



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

PROGRAMA GENÉRICO DE MODELACIÓN DE EMBALSES, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MS EXCEL – VISUAL BASIC

Memoria de Título presentada por

Tomás Andrés Gómez Peralta

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Vivian Aranda Núñez

Agosto de 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

TÍTULO DE LA TESIS:

**PROGRAMA GENÉRICO DE MODELACIÓN DE EMBALSES,
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MS EXCEL – VISUAL BASIC**

AUTOR:

TOMÁS ANDRÉS GÓMEZ PERALTA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Prof. GuíaVivian Aranda Núñez.....

Nombre Miembro 1 ComisiónPedro Kamann Chacana.....

Santiago, Chile, Agosto de 2021

PROGRAMA GENÉRICO DE MODELACIÓN DE EMBALSES, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MS EXCEL - VBA

Tomás Gómez Peralta¹, Vivian Aranda Núñez¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

1. RESUMEN

La explotación del recurso hídrico en la actualidad se ha visto en un incremento constante, debido a la actividad humana, denotada en un constante crecimiento del sector industrial, agrícola y sanitario. Luego, ante la disminución de la cantidad de agua almacenada en acuíferos y glaciares, asociadas al aumento de demanda y variaciones climáticas extremas dado el calentamiento global en el planeta, se exterioriza la existencia clara de una crisis hídrica desarrollada dentro del territorio chileno.

Luego, precede la necesidad plausible del aprovechamiento asertivo de los recursos existentes, tanto en términos naturales como también de infraestructura disponible. Pues, bajo una mirada global, se observa que la planificación de acumulación y distribución de agua, tanto para regadío como consumo humano, carece de certeza calculista y de gestión, en términos de proyección para varias localidades dentro del territorio chileno, generando un aumento de costos en términos económicos y sociales.

En consideración de la crisis hídrica actual, y el gran costo económico que implica generar nuevas instalaciones de acumulación y distribución de agua, se propone mejorar el comportamiento actual del sistema, mediante un aumento de eficiencia conciso, entregando a plena disposición una herramienta que permita representar un eslabón crucial, relacionado al trabajo y renderización de la optimización del aprovechamiento del agua, mediante la simulación de todo tipo de embalses, existentes a lo largo de todo Chile.

Luego, se propone crear una herramienta que permita, de forma práctica y concisa, la modelación de un embalse genérico, mediante la aplicación de MS Excel – Visual Basic, una plataforma de fácil acceso para estudiantes, académicos y empresas relacionadas al rubro. El fin principal, corresponde a generar un programa, que permita modelar el comportamiento principal de un embalse, definido según la simulación de central hidroeléctrica y dos tipos de operación simulada, referentes a un enfoque tradicional y al estado del arte, respectivamente.

2. OBJETIVOS Y PROPUESTA

2.1. Objetivos

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se tiene que el objetivo propuesto corresponde a generar un aumento de eficiencia la posibilidad de reinterpretar el método de funcionamiento de los embalses que existen actualmente en Chile. Luego, se propone realizar un trabajo que contenga parte de los 2 ejes principales mencionados a continuación:

- Aprovechamiento eficiente del recurso hídrico para regadío y consumo humano adquirido mediante embalses
- Análisis y posibilidad de reinterpretación del método de funcionamiento de una central hidroeléctrica, mediante la simulación de su infraestructura

2.2. Propuesta

Con el fin de cumplir parte de los 2 ejes mencionados anteriormente, se propone generar una herramienta que permita realizar una operación simulada de embalses, mediante la generación de un programa basado en métodos numéricos, utilizando la plataforma Visual Basic en Excel.

Debido a que existe una gran cantidad de variables que influyen en la generación de una operación simulada de embalses, se propone generar un programa que realice lo siguiente:

- Solicitar datos de entrada respectivos al embalse en cuestión
- Procesar de manera interna los datos de entrada mencionados en el punto anterior

- Entregar resultados referentes a la operación simulada, como el caudal de salida aprovechable para consumo humano y regadío, como también la generación de energía respectiva

3. EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA – CONCEPTOS Y PROGRAMACIÓN

De acuerdo con los alcances del programa mencionado anteriormente, se presenta a continuación, de manera acotada, los aspectos principales de su funcionamiento.

3.1. Diagrama de flujo

Primeramente, se presenta un esquema que define las variables principales utilizadas en la simulación del embalse:

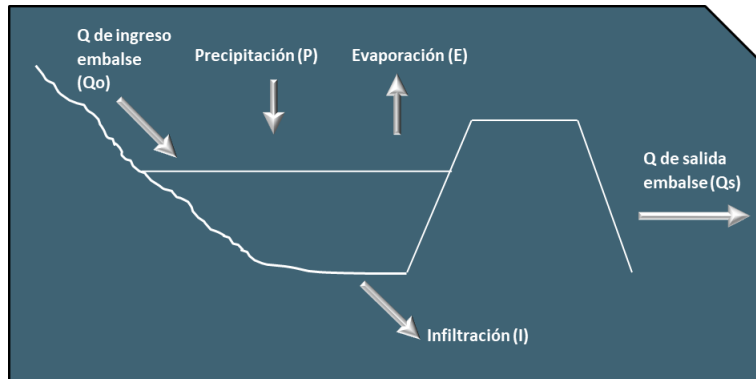


Figura 1: Diagrama explicativo de parámetros relevantes utilizados para modelación de embalses

Luego, se presenta un diagrama de flujo, acotando inputs, procesamiento de datos y outputs del programa realizado.

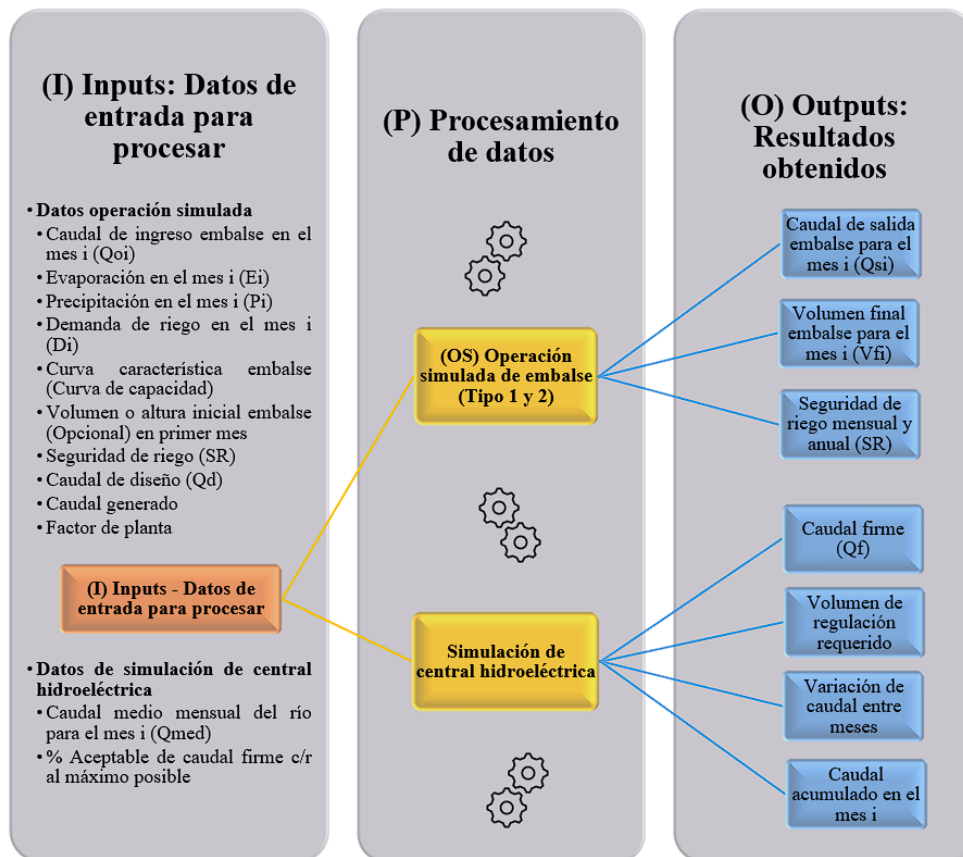


Figura 2: Diagrama de flujo, donde se detallan inputs, proceso de datos y outputs respectivos al modelo realizado

3.2. Métodos de simulación utilizados en programación Visual Basic

En el presente apartado se describe el marco teórico, de acuerdo con los métodos numéricos programados en la plataforma Visual Basic, para simulación de un embalse genérico. Luego, se presenta un diagrama conceptual con los nombres y distribución de los modelos realizados:

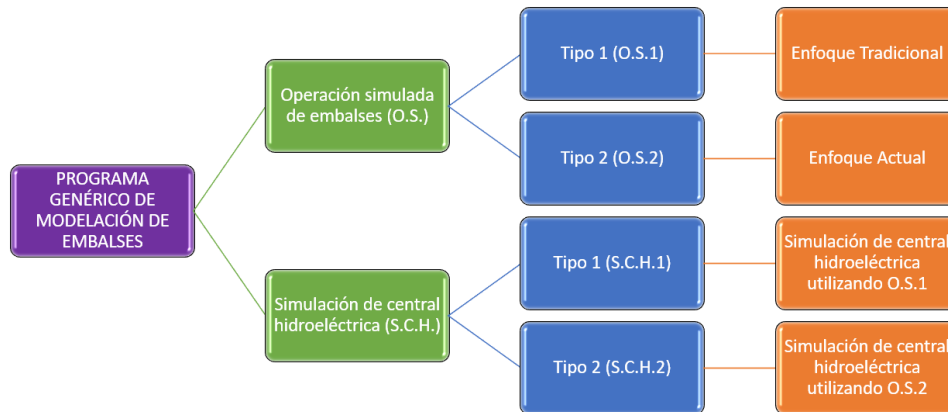


Figura 3: Diagrama conceptual, donde se indica nombres y característica principal de cada modelo disponible en el programa realizado

Luego, se explica los tópicos enunciados en la Figura 3, en cada una de las secciones que componen al Capítulo 3, de acuerdo con el orden presentado a continuación:

- **Capítulo 3.2.1:** Operación simulada de embalses Tipo 1 (O.S.1)
- **Capítulo 3.2.2:** Operación simulada de embalses Tipo 2 (O.S.2)
- **Capítulo 3.2.4:** Simulación de central hidroeléctrica Tipo 1 (S.C.H.1)
- **Capítulo 3.2.5:** Simulación de central hidroeléctrica Tipo 2 (S.C.H.2)

3.2.1. OPERACIÓN SIMULADA DE EMBALSES TIPO 1 (O.S.1)

La operación simulada de embalses tipo 1 (O.S.1) entrega los caudales de salida de cada mes, mediante la aplicación tradicional de métodos numéricos, los que ejecutan un funcionamiento de infraestructura basado en una cota fija de rebalse (Independiente de la demanda requerida), procesando principalmente los datos de entrada nombrados a continuación:

- Caudales de entrada de cada mes para el período de análisis requerido
- Valores de precipitación y evaporación de cada mes respectivos a la zona de análisis
- Volumen de regulación y curva característica del embalse

El Marco Teórico y ecuaciones utilizadas se describen en el presente capítulo, mientras que los resultados, manual de aplicación y análisis respectivos se encuentran disponibles en la sección “5. Ejecución del programa – Manual de utilización y resultados”.

3.2.1.1. Marco Teórico (O.S.1)

A continuación, se presenta la definición algebraica de la modelación numérica utilizada para la operación simulada de embalses Tipo 1:

- Se posee una función que define la curva característica del embalse, correspondiente a:

$$V = f(H) \quad (1)$$

- o Donde V es el volumen del embalse [m^3] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m].

- Luego, la curva del espejo de agua corresponde a:

$$A = \frac{d}{dH}(f(H)) \quad (2)$$

- Donde A es el área del espejo de agua del embalse [m^2] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m]

Considerando lo anterior se realiza el siguiente balance:

$$Q_{entrada} + P - E - R - I - Q_{demanda} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3)$$

Donde:

- $Q_{entrada}$ es el caudal del canal alimentador en [$\frac{m^3}{s}$]
- P es la precipitación en [m]
- E es la evaporación en el embalse en [m]
- R corresponde al rebalse en [m^3]
- I es la infiltración del embalse en [m^3]
- $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ la variación del volumen en el tiempo

Los datos de entrada para esta simulación son los calculados anteriormente para la situación presente. Luego, para llevar a cabo la operación simulada de embalse, se debe realizar el procedimiento definido a continuación:

1. En caso de que no se entregue volumen inicial, proponer un $V_i = \frac{V_{max}}{2}$
2. De la ecuación (1) obtener H_i
3. De la ecuación (2) obtener A_i
4. Se aproxima que el área se mantiene constante
5. Se obtiene el V_f del mes aplicando (3) para $dt = 1 \text{ mes}$

$$V_f = V_i + V_{rio} + P_i \cdot A_i - E_i \cdot A_i - D \cdot dt \quad (4)$$

6. Con (1) se obtiene H_f y con (2) A_f
7. Se calcula un nuevo volumen con:

$$V_f = V_i + V_{rio} + P_i \cdot \frac{A_i + A_f}{2} - E_i \cdot \frac{A_i + A_f}{2} - D \cdot dt \quad (5)$$

8. Se obtiene el déficit como:

$$Déficit = \begin{cases} V_f & V_f < V_{min} \\ 0 & V_f \geq V_{min} \end{cases} \quad (6)$$

9. El rebalse:

$$Rebalse = \begin{cases} 0 & V_f < V_{max} \\ V_f - V_{max} & V_f \geq V_{max} \end{cases} \quad (7)$$

10. Se obtiene un nuevo volumen final

$$V_{final} = \begin{cases} V_{min} & Deficit > 0 \\ V_f & Deficit = 0 \text{ y } Rebalse = 0 \\ V_{max} & Rebalse > 0 \end{cases} \quad (8)$$

11. Luego, a partir de lo anterior, se tiene que el caudal entregado para riego corresponde a:

$$Q_{riego} = \frac{V_f - V_{min}}{\Delta t} \quad (9)$$

12. De (1) se obtiene un H_{final} , y se repite la iteración desde el punto 7, obteniendo el último valor de H_{final}

3.2.2. OPERACIÓN SIMULADA DE EMBALSES TIPO 2 (O.S.2)

La operación simulada de embalses tipo 2 (O.S.2) entrega los caudales de salida de cada mes, mediante la aplicación contemporánea de métodos numéricos, los que ejecutan un funcionamiento de infraestructura basado en una “cota variable” de rebalse, adaptándose según la demanda requerida de riego o generación de energía respectiva.

El método, incorpora la posibilidad de utilizar el recurso hídrico de forma flexible y adaptable según el contexto referente a las necesidades y virtudes de la zona, mediante la acumulación o liberación de volumen para períodos de sequía (verano) o abundancia (invierno), ingresando la demanda respectiva de cada mes como parámetro de entrada.

Luego, el programa se utiliza ingresando principalmente los siguientes valores:

- Caudales de entrada de cada mes para el período de análisis requerido
- Valores de precipitación y evaporación de cada mes respectivos a la zona de análisis
- Volumen de regulación y curva característica del embalse
- Demanda de riego y/o generación de energía para cada mes del año

El Marco Teórico y ecuaciones utilizadas se describen en el presente capítulo, mientras que los resultados, manual de aplicación y análisis respectivos se encuentran disponibles en la sección “5. Ejecución del programa – Manual de utilización y resultados”.

3.2.2.1. Marco Teórico (O.S.2)

A continuación, se presenta la definición algebraica de la modelación numérica utilizada para la operación simulada de embalse Tipo 2:

- Se posee una función que define la curva característica del embalse, correspondiente a:

$$V = f(H) \quad (10)$$

- o Donde V es el volumen del embalse [m^3] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m].
- Luego, la curva del espejo de agua corresponde a:

$$A = \frac{d}{dH}(f(H)) \quad (11)$$

- o Donde A es el área del espejo de agua del embalse [m^2] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m]

Considerando lo anterior, mediante la aplicación de *Goalseek* (Solver incluido en plataforma Visual Basic), se resuelve la ecuación respectiva a volumen y altura de agua acumulada en el embalse, definido a continuación:

$$\text{Solve}(\{\text{Sistema de ecuaciones}\}; \text{incógnita}) \rightarrow \text{Solve}\left(\left\{\begin{array}{l} V_i = f(H_i) \\ f(H_i) = V_i \end{array}\right\}; H_i\right) \quad (12)$$

- o Donde V_i es el volumen del embalse [m^3] y H_i corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m]

Los datos de entrada para esta simulación son los calculados anteriormente para la situación presente. Luego, para llevar a cabo la operación simulada de embalse, se debe realizar el procedimiento definido a continuación:

1. En caso de que no se entregue volumen inicial, proponer un $V_i = \frac{V_{max}}{2}$
2. De la Ecuación (12) obtener H_i
3. De la Ecuación (11) obtener A_i
4. Se aproxima que el área se mantiene constante
5. Se obtiene el volumen del mes siguiente (V_{i+1}) para $dt = 1 \text{ mes}$ utilizando:

$$V_{i+1} = V_i + Qm_i + Pr_i * A_i - Ev_i * A_i \quad (13)$$

6. Se obtiene el volumen de riego (V_{riego_i}), restante (V_{res_i}) y de rebalse (V_{reb_i}) según las condiciones presentadas a continuación:

$$\{V_{riego_i}; V_{res_i}; V_{reb_i}\} \rightarrow \begin{cases} V_i \geq D_i \rightarrow \begin{cases} V_{riego} = D_i \\ V_{res_i} = V_i - D_i \end{cases} \rightarrow \begin{cases} V_{res_i} \geq V_{util} \rightarrow \begin{cases} V_{reb_i} = V_{res_i} - V_{util} \\ V_{res_i} = V_{util} \end{cases} \\ V_{res_i} < V_{util} \rightarrow V_{reb_i} = 0 \end{cases} \\ V_i < D_i \rightarrow \begin{cases} V_{riego_i} = V_i \\ V_{res_i} = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

7. El volumen de salida se obtiene con:

$$V_{salida_i} = V_{riego_i} + V_{reb_i} \quad (15)$$

8. Luego, se almacena la falla o cumplimiento de demanda de cada mes según:

$$falla_i \rightarrow \begin{cases} V_{riego_i} < D_i \rightarrow \text{No cumple} \rightarrow falla_i = 1 \\ V_{riego_i} \geq D_i \rightarrow \text{Cumple} \rightarrow falla_i = 0 \end{cases} \quad (16)$$

9. Con el valor de volumen V_{i+1} se repite el procedimiento desde el punto 1, hasta llegar al último mes de análisis

3.2.3. SIMULACIÓN DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA (S.C.H)

Con el objetivo de construir un programa genérico de modelación de embalses, se incluye como segundo pilar el desarrollo de simulación de central hidroeléctrica, para entregar el cumplimiento de los aspectos presentados a continuación:

- Procesar el caudal disponible para funcionamiento de infraestructura vigente de la central hidroeléctrica
- Definir los valores de producción respectivos al funcionamiento de la infraestructura vigente
- Utilizar el programa con el objetivo de analizar diversos escenarios de producción, planteando diversos puntos de funcionamiento y eligiendo el que mejor se adapte al contexto en cuestión

Inicialmente, se describirá el fundamento teórico principal de una central hidroeléctrica, para luego denotar su incorporación en el funcionamiento de las operaciones simuladas de embalses, acotadas en los capítulos anteriores (O.S.1 y O.S.2).

El Marco Teórico y ecuaciones utilizadas se describen en el presente capítulo, mientras que los resultados, manual de aplicación y análisis respectivos se encuentran disponibles en la sección “5. Ejecución del programa – Manual de utilización y resultados”.

3.2.3.1. Marco Teórico general para central hidroeléctrica (S.C.H)

En el presente capítulo, se describe el marco teórico general utilizado para la simulación de central hidroeléctrica. A continuación, se presenta la nomenclatura y significado de los términos que serán utilizados:

- Q_{ni} : Caudal natural del río analizado para el mes i
- Q_f : Caudal firme, correspondiente al valor que se puede obtener luego de la estación seca más crítica
- Q_D : Caudal de diseño utilizado en la obra

- Q_{g_i} : Caudal generado por la central hidroeléctrica para el mes i
- V_i : Volumen acumulado para el mes i
- V_{reg} : Volumen de regulación utilizado en la obra

Luego, la operación de una central hidroeléctrica se define principalmente por el conjunto de condiciones presentadas a continuación:

$$\text{Condiciones de operación } \{Q_{n_i}, Q_f, Q_D\} \rightarrow \begin{cases} Si (Q_{n_i} < Q_f) \rightarrow Q_g = Q_f \\ Si (Q_f < Q_{n_i} < Q_D) \rightarrow \begin{cases} Si V_i < V_{reg} \rightarrow Q_f < Q_g < Q_{n_i} \\ Si V_i = V_{reg} \rightarrow Q_g = Q_{n_i} \end{cases} \\ Si (Q_{n_i} \geq Q_D) \rightarrow \begin{cases} Si V_i < V_{reg} \rightarrow Q_f < Q_g < Q_D \\ Si V_i = V_{reg} \rightarrow Q_g = Q_D \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

Ya que se conoce el valor del volumen de regulación, las expresiones presentadas anteriormente se pueden expresar como caudales, incorporando las definiciones presentadas a continuación:

- Variación de caudal para cada mes i (δQ_i), definida por:

$$\delta Q_i = (Q_{n_i} - Q_f) \quad (17)$$

- Caudal acumulado para el mes i (Q_{acum_i}) definido por:

$$Q_{acum_i} \rightarrow \begin{cases} Si (Q_{acum_{i-1}} + \delta Q_i) \leq 0 \rightarrow Q_{acum_i} = Q_{acum_{i-1}} + \delta Q_i \\ Si (Q_{acum_{i-1}} + \delta Q_i) > 0 \rightarrow Q_{acum_i} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Entonces, incorporando las ecuaciones presentadas anteriormente al planteamiento general, se reescribe algunas condiciones de acuerdo con lo presentado a continuación:

- La situación de volumen del mes i menor al valor de regulación ($V_i < V_{reg}$), se puede escribir como condición de caudal acumulado mediante la expresión $Q_{Acum_i} < 0$
- El mes donde el volumen del mes i es igual al valor de regulación ($V_i = V_{reg}$), se puede expresar como un valor de caudal acumulado de valor nulo ($Q_{acum_i} = 0$)
- La situación de caudal natural mayor al valor firme ($Q_{n_i} > Q_f$), se puede escribir como $\delta Q_i > 0$
- La situación de caudal natural menor al valor firme ($Q_{n_i} < Q_f$), se puede escribir como $\delta Q_i < 0$. Lo anterior, se cumple debido a que en cualquier caso se generará déficit (Expresado por $Q_{acum_i} \leq 0$), por lo tanto, se cumplirá el contexto descrito por $Q_{acum_i} + \delta Q_i < 0$

Luego, se presenta resumidamente las expresiones obtenidas:

$$Si Q_{acum_i} < 0 \rightarrow \begin{cases} Si (Q_{n_i} < Q_f) \rightarrow Q_{g_i} = Q_f \\ Si (Q_f < Q_{n_i} < Q_D) \rightarrow Q_f < Q_g < Q_{n_i} \\ Si (Q_{n_i} \geq Q_D) \rightarrow Q_f < Q_{g_i} < Q_D \end{cases} \quad (19)$$

$$Si Q_{acum_i} = 0 \rightarrow \begin{cases} Si (Q_f < Q_{n_i} < Q_D) \rightarrow Q_{g_i} = Q_{n_i} \\ Si (Q_{n_i} \geq Q_D) \rightarrow Q_{g_i} = Q_D \end{cases} \quad (20)$$

Finalmente, aplicando los conceptos presentados anteriormente, se obtiene que la ley de operación para central hidroeléctrica se compone fundamentalmente de las siguientes expresiones:

$$\text{Condiciones generales de operación según } Q_{acum_i} \rightarrow \begin{cases} Si (Q_{acum_i} < 0) \rightarrow Q_{g_i} = Q_f \\ Si (Q_{acum_i} = 0) \rightarrow Q_{g_i} = \begin{cases} Si Q_{n_i} < Q_D \rightarrow Q_{g_i} = Q_{n_i} \\ Si Q_D \leq Q_{n_i} \rightarrow Q_{g_i} = Q_D \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

Luego, se añade la simulación de central hidroeléctrica en la construcción del programa, mediante la profundización de la operación simulada de embalses, aplicando principalmente los conceptos de caudal generado (Q_{gi}) y firme (Q_f).

3.2.4. SIMULACIÓN DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA TIPO 1 (S.C.H.1)

Se profundiza el programa de operación simulada de embalses tradicional (Tipo 1), mediante la incorporación de reglas utilizadas en la interpretación de central hidroeléctrica, de acuerdo con las ecuaciones y conceptos presentados en el capítulo “3.2.3.1.Marco Teórico general para central hidroeléctrica (S.C.H)”.

3.2.4.1. Marco teórico (S.C.H.1)

En consideración del marco teórico acotado en el capítulo “3.2.3.1.Marco teórico de operación simulada de central hidroeléctrica”, se presenta la definición algebraica de central hidroeléctrica utilizando la modelación numérica para la operación simulada de embalses Tipo 1:

- Se posee una función que define la curva característica del embalse, correspondiente a:

$$V = f(H) \quad (22)$$

- o Donde V es el volumen del embalse [m^3] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m].
- Luego, la curva del espejo de agua corresponde a:

$$A = \frac{d}{dH}(f(H)) \quad (23)$$

- o Donde A es el área del espejo de agua del embalse [m^2] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m]

Considerando lo anterior se realiza el siguiente balance:

$$Q_{entrada} + P - E - R - I - Q_{demanda} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (24)$$

Donde:

- $Q_{entrada}$ es el caudal del canal alimentador en [$\frac{m^3}{s}$]
- P es la precipitación en [m]
- E es la evaporación en el embalse en [m]
- R corresponde al rebalse en [m^3]
- I es la infiltración del embalse en [m^3]
- $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ la variación del volumen en el tiempo

Los datos de entrada para esta simulación son los calculados anteriormente para la situación presente. Luego, para llevar a cabo la operación simulada de embalse, se debe realizar el procedimiento definido a continuación:

13. En caso de que no se entregue volumen inicial, proponer un $V_i = \frac{V_{max}}{2}$
14. De la ecuación (1) obtener H_i
15. De la ecuación (2) obtener A_i
16. Se aproxima que el área se mantiene constante
17. Se obtiene el V_f del mes aplicando (3) para $dt = 1 \text{ mes}$

$$V_f = V_i + V_{rio} + P_i \cdot A_i - E_i \cdot A_i - D \cdot dt \quad (25)$$

18. Con (1) se obtiene H_f y con (2) A_f
 19. Se calcula un nuevo volumen con:

$$V_f = V_i + V_{rio} + P_i \cdot \frac{A_i + A_f}{2} - E_i \cdot \frac{A_i + A_f}{2} - D \cdot dt \quad (26)$$

20. Se obtiene el déficit como:

$$Déficit = \begin{cases} V_f & V_f < V_{min} \\ 0 & V_f \geq V_{min} \end{cases} \quad (27)$$

21. El rebalse:

$$Rebalse = \begin{cases} 0 & V_f < V_{max} \\ V_f - V_{max} & V_f \geq V_{max} \end{cases} \quad (28)$$

22. Se obtiene un nuevo volumen final

$$V_{final} = \begin{cases} V_{min} & Deficit > 0 \\ V_f & Deficit = 0 \text{ y } Rebalse = 0 \\ V_{max} & Rebalse > 0 \end{cases} \quad (29)$$

23. Luego, a partir de lo anterior, se tiene que el caudal de salida total disponible para utilización de la central hidroeléctrica (Q_{ch}) corresponde a:

$$Q_{ch} = \frac{V_f - V_{min}}{\Delta t} \quad (30)$$

24. El caudal disponible para utilización de la central hidroeléctrica es utilizado mediante las siguientes condiciones:

$$Q_{gi} = \begin{cases} Si (Q_{acum_i} < 0) \rightarrow Q_{gi} = Q_f \\ Si (Q_{acum_i} = 0) \rightarrow Q_{gi} = \begin{cases} Si Q_{ch_i} < Q_D \rightarrow Q_{gi} = Q_{ch_i} \\ Si Q_D \leq Q_{ch_i} \rightarrow Q_{gi} = Q_D \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

25. De (22) se obtiene un H_{final} , y se repite la iteración desde el punto 7, obteniendo el último valor de H_{final}

3.2.5. SIMULACIÓN DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA TIPO 2 (S.C.H.2)

Se profundiza el programa de operación simulada de embalses contemporáneo (Tipo 2), mediante la incorporación de reglas utilizadas en la interpretación de central hidroeléctrica, de acuerdo con las ecuaciones y conceptos presentados en el capítulo "3.2.3.1. Marco Teórico general para central hidroeléctrica (S.C.H)".

3.2.5.1. Marco teórico (S.C.H.2)

A continuación, se presenta la definición algebraica de la modelación numérica utilizada para la operación simulada de embalse Tipo 2:

- Se posee una función que define la curva característica del embalse, correspondiente a:

$$V = f(H) \quad (32)$$

- o Donde V es el volumen del embalse [m^3] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m].
- Luego, la curva del espejo de agua corresponde a:

$$A = \frac{d}{dH}(f(H)) \quad (33)$$

- o Donde A es el área del espejo de agua del embalse [m^2] y H corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m]

Considerando lo anterior, mediante la aplicación de *Goalseek* (Solver incluido en plataforma Visual Basic), se resuelve la ecuación respectiva a volumen y altura de agua acumulada en el embalse, definido a continuación:

$$\text{Solve}(\{\text{Sistema de ecuaciones}\}; \text{incógnita}) \rightarrow \text{Solve}\left(\left\{\begin{array}{l} V_i = f(H_i) \\ f(H_i) = V_i \end{array}\right\}; H_i\right) \quad (34)$$

- Donde V_i es el volumen del embalse [m^3] y H_i corresponde a la altura del pelo de agua del embalse en [m]

Los datos de entrada para esta simulación son los calculados anteriormente para la situación presente. Luego, para llevar a cabo la operación simulada de embalse, se debe realizar el procedimiento definido a continuación:

10. En caso de que no se entregue volumen inicial, proponer un $V_i = \frac{V_{max}}{2}$
11. De la Ecuación (11) obtener H_i
12. De la Ecuación (10) obtener A_i
13. Se aproxima que el área se mantiene constante
14. Se obtiene el volumen del mes siguiente (V_{i+1}) para $dt = 1 \text{ mes}$ utilizando:

$$V_{i+1} = V_i + Qm_i + Pr_i * A_i - Ev_i * A_i \quad (35)$$

15. Se obtiene el volumen de salida total disponible para utilizar en la central hidroeléctrica (V_{ch_i}), restante (V_{res_i}) y de rebalse (V_{reb_i}) según las condiciones presentadas a continuación:

$$\{V_{ch_i}; V_{res_i}; V_{reb_i}\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_i \geq D_i \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{ch_i} = D_i \\ V_{res_i} = V_i - D_i \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{res_i} \geq V_{util} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{reb_i} = V_{res_i} - V_{util} \\ V_{res_i} = V_{util} \end{array} \right\} \\ V_{res_i} < V_{util} \rightarrow V_{reb_i} = 0 \end{array} \right\} \\ V_i < D_i \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{ch_i} = V_i \\ V_{res_i} = 0 \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (36)$$

16. El volumen de salida se obtiene con:

$$V_{salida_i} = V_{ch_i} + V_{reb_i} \quad (37)$$

17. Luego, a partir de lo anterior, se tiene que el caudal de salida total disponible para utilización de la central hidroeléctrica (Q_{ch}) corresponde a:

$$Q_{ch_i} = \frac{V_{ch_i} [m^3]}{30 * 24 * 3600} \left[\frac{L}{S} \right] \quad (38)$$

18. El caudal disponible para utilización de la central hidroeléctrica (Q_{ch_i}) es obtenido mediante las siguientes condiciones:

$$Q_{g_i} = \left\{ \begin{array}{l} Si (Q_{acum_i} < 0) \rightarrow Q_{g_i} = Q_f \\ Si (Q_{acum_i} = 0) \rightarrow Q_{g_i} = \left\{ \begin{array}{l} Si Q_{ch_i} < Q_D \rightarrow Q_{g_i} = Q_{ch_i} \\ Si Q_D \leq Q_{ch_i} \rightarrow Q_{g_i} = Q_D \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (39)$$

19. Luego, se almacena la falla o cumplimiento de demanda de cada mes según:

$$falla_i \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{riego_i} < D_i \rightarrow No \text{ cumple} \rightarrow falla_i = 1 \\ V_{riego_i} \geq D_i \rightarrow Cumple \rightarrow falla_i = 0 \end{array} \right. \quad (40)$$

20. Con el valor de volumen V_{i+1} se repite el procedimiento desde el punto 1, hasta llegar al último mes de análisis

4. CONSTRUCCIÓN DE PLATAFORMA INTERACTIVA DE USO MEDIANTE VISUAL BASIC

Se analiza diferentes opciones de software para realizar el programa de modelación de embalses, donde radica la participación de tres pilares fundamentales, presentados a continuación:

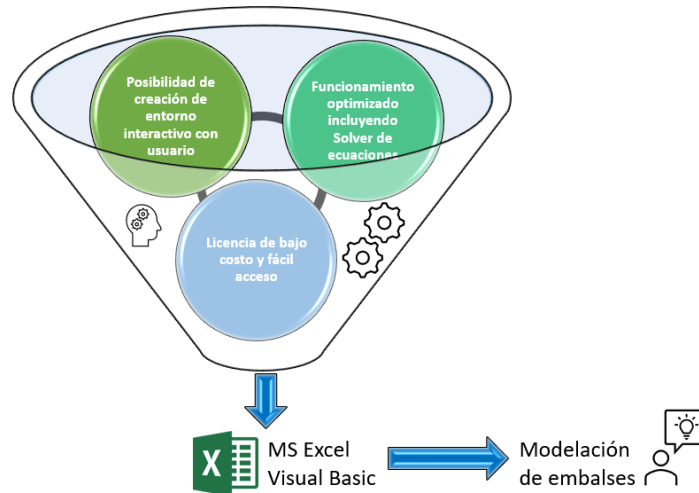


Figura 4: Criterios de elección para la realización de programa de modelación de embalses

Luego, tal y como se enuncia en el diagrama anterior, se decide optar por la utilización de MS Excel – Visual Basic, ya que permite crear un entorno interactivo con el usuario, lo que brinda la posibilidad de generar botones, mensajes y casillas de ingreso, además de incluir un Solver de ecuaciones optimizado, y estar disponible en la mayoría de las Universidades y oficinas de cálculo dedicadas a la ingeniería hidráulica, convirtiéndose en una plataforma de fácil acceso.

5. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA – MANUAL DE UTILIZACIÓN Y RESULTADOS

En el presente capítulo, se describe un manual de utilización del programa de modelación de embalses realizado en MS Excel – Visual Basic, considerando el orden requerido para el ingreso de parámetros de entrada, como también los resultados obtenidos y la verificación de funcionamiento realizada.

5.1.1. Manual de utilización de programa – Tipo 1 y 2

Para lograr una correcta utilización del programa de modelación de embalses, se debe seguir los pasos enunciados a continuación:

- 1) Instalar el software MS Excel, disponible en la página oficial de Microsoft
- 2) Abrir el archivo donde se encuentra el programa, de acuerdo con el tipo de modelación que se desee aplicar. Los archivos poseen el siguiente nombre y contenido:
 - a. **“Modelación de embalses Tipo 1.xlsx”**: Incorpora el código de operación simulada de embalses, en conjunto con la simulación de central hidroeléctrica, realizadas con enfoque tradicional (Tipo 1)
 - b. **“Modelación de embalses Tipo 2.xlsx”**: Incorpora el código de operación simulada de embalses, en conjunto con la simulación de central hidroeléctrica, realizadas con un enfoque actual referente al estado del arte en la disciplina (Tipo 2)
- 3) En la pestaña “Datos Años”, ingresar los caudales de entrada para cada mes de cada año del embalse en cuestión, utilizando las unidades $\left[\frac{m^3}{s}\right]$, los que deben poseer una nomenclatura como la presentada a continuación:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Año	abr	may	jun	jul	ago.	sep.	oct	nov	dic	ene	feb	mar
2	1961	0,008	0,035	0,031	0,08	0,125	0,053	0,025	0,029	0,01	0,008	0,006	0,007
3	1962	0,006	0,014	0,047	0,079	0,049	0,112	0,027	0,012	0,007	0,005	0,004	0,003
4	1963	0,004	0,005	0,061	0,153	0,051	0,064	0,034	0,01	0,006	0,003	0,002	0,003
5	1964	0,009	0,058	0,078	0,141	0,081	0,122	0,05	0,018	0,011	0,006	0,004	0,006
6	1965	0,006	0,084	0,128	0,041	0,018	0,011	0,009	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002
7	1966	0,01	0,114	0,162	0,062	0,111	0,147	0,036	0,029	0,012	0,008	0,006	0,005
8	1967	0,004	0,033	0,14	0,159	0,071	0,047	0,028	0,014	0,024	0,004	0,003	0,004
9	1968	0,003	0,029	0,071	0,088	0,034	0,019	0,017	0,01	0,006	0,006	0,004	0,006
10	1969	0,009	0,062	0,047	0,098	0,219	0,231	0,054	0,019	0,009	0,005	0,004	0,003
11	1970	0,005	0,016	0,16	0,187	0,085	0,025	0,019	0,011	0,007	0,004	0,005	0,004
12	1971	0,004	0,007	0,04	0,037	0,017	0,073	0,012	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003
13	1972	0,01	0,036	0,015	0,167	0,062	0,028	0,025	0,012	0,006	0,003	0,003	0,003
14	1973	0,001	0,04	0,018	0,053	0,083	0,029	0,014	0,007	0,004	0,002	0,001	0,002
15	1974	0,002	0,01	0,121	0,065	0,131	0,068	0,034	0,013	0,005	0,002	0,002	0,002
16	1975	0,021	0,054	0,103	0,191	0,108	0,076	0,033	0,016	0,008	0,004	0,003	0,004
17	1976	0,005	0,009	0,089	0,072	0,043	0,034	0,02	0,009	0,003	0,002	0,003	0,004
18	1977	0,003	0,003	0,058	0,133	0,102	0,181	0,064	0,02	0,011	0,005	0,004	0,004
19	1978	0,006	0,007	0,036	0,023	0,042	0,014	0,017	0,006	0,003	0,002	0	0,001
20	1979	0,001	0,004	0,019	0,114	0,13	0,19	0,037	0,025	0,013	0,005	0,003	0,003
21	1980	0,004	0,007	0,013	0,029	0,039	0,025	0,009	0,004	0,004	0,002	0,001	0,001
22	1981	0,008	0,017	0,03	0,216	0,213	0,049	0,03	0,015	0,011	0,005	0,003	0,003
23	1982	0,008	0,024	0,212	0,161	0,157	0,074	0,041	0,017	0,021	0,007	0,004	0,004
24	1983	0,006	0,037	0,035	0,06	0,033	0,037	0,017	0,007	0,003	0,001	0,001	0,002
25	1984	0,003	0,004	0,006	0,008	0,01	0,006	0,005	0,002	0	0	0	0
26	1985	0	0,011	0,175	0,082	0,094	0,064	0,02	0,008	0,001	0,001	0,001	0,001
27	1986	0,002	0,007	0,067	0,132	0,069	0,02	0,015	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001
28	1987	0,002	0,01	0,083	0,089	0,094	0,036	0,022	0,008	0,006	0,003	0,001	0,003
29	1988	0,003	0,065	0,545	0,184	0,138	0,169	0,063	0,034	0,015	0,009	0,007	0,006
30	1989	0,006	0,042	0,1	0,107	0,075	0,027	0,032	0,013	0,008	0,008	0,001	0
31	1990	0,001	0,04	0,022	0,094	0,026	0,04	0,021	0,008	0,007	0,003	0,002	0,003

Figura 5: Extracto de nomenclatura utilizada para ingreso de caudales de entrada en programa

- En la pestaña “Operación simulada”, se debe presionar el botón “Generar operación simulada” indicado en la Figura 6, el cual abrirá una ventana emergente (Figura 7), donde se debe ingresar los datos respectivos

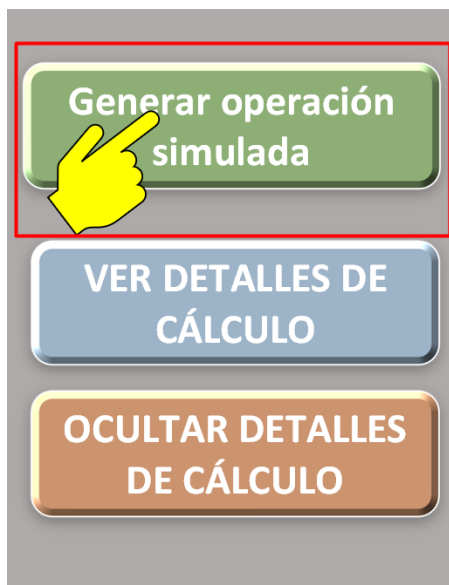


Figura 6: Botones disponibles en programa de modelación de embalses. Se indica presionar el botón “Generar operación simulada” para abrir cuadro de diálogo emergente

Ingreso de datos

Ingresar los valores definidos en las casillas presentadas a continuación:

VOLUMEN DE REGULACIÓN (Vreg) Y VOLUMEN MÍNIMO

Vreg [m3]

%Vmin/Vreg

Curva Embalse $V=A \cdot h^B$ [m3]

A

B

DEMANDA DE REQUERIMIENTOS DE CAUDAL SALIENTE (PARA CADA MES DE CADA AÑO)

Abril Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre Noviembre Diciembre Enero Febrero Marzo

PRECIPITACIÓN EMBALSE [mm] (PARA CADA MES DE CADA AÑO)

Abril Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre Noviembre Diciembre Enero Febrero Marzo

EVAPORACIÓN EMBALSE [mm] (PARA CADA MES DE CADA AÑO)

Abril Mayo Junio Julio Agosto Septiembre Octubre Noviembre Diciembre Enero Febrero Marzo

Importar datos y generar operación simulada de embalse

Figura 7: Cuadro de diálogo emergente al presionar el botón “Generar operación simulada”

- 5) Ingresar los valores que serán utilizados para modelar el embalse, en cada una de las casillas disponibles, de acuerdo con la descripción del parámetro indicado en el borde superior
- 6) Presionar el botón “Importar datos y generar operación simulada de embalse” acotado en la Figura 7, el cual ejecutará el código respectivo a la modelación Tipo 1 o 2, dependiendo del archivo que esté siendo utilizado

Luego de realizar los pasos descritos anteriormente, se ejecutará el código utilizando los valores de entrada que fueron ingresados en cada casilla. Los resultados de cálculo se encuentran disponibles en tres secciones (Indicadas en la Figura 8), correspondientes a:

- a. Sección de resultados principales donde se muestra los caudales de salida para cada mes de cada año, compuesta por:
 - i. Caudales de salida en formato de tabla (Figura 10)
 - ii. Caudales de salida en formato de gráfico (Figura 11)
- b. Sección de resultados relevantes obtenidos al ejecutar el código respectivo, los que se pueden observar y ocultar, presionando los botones “Ver detalles de cálculo” y “Ocultar detalles de cálculo”, indicados en la Figura 6

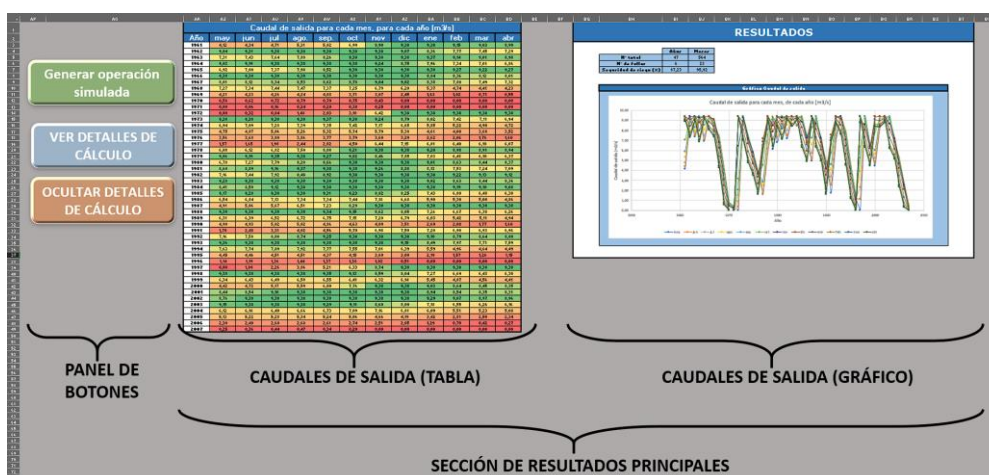


Figura 8: Secciones disponibles en el entorno del programa

	AF	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD
Caudal de salida para cada mes, para cada año [m3/s]													
Año	may	jun	jul	ago.	sep.	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	
1961	4,12	4,34	4,71	5,31	5,82	6,39	6,90	9,38	9,38	9,15	9,03	6,89	
1962	9,04	9,31	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,07	8,36	7,77	7,45	7,23	
1963	7,31	7,43	7,64	7,88	8,26	9,38	9,38	9,38	9,37	9,14	9,01	8,98	
1964	3,03	9,19	9,38	9,38	9,38	9,38	9,24	8,75	7,96	7,34	7,01	6,86	
1965	6,32	7,00	7,37	7,98	6,52	9,38	9,38	9,38	9,38	9,27	9,22	9,27	
1966	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	8,64	8,36	8,12	8,01	
1967	8,01	8,12	8,34	8,53	8,62	8,78	9,04	9,02	8,38	7,80	7,49	7,32	
1968	7,27	7,34	7,44	7,47	7,37	7,25	6,79	6,20	5,37	4,74	4,41	4,23	
1969	4,21	4,23	4,26	4,24	4,03	3,71	3,07	2,45	1,63	1,02	0,71	0,55	
1970	0,58	0,62	0,72	0,79	0,70	0,75	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1971	0,00	0,06	0,15	0,24	0,20	0,38	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1972	0,00	0,32	0,84	1,48	2,03	3,10	6,42	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	
1973	9,38	9,38	9,38	9,38	9,37	9,38	9,24	8,79	8,02	7,42	7,11	6,94	
1974	6,94	7,09	7,28	7,39	7,35	7,42	7,17	6,65	5,85	5,22	4,90	4,72	
1975	4,75	4,87	5,06	5,26	5,32	5,74	5,79	5,38	4,61	4,00	3,68	3,52	
1976	3,56	3,68	3,80	3,86	3,77	3,79	3,60	3,29	2,62	2,06	1,76	1,60	
1977	1,57	1,65	1,86	2,44	2,82	4,50	6,44	7,15	6,61	6,40	6,18	6,07	
1978	6,08	6,12	6,82	7,50	8,08	9,21	9,38	9,38	9,38	9,38	8,91	8,94	
1979	3,06	9,19	9,35	9,38	9,27	9,02	8,46	7,85	7,03	6,41	6,10	6,37	
1980	6,78	7,27	7,79	8,28	8,66	9,38	9,38	9,38	9,01	8,63	8,44	8,30	
1981	9,60	8,89	9,16	9,37	9,38	9,38	9,26	8,88	8,13	7,53	7,24	7,09	
1982	7,16	7,44	7,92	8,48	8,32	9,38	9,38	9,38	9,38	9,22	9,19	9,12	
1983	3,28	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,02	8,63	8,44	8,36	
1984	8,41	8,50	9,12	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,19	9,10	9,08	
1985	9,17	9,28	9,38	9,38	9,31	9,23	8,62	8,25	7,43	6,80	6,46	6,30	
1986	6,54	6,84	7,19	7,34	7,34	7,44	7,18	6,68	5,90	5,30	5,00	4,86	
1987	4,91	5,06	5,67	6,51	7,23	8,29	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	
1988	9,38	9,38	9,38	9,38	9,34	9,15	8,62	8,05	7,26	6,67	6,38	6,26	
1989	6,31	6,39	6,62	6,72	6,75	7,15	7,20	6,79	6,03	5,42	5,11	4,94	
1990	4,90	4,93	5,02	5,02	4,86	4,63	4,03	3,51	2,69	2,08	1,77	1,60	
1991	1,70	2,48	3,31	4,02	4,56	5,70	6,98	7,50	7,20	6,90	6,93	6,96	
1992	7,16	7,58	8,08	8,74	9,26	9,38	9,38	9,38	9,10	8,79	8,64	8,60	
1993	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,15	8,49	7,87	7,71	7,53	
1994	7,83	7,74	7,89	7,92	7,77	7,55	7,01	6,39	5,69	4,96	4,64	4,49	
1995	4,45	4,46	4,51	4,51	4,37	4,15	3,60	3,00	2,19	1,57	1,26	1,15	
1996	1,14	1,19	1,36	1,44	1,37	1,38	1,02	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	
1997	0,00	1,09	2,26	3,86	5,21	6,33	8,74	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	
1998	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	9,13	8,53	8,04	7,27	6,69	6,43	6,30	
1999	6,34	6,43	6,49	6,58	6,55	6,41	6,32	6,14	5,45	4,87	4,56	4,41	
2000	4,42	4,72	5,17	5,53	6,00	7,76	9,38	9,38	9,03	8,64	8,45	8,35	
2001	8,44	8,54	9,10	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38	8,94	8,54	8,35	8,31	
2002	6,78	6,38	6,38	6,38	6,38	6,38	6,38	6,29	6,07	6,07	6,07	6,07	
2003	9,15	9,38	9,38	9,38	9,29	9,11	8,60	8,00	7,18	6,55	6,26	6,16	
2004	6,12	6,18	6,40	6,66	6,73	7,03	7,16	6,81	6,03	5,51	5,23	5,08	
2005	5,13	5,22	5,28	5,34	5,24	5,06	4,86	4,19	3,42	2,81	2,50	2,34	
2006	2,30	2,40	2,60	2,69	2,61	2,74	2,51	2,05	1,29	0,70	0,42	0,27	
2007	0,25	0,38	0,44	0,47	0,34	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura 9: Tabla de caudales de salida obtenidos al aplicar el código de modelación de embalses



Figura 10: Gráfico de caudales de salida obtenidos al aplicar el código de modelación de embalses

5.1.2. Resultados obtenidos

Mediante la aplicación del programa realizado, se puede obtener cada detalle de la operación simulada de embalses, adquiriendo valores referidos al procesamiento de datos, tales como altura, área, volumen acumulado y déficit, como también, el parámetro que generalmente presenta mayor relevancia, correspondiente al caudal de salida del embalse.

Luego, con el objetivo de analizar el comportamiento obtenido, se presenta a continuación los gráficos de caudal de salida para cada mes de cada año, para ambos tipos de simulación:

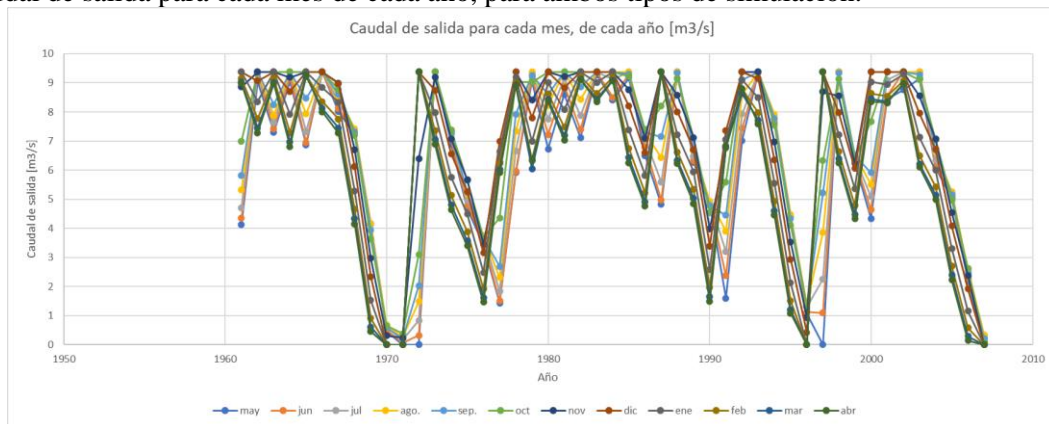


Figura 11: Caudal de salida para cada mes, de cada año, para el embalse Valle Hermoso, de acuerdo con los inputs ingresados, descritos en la Figura 7, para la simulación de embalses Tipo 1

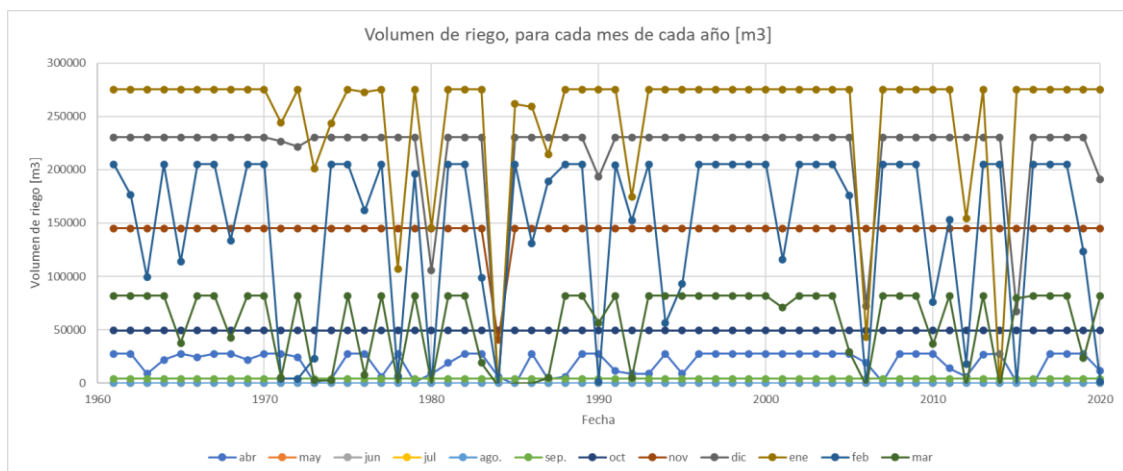


Figura 12: Volumen de riego para cada mes, de cada año, para el Embalse Empedrado, de acuerdo con los inputs ingresados, descritos en la Figura 7, para la simulación de embalses Tipo 2

Se puede observar que los resultados obtenidos son cualitativamente diferentes en las simulaciones de tipo 1 y 2. Lo anterior, se debe a las ventajas que propicia la utilización del estado del arte, al verter un caudal de riego dependiente del volumen disponible y la demanda requerida, superponiendo como prioridad satisfacer la demanda mes a mes, más no la acumulación de agua de forma arbitraria.

Por otro lado, se concluye que es totalmente conveniente el proceso de modernización de embalses que poseen un funcionamiento del tipo tradicional, ya que, al tener una cota fija de rebalse, el valor almacenado es menos flexible a cambios estacionales, siendo mucho más difícil superar los períodos de sequía.

Respecto de los resultados conseguidos al aplicar el programa, es destacable mencionar que para ambos tipos de simulación se ha realizado una verificación de inputs y outputs con la data disponible, validando tanto el tipo de modelación tradicional, como también el estado del arte, mediante los recursos bibliográficos referentes a la literatura actual, los cuales pueden ser adquiridos consultando las referencias bibliográficas, como también el sitio oficial de la dirección general de aguas (DGA).

Por otro lado, se concluye que el programa realizado tiene una gran gama de aplicaciones disponibles para continuar su desarrollo, considerando que se puede adaptar a cualquier sistema interconectado central, ya que solo requiere valores de entrada para funcionar de manera íntegra, entregando valores de salida de manera ordenada, dispuestos para conectarse con el próximo eslabón de infraestructura analizada.

Finalmente, se destaca la flexibilidad de manipulación que presenta el programa, ya que abre la posibilidad de trabajar directamente con el código interno de ejecución, lo que permite cambiar fácilmente las reglas de operación, incluir ciclos de simulación y automatizar la generación y cálculo de varios escenarios.

6. REFERENCIAS

- CARRASCO, Miguel. (2017). Optimización operacional del uso del embalse Lynch en el sistema de producción de agua potable de Punta Arenas.
- KAMANN, Pedro (2012). Apuntes del curso de Proyecto Hidráulico – CIV349. Departamento de Obras Civiles. UTFSM 2012.
- KAMANN, Pedro (2019). Apuntes del curso Máquinas y Sistemas Hidráulicos – CIV347. Departamento de Obras Civiles. UTFSM 2019.
- RODRÍGUEZ, Francisco (2018). Análisis de rompimiento de presas aplicado al embalse El Quillay, Río Combarbalá.
- MENA, Edwin (2015), Diseño y simulación hidráulica para una central hidroeléctrica con una capacidad de generación de 16.8 MW.
- SAID, Rodrigo (2008), Análisis social y económico para el diseño del embalse empedrado