

Determinación de las descargas en el canal de Vento a partir de los niveles en las captaciones Taza Grande y Taza Chica

LILIANA CARRERAS FLORESE-MAIL: lilianac@ahabana.co.cu

Empresa Aguas de La Habana, La Habana, Cuba

YOEL MARTÍNEZ GONZÁLEZE-MAIL: yng@instec.cu

Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas (InSTEC), La Habana, Cuba

ODALYS MÉNDEZ VALDÉSE-MAIL: omendez@ahabana.co.cu

Empresa Aguas de La Habana, La Habana, Cuba

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un modelo para calcular los aportes de las captaciones Taza Grande y Taza Chica al canal de Vento. Para determinar los caudales provenientes de ambas fuentes, se ha hecho necesario plantear la ecuación de Bernoulli, y tomar en cuenta las pérdidas de carga total. Por no contarse con un registro histórico regular de niveles, se llevó a cabo una campaña de mediciones entre junio/2021 y octubre/2022. La calibración de los parámetros fue realizada empleando el método de maximizar la eficiencia computacional según el criterio de Kling-Gupta (KGE), obteniéndose resultados satisfactorios. El modelo propuesto presenta ventajas que pueden ser aprovechadas para fortalecer la gestión del acueducto de Albear para el suministro de agua a la ciudad de La Habana.

PALABRAS CLAVES:

Taza Grande, Taza Chica, canal de Vento, captación, modelo.

Determination of the discharges in the Vento's channel from the levels in Taza Grande and Taza Chica catchments

ABSTRACT

At present work, a new approach is developed to estimate the contributions to Vento's channel from Taza Grande and Taza Chica catchments. In order to quantify the discharge from both of these sources, it was necessary to apply Bernoulli's equation, taking into account the total head losses. As there are no regular historical of levels records in any of these catchments, systematic measurements were carried out between June/2021 and October/2022. The parameters estimation in proposed model was achieved using the method of maximizing the computational efficiency, according to the Kling-Gupta criteria, and comparing the results to flow values currently reported. The proposed model presents advantages that can be used to strength the management of Albear aqueduct for Havana city water supply.

KEYWORDS: Taza Grande, Taza Chica, Vento channel, catchment, modeling

01 INTRODUCCIÓN

En la capital del país, los recursos explotables para el consumo urbano provienen fundamentalmente de las aguas subterráneas. Entre 540 y 580 Hm³/año se extraen para abasto en la ciudad, y aproximadamente el 45% de ese volumen es aportado por las captaciones enclavadas en la cuenca kárstica Vento, las cuales se muestran en la figura 1 (Producción, 2022).

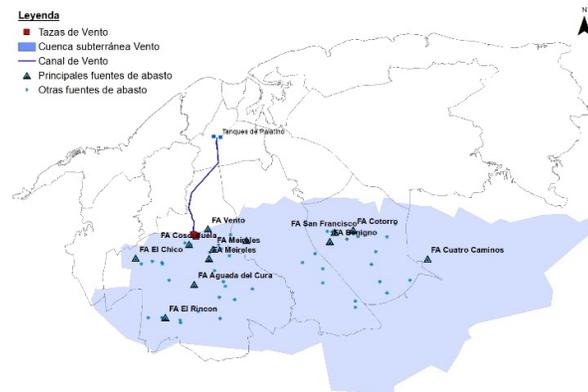


Figura 1. Cuenca subterránea Vento y sus captaciones.
(cortesía del departamento GIS, empresa Aguas de La Habana).

Entre las fuentes de abasto de importancia, se encuentra el acueducto de Albear, que es el más antiguo en funcionamiento, y que actualmente es gestionado por la empresa Aguas de La Habana, incorporando sus aguas al suministro del Sistema Central. La Taza Grande, que es la obra principal y más antigua del acueducto, capta un número de manantiales que se encuentran aislados del río Almendares mediante un muro de hormigón armado, y entrega sus aguas a través de un canal que cruza dicho río desde la margen izquierda hasta la derecha mediante un sifón invertido, y que conduce sus aguas por gravedad a través de un conducto de sección ovoide (donde antes de este se incorpora el aporte de la Taza Chica) hasta los tanques de Palatino con capacidad de 60 000 m³ (García, 2009).

En el canal de Vento como el régimen de circulación es libre para un amplio rango de niveles de circulación, históricamente se ha adoptado la hipótesis de que en el mismo el régimen del flujo es uniforme y que con independencia de la formulación adoptada, a partir de la simple medición de los niveles, y tomando en cuenta las propiedades geométricas de la sección transversal de la conducción, así como el tipo de revestimiento y su pendiente, resulta posible estimar el caudal de circulación.

Para determinar el caudal que circula por Torre Norte y que es entregado al canal de Vento, se ha venido empleando la mencionada hipótesis de flujo uniforme (caracterizada por la ecuación de Manning) sin tomar, sin embargo, en cuenta el efecto de remanso que se produce por la entrada de los aportes de Taza Chica, ni los efectos que produce la presencia de una transición abrupta entre una sección abierta y una sección cerrada, los cuales se manifiestan cuando las alturas del agua en el canal sobrepasan los 1,42 m, lo cual compromete la fiabilidad de los niveles, y por ende, los caudales que se reportan en la actualidad. Además, no se cuenta con un registro histórico de sus niveles, y en consecuencia no se toman en consideración las variaciones de los mismos en ambas tazas, siendo estas los puntos de descarga de la cuenca Vento.

Teniendo en cuenta la situación existente en la presente contribución, se ha establecido como objetivo el desarrollo de un modelo basado en la ecuación de Bernoulli, el cual permitirá determinar las descargas de cada captación de forma separada y al aplicar la superposición de éstas, se obtendrá el caudal en el canal de Vento, en función de las diferencias de nivel entre las obras de captación de los manantiales Taza Grande y Taza Chica y la mencionada conducción.

02 MODELO DE DESCARGAS DE LA CAPTACIÓN TAZA CHICA AL CANAL DE VENTO

La Taza Chica consiste en una captación de manantiales que brotan en la margen izquierda del río Almendares, que descargan en un estanque de forma alargada (figura 2a), y cuyas aguas son conducidas mediante cuatro conductos de hierro fundido de juntas flexibles (figura 2b), por debajo del río hasta dos galerías ubicadas en la torre Norte, a pocos metros de donde comienza el canal de Vento (canal de Albear en figura 2b).

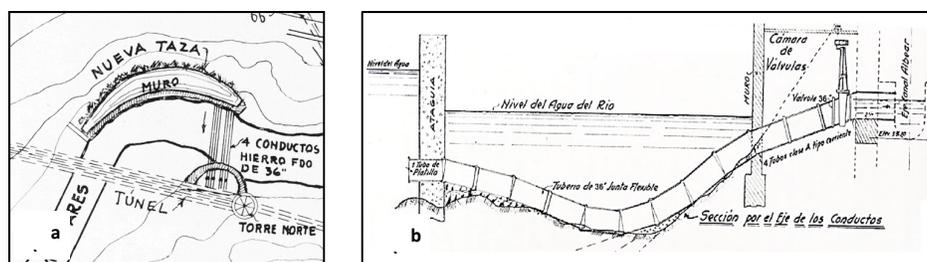


Figura 2. Vista en planta de conexión entre Taza Chica y Torre Norte: a) Esquema en planta, adaptado de Simón (1950b), b) perfil longitudinal de uno de los conductos por debajo del río Almendares, adaptado de Simón (1950a).

Los aportes de Taza Chica dependen de ciertas condiciones presentes en la descarga hacia al canal de Vento. En este sentido se han identificado tres escenarios típicos, tal y como se muestra en la figura 3.

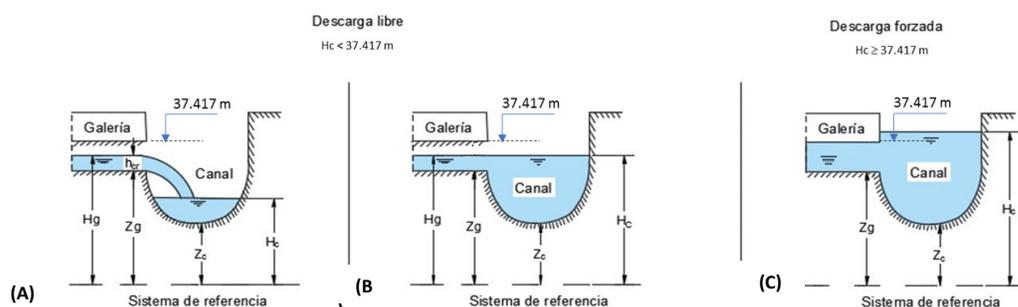


Figura 3. Escenarios típicos en presencia de aportes, sujetos a que el nivel en Taza Chica sea mayor que el nivel en el canal.

ESCENARIOS TIPO A Y B

Estos dos escenarios presentan un régimen de descarga libre, ya que en ambos casos el nivel del agua en el canal se localiza por debajo de la cota del techo de la galería. En sentido general, se plantea la ecuación de Bernoulli entre la captación Taza Chica y una sección situada dentro de la galería; al considerar la captación Taza Chica como un depósito de grandes dimensiones, y despreciar, por lo tanto, la carga a velocidad en ésta, resulta:

$$H_{TC} = H_g - z_g + \frac{v_g^2}{2g} + \Delta h_{TC-g} \quad (1)$$

siendo H_{TC} = nivel en Taza Chica, z_g = cota de fondo de la galería (36,23 m), H_g = nivel de referencia (si $H_c < z_g$, como en la condición A, entonces $H_g - z_g = h_{cr}$, donde h_{cr} es el tirante crítico en el interior de la galería; de lo contrario $H_g \cong H_c$, como en la condición B, siendo H_c el nivel en el canal de Vento), V_g = velocidad de circulación en la galería y Δh_{TC-g} = pérdidas de energía totales desde la captación hasta la galería.

La velocidad en el sistema de galerías vendrá dada por:

$$V_g = \frac{Q_{TC}}{2 B_g (H_g - z_g)} \quad (2)$$

Q_{TC} = caudal de Taza Chica, B_g = ancho de la galería, H_g = nivel en la galería, y z_g = cota de fondo de la galería. Las pérdidas totales de energía abarcan varias singularidades existentes, las cuales serán descritas a continuación.

PÉRDIDAS EN CONDUCTOS QUE ATRAVIESAN EL RIO ALMENDARES

Las pérdidas en los conductos Δh_c se propone calcularlas de la siguiente manera:

$$\Delta h_c = \left(k_{ec} + \frac{f L_c}{D_c} + \sum k_i + N_u k_u + k_v + k_s \right) \frac{V_c^2}{2g} \quad (3)$$

donde k_{ec} y k_{sc} = coeficiente de pérdidas a la entrada (0,5) y salida (1,0) de los conductos respectivamente según Streeter et al. (2000), L_c = longitud recta de los conductos (8 tramos de 3,66 m), D_c = diámetro de los conductos (0,91 m), N_u = cantidad de uniones, k_u = coeficiente de pérdidas de las uniones, k_v = coeficiente de pérdidas de la válvula tipo Chapman (una por cada conducto según Simón (1950a)), f = factor de fricción de Weisbach-Darcy.

Existen un total de nueve inflexiones en dichos conductos. Los coeficientes de pérdidas de las inflexiones podrán ser estimados (previa medición del ángulo de inflexión θ_i) según Rabinovich (1987):

$$k_i = 0,946 \left(\text{sen} \frac{\theta_i}{2} \right)^2 + 2,047 \left(\text{sen} \frac{\theta_i}{2} \right)^4 \quad (4)$$

Considerando flujo turbulento desarrollado, el factor de fricción de Darcy - Weisbach se determina según Streeter et al. (2000):

$$f = \frac{1}{\left[1,14 - 0,869 \log \left(\frac{\varepsilon}{D_s} \right) \right]^2} \quad (5) \quad V_c = \frac{Q_{TC}}{4 A_c} \quad (6)$$

ε = rugosidad absoluta del conducto. La velocidad en cada uno de los conductos V_c vendrá dada por la ecuación (6), donde Q_{TC} = caudal de Taza Chica y A_c = área del conducto.

PÉRDIDAS EN LA GALERÍA

En la galería se ha considerado la formación de una profundidad o tirante $h_g = (H_g - z_g)$, de manera que las pérdidas por fricción pueden ser estimadas como el producto:

$$\Delta h_g = k_g \frac{V_g^2}{2g} \quad (7) \quad k_g = \frac{2g n_g^2 L_g}{\left[\frac{B_g (H_g - z_g)}{B_g + 2(H_g - z_g)} \right]^{4/3}} \quad (8)$$

donde k_g = coeficiente de pérdidas en la galería, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ es la aceleración en caída libre, n_g = coeficiente de rugosidad de Manning en las paredes de la galería, L_g = longitud de la galería.

Al consolidar todas las ecuaciones en (1), el caudal por cada una de las dos galerías, viene expresado por:

$$\frac{Q_{TC}}{2} = C B_g (H - z_g) \sqrt{2g(H_{TC} - H)} \quad (9.a)$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(k_{ec} + \frac{f L_c}{D_c} + \sum k_i + N_u k_u + k_v + k_{sc} \right) \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{B_g}{D_c} \right)^2 \left(\frac{H_g - z_g}{D_c} \right)^2 + \frac{19.62 n_g^2 L_g}{\left[\frac{B_g (H_g - z_g)}{B_g + 2(H_g - z_g)} \right]^{4/3}}} \quad (9.b)$$

ESCENARIO TIPO C

Resulta poco probable en las condiciones actuales, pues implicaría que tanto los conductos como la propia galería que descarga al canal, estarían sometidos a un régimen de circulación forzado. Es muy posible, además, que para garantizar un gradiente de flujo hacia el canal de Vento, los niveles en la Taza Chica deberían alcanzar cotas récords (~ 38 m), y esto históricamente no se ha reportado jamás. No obstante, en la formulación que se presenta, este caso quedaría reflejado modificando las pérdidas en la galería al contemplar el radio hidráulico de la sección de la galería completamente llena.

03 MODELO DE DESCARGAS DE LA CAPTACIÓN TAZA GRANDE AL CANAL DE VENTO

La captación Taza Grande consiste en un grupo de manantiales cuyas descargas son conducidas a través de un canal de derivación; que seguidamente se incorpora a dos sifones invertidos bajo el río Almendares (figura 4), para luego transitar a través de un canal de sección abierta hacia el canal de Vento propiamente dicho (Simón, 1950b).

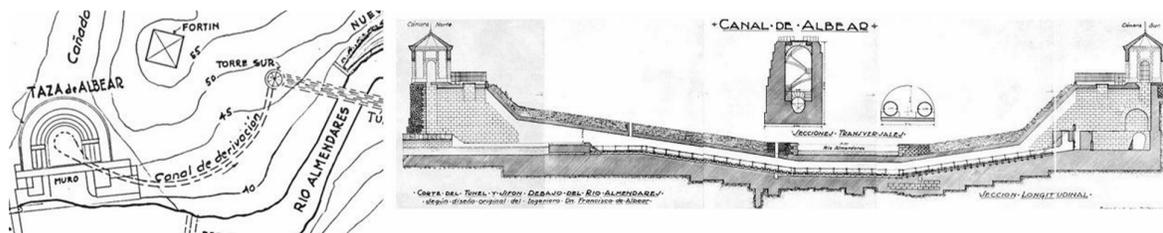


Figura 4. Vista en planta y perfil de conexión entre Taza Grande y Torre Norte (inicio del canal de Vento). Adaptado de Simón (1950b).

Para determinar los aportes provenientes de Taza Grande, de forma análoga como se hizo antes con Taza Chica, se ha formulado la ecuación de Bernoulli entre esta captación y el canal de Vento. La captación Taza Grande se ha enfocado como un depósito de grandes dimensiones, despreciando la carga a velocidad en el mismo, por lo que resulta:

$$H_{TG} = H_c + \frac{V_c^2}{2g} + \Delta h_{TG-C} \quad (10)$$

siendo H_{TG} = nivel en Taza Grande, H_c = nivel en el canal de Vento, V_c = velocidad de circulación en el canal y Δh_{TG-C} = pérdidas de energía totales desde la captación hasta el canal.

La velocidad en el canal vendrá dada por:

$$V_c = \frac{Q_{TG} + Q_{TC}}{A_c (H_c - z_c)} \quad (11)$$

donde Q_{TG} , Q_{TC} = caudales de Taza Grande y Taza Chica respectivamente, A_c = área mojada del canal de Vento (que depende de la diferencia $(H_c - z_c)$) donde H_c es el nivel de agua en el canal y $z_c \sim 35$ m es la cota de fondo del canal.

Las pérdidas de energía total dependen de varias singularidades existentes, las cuales serán descritas a continuación.

PÉRDIDAS A LA ENTRADA DE LAS REJILLAS Y PILA

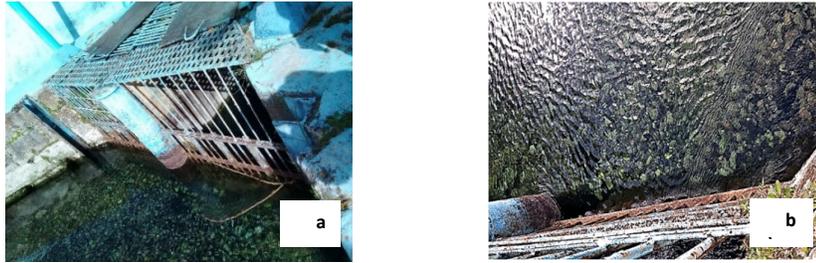


Figura 5. a) Rejillas a la entrada del canal de derivación en Taza Grande. b) Comportamiento del flujo de entrada de Taza Grande a una de las rejillas.

La magnitud de las pérdidas de carga en una de las rejillas situadas a la entrada del canal de derivación, equipadas con barras de sección circular (figura 5 a y b) y su respectivo coeficiente de pérdidas puede calcularse según Pardo y Alegret (2001) como:

$$\Delta h_r = k_r \frac{V_r^2}{2g} \quad (12) \quad k_r = 1.79 \frac{\left(\frac{S_b}{b_r}\right)^{4/3}}{\left(1 + \frac{S_b}{b_r}\right)^2} \quad (13)$$

siendo S_b = diámetro de las barras, b_r = luz libre entre barras (espaciamiento), k_r = coeficiente de pérdidas en la rejilla, V_r = velocidad en la rejilla, la cual puede calcularse como:

$$V_r = \frac{Q_{TG}}{A_r} \quad (14)$$

Para el área efectiva de la rejilla A_r , debe calcularse con el ancho efectivo B_e , el cual depende del ancho de entrada al canal de derivación B_{TG} , así como del ancho b_p y tipo de pila (definido por su coeficiente de forma), espesor de barras S_b , el número de barras N_b , y cota de fondo de la Taza Grande z_{TG} ; calculándose según plantea Pardo y Alegret (2001) tal como se muestra a continuación:

$$B_e = B_{TG} - 2k_p(H_{TG} - z_{TG}) - b_p - N_b S_b \quad (15) \quad A_r = B_e(H_{TG} - z_{TG}) \quad (16)$$

siendo z_{TG} = cota de fondo de la Taza Grande (35,69 m).

La pérdida adicional que introduce la pila Δh_p puede calcularse según:

$$\Delta h_p = k_p \frac{V_r^2}{2g} \quad (17)$$

con su coeficiente de resistencia o de pérdida de carga de la pila igual a k_p .

PÉRDIDAS EN EL CANAL DE DERIVACIÓN

En este caso, se considera que el flujo es uniforme en el canal de derivación entre la captación Taza Grande y la Torre Sur (hipótesis un tanto idealizada para un canal curvo en planta (figura 6a), pero no existen registros de ninguna clase en ese tramo previo al sifón). El canal tiene 150 metros de longitud, en los primeros 35 metros (L1) la geometría tiene forma rectangular (figura 6b) hasta una altura desde la base de 1,575 m, donde se desarrolla el caz de cubierta con un radio igual al semiancho de la base (0,625 m).

A partir de los 35 metros y hasta su total desarrollo en planta, la geometría cambia a trapecial (L2) manteniendo el ancho de base (figura 6c), con una altura respecto a esta de 1 m, un talud $Z = 0,3125$ y el caz de cubierta tiene un radio de 1 m. En todo el desarrollo en planta la altura total del canal es de 2,2 m.



Figura 6. a) Vista en planta de canal de derivación Adaptado de Simón (1950b), b) entrada al canal de derivación desde Taza Grande, c) salida del canal de derivación en Torre Sur, d) tajamar.

Por tanto, las pérdidas totales en el canal de derivación Δh_{cd} se expresan como:

$$\Delta h_{cd} = (k_{e_cd} + k_{cd_1}) \frac{V_{cd_1}^2}{2g} + k_{cont} \left(\frac{V_{cd_1}^2}{2g} - \frac{V_{cd_2}^2}{2g} \right) + (k_{s_cd} + k_{cd_2}) \frac{V_{cd_2}^2}{2g} \quad (18)$$

k_{e_cd} = coeficiente de pérdidas a la entrada del canal de derivación, valor recomendado de 0,5; k_{s_cd} = coeficiente de pérdidas a la salida del canal de derivación, valor recomendado de 1,0 según Streeter et al. (2000), k_{cont} = coeficiente de pérdidas por cambio de geometría (contracción/expansión); V_{cd_1} = velocidad del canal de derivación en el primer tramo, V_{cd_2} = velocidad del canal de derivación en el segundo tramo.

Estas velocidades pueden calcularse como:

$$V_{cd_1} = \frac{Q_{TG}}{A_{cd_1}} \quad (19.a) \quad V_{cd_2} = \frac{Q_{TG}}{A_{cd_2}} \quad (19.b)$$

donde A_{cd_1} y A_{cd_2} es la velocidad del flujo del canal de derivación en el primer y segundo tramo respectivamente, las cuales dependen directamente de $(H_{TG} - z_{TG})$.

Las expresiones para los coeficientes de pérdida por rozamiento k_{cd_1} y k_{cd_2} son:

$$k_{cd_1} = \frac{2gn_{cd}^2 L_1}{R_{cd_1}^{4/3}} \quad (20.a) \quad k_{cd_2} = \frac{2gn_{cd}^2 L_2}{R_{cd_2}^{4/3}} \quad (20.b)$$

donde n_{cd} = coeficiente de rugosidad de Manning en el canal de derivación, R_{cd_1} y R_{cd_2} = radio hidráulico del canal de derivación en los tramos correspondientes.

PÉRDIDAS EN EL TAJAMAR (DIVISOR DE FLUJO)

Las pérdidas locales que ocasiona el tajamar se calculan según Pardo y Alegret (2001) como:

$$\Delta h_t = k_t \frac{V_{cd_2}^2}{2g} \quad (21)$$

siendo k_t = coeficiente de pérdidas del tajamar.

PÉRDIDAS EN EL SISTEMA DE SIFONES INVERTIDOS BAJO EL RÍO ALMENDARES

En el modelo se propone calcular las pérdidas en cada sifón (figura 7a), de la siguiente manera:

$$\Delta h_s = \left(k_{es} + \frac{fL_s}{D_s} + \sum k_i + N_u k_u + k_{ss} \right) \frac{V_s^2}{2g} \quad (22)$$

donde k_{es} y k_{ss} = coeficiente de pérdidas a la entrada (0,5) y salida (1,0) del sifón respectivamente según Streeter et al. (2000), L_s = longitud recta del sifón, D_s = diámetro del sifón (0,91 m), N_u = cantidad de uniones, k_u = coeficiente de pérdidas de las uniones, f = factor de fricción de Weisbach-Darcy, el cual se determina por la ecuación (5). Existen un total de tres inflexiones en los sifones bajo el río Almedares (figura 7b), cuyos coeficientes de pérdidas k_i se calculan por la ecuación (4).

La velocidad en cada uno de los sifones viene dada por:

$$V_s = \frac{Q_{TG}}{2 A_s} \quad (23)$$

donde Q_{TG} = caudal en Taza Grande y A_s = área de la sección de cada sifón.

PÉRDIDAS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN DE SECCIÓN ABIERTA EN TORRE NORTE

Las pérdidas de carga en el canal de sección abierta (figura 7 c) se calculan de forma similar a como fue establecido con anterioridad para el canal de derivación. Se establece la hipótesis de flujo uniforme, la cual encuentra su limitación al existir un cambio de sección abierta a cerrada, justo donde comienza el canal de Vento con sección ovoidal. Por otra parte, los aportes de Taza Chica, cuando se producen, alteran el régimen de circulación, llegando a provocar una componente de turbulencia de consideración, que se encuentra en correspondencia con la magnitud de dicha descarga. No obstante, en el presente tratamiento los errores que puedan producir estas particularidades, serán desestimados.

$$\Delta h_{ca} = k_{ca} \frac{V_{ca}^2}{2g} \quad (24) \quad k_{ca} = \frac{2g n_{ca}^2 L_a}{R_{ca}^{4/3}} \quad (25)$$

donde k_{ca} = coeficiente de pérdidas, n_{ca} = coeficiente de rugosidad de Manning y R_{ca} = radio hidráulico del canal de sección abierta, L_a = longitud del tramo de canal de sección abierta (~ 15 m).

La velocidad del canal de sección abierta V_{ca} , puede calcularse como:

$$V_{ca} = \frac{Q_{TG} + Q_{TC}}{A_{ca} (H_c - z_c)} \quad (26)$$

Siendo A_{ca} = el área mojada del canal de sección abierta en Torre Norte, la cual depende directamente de $(H_c - z_c)$.



Figura 7. a) Sifones bajo el río Almendares, b) Detalle de inflexión y tipos de uniones, c) Vista del canal de sección abierta en Torre Norte donde se aprecia además el sensor de nivel existente y las galerías encargadas de la descarga de Taza Chica.

De forma análoga a como se procedió con la captación Taza Chica, al consolidar todas las ecuaciones de pérdidas en la ecuación (10), después de algunas modificaciones matemáticas es posible obtener una ecuación cuadrática que permite determinar analíticamente las descargas provenientes de la captación Taza Grande:

$$Q_{TG}^2 + \frac{\mu}{\varphi} Q_{TG} + \frac{\delta - \sigma}{\varphi} = 0 \quad (27)$$

cuyos coeficientes vienen dados por las siguientes expresiones:

$$\mu = 2(1 + k_{ca}) Q_{TC} \quad (28.a)$$

$$\delta = (1 + k_{ca}) Q_{TC}^2 \quad (28.b)$$

$$\sigma = 2g A_{ca}^2 (H_{TG} - H_C) \quad (28.c)$$

$$\varphi = 1 + (k_r + k_p) \left(\frac{A_{ca}}{A_r}\right)^2 + (k_{e.cd} + k_{cd.1}) \left(\frac{A_{ca}}{A_{cd.1}}\right)^2 + k_{cont} \left[\left(\frac{A_{ca}}{A_{cd.1}}\right)^2 - \left(\frac{A_{ca}}{A_{cd.2}}\right)^2 \right] + (k_{s.cd} + k_{cd.2} + k_t) \left(\frac{A_{ca}}{A_{cd.2}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(k_{es} + \frac{fL_s}{D_s} + \sum k_i + N_u k_u + k_{ss} \right) \left(\frac{A_{ca}}{A_s}\right)^2 + k_{ca} \quad (28.d)$$

La solución de la ecuación (27) viene dada por su raíz positiva, expresada como:

$$Q_{TG} = \frac{1}{2} \left[-\frac{\mu}{\varphi} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\varphi}\right)^2 - 4\left(\frac{\delta - \sigma}{\varphi}\right)} \right] \quad (29)$$

Nótese que los coeficientes μ y δ dependen proporcionalmente de los aportes de Taza Chica, reflejando la influencia de dichas contribuciones en la carga por velocidad en el canal de sección abierta de Torre Norte. Si estas contribuciones son muy pequeñas o no existen, entonces la ecuación (29) podrá expresarse como:

$$Q_{TG} = \sqrt{\frac{\sigma}{\varphi}} = \omega A_{ca} \sqrt{2g(H_{TG} - H_C)} \quad (30)$$

Donde el coeficiente de descarga es:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \quad (31)$$

04 AJUSTE DE PARÁMETROS DE LOS MODELOS PRESENTADOS

El sistema de ecuaciones (9) – (29), involucra parámetros característicos del canal, así como aquellos que identifican a los elementos de conducción entre las captaciones de Vento y el canal. En sentido general, esto genera un vector de parámetros Γ , los cuales son desconocidos a priori y que es preciso que sean estimados eficientemente para un satisfactorio desempeño de los modelos abordados.

Para la estimación de parámetros en modelos de naturaleza hidrológica e hidráulica, Gupta et al. (2009) y Kling et al. (2012) han introducido un índice conocido como de eficiencia de Kling – Gupta (KGE, por sus siglas en inglés) cuya denominación expresa el sentido del desempeño de los modelos. Este índice se define de acuerdo con la ecuación (32):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{h}_{sim}}{\bar{h}_{obs}} - 1\right)^2} \quad (32)$$

siendo r = coeficiente de correlación de Pearson, σ = es la desviación estándar y \bar{h} = la media de los valores simulados u observados, según corresponda.

Cuando $KGE = 1$, se indica una coincidencia perfecta. En este sentido, Knoben et al. (2019) demuestran que valores mayores que - 0,41 indican que el modelo mejora por encima del flujo medio, como criterio de referencia. En el caso particular de esta aplicación, la variable simulada corresponde a niveles y el criterio de referencia sería el nivel medio del canal de Vento. Por tanto, con el objetivo de maximizar la eficiencia computacional del modelo se ha planteado minimizar la siguiente función objetivo:

$$\min FO(\Gamma) = \sqrt{[r(\Gamma) - 1]^2 + \left[\frac{\sigma_{sim}(\Gamma)}{\sigma_{obs}} - 1\right]^2 + \left[\frac{\bar{h}_{sim}(\Gamma)}{\bar{h}_{obs}} - 1\right]^2} \quad (33)$$

En esta investigación ha sido utilizado un algoritmo implementado en el toolbox de optimización del asistente matemático MatLab a través de la función fmincon.

Para su aplicación, inicialmente se genera una aproximación inicial aleatoria del vector de parámetros en la forma:

$$\Gamma = \Gamma_l + (\Gamma_u - \Gamma_l) \alpha \quad (34)$$

Nótese que $\Gamma_l \leq \Gamma \leq \Gamma_u$ y (Γ_l, Γ_u) son los vectores de los respectivos límites inferior y superior de los parámetros del modelo; α = número aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y 1. El algoritmo se ejecuta y la función objetivo (ecuación 32) es evaluada y se compara con la tolerancia (criterio de parada, valor 10⁻³). Este procedimiento se ejecuta sistemáticamente hasta que se cumple que el valor de la función objetivo sea menor que la tolerancia. De esta forma, quedan determinados los parámetros y la eficiencia del modelo.

05 MEDICIONES EN LAS CAPTACIONES DE VENTO, CANAL Y RÍO ALMENDARES

Como se mencionó anteriormente, se cuenta con muy pocos registros de niveles en ambas tazas, los cuales además se encuentran muy dispersos en el tiempo. Para ello se llevó a cabo una campaña de mediciones en el período comprendido entre junio/2021 y octubre/2022, las cuales se dispuso realizarlas en una misma ubicación con cota referenciada (figura 9). Los niveles del canal de Vento se reportan en la Sala de Despacho de la empresa Aguas de La Habana. El comportamiento de estas variables se muestra en la figura 8.

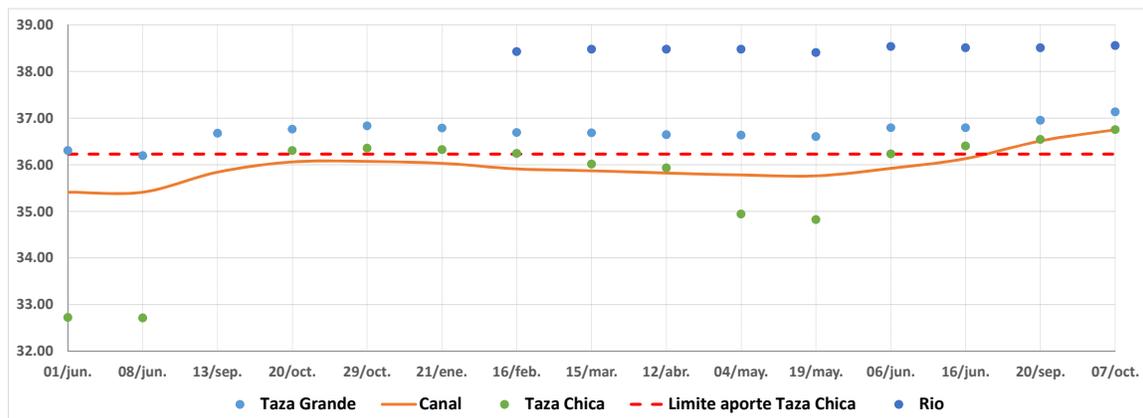


Figura 8. Registro de los niveles observados en el río Almendares, captación Taza Grande, captación Taza Chica y canal de Vento.

Como se puede apreciar, los niveles del río han sufrido muy poca variación, lo que evidencia un régimen estable de circulación. En la captación Taza Grande se registran niveles con tendencia creciente (~1 m en 35 meses) los cuales tienen una importante influencia en el comportamiento de los niveles del canal de Vento. Basta verificar que el nivel del canal hasta el mes de junio/2022 estuvo por debajo de la cota 36,23 m, que es la cota de fondo de las galerías que conducen los aportes de Taza Chica. Los niveles en el canal y en las captaciones ascendieron a partir de la ocurrencia de la depresión tropical ALEX (2/junio/2022) y mantuvieron esa tendencia hasta la ocurrencia del ciclón tropical IAN que azotó al occidente de nuestro país el 26/sept/2022.



Figura 9. Mediciones realizadas en (de izquierda a derecha): Taza Grande, sifones, Taza Chica en período seco, Taza Chica en período húmedo, río Almendares.

El registro de los caudales por el sifón bajo el río Almendares, tal como se expone en la figura 9, se llevó a cabo con un caudalímetro ultrasónico de tiempo de tránsito marca Ultraflux. Es válido destacar que, para el rango de profundidades en el canal durante el periodo de mediciones, mientras no existió contribución de Taza Chica, los caudales registrados en los sifones fueron superiores a los reportados por la Sala de Operaciones de la empresa Aguas de La Habana. En este sentido se detecta que existe un desajuste entre ambas mediciones, lo cual puede estar influenciado por una descalibración de la sección de control ubicada en Torre Norte, y evidenciada la necesidad de proceder a la urgente recalibración de la misma. Los resultados se presentan seguidamente en la figura 10.

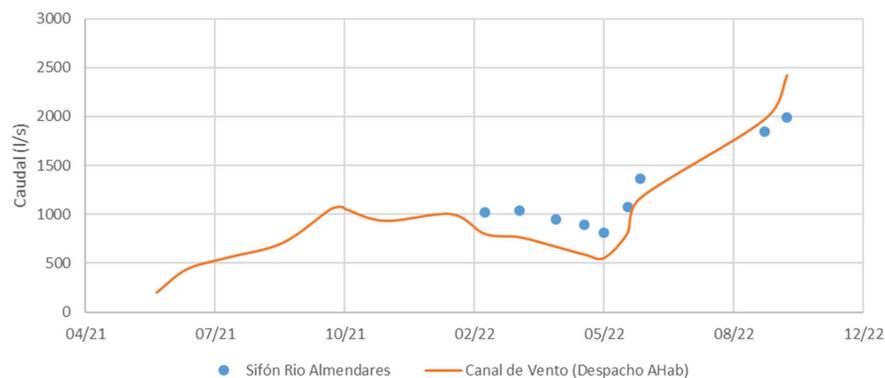


Figura 10. Mediciones en el sifón invertido del Río Almendares y reporte de caudales en el canal de Vento por parte de la empresa Aguas de La Habana.

Aunque no se ha procedido a aforar los caudales provenientes de Taza Chica, existen registros fotográficos donde se evidencia la existencia de aportes al canal, dado los niveles alcanzados en dicha captación (ver figura 11).



Figura 11. Presencia de aportes de Taza Chica al canal de Vento.

En efecto, en la tabla 1 se muestran mediciones realizadas entre el 6 de junio y el 7 de octubre de 2022, donde el nivel en Taza Chica supera la cota 36,23 m y empieza a generarse una lámina de vertimiento hacia el canal. Es notable el hecho de que el día 7 de octubre se registraran los mismos niveles en el canal y en Taza Chica, lo cual sugiere un efecto de “equilibrio” de los niveles del canal de Vento, que impidió que el flujo proveniente de esta captación se incorporase a dicha conducción. En este sentido los aportes de los días 16/jun/22 y 20/sep/22 fueron estimados considerando a las galerías como vertedores de umbral ancho según León (2008). Este proceso de estimación de aportes permitirá poner a prueba el modelo propuesto mediante una calibración preliminar.

Tabla 1. Mediciones efectuadas en Taza Chica, canal de Vento y estimación de aportes.

Fecha	Lámina en la galería (m)	Nivel Taza Chica (m)	Nivel canal Vento (m)	Aportes al canal (L/s)
06/jun/22	0	36,23	35,92	0
16/jun/22	0,01	36,40	36,13	3,6
20/sep/22	0,23	36,54	36,51	398,5
07/oct/22	0,44	36,75	36,75	0

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO DE DESCARGA DE TAZA CHICA

En el periodo de mediciones de la tabla 1 fueron calibrados los parámetros siguientes: n_g , ε , k_u y k_v , obteniéndose los siguientes valores de la tabla 2, mostrándose gráficamente en la figura 12

Tabla 2. Resultados de la calibración del modelo Taza Chica – canal de Vento.

Parámetro	Valor	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	KGE
n_g	0,0139	1,0000	0,8701
ε (mm)	6,6000		
k_u	0,9419		
k_v	4,0135		

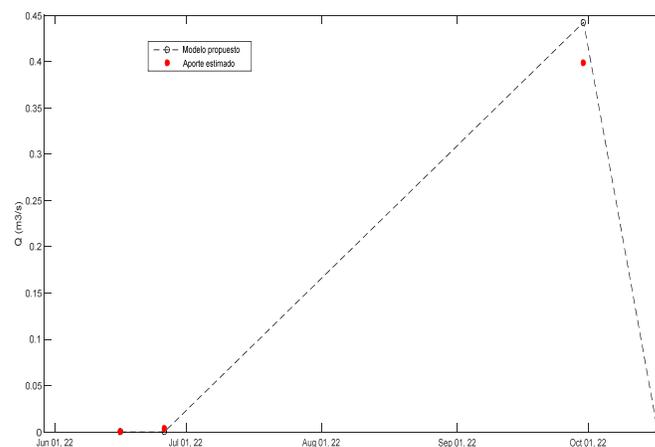


Figura 12. Comparación de los resultados obtenidos con la calibración del modelo de descarga de Taza Chica.

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO DE DESCARGA DE TAZA GRANDE

Del periodo de mediciones se seleccionaron aquellas en las que no existía contribución al canal proveniente de Taza Chica, y fueron calibrados los parámetros siguientes: n_{cd} , ε , k_u y n_{ca} , obteniéndose los siguientes valores mostrados en la tabla 3 y gráficamente en la figura 13.

Tabla 3. Resultados de la calibración del modelo Taza Grande – canal de Vento.

Parámetro	Valor	Coefficiente de correlación de Pearson (r)	KGE
n_{cd}	0,0148	0,9704	0,8999
ε (mm)	3,0000		
k_u	1,1405		
k_{cont}	0,5295		
n_{ca}	0,0110		

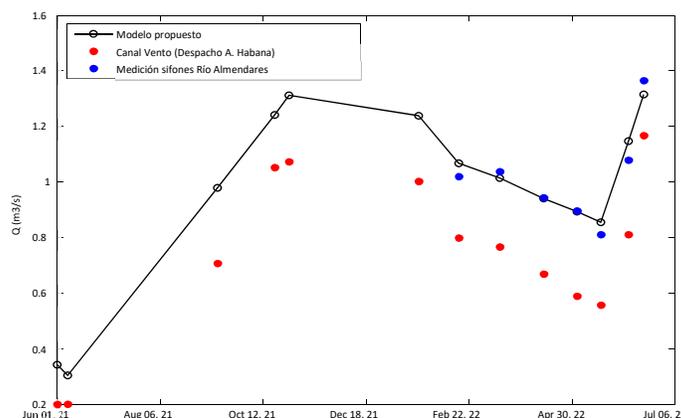


Figura 13. Comparación de los resultados obtenidos con la calibración del modelo de descarga de Taza Grande.

El modelo propuesto reproduce con mayor eficiencia los caudales de descarga del canal, en comparación con los reportados por la Sala de Despacho de la empresa Aguas de La Habana. En términos de eficiencia computacional, los registros reportados por la empresa tienen una correlación igual a 0,9709; sin embargo, estos no son eficientes de acuerdo al criterio de Kling-Gupta, pues este último solo alcanza un valor de 0,5921, muy inferior al 0,9222 obtenido con el modelo propuesto. Este resultado trae como consecuencia una subestimación del caudal de descarga en todas las mediciones de referencia (mientras no exista aporte de Taza Chica). En efecto, como promedio se deja de contabilizar 220 l/s, lo que representa un 28 % del caudal entregado en el periodo de mediciones (figura 14). Esto corrobora la necesidad de realizar una recalibración de la curva de aforo utilizada por la empresa para obtener registros que sean hidrométricamente confiables.

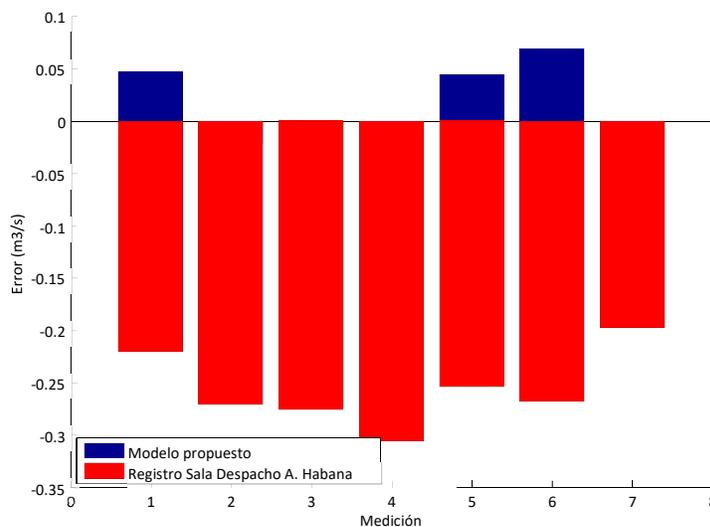


Figura 14. Errores del modelo propuesto y de los registros reportados por la empresa Aguas de La Habana.

05 CONCLUSIONES

A partir del desarrollo teórico presentado en este trabajo, es posible afirmar que se han obtenido resultados novedosos a partir de un principio básico de la mecánica de los fluidos expresado a través de la ecuación de Bernoulli. El nivel de detalle alcanzado al integrar todos los elementos de conducción desde las captaciones Taza Chica y Taza Grande hasta el canal de Vento, no encuentra precedentes en la literatura relativa al tema. Los modelos obtenidos han sido comprobados a partir de registros llevados a cabo por los autores en los elementos de captación y conducción, obteniéndose excelentes correlaciones y eficiencias computacionales.

Por su importancia teórico-práctica, este resultado se considera valioso en la futura gestión del acueducto de Albear, toda vez que sea posible articular este resultado con otros modelos de predicción de niveles en las captaciones lo cual permitirá identificar diferentes escenarios de las descargas hacia el canal, como por ejemplo lo que ha ocurrido durante eventos de sequía, durante los cuales Taza Chica se seca totalmente.

Por estas razones los autores consideran pertinente y recomendable que sean llevados sistemáticamente registros de los niveles en Taza Chica y Taza Grande para que la cuantificación de las descargas hacia el canal de Vento alcance los niveles de precisión esperados. Desde el punto de vista hidrométrico el modelo ha contribuido a detectar importantes diferencias respecto a los registros actuales de la empresa Aguas de La Habana, en el orden de 220 L/s (28 %), precisándose la calibración de la curva de aforo de Torre Norte, lo cual deberá ser abordado en investigaciones posteriores.

AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en esta contribución recibió fondos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) de la República de Cuba.

06 REFERENCIAS

- García D.** (2009). "Comprobación de la curva de aforo de Torre Norte en el canal de Albear", Tesis de Diploma, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana.
- Gupta H., Kling H., Yilmaz K. and Martínez G.** (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling", *Journal of Hydrology*, vol.377, no.1-2, pp. 80 – 91, doi: 10.1016, Departamento de Hidrología y Recursos Hídricos, Universidad de Arizona.
- Kling H., Fuchs M. and Paulin M.** (2012). "Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios", *Journal of Hydrology*, vol.424 – 425, pp. 264 –277, ISSN 0022-1694.
- Knoben W., Freer J. and Woods R.** (2019). "Inherent benchmark or not? comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, no.10, pp. 4323 – 433, DOI 10.5194/hess-2019-327, Universidad de Bristol, Reino Unido.
- Pardo R. y Alegret E.** (2001). "Diseño hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas pequeñas", Editorial Félix Varela, ISBN 959-258-190-8, La Habana.
- Rabinóvich E.** (1987). "Hidráulica", Editorial Mir, ISBN 9785884170780, Moscú.
- Simón A.** (1950a). "Memoria histórico-técnica de los acueductos de La Habana Segunda Parte: La nueva taza de Vento", *Revista Arquitectura*, Edición Diciembre, pp. 513 – 518, Colegio de Arquitectos de Cuba, La Habana.
- Simón A.** (1950b). "Memoria histórico-técnica de los acueductos de La Habana. Primera Parte", Imprenta Ucar García, La Habana.
- Streeter V., Bedford K. y Wylie B.** (2000). "Mecánica de Fluidos", Editorial McGraw-Hill en español, ISBN 978-84-219-0073-4, España.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Liliana Carreras Flores <https://orcid.org/0000-0002-7177-1916>

Recopilación de información histórico-documental, mediciones, análisis y procesamiento, asimilación e implementación computacional, calibración, validación, redacción del manuscrito original y revisión.

Yoel Martínez González <https://orcid.org/0000-0002-8023-7897>

Conceptualización, análisis de datos, metodología, implementación computacional, asesoró etapas de calibración, validación, redacción del manuscrito original y revisión.

Odalys Méndez Valdés <https://orcid.org/0000-0002-7519-9638>

Contribuyó en la recopilación y análisis de datos, metodología, asesoró análisis de los resultados y revisión del manuscrito. Propuesta de revista para publicar.