



Artículo: COMEII-16015

II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO PARA DISEÑO DE PEQUEÑAS PRESAS DE GAVIONES

Eduardo Jiménez Hernández¹

¹Soluciones en Ingeniería y Tecnologías del Agua S.A. de C.V., Texcoco, Estado de México.
eddojh@gmail.com. (*Autor de correspondencia).

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de una librería de software libre para el diseño de pequeñas presas de gaviones con propósitos de conservación de suelos. Misma que se implementa en un programa para facilitar la tarea de diseño. La librería y el programa se desarrollaron en el lenguaje de programación Python, que es un lenguaje de alto nivel, libre, interpretado y multiplataforma. Se implementaron algoritmos para el cálculo del escurrimiento máximo del cauce, (usando el método racional o con el método simplificado de la huella máxima), para el diseño del vertedor rectangular de pared gruesa y para el análisis estabilidad en condiciones de deslizamiento y volcamiento. Se desarrolló un algoritmo propio para el dimensionamiento automático de la presa. Los resultados de los cálculos obtenidos con el programa son iguales a los que se obtienen con el uso de programas de hoja de cálculo. El uso del programa demostró tener ventajas en reducir el tiempo requerido para el diseño y los errores debidos a descuidos. Además, el programa proporciona al usuario un ambiente de trabajo agradable y especializado para este propósito.

Palabras clave adicionales: Software libre, Python, conservación de suelos, erosión, presas de gaviones.



Introducción

La formación de cárcavas en el terreno es un indicador del grado avanzado de erosión hídrica, su restauración se hace por medio de diversas prácticas de control de azolves, entre ellas se encuentran las presas de gaviones. El procedimiento de diseño de estas obras, requiere de una previa planeación de su ubicación en el cauce a ser restaurado, posteriormente se procede a realizar los cálculos necesarios para determinar sus dimensiones y estabilidad.

El dimensionamiento de presas de gaviones se realiza a partir de datos de la sección transversal del cauce en el sitio donde se desea construir la obra. Una vez dimensionadas, el análisis de estabilidad consiste en la aplicación de ecuaciones previamente establecidas. Por lo tanto, el procedimiento resulta sencillo de codificar en un programa de cómputo.

Al no existir un programa para realizar el diseño de presas de gaviones, este procedimiento se realiza con el uso de programas de cómputo como hojas de cálculo y de dibujo asistido por computadora. Sin embargo, resulta ser un procedimiento largo y propenso a errores de cálculo.

En el contexto anterior, el objetivo del presente trabajo fue implementar un algoritmo para automatizar la realización de los cálculos requeridos para el diseño de presas de gaviones y generar los reportes y planos correspondientes. El programa y su correspondiente librería se desarrollaron en el lenguaje de programación Python, que es un lenguaje de alto nivel, libre, interpretado y multiplataforma.

Materiales y métodos

La metodología que se utilizó para el desarrollo de la librería para el diseño de presas de gaviones es la presentada por Oropeza-Mota, (2012) en el curso de Conservación del suelo y del agua en el Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Para propósitos de este trabajo, la metodología se dividió en diferentes partes, mismas que a su vez se codificaron en módulos que realizan una tarea específica.

Escurrimiento máximo del cauce

Los escurrimientos máximos en pequeñas cuencas o áreas de drenaje pueden estimarse mediante dos procedimientos (Colegio de Postgraduados, 1991):

1. Método racional.
2. Método simplificado de las huellas máximas.

Método racional

Es un método muy utilizado particularmente en el diseño de drenajes urbanos, toma en cuenta el área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación.



El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1992). Una forma de estimar el tiempo de concentración (t_c) es mediante la fórmula de Kirpich (ecuación 1):

$$t_c = \frac{0.000325 \times L_c^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1)$$

Donde t_c es el tiempo de concentración (en horas); L_c es la longitud del cauce principal de la cuenca (en m); v es la velocidad media del agua en el cauce principal ($m s^{-1}$).

La ecuación de Kirpich es válida para cuencas cuya área es mayor a 200 ha, para cuencas de menor superficie se recomienda usar la ecuación de Giandotti (1934) (citado por Vélez & Botero, 2011), que se muestra en la ecuación (2):

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_c}{25.3\sqrt{S \cdot L_c}} \quad (2)$$

Donde t_c es el tiempo de concentración (h); A es el área de la cuenca (km^2); L_c es la longitud del cauce más largo (km); S es la pendiente promedio del cauce principal ($m m^{-1}$).

La fórmula racional se expresa como se muestra en la ecuación (3):

$$Q = C_e \cdot i \cdot A \quad (3)$$

Donde C_e es el coeficiente de escurrimiento, que representa la fracción de la lluvia que escurre de forma directa; i es la intensidad de la lluvia de una frecuencia elegida para una duración igual al tiempo de concentración t_c (Bedient, Huber, & Vieux, 2008); Q es el gasto máximo posible que puede producirse con una lluvia de intensidad i en una cuenca de área A y coeficiente de escurrimiento C_e .

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se puede determinar por tres métodos, de los que se seleccionó el que está en función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual de la cuenca de estudio, por su facilidad de programación y disponibilidad de datos (Poder Ejecutivo-SEMARNAT, 2002). Se clasifican los suelos de la cuenca de estudio en tres diferentes tipos: A (suelos permeables), B (suelos medianamente permeables) y C (suelos casi impermeables) que se especifican en el Cuadro 1 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K del Cuadro 2.

Si en la cuenca de estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y



obtener el promedio ponderado de todas ellas. Una vez obtenido el valor de K , el coeficiente de escurrimiento anual C_e , se calcula mediante la ecuación (4) si K resulta menor o igual que 0.15 y con la ecuación (5) si K es mayor que 0.15.

Cuadro 1. Tipos de suelo para determinar el valor de K .

Tipo de suelo	Características
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Fuente: (Poder Ejecutivo-SEMARNAT, 2002).

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000} \quad (4)$$

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad (5)$$

Donde C_e es el coeficiente de escurrimiento, que representa la fracción de la lluvia que escurre de forma directa; K es un parámetro que se obtiene del Cuadro 2; P es la precipitación media anual (en mm).

Rango de validez: Las fórmulas se considerarán válidas para valores de precipitación anual (P) entre 350 y 2,150 mm.

Cuadro 2. Valores de K en función del tipo y uso del suelo.

Uso de suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.26	0.26
Cultivos:			
En hilera	0.24	0.24	0.24
Legumbres o rotación de pradera	0.27	0.27	0.27
Granos pequeños	0.30	0.30	0.30
Pastizal (Porcentaje del suelo cubierto o pastoreo):			
Más del 75% -Poco-	0.14	0.14	0.14
Del 50 al 75 % -Regular-	0.20	0.20	0.20



Uso de suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Menos del 50% -Excesivo-	0.28	0.28	0.28
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.07	0.07
Cubierto del 50 al 75 %	0.16	0.16	0.16
Cubierto del 25 al 50 %	0.24	0.24	0.24
Cubierto menos del 25%	0.12	0.12	0.12
Zonas urbanas	0.22	0.22	0.22
Caminos	0.26	0.26	0.26
Pradera permanente	0.17	0.17	0.17

Fuente: (Poder Ejecutivo-SEMARNAT, 2002)

Método simplificado de la huella máxima

El método simplificado de la huella máxima tiene la ventaja de no requerir datos de precipitación y se recomienda en cárcavas donde se observe claramente las huellas dejadas por los escurrimientos máximos que se hayan presentado (Colegio de Postgraduados, 1991).

El método parte de la ecuación de continuidad (ecuación 6):

$$Q = A_h \cdot v \quad (6)$$

Donde Q_{max} es el gasto máximo de diseño ($m^3 s^{-1}$); A_h es el área hidráulica del cauce (m^2); v es la velocidad del escurrimiento ($m s^{-1}$).

La sección transversal se obtiene por cualquier procedimiento topográfico. El área hidráulica se obtiene por medio de figuras geométricas conocidas. La velocidad del escurrimiento se determina en función de la ecuación de Manning (7):

$$v = \frac{1}{n} S^{1/2} R^{2/3} \quad (7)$$

Donde v es la velocidad del escurrimiento ($m s^{-1}$); S es la pendiente del cauce ($m m^{-1}$); R es el radio hidráulico (m); n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Y el radio hidráulico se calcula mediante la relación (8):

$$R = \frac{A_h}{P_m} \quad (8)$$

Donde A_h es el área hidráulica (m^2) y P_m es el perímetro mojado (m).



Diseño del vertedor

En función del escurrimiento superficial calculado se dimensiona el vertedor. En estructuras de gaviones, muros secos y mampostería hidráulica se utilizan vertedores rectangulares de cresta gruesa, cuyas dimensiones se encuentran mediante la ecuación (9):

$$H_v = \left[\frac{Q}{C \cdot L} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

Donde, H_v es la carga sobre el vertedor (m); Q es el escurrimiento máximo de diseño ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C es el coeficiente del vertedor (adimensional = 1.45) y L es la longitud del vertedor (m).

Como el valor del escurrimiento máximo Q es conocido, dado que se determina con alguno de los métodos presentados anteriormente, se proponen valores de longitud L y se obtiene como resultado la carga H_v .

Diseño de la colocación de gaviones

Finalmente, el método indica que se debe determinar la colocación de gaviones en función de la sección transversal del cauce, así como el número y tamaño de los mismos. El programa realizado no incluye ninguna función de colocación de gaviones.

Diseño estructural

El cálculo estructural de una presa de gaviones se realiza a partir de la sección crítica unitaria, es decir, que las dimensiones están referidas a la unidad de ancho del muro considerando el perfil de la Figura 1. La ubicación de la sección crítica unitaria se realiza mediante el cálculo del centroide de la presa de gaviones.

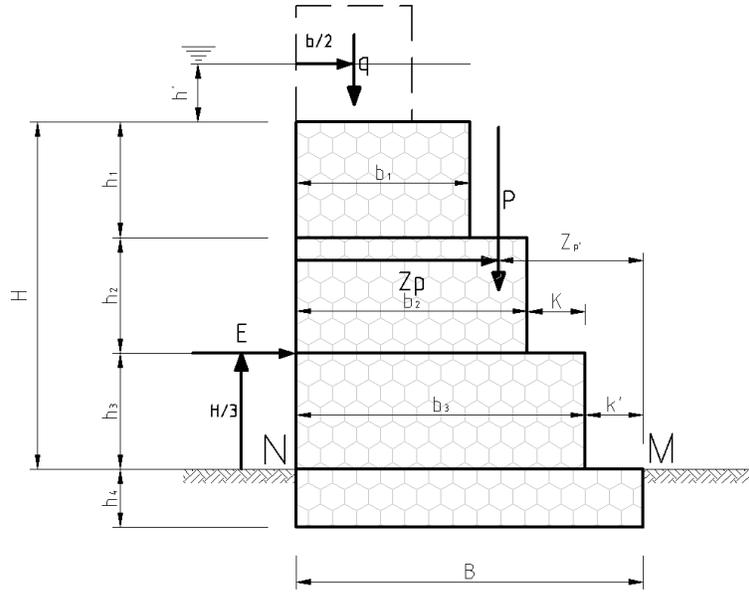


Figura 1. Elementos de una sección crítica unitaria típica de una presa de gaviones

De acuerdo con la figura, se define la siguiente nomenclatura para las ecuaciones que se presentan más adelante:

H = altura de la presa (m).

h' = altura de la carga sobre la cresta vertedora (m).

h_i = altura del tendido i de la presa (m).

B = longitud de la base de la presa (m).

b = longitud de la corona de la presa (m).

K = longitud constante del escalón (m).

k' = longitud del colchón amortiguador (m).

b_i = largo del tendido i (m).

q = peso de la lámina vertiente (t).

P = peso total de la sección crítica unitaria (t).

Z_p = brazo de palanca del peso de la sección crítica unitaria (m).

E = empuje hidrostático del agua (t).

μ = coeficiente de fricción (adimensional = 0.75 para piedra).

N, M = puntos de referencia aguas arriba y aguas abajo de la presa.

Un elemento que no aparece en la figura pero que es importante es el valor del ancho de la sección $a = 1$.

Peso de la lámina vertiente (q)

Es el peso del agua que pasa por el vertedor, de manera teórica, es la lámina formada por la longitud del vertedor, el ancho de la corona y la carga sobre la cresta vertedora. Esto se expresa con la ecuación (10):

$$q = a \cdot h' \cdot b \cdot w \quad (10)$$

Donde todas las variables se definieron en la nomenclatura de la Figura 1.



Su brazo de palanca (X_q) con respecto al punto N de la Figura 1, se expresa con la ecuación (11):

$$X_q = \frac{b}{2} \quad (11)$$

Donde todas las variables se definieron en la nomenclatura de la Figura 1.

Peso de la sección crítica unitaria (P)

Se hace el cálculo del volumen unitario multiplicando la altura de cada tendido por su ancho y sumando los resultados, esto se expresa con la ecuación ((12). Nótese que como el ancho del muro es unitario, este se omite en la ecuación.

$$V = \sum_{i=0}^n (h_i \cdot b_i) \quad (12)$$

Donde V es el volumen de la sección crítica unitaria, n es el número de tendidos de la presa y las demás variables se definieron en la nomenclatura de la Figura 1. El cálculo del peso específico aparente se hace mediante la ecuación (13):

$$\delta_a = \delta - w \quad (13)$$

Donde δ_a es el peso específico aparente ($t \cdot m^{-3}$); δ es el peso específico de la piedra ($t \cdot m^{-3}$); w es el peso específico del agua con sedimentos ($t \cdot m^{-3}$). Finalmente, una vez que se ha obtenido el volumen unitario y peso específico aparente, se puede obtener el peso de la sección crítica unitaria:

$$P = V \cdot \delta_a \quad (14)$$

Donde P es el peso total de la sección crítica unitaria (t) y V es volumen de la sección crítica unitaria (m^3).

Se obtiene su brazo de palanca (X_p) con respecto al punto N de la Figura 1 usando la ecuación (15):

$$X_p = Z'_p = B - Z_p \quad (15)$$

Donde Z_p es el brazo de palanca del peso de la sección crítica unitaria; b_i es la longitud de cada uno de los tendidos (m); h_i es la altura de cada uno de los tendidos (m); n = número de tendidos de la presa; V es el volumen de la sección crítica unitaria (m^3).

Y Z_p se obtiene con la ecuación (16):

$$Z_p = \frac{\sum_0^n \frac{(h_i \cdot b_i) b_i}{2}}{V} \quad (16)$$

Donde todas las variables se definieron en la nomenclatura de la Figura 1.



Empuje hidrostático (E)

El empuje hidrostático que ejerce el agua sobre la estructura se calcula con la ecuación (17):

$$E = S_m \cdot h \cdot w \quad (17)$$

Donde S_m es la superficie de mojado de la sección crítica unitaria (m^2); h es el centro de gravedad de la superficie de mojado (m). La superficie de mojado de la sección crítica unitaria se obtiene con la ecuación ((18):

$$S_m = H \cdot a \quad (18)$$

Y su centro de gravedad con la ecuación ((19):

$$h = \frac{H}{2} \quad (19)$$

Su brazo de palanca (X_E) con respecto al punto N de la Figura 1, se obtiene con la ecuación (20):

$$X_E = \frac{H}{3} \quad (20)$$

Condición de deslizamiento

La condición de deslizamiento establece que el peso del cuerpo de la presa y la lámina de agua vertiente (afectados por el coeficiente de fricción) deben ser mayores que el empuje hidrostático.

$$\frac{(q + P)\mu}{E} \geq 1 \quad (21)$$

Donde todas las variables se definieron en la nomenclatura de la Figura 1.

Condición de volcamiento

La condición de volcamiento a la que se debe someter la presa es que la relación entre el peso unitario de la misma y el empuje hidrostático sea mayor a la unidad, como se expresa en la ecuación (22):

$$\frac{P \cdot (X_P)}{E \cdot (X_E)} \geq 1 \quad (22)$$

Donde X_P es el brazo de palanca del peso de la presa; X_E es el brazo de palanca del empuje hidrostático y las otras variables se definieron en la nomenclatura de la Figura 1.

Condición de núcleo central

Establece que la resultante de todas las fuerzas debe estar en el tercio medio de la base de la presa para que exista estabilidad. Esto se expresa en la ecuación (23):

$$q \cdot (X_q) + P \cdot (Z_p) + E \cdot (X_E) \leq \frac{2}{3} (q + P) B \quad (23)$$

Donde todas las variables se definieron en la nomenclatura de la Figura 1.

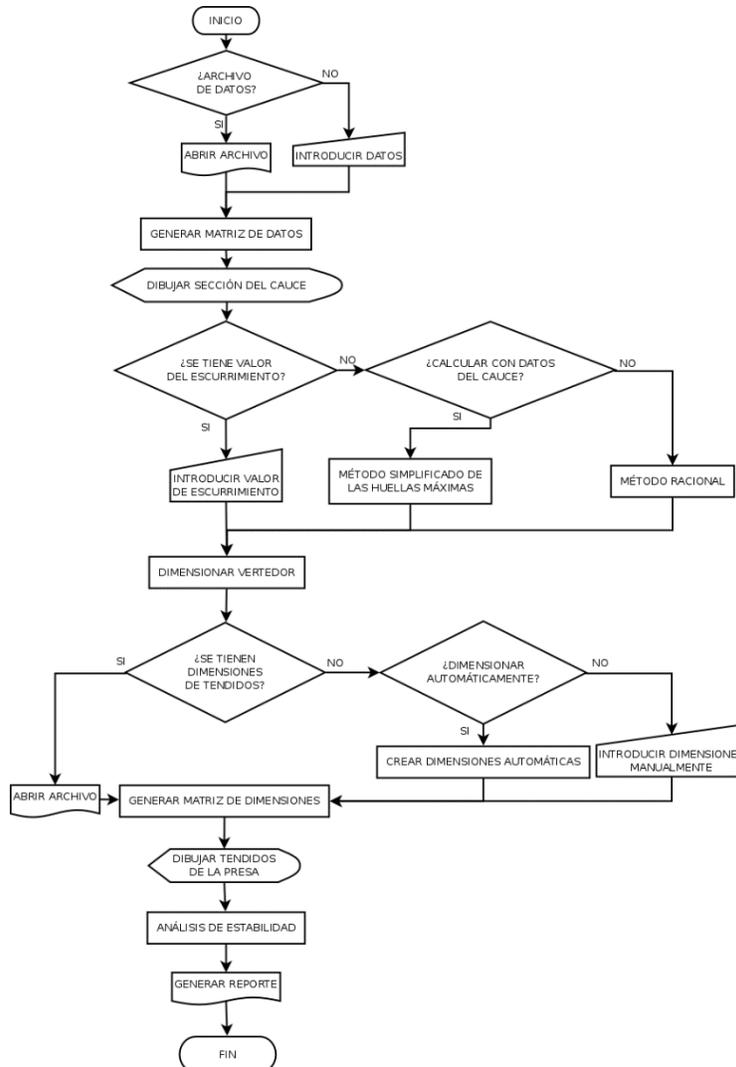


Figura 2. Diagrama de flujo para el desarrollo del programa de diseño de presas de gaviones.

Con base en la metodología expuesta, se procedió a desarrollar los algoritmos necesarios en el lenguaje de programación Python, llegando a obtener una librería con funciones especializadas para el diseño de presas de gaviones denominada *gdamslib*, además de otros archivos requeridos para la interfaz gráfica y el programa principal, los cuales se agruparon en un sistema computacional denominado *Gabbioni*.

Análisis y discusión de resultados

Como resultado principal de la implementación del algoritmo de Oropeza-Mota, (2012) para diseño de pequeñas presas de gaviones se obtuvo un programa de cómputo. Mismo que se integra de los siguientes módulos: módulo de entrada de datos, dibujo de la sección transversal del cauce, módulo de cálculo del escurrimiento máximo usando a) el método racional o b) el método simplificado de la huella máxima; módulo de diseño del vertedor, módulo de dimensionamiento de la presa, dibujo de la presa, módulo de análisis de estabilidad y reporte de resultados. Además se incluye un módulo básico de dibujo de planos.

Una vez codificado el programa se procedió a comparar los resultados obtenidos con un ejemplo realizado por Oropeza-Mota, (2012), mostrado en la Figura 3:

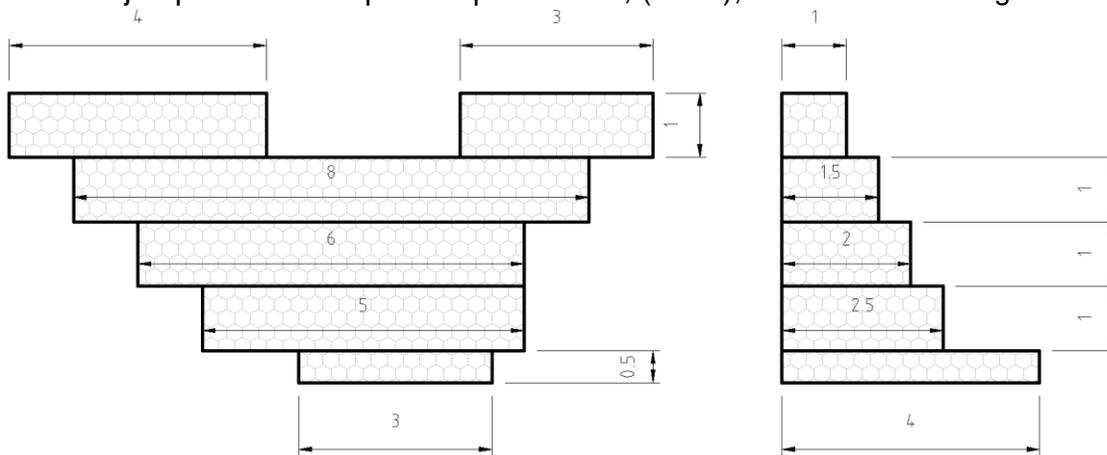


Figura 3. Vista de frente y de perfil de la sección crítica unitaria.

La comparación entre los resultados del ejemplo y los del programa se muestran a continuación:

Cuadro 3. Comparación resultados entre un ejemplo y el programa.

Valor de comparación	Resultados ejemplo	Resultados programa
Coordenada centroidal X	5.21	5.217
Coordenada centroidal Y	2.06	2.439
Coordenada centroidal Z	1.05	1.053
Peso de la lámina vertiente (t)	1.2	1.2
Peso de la sección crítica unitaria (t)	9.6	9.6
Empuje hidrostático (t)	5.4	5.4
Condición de deslizamiento	$1.5 \geq 1$	$1.5 \geq 1$
Condición de volcamiento	$4.83 \geq 1$	$4.8333 \geq 1$
Condición de núcleo central	$1.33 < 1.84 < 2.66$	$1.333 \leq 1.843 \leq 2.667$

Además de estos valores, los resultados de las condiciones contra volcamiento y deslizamiento son positivos, es decir, la presa es estable ante estas condiciones. Un resumen de los resultados del diseño de presas de gaviones que presenta el programa se muestra en la Figura 4.

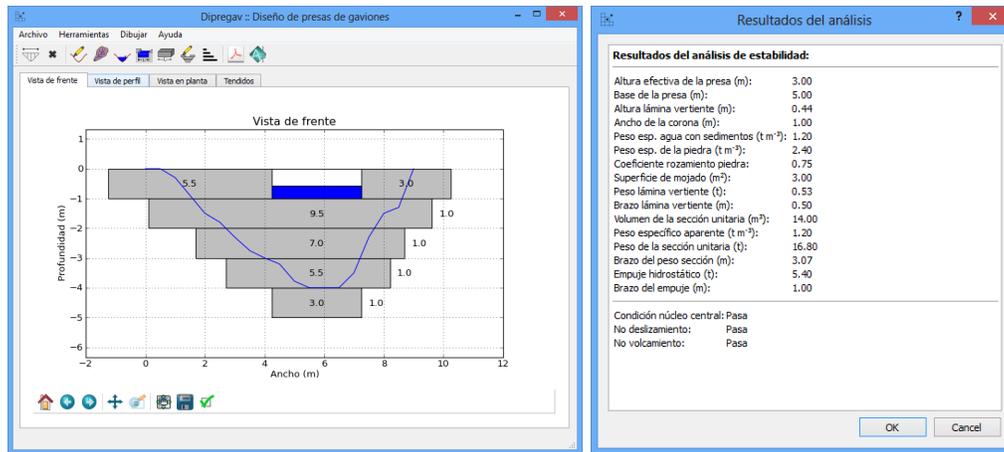


Figura 4. Resumen de resultados del diseño de presas de gaviones.

Conclusiones

Con el software desarrollado se proporciona al usuario, una herramienta que realiza de manera automática los cálculos del diseño de una presa de gaviones; así como los dibujos o gráficos necesarios. Los resultados del diseño realizado con el programa son presentados en formato de texto e imagen, lo que facilita la creación de memorias de cálculo y reportes.

Con el uso de esta herramienta el procedimiento de diseño de una presa de gaviones se realiza en menos tiempo, comparado con el uso de programas de hoja de cálculo, dibujo asistido por computadora y procesador de textos por separado. Además, se reduce considerablemente la ocurrencia de errores provocados por descuidos.

Después de haber comparado los resultados obtenidos con el programa *Gabbioni* y los cálculos efectuados en el diseño con hojas de cálculo se observa que efectivamente el resultado es prácticamente igual. Las pequeñas variaciones que se observan son causadas por errores de redondeo al efectuar los cálculos sin el programa. Por lo anterior se concluye que el programa *Gabbioni* es una herramienta confiable, precisa y funcional para el diseño de presas de gaviones

Referencias bibliográficas

- Aparicio, M. F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (primera ed.). México D.F: LIMUSA.
- Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2008). *Hydrology and foodplain analysis*. Prentice Hall.
- Colegio de Postgraduados. (1991). *Manual de conservación del suelo y del agua* (tercera ed.). Chapingo, México: Colegio de postgraduados.



Oropeza-Mota, J. (2012). Notas del curso de Conservación del suelo y del agua. México: Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.

Poder Ejecutivo-SEMARNAT. (2002). Conservación del recurso agua. *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000*. Diario Oficial de la Federación.

Vélez, U. J., & Botero, G. A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de La Quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*(165), 59-71.