



Determinación del tipo de vertedero más eficiente según la precisión de su ecuación teórica y de regresión respecto a los datos experimentales.

Determination of the most efficient type of landfill according to the precision of its theoretical and regression equation regarding the experimental data.

Oscar Andrés Higuera Rivera¹, Liseth Carolina Hernández Larrotta¹, David Orlando Erazo Ballesteros¹, Lady Julianalexandra Vásquez Delgado¹, Haimar Ariel Vega Serrano²

¹Estudiantes de Hidráulica, Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad Libre Seccional Socorro. oscar_130811@hotmail.com, lisethcarito@hotmail.com, daviderazo_1997@hotmail.com, julianavd97@hotmail.com,

²Ingeniero civil. Especialista en Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Docente Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre Seccional Socorro. haimar.vega@unilibre.edu.co

INNOVANDO EN LA U ISSN 2216 - 1236

RESUMEN

Introducción. Los vertederos se definen como estructuras hidráulicas sobre las cuales se descarga un líquido, estas estructuras son utilizadas para regular o medir caudales con el uso de ecuaciones teóricas o de regresión que son empleadas cuando no es posible realizar un aforo volumétrico, de allí nace la importancia de su exactitud. En el presente trabajo se determinó el error de las ecuaciones respecto a los datos adquiridos en el laboratorio mediante

Figura 1. Instalación del Vertedero Rectangular



aforos volumétricos en los vertederos tipo: rectangular, trapezoidal, triangular, circular y sutro. **Objetivo.** Determinar el tipo de vertedero más preciso, comparando los resultados de cada una de sus ecuaciones con los obtenidos en el laboratorio. **Metodología.** Primero, se verificó que el canal cumpliera con las condiciones necesarias y al momento de la instalación de los vertederos se les tomaron las medias correspondientes (B , b , θ , D , e , w), posteriormente, se instaló cada vertedero de la forma correcta y cubriendo posibles fugas para luego regular el caudal de salida del tanque que abastece el canal y así medir w y H_t , para realizar los aforos volumétricos con diferentes cargas hidráulicas, por último, se realizaron los cálculos respectivos, comparando resultados y hallando la ecuación más precisa. **Resultados.** Respecto a la ecuación teórica, el vertedero triangular presentó un error promedio de 8,6%, una desviación estándar de 7,08, un coeficiente de variación de 81,8%, un mínimo de 1,8 y un máximo de 29,4. En relación a la ecuación de regresión el vertedero circular presentó un error promedio de 2,2%, una desviación estándar de 2,14, un coeficiente de variación de 55,4%, un mínimo de 1,34 y un máximo de 4,22.

Conclusión. Respecto a la ecuación teórica, los vertederos más efectivos y eficaces fueron, el triangular (8,6% de error) y el el sutro (9,2% de error), mientras que, el menos efectivo y eficaz fue el trapezoidal (53,0% de error). Por otra parte, de acuerdo a la ecuación de regresión, los mejores vertederos fueron el circular (97,8% de precisión), y el sutro (97,7% de precisión); y los menos efectivos fueron: el rectangular (96,8% de precisión), y el trapezoidal (93,8% de precisión); debido a eso, el vertedero que se recomienda es el circular, además, todos los análisis presentados en las gráficas determinaron una relación directamente proporcional entre la carga hidráulica y el caudal; mientras que el coeficiente de descarga tendía a mantenerse constante entre un rango de valores determinados para cada vertedero sin presentar una variación considerable respecto a la carga hidráulica.

Palabras clave.

Aforo volumétrico, caudal, ecuación de regresión, ecuación teórica, estructura hidráulica, exactitud, precisión, vertedero.

ABSTRACT

Introduction:

Weirs are considered as hydraulic structures on which a liquid is discharged. These structures are employed to regulate or measure flow rates, with the use of theoretical or regression models, when it is not possible to perform a volumetric gauging –hence the importance of their accuracy–. In this study, the error of the equations with respect to the data obtained in the laboratory is determined by volumetric gauging in each type of weir: rectangular, trapezoidal, triangular, circular and sutro weir. **Objective:** To determine the most accurate type of weir, comparing the results of each equation with those obtained in the laboratory.

Methodology: First, it was verified that the weirs fulfilled the necessary conditions, and the corresponding measurements were taken at the time of the installation (B, b, θ , D, e, w). Then, each weir was installed in the proper way: covering possible leaks, regulating the flow of the tank that supplied the weir, and measuring w and Ht, all this to perform the volumetric gauging with different hydraulic loads. Finally, the calculations were done, comparing results, and finding the most accurate equation. **Results:** Regarding the theoretical equation, the triangular weir had an average error of 8.6%, a standard deviation of 7.08, a coefficient of variation of 81.8%, a minimum of 1.8 and a maximum of 29.4. In relation to the regression equation, the circular weir had an average error of 2.2%,

a standard deviation of 2.14, a coefficient of variation of 55.4%, a minimum of 1.34 and a maximum of 4.22).

Conclusion: regarding the theoretical equation, the most effective and efficient weirs were the triangular one (8.6% error) followed by the sutro one (9.2% error), while, the least effective and efficient weir was the trapezoidal (53.0% error). On the other hand, according to the regression equation, the best weir was the circular one (97.8% precision), followed by the sutro one (97.7% precision); and the least effective weirs, were the rectangular one (96.8% precision), and the trapezoidal (93.8% precision). Because of that, the recommended weir is the circular one. In addition, all the analyzes presented in the graphs determined a directly proportional relationship between the hydraulic charge and the flow, while the discharge coefficient tended to remain constant between a range of specific values for each weir without presenting a considerable variation with respect to the hydraulic charge.

Key Words

Volumetric capacity, flow, regression equation, theoretical equation, hydraulic structure, accuracy, precision, weir.

1. INTRODUCCIÓN

Según Sotelo (2014; p, 241) los vertederos (también llamados vertedores) se definen como estructuras hidráulicas sobre las cuales se descarga un líquido, estas estructuras son utilizadas para regular o medir caudales con el uso de ecuaciones teóricas o de regresión que son empleadas cuando no es posible realizar un aforo volumétrico, de allí nace la importancia de su exactitud. En el presente trabajo se determinó el error de las ecuaciones respecto a los datos adquiridos en el laboratorio mediante aforos volumétricos en cada tipo de vertedero.

Según Pérez (2016; p, 5) un vertedero es un dique o pared que presenta una escotadura de forma regular, a través de la cual fluye una corriente líquida. El vertedero intercepta la corriente, causando una elevación del nivel aguas arriba, y se emplea para controlar niveles (vertederos de rebose) y/o para medir caudales (vertederos de medida).

2. METODOLOGÍA

Las pruebas para la recopilación de los datos se realizaron en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Libre localizado en la Hacienda Majavita en el Socorro Santander.

El procedimiento seguido para realizar las pruebas en el laboratorio fue el siguiente:

1. Verificar que el canal cumpla con las condiciones necesarias para la instalación de cada vertedero.
2. Tomar las medias correspondientes del vertedero a instalar (B, b, θ, D, e)
3. Instalar cada vertedero de la forma correcta y cubriendo posibles fugas.
4. Regular el caudal de salida del tanque que abastece el canal.
5. Medir w y Ht, para realizar los aforos volumétricos con diferentes cargas hidráulicas a cada vertedero.
6. Realizar los cálculos respectivos, comparando resultados y hallando la ecuación más precisa.

Para cada vertero se estimaron seis caudales por cada vertedero se median siete aforos por caudal, de los cuales se omitieron el mínimo y el máximo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el laboratorio de calibración de vertederos se determinaron las ecuaciones teóricas, experimentales y de regresión lineal de cada tipo de vertedero mediante Excel, y una ecuación potencial con *Curve Expert 1.4*, para poder observar el comportamiento de las variables a evaluar.

3.1. Evacuación de regresión

A continuación se presentan los resultados de acuerdo a los objetivos.

3.1.1. Resultados de la regresión lineal vertedero rectangular

En la tabla 1 y figura 2 se presentan los resultados obtenidos del vertedero rectangular, en donde se relaciona la variación del caudal (l/s) respecto a la carga hidráulica (cm) teniendo en cuenta su coeficiente de descarga experimental.

La figura 2 muestra que, aunque los primeros datos de Q-H siguen la línea de tendencia, los últimos se alejan de ésta; aun así, posee un coeficiente de determinación de 99,56%. El caudal es directamente proporcional a la

carga hidráulica y el coeficiente de descarga tiende a mantenerse algo disperso, casi constante, entre 0,87 y 0,92.

Figura 2. Variación del caudal respecto de la carga hidráulica vertedero rectangular b=10,2 cm, w=26 cm B=33,7 cm

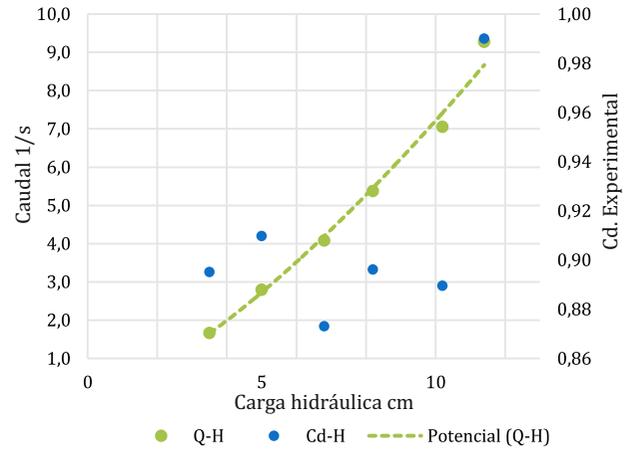


Tabla 1. Propiedades ecuación de calibración

$$Qr = 0,2842H^{1.4046}$$

$$R = 0,9977$$

| | | Mínimo | Máximo | |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|----------|
| D | Caudal | Q | 1,66 | 9,27 l/s |
| I | Profundidad | H | 3,5 | 11,4 cm |
| Coeficiente de correlación | | R | 0.9977 | |
| Diferencia del exponente en % | | 9,5% | | |

| | Cde | Error regresión |
|--------------------------|------|-----------------|
| Promedio | 0,91 | 3,73 |
| Mínimo | 0,87 | 0,45 |
| Máximo | 1,02 | 10,40 |
| Desviación estándar | 0,05 | 3,54 |
| Coeficiente de variación | 5,83 | 95,03% |

Según Moreno Mogollón, et al, (2015; p, 9), la figura del vertedero rectangular también evidenciaba poca dispersión de los datos correspondientes a una carga hidráulica baja, pero al aumentar la carga hidráulica los valores se alejaron considerablemente de la línea de tendencia, pues presentó un coeficiente de correlación de 0,9925 y un coeficiente de determinación de 98,50%; mientras que los datos de esta investigación presentaron un coeficiente de determinación de 0,9956 y un coeficiente de correlación de 0,9978; estos nuestros resultados presentaron mayor correlación de caudal respecto a la carga hidráulica.

Resultados de la regresión lineal vertedero trapezoidal

En la tabla 2 y figura 3 se presentan los resultados obtenidos del vertedero trapezoidal en donde se refleja la variación del caudal (l/s) respecto a la carga hidráulica (cm) teniendo en cuenta su coeficiente de descarga experimental.

Figura 3. Variación del caudal respecto de la carga hidráulica vertedero trapezoidal $b=5\text{ cm}$, $w=26,4\text{ cm}$ $B=34\text{ cm}$

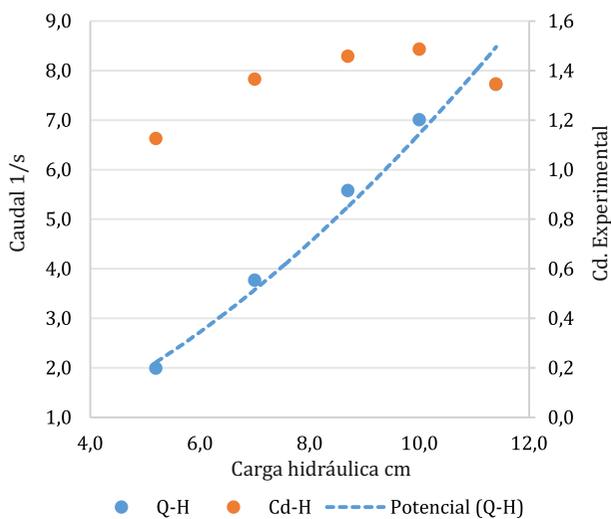


Tabla 2. Propiedades ecuación de calibración

$$Qr = 0,1143H^{1,7693}$$

$$R = 0,9916$$

| | | Mínimo | Máximo | |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|----------|
| D | Caudal | Q | 1,99 | 7,72 l/s |
| I | Profundidad | H | 5,20 | 11,4 cm |
| Coeficiente de correlación | | R | 0,9916 | |
| Diferencia del exponente en % | | 26,93% | | |

| | Cde | Error |
|--------------------------|-------|--------|
| Promedio | 1,36 | 6,19 |
| Mínimo | 1,13 | 4,07 |
| Máximo | 1,49 | 9,75 |
| Desviación estándar | 0,14 | 2,15 |
| Coeficiente de variación | 10,45 | 34,67% |

En la figura 3 se observa una notable dispersión de todos los datos de Q-H, con un coeficiente de determinación de 98,33%, siendo el más bajo entre todos los vertederos; aun así, la relación entre la carga hidráulica y el caudal sigue siendo directamente proporcional, mientras que, el coeficiente de descarga se mantiene constante entre 1,1 y 1,6.

En la figura de la ecuación de regresión obtenida del vertedero trapezoidal por Santos Santos, M., et.al. (2016; p, 4), se pudo evidenciar una notable dispersión de los datos del caudal respecto a la carga hidráulica, alejándose considerablemente de la línea de tendencia.

Resultados de la regresión lineal vertedero triangular.

En la tabla 3 y figura 4 se presentan los resultados obtenidos del vertedero triangular en donde se indica la variación del caudal (l/s) respecto a la carga hidráulica (cm) teniendo en cuenta su coeficiente de descarga experimental.

Figura 4. Variación del caudal respecto de la carga hidráulica vertedero triangular $b_e=24,58\text{ cm}$ $w=27,9\text{ cm}$ $B=33,8\text{ cm}$ $a=4,4\text{ cm}$ $H_v=46\text{ cm}$ $\theta=90^\circ$

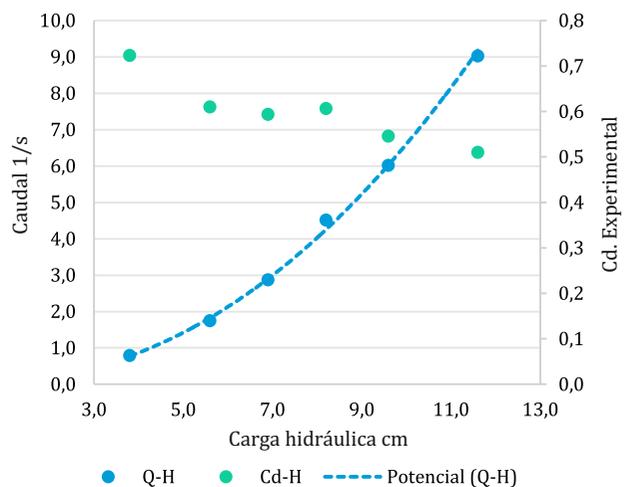


Tabla 3. Propiedades ecuación de calibración

$$Qr = 0,0401H^{2,2164}$$

$$R = 0,9992$$

| | | Mínimo | Máximo | |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|----------|
| D | Caudal | Q | 0,79 | 9,03 l/s |
| I | Profundidad | H | 3,8 | 11,6 cm |
| Coeficiente de correlación | | R | 0,9992 | |
| Diferencia del exponente en % | | 28,4% | | |

| | Cde | Error |
|---------------------------|-------|--------|
| Promedio | 0,60 | 2,47 |
| Mínimo | 0,51 | 0,18 |
| Máximo | 0,72 | 5,14 |
| Desviación estándar | 0,07 | 2,14 |
| Coefficiente de variación | 12,16 | 86,72% |

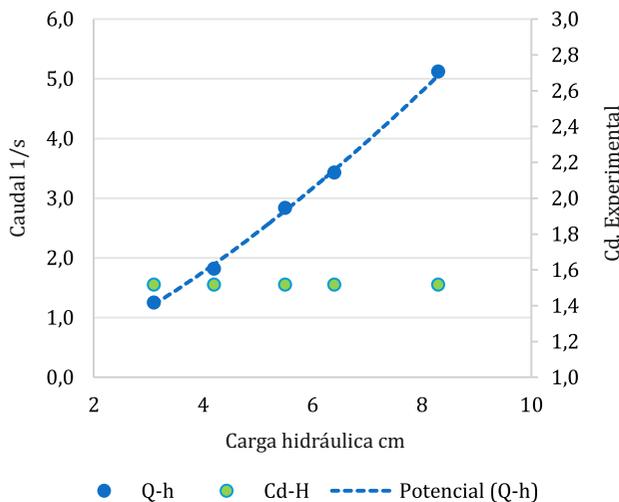
En la figura 4 se observa que la mayoría de datos Q-H siguen la línea de tendencia, la gráfica tiene un coeficiente de determinación de 99,85%; siendo el más alto entre todos los vertederos, el caudal aumenta proporcionalmente a medida que lo hace la carga hidráulica, el coeficiente de descarga se mantiene muy constante entre 0,5 y 0,7.

Según Moreno Mogollón et al. (2015; p, 10), la figura del vertedero triangular también presentó algunos datos que se apegaban a la línea de tendencia, e igualmente, otros que se alejaban considerablemente de ésta; evidenciando un coeficiente de correlación de 0,9937 y un coeficiente de determinación de 98,74%, mientras que, en la presente investigación el coeficiente de correlación fue de 0,9992 y el coeficiente de determinación de 0,9985.

Resultados de la regresión lineal vertedero circular.

En esta tabla 4 y figura 5 se presentan los resultados obtenidos del vertedero circular en donde se relacionan la variación del caudal (l/s) respecto a la carga hidráulica (cm) teniendo en cuenta su coeficiente de descarga experimental.

Figura 5. Variación del caudal respecto de la carga hidráulica vertedero circular D=10,5 cm w=29,6 cm B=34 cm



En la figura 5 se observa que todos los datos de Q-H siguen la línea de tendencia, presentando muy poca variación, con un coeficiente de determinación del 99,75%. El caudal es directamente proporcional a la carga hidráulica y el coeficiente de descarga se mantiene entre 1,5 y 1,6

Tabla 4. Propiedades ecuación de calibración

$$Qr = 0,2392H^{1,4414}$$

$$R = 0,9987$$

| | | | Mínimo | Máximo | |
|-------------------------------|-------------|---|--------|--------|-----|
| D | Caudal | Q | 1,25 | 5,12 | l/s |
| I | Profundidad | H | 3,1 | 8,3 | cm |
| Coeficiente de correlación | | | R | 0,9987 | |
| Diferencia del exponente en % | | | 20,23% | | |

| | Cde | Error |
|---------------------------|----------|--------|
| Promedio | 1,52 | 2,20 |
| Mínimo | 1,52 | 1,34 |
| Máximo | 1,52 | 4,22 |
| Desviación estándar | 1,92E-16 | 122 |
| Coefficiente de variación | 1,27E-14 | 53,43% |

Según Moreno Mogollón et al. (2015; p, 11), en la figura del vertedero circular, igualmente, se observó una correlación entre todos los datos, al seguir la línea de tendencia, y presentar un coeficiente de correlación de 0,9976 y un coeficiente de determinación de 99,52%; mientras que, dichos coeficientes en la experimentación del vertedero circular fueron de 0,9987 y 0,9975 respectivamente.

Resultados de la regresión lineal vertedero sutro

En la tabla 5 y figura 6 se presentan los resultados obtenidos del vertedero sutro en donde se muestra la variación del caudal (l/s) respecto a la carga hidráulica (cm) teniendo en cuenta su coeficiente de descarga experimental.

En la figura 6 se observa que los primeros valores de Q-H siguen la línea de tendencia, pero al aumentar la carga hidráulica, estos se dispersan. La figura tiene un coeficiente de determinación de 99,61%, nuevamente, el caudal es directamente proporcional a la carga hidráulica, mientras que, el coeficiente de descarga se mantiene, casi constante, entre 0,06 y 0,08.

Figura 6. Variación del caudal respecto de la carga hidráulica vertedero sutro $b=17,1\text{ cm}$ $w=27,5\text{ cm}$ $B=33,85\text{ cm}$ $c=1,2\text{ cm}$ $as=8,77E-05$

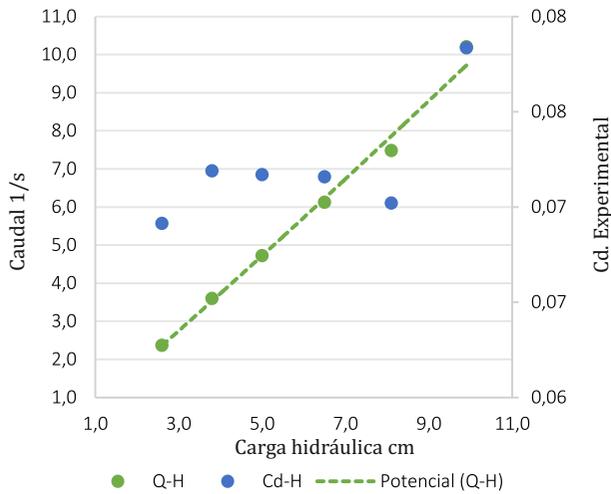


Tabla 5. Propiedades ecuación de calibración

$$Q_r = 0,8608H^{1,0574}$$

$$R = 0,9980$$

| | | Mínimo | Máximo | |
|----------------------------|-------------|--------|--------|-----------|
| D | Caudal | Q | 2,37 | 10,21 l/s |
| I | Profundidad | H | 2,60 | 9,90 cm |
| Coeficiente de correlación | | R | 0.9980 | |

| | Cde | Error |
|--------------------------|-------|--------|
| Promedio | 0,07 | 2,80 |
| Mínimo | 0,07 | 0,35 |
| Máximo | 0,08 | 7,93 |
| Desviación estándar | 0,003 | 2,69 |
| Coeficiente de variación | 4.08 | 96.17% |

La figura del vertedero sutro encontrada por Moreno Mogollón et al. (2015; p, 8), se asemeja considerablemente a la determinada en éste informe; mientras los datos del coeficiente de descarga se mantienen constantes, los valores del caudal siguen la línea de tendencia; a excepción del último. Los coeficientes de determinación y correlación fueron 0,9970 y 99,85% respectivamente.

3.2. Ecuación teórica y coeficientes teóricos y experimentales

Tabla 6. Exponente de la ecuación del vertedero rectangular

| Variable | Símbolo | Mínimo | Máximo | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación |
|--------------------------------------|---------|--------|--------|----------|---------------------|--------------------------|
| Coeficiente de descarga teórico | Cdt | 0,61 | 0,64 | 0,63 | 0,01 | 1,50% |
| Error del caudal teórico | ErQt | 28,42 | 37,33 | 31,22 | 3,31 | 10,60% |
| Coeficiente de descarga experimental | Cde | 0,87 | 1,02 | 0,91 | 0,05 | 5,83% |
| Error del caudal experimental | ErQe | 0,45 | 10,40 | 3,73 | 3,54 | 95,03% |

Con estos datos se observa que la mayor parte de los coeficientes de descarga están dentro de los rangos límites para este vertedero, el menor porcentaje de error fue el experimental esto se debe a que las ecuaciones teóricas no son muy precisas a la hora de evaluar cada vertedero.

Tabla 7. Exponente de la ecuación del vertedero circular

| Variable | Símbolo | Mínimo | Máximo | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación |
|--|---------|--------|--------|----------|---------------------|--------------------------|
| Coeficiente de descarga Acevedo y acosta | CdAA | 1,52 | 1,52 | 1,52 | 0,00 | 0,00% |
| Error del caudal Acevedo y acosta | ErQAA | 30,76 | 52,27 | 40,38 | 8,16 | 20,22% |
| Coeficiente de descarga staus | Cds | 0,53 | 3,15 | 1,64 | 1,02 | 62,53% |
| Coeficiente de descarga teórico | μ | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 0,00 | 0,39% |
| Error del caudal staus | ErQs | 30,41 | 52,41 | 39,35 | 8,56 | 21,75% |

Se observa, de acuerdo a los datos obtenidos, un 0,39% de coeficiente de variación respecto al coeficiente de descarga teórico, con lo que se establece que los datos son muy homogéneos y aportan una alta confiabilidad.

Tabla 8. Exponente de la ecuación del vertedero triangular

| Variable | Símbolo | Mínimo | Máximo | Promedio | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|----------|---------------------|---------------------------|
| Coefficiente de descarga teórico | Cdt | 0,58 | 0,59 | 0,58 | 0,00 | 0,34% |
| Error del caudal teórico | ErQt | 1,80 | 19,49 | 8,66 | 7,08 | 81,81% |
| Coefficiente de descarga experimental | Cde | 0,51 | 0,72 | 0,60 | 0,07 | 12,16% |
| Error del caudal experimental | ErQe | 0,78 | 17,32 | 8,05 | 7,86 | 97,66% |

En esta tabla se aprecia que los porcentajes de error más bajos son los del caudal experimental, con un mínimo de 0,78%, además, se muestra una óptima relación con lo experimental y lo teórico, exceptuando su coeficiente de variación de 97,66%, lo que indica que los datos pueden ser algo dispersos.

Tabla 9. Exponente de la ecuación del vertedero suto

| Variable | Símbolo | Mínimo | Máximo | Promedio | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|----------|---------------------|---------------------------|
| Coefficiente de descarga teórico | Cdt | 0,64 | 0,66 | 0,65 | 0,01 | 1,54% |
| Error del caudal teórico | ErQt | 7,93 | 18,31 | 10,49 | 4,40 | 41,93% |
| Coefficiente de descarga experimental | Cde | 0,70 | 0,78 | 0,73 | 0,03 | 4,40% |
| Error del caudal experimental | ErQe | 1,19 | 7,16 | 3,01 | 2,51 | 83,35% |

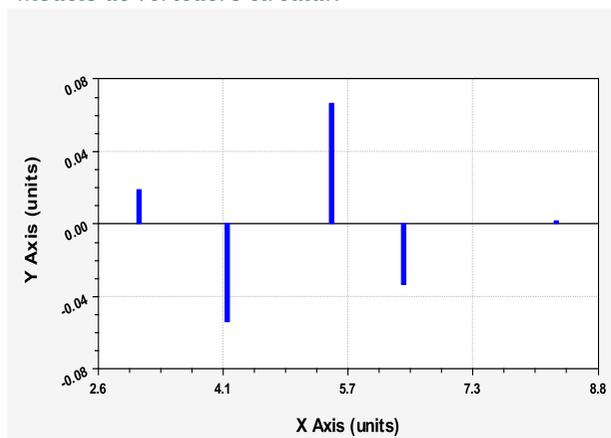
Analizando los coeficientes de descarga experimental y teórico en este vertedero, se obtuvo una gran dispersión de los valores entre ellos, esto contribuye a determinar que los datos experimentales son más confiables que los teóricos con un mínimo de 1,19%.

Tabla 10. Exponente de la ecuación del vertedero trapezoidal

| Variable | Símbolo | Mínimo | Máximo | Promedio | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
|----------------------------------|---------|--------|--------|----------|---------------------|---------------------------|
| Coefficiente de descarga teórico | Cdt | 0,63 | 1,49 | 1,36 | 0,14 | 10,45% |
| Error del caudal teórico | ErQt | 44,04 | 57,60 | 53,09 | 5,39 | 10,16% |

En la tabla 11 y figura 7 se presentan los resultados obtenidos del vertedero circular en donde se refleja el comportamiento de los residuales.

Figura 7. Comportamiento de los residuales del modelo de vertedero circular.



Elaborado: Curve Expert 1.4

Tabla 11. Propiedades ecuación de calibración

$$Q_{ce} = 0.15443x2,2005^{(1/H)}H^{1,6693}$$

Shifted Power Fit

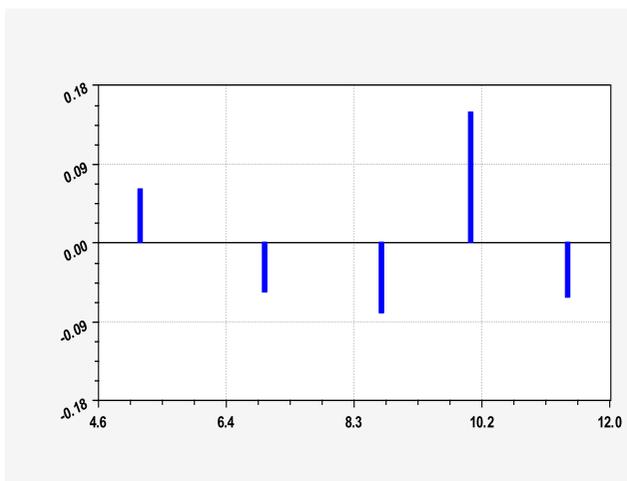
| | | |
|--------------------------|----|---------|
| Caudal | Q | l/s |
| Delta de presión | H | cm |
| Error estándar | ES | 0,06960 |
| Coefficiente correlación | R | 0,99946 |

| | Precisión | Error |
|---------------------------|-----------|-------|
| Promedio | 89,41 | 10,53 |
| Mediana | 87,28 | 12,66 |
| Desviación estándar | - | 3,70 |
| Coefficiente de variación | - | 35,14 |

En la figura 7 se observa una pequeña tendencia de los datos con una influencia real de la variable regresora, es decir, en la carga hidráulica se evidencia que la distribución de residuos son más pequeños cuando la variable y es pequeña, lo que indica que es directamente proporcional. Se muestra que el coeficiente de determinación fue del 99.9%, donde el caudal es directamente proporcional a la carga hidráulica.

En la tabla 12 y figura 8 se presentan los resultados obtenidos del vertedero trapezoidal en donde se muestra el comportamiento de los residuales.

Figura 8. Comportamiento de los residuales del modelo de vertedero trapezoidal



Elaborado: Curve Expert 1.4

Tabla 12. Propiedades ecuación de calibración

$$Q_{ce} = 0.01083x0,7500^{(H)}H^{4,0492}$$

Hoerl Model

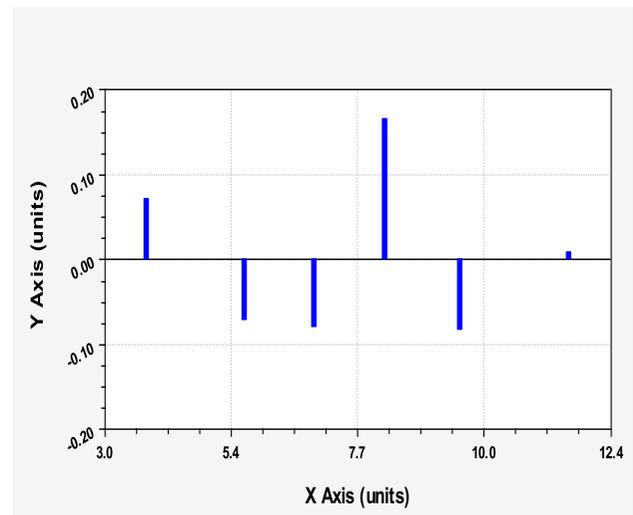
| | | |
|--------------------------|----|---------|
| Caudal | Q | l/s |
| Delta de presión | H | cm |
| Error estándar | ES | 0,14342 |
| Coefficiente correlación | R | 0,99906 |

| | Precisión | Error |
|---------------------------|-----------|--------|
| Promedio | 98,04 | 1,86 |
| Mediana | 98,36 | 1,54 |
| Desviación estándar | - | 0,89 |
| Coefficiente de variación | - | 47,93% |

En la figura 8 se observa existe una pequeña tendencia de los datos mostrando una influencia real de la variable regresora, es decir, en la carga hidráulica se evidencia una distribución de residuos que son más pequeños cuando la variable y es pequeña, en consecuencia, es directamente proporcional. El coeficiente de determinación fue del 99.9% donde el caudal es directamente proporcional a la carga hidráulica. En este caso, los residuos parecen aleatorios. Es una buena indicación que el modelo de regresión se ajusta bien.

En la tabla 13 y figura 9 se presentan los resultados obtenidos del vertedero triangular en donde se indica el comportamiento de los residuales.

Figura 9. Comportamiento de los residuales del modelo de vertedero triangular



Elaborado: Curve Expert 1.4

Tabla 13. Propiedades ecuación de calibración

$$Q_{ce} = 0,02524x0,94432^{(H)}H^{2,6696}$$

Hoerl Model

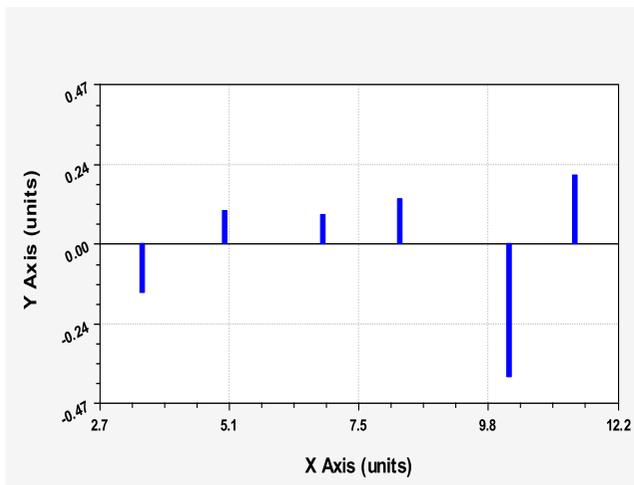
| | | |
|--------------------------|----|---------|
| Caudal | Q | l/s |
| Delta de presión | H | cm |
| Error estándar | ES | 0,13188 |
| Coefficiente correlación | R | 0,99943 |

| | Precisión | Error |
|---------------------------|-----------|-------|
| Promedio | 96,41 | 3,53 |
| Mediana | 96,62 | 3,32 |
| Desviación estándar | - | 3,02 |
| Coefficiente de variación | - | 85,69 |

En la figura 9 se observa existe una pequeña tendencia de los datos mostrando una influencia real de la variable regresora, es decir, en la carga hidráulica se evidencia una distribución de residuos que son más pequeños cuando la variable y es pequeña, en otras palabras, es directamente proporcional. El coeficiente de determinación fue del 99.9% donde el caudal es directamente proporcional a la carga hidráulica. En este caso, se ve una relación entre variable Y y los residuos. El modelo lineal no se ajusta bien.

En la tabla 14 y figura 10 se presentan los resultados obtenidos del vertedero rectangular donde se refleja el comportamiento de los residuales.

Figura 10. Comportamiento de los residuales del modelo de vertedero rectangular



Elaborado: Curve Expert 1.4

Tabla 14. Propiedades ecuación de calibración

$$Q_{ce} = 0,52674x1,1038^{(H)}H^{0,7062}$$

Hoerl Model

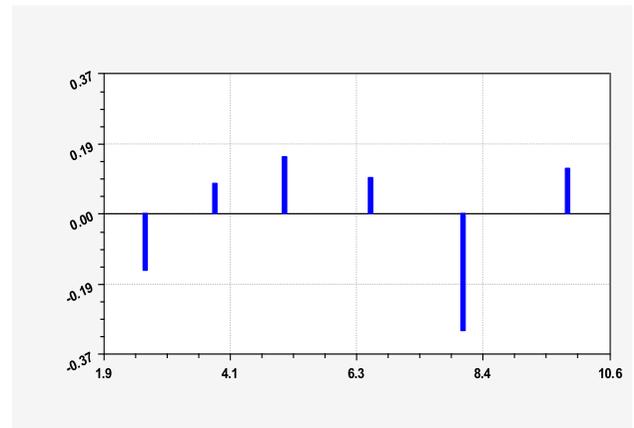
| | | |
|--------------------------|----|---------|
| Caudal | Q | l/s |
| Delta de presión | H | cm |
| Error estándar | ES | 0,28999 |
| Coefficiente correlación | R | 0,99679 |

| | Precisión | Error |
|---------------------------|-----------|--------|
| Promedio | 95,57 | 4,10 |
| Mediana | 96,63 | 3,04 |
| Desviación estándar | - | 2,57 |
| Coefficiente de variación | - | 32,71% |

En la figura 10 se observa una distribución de residuos, indicando que son más pequeños cuando la variable y es pequeña, es decir, es directamente proporcional. El coeficiente de determinación fue del 99.9% donde el caudal es directamente proporcional a la carga hidráulica. Se puede determinar que este modelo no se ajusta muy bien, pues no existe relación entre la variable regresora y el caudal.

En la tabla 15 y figura 11 se presentan los resultados obtenidos del vertedero suto, donde se relaciona el

Figura 11. Comportamiento de los residuales del modelo de vertedero suto



Elaborado: Curve Expert 1.4

Tabla 15. Propiedades ecuación de calibración

$$Q_{ce} = 1,1278x1,0742^{(H)}H^{0,6465}$$

Hoerl Model

| | | |
|--------------------------|----|---------|
| Caudal | Q | l/s |
| Delta de presión | H | cm |
| Error estándar | ES | 0,23932 |
| Coefficiente correlación | R | 0,99785 |

| | Precisión | Error |
|---------------------------|-----------|--------|
| Promedio | 97,30 | 2,48 |
| Mediana | 97,01 | 2,77 |
| Desviación estándar | - | 1,18 |
| Coefficiente de variación | - | 47,55% |

En la figura 11 se evidencia una distribución de residuos que indica que son más pequeños cuando la variable y es pequeña, es decir, es directamente proporcional. El coeficiente de determinación fue del 99.7% donde el caudal es directamente proporcional a la carga hidráulica.

4. CONCLUSIONES

- Respecto a la ecuación teórica, los vertederos más eficientes fueron, el triangular (8,6% de error) seguido por el sutro (9,2% de error), el vertedero menos eficiente fue el trapezoidal (53,0% de error).
- De acuerdo a la ecuación de regresión, el mejor vertedero fue el circular (97,8% de precisión), seguido por el sutro (97,7% de precisión); y los vertederos menos eficientes, en este caso, fueron el rectangular (96,8% de precisión), y el trapezoidal (93,8% de precisión). Debido a eso, el vertedero más recomendado es el circular.
- La ecuación de regresión indicó una mayor precisión respecto a la ecuación teórica, evidenciada en los porcentajes de error de cada vertedero, al presentar una mayor correlación de los datos por ser propia de cada vertedero.
- El vertedero que no se recomendaría es el trapezoidal, puesto que muestra el mayor error en ambas ecuaciones (teórica 53,09% y de regresión 6,19%), lo cual, podría ser ocasionado porque el canal no cumple las condiciones necesarias para su instalación.
- Todas las figuras determinaron una relación directamente proporcional entre la carga hidráulica y el caudal, mientras que, el coeficiente de descarga tendía a mantenerse constante entre un rango de valores sin demostrar una variación considerable respecto a la carga hidráulica.

5. REFERENCIAS

- Moreno Mogollón, M., Ortega Gómez, G., Melgarejo Martínez, M., & Mogollón Salas, J. (2015). Análisis del comportamiento estadístico del caudal con respecto a la carga hidráulica en vertederos. Universidad Libre Seccional Socorro.
- Santos Santos, M., Mejía Bernal, A., & Santos Mejía, D. (2016). Determinación de la eficiencia de los diferentes tipos de vertederos según su carga hidráulica. Universidad Libre Seccional Socorro.
- Sotelo Ávila, G. (2014). *Hidráulica General 1: Fundamentos*. México D.F.: Limusa.
- Pérez Marbello, R. (2016) *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.