

Análisis del funcionamiento de un sistema hidroeléctrico en México con reglas de operación obtenidas para intervalos de tiempo mensual y quincenal

Rosalva Mendoza Ramírez ^a, Ramón Domínguez Mora ^b y Maritza Liliana Arganis Juárez ^c

^a Campus UNAM-Morelia. Antigua carretera a Pátzcuaro 8701. Ex Hacienda de San José de La Huerta. C.P. 58190. Morelia Mich. Teléfono (CDMX): (+52) 5623-7893 (Morelia): (+52) 443 3227893 ext. UNAM: 37893. rmr@pumas.iingen.unam.mx ^b II UNAM. Edificio 5, cubículo 304, 2do Piso. Circuito Escolar s/n. Ciudad Universitaria. Coyoacán. CP 04510. Ciudad de México. Teléfono: (+52) 55 56233600 ext. 3666. rdm@pumas.iingen.unam.mx. ^c II UNAM. Edificio 5, cubículo 403, 3er Piso. Circuito Escolar s/n. Ciudad Universitaria. Coyoacán. CP 04510. Ciudad de México. Teléfono: (+52) 55 56233600 ext. 8644. MArganisJ@iingen.unam.mx

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

Se obtuvieron políticas de operación para dos intervalos de tiempo, a saber: mensual y quincenal, para simular el funcionamiento de uno de los sistemas hidroeléctricos más importantes de México, analizando el comportamiento de cuatro variables principalmente: volumen derramado, déficit, energía promedio generada y almacenamiento mínimo. Lo primero fue analizar estadísticamente los registros históricos de los volúmenes de ingreso quincenal y mensual, para obtener las medidas de dispersión y su probabilidad de ocurrencia. La metodología usada para obtener las reglas de operación fue la programación dinámica estocástica. Se hicieron ensayos probando diversos valores para los coeficientes de penalización. Los resultados mostraron que el sistema tiene un mejor control en el evento de derrame con reglas de operación determinadas en forma quincenal pero a costa de alcanzar en varios años niveles de almacenamiento bajos, no obstante lo anterior no impacta en forma notable la energía eléctrica que el sistema genera.

Palabras clave | políticas de operación; programación dinámica estocástica; análisis estadístico.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al manejo óptimo de embalses con propósitos de generación de electricidad, buscando definir reglas para la utilización del agua almacenada que cumplan, en la medida de lo posible, con niveles de almacenamiento adecuados para la seguridad de la presa en presencia de eventos hidrometeorológicos extremos y para la generación de energía. La determinación de dichas reglas es un tema que ha sido abordado desde los primeros años de la década de los setenta del siglo XX, utilizando la programación dinámica (PD) (Butcher, 1971; Chow y Cortes-Rivera, 1974), hasta los más recientes en los que se utilizan técnicas del campo de la inteligencia artificial y la computación evolutiva (Cai et al., 2001; Chandramounli y Raman, 2001; Chang et al., 2005; Cheng et al., 2008).

En este trabajo se optó por usar el algoritmo de la PD en su variante estocástica (Nandalal y Bogardi, 2007), proponiendo diferentes valores de los coeficientes de penalización de eventos no deseables (derrames y déficits, principalmente) y usando intervalos de tiempo variables, a saber: un mes y quince días, en esto último radica el interés de la presente investigación, esto es: se quiere saber si las reglas de operación obtenidas al analizar estadísticamente los volúmenes de ingreso tanto mensuales como quincenales difieren al simular el funcionamiento del sistema.

El trabajo se divide en cuatro apartados, en el primero se describe el sistema hidroeléctrico (SH) elegido para hacer el análisis comparativo, en el segundo se dan las generalidades del método de la programación dinámica estocástica (PDE), en el tercero la aplicación de la metodología al manejo del embalse y los resultados obtenidos y en el cuarto se dan las conclusiones generales del estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El embalse elegido para el estudio es la presa Lic. Adolfo López Mateos, conocida popularmente con el nombre de El Infiernillo (figura 1). Controla las aguas del río Balsas, uno de los más caudalosos del país. Nace en la región centro sur recorriendo aproximadamente 800 km hasta su salida en el océano Pacífico, tiene un ancho promedio de 150 a 200 m. Su cuenca se divide en tres subregiones: Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas. Según datos del 2007 tiene una disponibilidad total anual de aguas superficiales estimada en $24484 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de escurrimientos vírgenes y retornos. Geográficamente se localiza entre las coordenadas: $18^\circ 21' 26''$ a $18^\circ 56' 04''$ de Latitud norte y $101^\circ 28' 16''$ a $101^\circ 59' 49''$ de Longitud oeste, en los límites de los estados mexicanos de Guerrero y Michoacán. La precipitación anual promedio es de 622 mm, el período más seco se registra en invierno cuando la cantidad de lluvia es menor del 5 % de la anual. La temperatura ambiental promedio anual es de 28.2°C . La evaporación media anual es de 2848 mm (CONABIO, 2017).

La región presenta 3 tipos de climas, a saber: El 47% presenta clima semiárido, cálido. El 28% tiene clima árido, cálido. El 25% restante tiene la clasificación de clima cálido subhúmedo (CONABIO, 2017).

En la zona existen ecosistemas representativos de las selvas bajas caducifolias y subcaducifolias. La fauna está constituida por diversas especies de mamíferos y 253 especies de aves, las cuales representan el 46 % de las que se registran en Michoacán y el 24% de las registradas en la República Mexicana; 14 de ellas son endémicas a la zona.

La presa fue construida por la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos entre el período de agosto de 1960 a diciembre de 1963 y puesta en operación el 15 de junio de 1964. El vaso tiene 120 km de largo y cubre un área de 400 km^2 . Tiene una capacidad total de $12000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y 3 túneles vertedores que fueron diseñados para conducir un gasto máximo de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ cada uno (Sánchez, A., 2011).

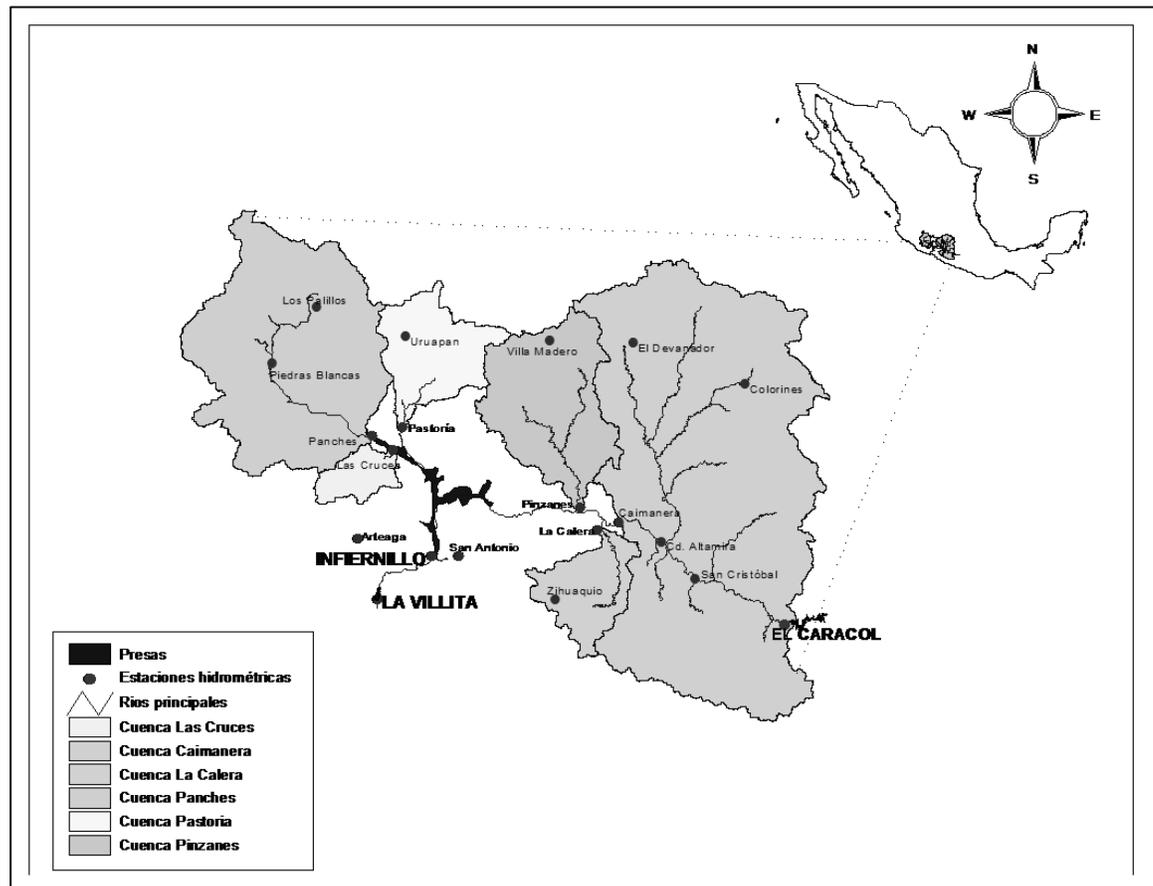


Figura 1 | Localización del SH El Infiernillo en el estado de Michoacán, México.

De estudios anteriores (Mendoza et al., 2016; Mendoza et al., 2017) se tomó el valor de $6000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ para la capacidad útil, un intervalo de $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ para discretizar los ingresos y los almacenamientos, el número de etapas definidas (tabla 1) y extracciones máximas y mínimas para cada una, límites de curvas guía alta y baja, ecuaciones de ajuste y datos generales del embalse. Se usaron los registros de ingresos históricos para el periodo en forma mensual y quincenal para hacer primero un análisis estadístico y determinar las probabilidades asociadas a ellos.

Tabla 1 | Agrupación hecha para el caso mensual.

Etapa	Meses
1	Octubre
2	Septiembre
3	Agosto
4	Julio
5	Marzo, Abril, Mayo y Junio
6	Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero

Del estudio del 2016 (Mendoza et al., 2016) se tomaron las probabilidades de los ingresos discretizados determinadas en forma mensual y agrupando los doce meses del año en seis etapas (figura 2). Para el análisis quincenal no se formaron grupos y se tomaron 24 etapas iniciando con la segunda quincena del mes de diciembre y cerrando con la primera quincena del mes de enero. Los resultados de las probabilidades obtenidas para cada una de las 24 etapas se muestran en la figura 3.

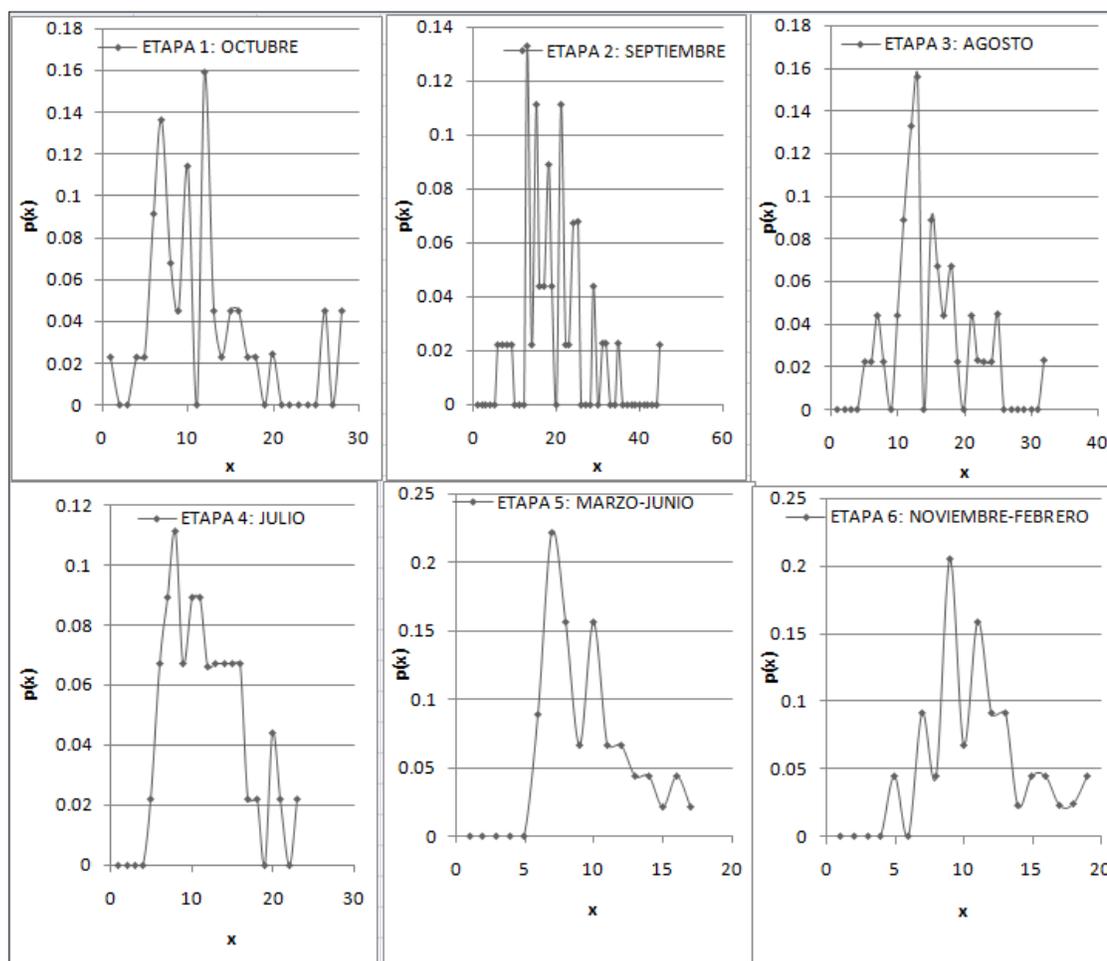


Figura 2 | Probabilidades de ingresos definidas para cada etapa (análisis mensual).

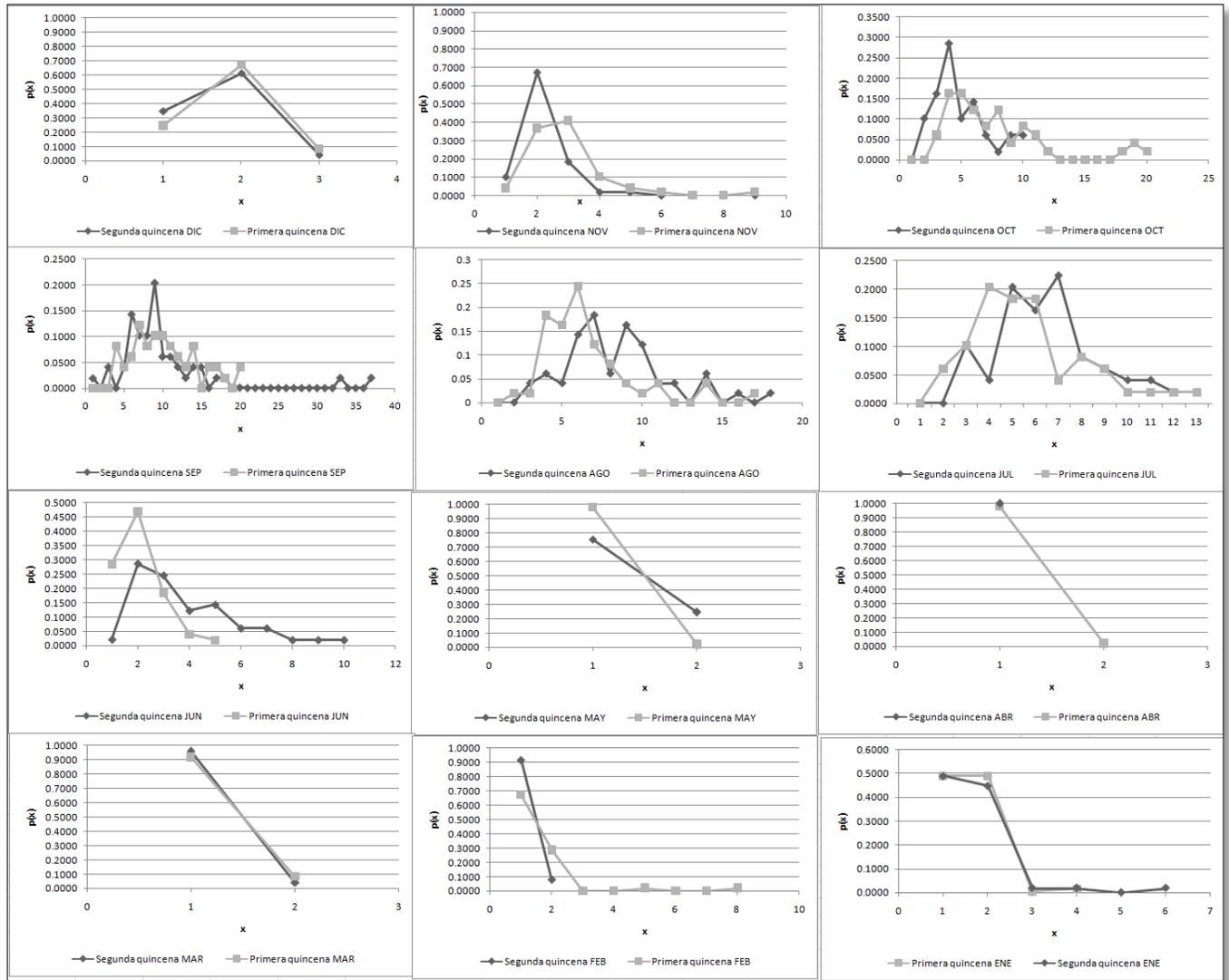


Figura 3| Probabilidades de ingresos definidas para cada etapa (análisis quincenal).

Una vez hecho el análisis estadístico, las políticas de operación del SH se determinan usando la metodología de la Programación Dinámica en su versión estocástica (PDE), los detalles del algoritmo se pueden consultar en Bellman (1957). El inconveniente de esta técnica de optimización es el alto costo en recursos computacionales que demanda, para salvar esto se trabaja separando el algoritmo de solución en dos partes; en la primera sólo se calcula el beneficio esperado por cada etapa, que se repite de un año a otro. En la segunda parte se determina el beneficio acumulado hasta la etapa considerada y su valor óptimo, para ello se propone un número de años muy grande (puede corresponder a la vida útil del sistema); en la etapa inicial se asignan valores de cero a los beneficios óptimos, se comienza el recorrido de las etapas en sentido contrario al tiempo y se resuelven las ecuaciones iterando hasta que las diferencias entre dos años consecutivos cumplen una tolerancia establecida que garantiza convergencia y estabilidad de la solución. Un vez logrado esto, se guarda la extracción óptima (k_i^*) para cada presa con su respectivo beneficio (B^*) (Mendoza et al., 2012).

Con la política de operación obtenida se simula el funcionamiento del sistema y se evalúa su desempeño monitoreando el comportamiento de cuatro variables principales, a saber: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo registrado y energía eléctrica promedio generada.

El algoritmo de la PDE y la ecuación que gobierna el cambio en el almacenamiento del embalse se tienen codificados en tres programas elaborados en lenguaje Fortran, con los que se obtiene para cada intervalo de tiempo y de discretización de volumen, la extracción óptima mensual o quincenal y con esta última se simula el funcionamiento del sistema (de 1965 a 2013).

Se diseñaron 5 ensayos para comparar con los resultados de los estudios del 2016 (Mendoza et al., 2016) y del 2017 (Mendoza et al., 2017). En cada uno de ellos se eligieron valores distintos para penalizar los eventos de derrame y de déficit. El estudio del 2016 introduce en el proceso de obtención de reglas de operación el variar para cada etapa el valor de los coeficientes de penalización para los eventos no deseados (déficit y derrame). El del 2017 adiciona en el proceso de simulación el poder modificar el volumen que dicta la política aumentando o restando un cierto volumen en función de la variación temporal del coeficiente de autocorrelación. En ambos estudios se usó el registro histórico de volúmenes de ingreso mensual al embalse, dos curvas guía (alta y baja) y se obtenían reglas de operación para ese intervalo. En el proceso de simulación se podía usar un paso de tiempo de 15 días y lo que se hacía para dar el volumen de extracción era simplemente tomar el que dictaba la política y dividirlo entre las dos quincenas del mes. En este nuevo estudio, se mantienen las condiciones de los trabajos referidos pero se obtienen reglas de operación usando los volúmenes de ingreso en forma quincenal y sin buscar formar grupos con características estadísticas homogéneas. Los 5 ensayos definidos se muestran en la tabla 2 y los resultados obtenidos se detallan en el siguiente apartado.

Tabla 2 | Valores usados para los coeficientes de penalización de derrame y déficit en los 5 ensayos.

Quincena	Mes	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3*	Ensayo 4**	Ensayo 5***
		Coeficientes de Penalización		Coeficientes de Penalización		Coeficientes de Penalización	Coeficientes de Penalización	Coeficientes de Penalización
		Derrame	Déficit	Derrame	Déficit	Déficit	Derrame	Déficit
1	DIC	1.4	10	14	500	5000	140	50000
2	DIC	1.4	10	14	500	5000	140	50000
1	NOV	1.4	10	14	500	5000	140	50000
2	NOV	1.4	10	14	500	5000	140	50000
1	OCT	5.5	10	55	500	5000	550	50000
2	OCT	5.5	10	55	500	5000	550	50000
1	SEP	10	10	100	300	3000	1000	30000
2	SEP	10	10	100	300	3000	1000	30000
1	AGO	8	20	80	300	3000	800	30000
2	AGO	8	20	80	300	3000	800	30000
1	JUL	5	10	50	300	3000	500	30000
2	JUL	5	10	50	300	3000	500	30000
1	JUN	0.8	10	8	300	3000	80	30000
2	JUN	0.8	10	8	2000	20000	80	200000
1	MAY	0.8	10	8	2000	20000	80	200000
2	MAY	0.8	10	8	2000	20000	80	20000
1	ABR	0.8	10	8	1800	18000	80	180000
2	ABR	0.8	10	8	1800	18000	80	180000
1	MAR	0.8	10	8	1700	17000	80	170000
2	MAR	0.8	10	8	1700	17000	80	170000
1	FEB	1.4	10	14	1500	15000	140	150000
2	FEB	1.4	10	14	1500	15000	140	150000
1	ENE	1.4	10	14	1000	10000	140	150000
2	ENE	1.4	10	14	1000	10000	140	150000

*Valores para penalizar derrame iguales a los del ensayo 2

**Valores para penalizar déficit iguales a los del ensayo 3

*** Valores para penalizar derrame iguales a los del ensayo 4

RESULTADOS

Con el registro histórico de volúmenes de ingreso en forma mensual y quincenal, se obtuvieron las reglas de operación para cada grupo de meses y para cada quincena. La figura 4 muestra las reglas de operación en forma mensual para seis etapas.

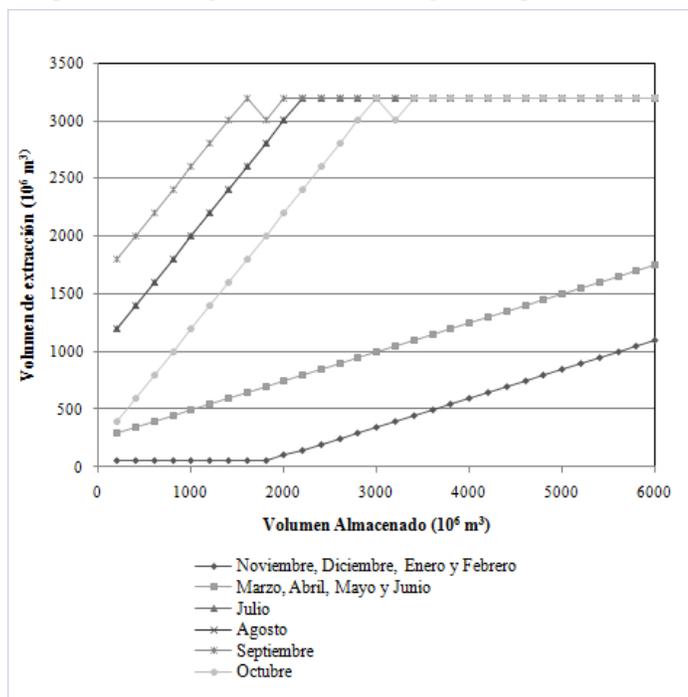


Figura 4 | Reglas de operación mensual por etapas.

La figura 5 muestra las reglas de operación quincenal del ensayo 3 para los meses de mayo y diciembre, y agosto y septiembre por considerarlos representativos de la época de estiaje y lluvia, respectivamente.

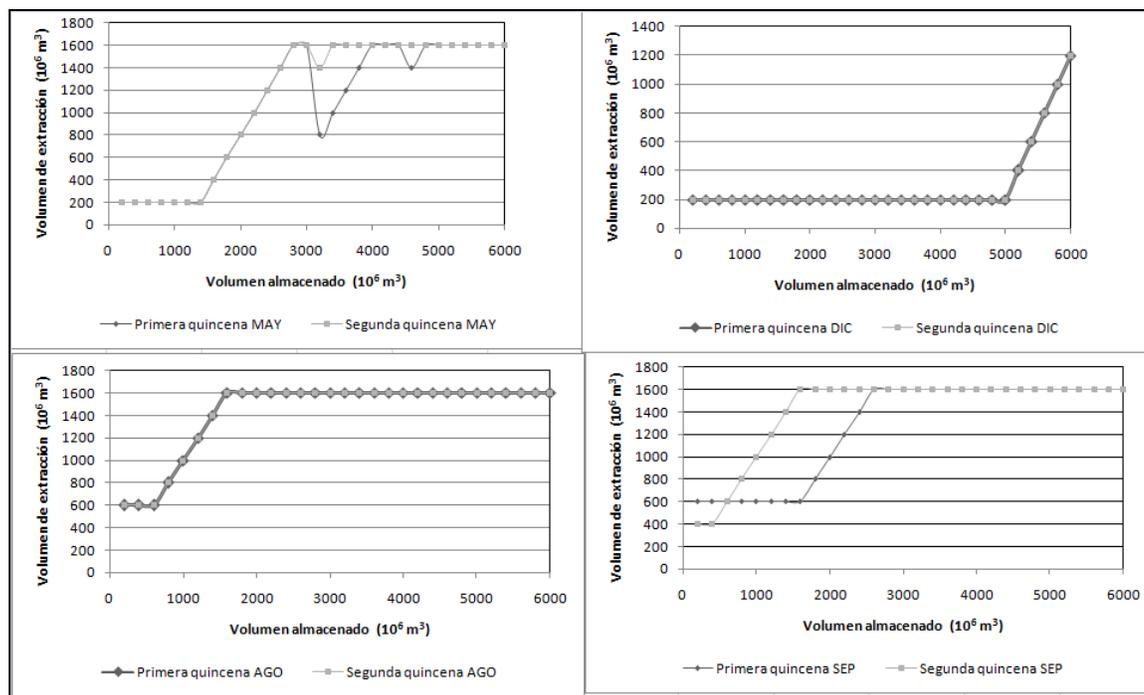


Figura 5 | Reglas de operación para las quincenas de mayo, diciembre, agosto y septiembre (ensayo 3).

Al analizar las gráficas de las figuras 4 y 5 se puede observar lo siguiente:

- En el caso de las reglas de operación mensual los meses de marzo, abril, mayo y junio tienen todos una extracción mínima de $300 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y se incrementa casi en forma constante hasta alcanzar un valor máximo de $1800 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Para el caso quincenal, en el mes de mayo para la primera quincena se inicia con un valor de extracción de $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ que se mantiene constante hasta que el almacenamiento en la presa supera los $1400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ lo que lleva a incrementar la extracción a $400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y se aumenta en $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ más casi en forma constante hasta alcanzar un valor máximo de $1600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ cuando el almacenamiento en el vaso es de casi $3000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, de ahí hasta el nivel de los $4000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ tiene una fluctuación que alcanza los $800 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ para almacenamientos entre los $3000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y los $3200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, volviendo a alcanzar un valor de extracción de $1600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ al tener un volumen almacenado de $4000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y esto se mantiene constante hasta alcanzar el nivel máximo de almacenamiento del embalse. El volumen extraído en la segunda quincena de mayo tiene un comportamiento similar al de la primera, solo que el intervalo en el que disminuye la extracción comprende almacenamientos entre los $3000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y los $3200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y el valor mínimo de extracción es de $1400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. En resumen, en la operación mensual, el volumen máximo que se podría extraer para un almacenamiento en el vaso de $3000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ serían $1000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pero en forma quincenal se podrían extraer $1600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en la primera quincena y otros $1600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en la segunda.
- Para el mes de diciembre, en el caso de la operación mensual, el valor mínimo a extraer es de $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y el máximo de 1200; en el caso de las reglas de operación con un paso de tiempo de quince días, lo mínimo que se puede extraer $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en la primera quincena y otros 200 en la segunda; lo máximo que se puede extraer por quincena para almacenamientos superiores a los $5000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ va de $400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a los $1200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
- Para los meses de agosto y septiembre, tanto en la operación mensual como en la quincenal el valor máximo que se puede extraer está limitado a la capacidad de las turbinas, que en este caso es de $3200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en un mes. Para el mes de septiembre lo que se puede resaltar es que la operación quincenal es más conservadora para valores de almacenamiento entre $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y $1600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pidiendo solo extraer $600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y $400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ mientras que la política mensual pide como extracción mínima $1800 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ cuando el almacenamiento en la presa es de $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

El siguiente paso es para cada uno de los 5 ensayos simular el funcionamiento del sistema usando el archivo histórico de entradas quincenales con un intervalo de tiempo de simulación de quince días y las reglas de operación obtenidas con el mismo paso de tiempo. Para cada ensayo se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 | Comparación de resultados con estudios anteriores.

	Derrame ($1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$)	Déficit ($1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$)	Almacenamiento mínimo ($1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
Mendoza et al., 2016	11320.2	0.0	271.0	144
Mendoza et al., 2017	10675.2	470.1	0.0	144
Ensayo 1	6902.6	4237.1	0.0	141
Ensayo 2	8565.0	2193.0	0.0	141.31
Ensayo 3	8296.83	1976.02	0.0	141.72
Ensayo 4	8296.83	1976.02	0.0	141.72
Ensayo 5	8974.98	1731.71	0.0	141.96

Al comparar los resultados de los 5 ensayos con los de los estudios de Mendoza et al., del 2016 y del 2017, se puede observar lo siguiente:

- a) El estudio del 2016 es el único que no presenta déficit en la operación del sistema pero es el que mayor derrame tiene. Si se suma el derrame y el déficit en cada uno de los 5 ensayos se tiene $11139 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en el ensayo 1, $10758 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ para el 2, $10272 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en el ensayo 3 y el 4, y de $10705 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en el quinto. En todos los casos el volumen total entre déficit y derrame en los 5 ensayos es inferior al total derramado en el estudio comparativo. Si se analiza el desempeño con el del 2017, también son mejores los resultados de los 5 ensayos diseñados.
- b) De los 5 ensayos se puede ver que entre el 3 y el 4 no existe ningún tipo de diferencia y son los que mejor desempeño tienen respecto al balance que se busca entre evitar presencia de déficits y derrames. El ensayo 5 tiene un mejor control del evento de déficit que el 3 pero la disminución de casi $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ se ven reflejados de manera negativa en el aumento en $700 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en la variable derrame.
- c) Tanto en los estudios del 2016, el del 2017 y estos 5 nuevos ensayos, la variable de energía promedio es la que menor variación tiene, tal parece que a pesar de que tanto en el estudio del 2017 como en los 5 ensayos presentes el que se alcance en varios años el valor mínimo de almacenamiento se ve compensado con niveles promedio más altos durante toda la operación.

CONCLUSIONES

El estudio mostró que es posible obtener mejores resultados con un paso de tiempo corto, en este caso en particular, el análisis estadístico usando volúmenes de ingreso quincenal dio mejores resultados que al usar los datos mensuales. También se pudo observar que agrupar los meses del año buscando que las medias de los grupos sean parecidas puede llevar a tener uno o varios meses en el grupo cuyo ingreso promedio sea muy distinto al del resto a pesar de que se trate de meses integrantes de una misma época (lluvia o estiaje), esto conducirá a escenarios en los que se pueden tener ingresos superiores al promedio del grupo pero la política estará limitada y no se extraerá lo que realmente se podría.

REFERENCIAS

- Bellman, R. 1957. *Dynamic Programming*. Princeton University Press. Princeton, NJ. USA.
- Butcher, W. S. (1971). Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation. *Water Resources Bulletin*. 7(1). 115-123.
- Cai, X., D. C. McKinney and L. S. Lasdon. (2001). Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. *Advances in Water Res.* 24: 667-676.
- Chandramounli, V. and H. Raman. (2001). Multireservoir modeling with dynamic programming and neural networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 127(2). 89-98.
- Chang, F. J., L. Chen and L. C. Chang. (2005). Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Process*. 19: 2277- 2289.
- Cheng, C. T., W. C. Wang, D. M. Xu and K. W. Chau. (2008). Optimizing Hydropower Reservoir Operation Using Hybrid Genetic Algorithm and Chaos. *Water Resour Management*. 22: 895- 909.
- Chow, V. T. and Cortes-Rivera, G. (1974). *Applications of DDDP in Water Resources Planning*. Research Report 78. Urbana. University of Illinois. Water Resources Center.
- CONABIO. 2017. Regiones Terrestres Prioritarias de México (RTP 116), El Infiernillo. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_116.pdf
- Mendoza, R., Domínguez, R. y Arganis, M. 2012. Influencia de curvas guía en las políticas de operación para el manejo de un sistema hidroeléctrico. *Memorias del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 9-12 Septiembre, San José, Costa Rica.

Mendoza, R., Arganis, M. y Domínguez, R. 2016. Efecto de la variación por etapa en los coeficientes de castigo para obtener reglas de operación: presa El Infiernillo, Mich., México. *Memorias del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 28-30 Septiembre, Lima, Perú.

Mendoza, R., Arganis, M. y Domínguez, R. 2017. Análisis de la inclusión de la variabilidad temporal del coeficiente de autocorrelación en la simulación de un sistema hidroeléctrico en México. *Memorias del XIII Congreso Internacional de Hidráulica*, 21-25 Marzo, La Habana, Cuba.

Nandalal, K. D. W. and J. J. Bogardi. (2007). *Dynamic Programming based Operation of Reservoirs: Applicability and Limits*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

Sánchez Mora, A. M. (2011). De Anzaldúas a El Infiernillo (1950-1964). Breves apuntes sobre la contribución de José Luis Sánchez Bribiesca a la ingeniería de grandes presas. *Revista Digital Universitaria* [en línea]. Vol. 12, No.2 Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art12/index.html>. ISSN: 1607-6079.