	0	8875.2	9388.1	2395.03	155.22	2260.96	
73	0	0	12165.63		11730	2634.53	156.26	2867.85
74	837.05	0	16097.8	15197.9	3179.66	158.61	3680.71	
75	0	0	14883.38		14811.6	3481.07	159.92	3757.12
76	0	0	14734.8	14316.3	2960.8	157.67	3603.97	
77	0	0	15117.3	14405.2	3439.86	159.74	3618.14	
78	174.3	0	16269.43		15801	3638.23	160.51	4020.89
79	0	0	16954.6	16624.1	4192.34	162.58	4278.22	
80	0	0	14287.54		13891.8	3178.5	158.61	3442.21
81	895.62	0	17655.1	17270.3	3839.72	161.26	4232.85	
82	0	0	12761.56		13074.6	3070.02	158.14	3234.41
83	0	0	16506.07		15557.4	3278.83	159.04	3939.43
84	0	0	13627.61		13723	3220.98	158.79	3416.25
85	320.64	0	16888.93		16085.4	3500.24	160	4042.55
86	0	0	11678.03		12173.2	2861.71	157.24	2976.74
87	0	0	18115.16		16471.2	3494.66	159.98	4179.79
88	0	0	15463.66		15742.2	3785.02	161.06	4028.65
89	551.88	0	17503.02		17021.5	4151.52	162.42	4281.56
90	2878.39	0	21719.18		20762.7	4129.98	162.34	4682.19
91	289.53	0	15951.57		16076.2	3990.82	161.83	4082.58
92	2444.51	0	22013.23		20638	4246.02	162.78	4757.39
93	0	0	14769.82		15510.6	3923.15	161.57	3943.54
94	0	0	14515.92		14761.3	3639.4	160.52	3741.94
95	0	0	15025.28		14122.9	3231.95	158.84	3537.13
96	295.57	0	17164.92		16706.2	3667.01	160.62	4231.38
97	1739.35	0	20029.44		19543.9	4373.8	163.25	4650.21
98	0	0	14158.55		14422.6	3435.12	159.72	3638.58
99	0	0	16496.27		15823.9	3642.51	160.53	4093.49
100	0	0	12456.9	12504.7	2845.36	157.17	3083.59	
TOTAL		54478.49		.00				
ALMACENAMIENTO INICIAL		MÓNIMO REGISTRADO:	1044.88	MILL M <sup>3</sup>				
ENERGÍA PROMEDIO GENERADA EN LOS 100 AÑOS:		155.61	GWH					

**Continuación Tabla 4.7 Resultado de la simulación para el registro sintético de la serie 01, archivo SIQPRE**



RESUMEN QUINCENAL					
P R O M E D I O S					
	ELEVACION	ALMACENAMIENTO		ENERGIA	
	MSNM	MILL M <sup>3</sup>		GWH	
1Q	ENE	158.37	3186.76	10.32	
2Q	ENE	158.74	3274.18	10.46	
1Q	FEB	159.14	3380.06	11.01	
2Q	FEB	159.54	3472.04	14.49	
1Q	MAR	159.78	3499.07	107.94	
2Q	MAR	159.64	3409.32	137.11	
1Q	ABR	160.77	4090.3	136.29	
2Q	ABR	162.41	4274.99	261.9	
1Q	MAY	163.41	4632.71	270.69	
2Q	MAY	163.79	4493.49	387.7	
1Q	JUN	164.04	4773.79	378.5	
2Q	JUN	165.26	5166.16	320.28	
1Q	JUL	164.92	4579.27	437.52	
2Q	JUL	162.94	4090.9	404.61	
1Q	AGO	159.82	3013.57	370.02	
2Q	AGO	156.22	2365.77	255.46	
1Q	SEP	154.76	2319.39	73.84	
2Q	SEP	154.74	2330.66	58.95	
1Q	OCT	155.18	2466.61	27.28	
2Q	OCT	155.6	2547.46	30.44	
1Q	NOV	156.14	2702	6.02	
2Q	NOV	156.81	2853.69	6.69	
1Q	DIC	157.41	2977.57	8.27	
2Q	DIC	157.93	3098.84	8.92	

**Continuación Tabla 4.7 Resultado de la simulación para el registro sintético de la serie 01, archivo SIQPRE**

#### 4.4 Resultados de la simulación

En la siguiente tabla (Tabla 4.8), se observa el resumen de resultados de la simulación del funcionamiento de vaso usando las series sintéticas con la política de operación usada con el registro histórico.



Los resultados indican que podría generarse 1.519 GWh/quincena y la energía anual histórica en 28 años fue de 1.4603 GWh/quincena, lo que representa un aumento respecto a la energía anual histórica. El derrame anual promedio sería de 611.44hm<sup>3</sup>, y si el promedio anual histórico fue de 407.40 hm<sup>3</sup>, se tendría un aumento con respecto al registro histórico. Se observa que no hay déficit en el sistema. El almacenamiento mínimo en 100 años sería de 3375.05 hm<sup>3</sup> y el almacenamiento anual histórico fue de 1633.04 hm<sup>3</sup>, se tendría un aumento respecto al registro histórico de utilizar la política de operación considerada.

SERIES (100 AÑOS)	DERRAME (hm3)	DÉFICIT (hm3)	INGRESO HIST (hm3)	EXT. TOTAL (hm3)
1	54478.47	0	1555341.2	1524295.7
2	58404.23	0	1520516.58	1489132.9
3	67191.7	0	1552619.25	1521878.4
4	58765	0	1497339.71	1465962.1
5	70514.2	0	158917429	1557493.8
6	39029.88	0	1473841.52	144344.8
7	60361.24	0	1517397.21	1487891.6
8	58198.12	0	1524683.7	1493113.7
9	82530.68	0	1549343.75	1517673.9
10	61971.74	0	1551322.21	1519561.7
<b>SUMA</b>	<b>611445.26</b>	<b>0</b>	<b>172659834.1</b>	<b>13721348.6</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>61144.526</b>	<b>0</b>	<b>17265983.41</b>	<b>1372134.86</b>
<b>PROMEDIO/100 AÑOS</b>	<b>611.44526</b>	<b>0</b>	<b>172659.8341</b>	<b>13721.3486</b>
<b>HISTORICO</b>	<b>40740.63</b>	<b>0</b>	<b>745498.56</b>	<b>734441.7</b>
<b>HISTORICO/100 AÑOS</b>	<b>407.4063</b>	<b>0</b>	<b>7454.9856</b>	<b>7344.417</b>

**Tabla 4.8 Resumen simulación del funcionamiento de vaso con cada serie sintética generada.**

ALMAC. PRO. (hm3)	ELEV. PRO. (msnm)	ENERGIA TOT. (GWh)	ENERGIA PROMEDIO GWh
345827.56	15969	373467.93	155.61
331423.65	15910.23	361461.31	150.61
339858.85	15943.24	368504.67	153.54
332613.28	15911.94	354843.91	147.85
349430.52	15980.54	378014.16	157.51
326663.14	15888.29	353684.06	147.37
332615.39	15912.3	360717.26	150.3
336443.9	15927.22	362552.41	151.06
335169.39	15923.97	362717.19	151.13
345011.01	15964.9	369646.29	154.02
<b>3375056.69</b>	<b>159331.63</b>	<b>3645609.19</b>	<b>1519</b>
<b>337505.669</b>	<b>15933.163</b>	<b>364560.919</b>	<b>151.9</b>
<b>3375.05669</b>	<b>159.33163</b>	<b>3645.60919</b>	<b>1.519</b>
<b>163304.63</b>	<b>7942.54</b>	<b>175237.6</b>	<b>146.03</b>
<b>1633.0463</b>	<b>79.4254</b>	<b>1752.376</b>	<b>1.4603</b>

**Continuación Tabla 4.8 Resumen simulación del funcionamiento de vaso con cada serie sintética generada.**

En la siguiente tabla (Tabla 4.9), se especifica el número de años y quincenas en los que se superó la curva guía.

Durante la simulación se encontró en las 10 series sintéticas, que en promedio la curva guía fue rebasada 812 quincenas, con una probabilidad del 34%.

SERIES (100 AÑOS)	AÑOS DONDE SE SUPERÓ LA CURVA GUIA
1	100
2	100
3	100
4	100
5	100
6	100
7	100
8	100
9	100
10	100

**Tabla 4.9 Número de años en los que se superó al curva guia**

QUINCENAS DONDE SE REBASÓ LA CURVA GUIA	de	probabilidad del 34 %
837	2400	0.34875
799	2400	0.33291667
811	2400	0.33791667
786	2400	0.3275
849	2400	0.35375
776	2400	0.32333333
805	2400	0.33541667
817	2400	0.34041667
815	2400	0.33958333
829	2400	0.34541667

**Continuación Tabla 4.9 Número de años en los que se superó al curva guia**

## **Conclusión**

En este capítulo se abordó la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 3, también se exhibieron en tablas el resumen de los resultados obtenidos.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este capítulo se plantean algunas observaciones, conclusiones y las recomendaciones a partir de los resultados obtenidos de este trabajo.

Uno de los grandes problemas que se encontraron para la realización de esta tesis y que es común que se presente en casi todo proyecto similar de ingeniería, es la cantidad de datos disponibles para realizar el análisis.

Para este trabajo se obtuvieron, a partir de la información disponible, los registros de los volúmenes de ingreso por cuenca propia al embalse lo suficientemente extensos y confiables para que al realizar el funcionamiento de vaso, los resultados fueran lo mas apegado a la realidad y que se cumpla con los objetivos deseados.

En esta tesis se mostró la fiabilidad del método de Svanidze para la generación de registros sintéticos con una similitud alta con el comportamiento estadístico del registro histórico y que el patrón de comportamiento de los coeficientes de autocorrelación es bastante similar al histórico.

Se puede afirmar que los objetivos de este trabajo se cumplieron satisfactoriamente, ya que el empleo conjunto de procedimientos hidrológicos como es la simulación de vaso y el uso de registros sintéticos con bases probabilísticas se redujo la subjetividad en los resultados de sólo haberse utilizado registros con pocos años y se pudo seleccionar una política de operación que puede incrementar la seguridad, así como disminuir escenarios futuros de derrames y de déficit en el sistema, con los mayores beneficios por generación de energía eléctrica.

Con la política de operación óptima simulada con los registros sintéticos se ve que se podría generar más energía, los derrames no serían tan grandes, se evitarían déficits, las elevaciones en el embalse aumentarían y por lo tanto el almacenamiento se incrementaría, en el largo plazo, al hacer la comparación con los resultados de simular la política con registro histórico.

Es recomendable que se vuelvan a hacer simulaciones de las políticas de operación para confirmar que la que se escogió fue la mejor, y dado que no se produjo algún caso de déficit, se puede operar la presa si sobrepasar el NAMO, también se recomienda modificar la curva guía, elevando los niveles de algunos meses para tener menos derrames y así aumentar el aprovechamiento y la generación de energía eléctrica.

**REFERENCIAS**

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa. 2011.
2. Peña Delgado, Francisco. Simulación histórica y sintética de políticas de operación óptima de un sistema de tres presas en cascada en el Río Santiago, Nayarit México. Tesis Profesional. UNAM. 2010.
3. ([digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf](http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf))
4. Dagli, C. H., Miles, J. F. Determining operating policies for a water resource system. Journal of Hidrology. 47 (1980). 297-306. Holanda.
5. Dam T. T., Burritt R. L., Pisaniello J. D. Adequacy of policy and practices for small agricultural dam safety accountability and assurance in Vietnam. Agricultural Water management. 112 (2012). 63-74. Australia.
6. Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L., González, V. F. Estudio integral de la cuenca alta del río Grijalva. 3. Manejo óptimo de las presas. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Informe final. Noviembre 2009.
7. Domínguez M.R., Cruickshank V.C., Arganis J.M.L. Importancia de la generación de muestras sintéticas en el análisis del comportamiento de políticas de operación de presas. Ingeniería del agua. 12. Marzo 2005.
8. Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L. Determinación de políticas de operación del río Fuerte, Sin. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Informe Final. Diciembre 2007.
9. Domínguez Mora, Ramón. Metodología de selección de una política de operación conjunta de una presa y su vertedor. Tesis Doctoral. UNAM.1989.
10. Domínguez, M. R., Mendoza R. R. Operación integral del sistema hidroeléctrico del río Grijalva. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Julio 1993.

11. Domínguez, M. R. Revisión de las políticas de operación quincenal de las presas Angostura y Malpaso, en el río Grijalva. Elaborado para la CFE por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Informe Final. Noviembre 2001.
12. Hall W. A., Howell D. T. The optimization of single-purpose reservoir design with the application of dynamic programming to synthetic hydrology samples. *Journal Hydrology*. 1 (1963). 355-363. Holanda.
13. Stam A., Salewicz K. A., Aronson J. E. An interactive reservoir management system for Lake Kariba. *European Journal of Operational Research*. 107(1998). 119-136. Austria.
14. Yoo, Ju-Hwan. Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model. *Journal of Hydrology*. 376 (2009). 182-187. Corea.
15. Devore J. L. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y ciencias. San Luis Obispo, USA: California Polytechnic State University. 2008.
16. Wilson, E. M. *Engineering Hydrology*. 4ª Edición. Hong Kong: Macmillan. 1990.
17. Yurekli, Kadri. Prediction of daily maximum streamflow based on stochastic approaches. *Journal of Spatial Hydrology*. Vol. 4, No. 2. 2004.
18. Mendoza R.R. Manual del programa SIMULQ1P.FOR. Instituto de Ingeniería UNAM. 2010.
19. Svanidze, G.G. *Mathematical Modeling of Hydrologic Series*. USA: Water Resources Publications. 1980.
20. Comisión Federal de Electricidad. Manual de diseño de obras civiles. Hidrotecnia. Hidrología. México. 1982.
21. Jiménez, E. M., et al. Manual de Operación de los Programas AX.EXE y CARACHID.EXE (para Hidrología). CENAPRED. México, 1997.