Ingeniería hidráulica en México, vol. XXII, núm. 2, pp. 5-20, abril-junio de 2007

Diseño hidráulico de vertedores escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental

Carlos A. González
Hubert Chanson

Universidad de Queensland, Australia

Durante las últimas tres décadas, el interés y diversidad en el uso de canales escalonados han aumentado debido al desarrollo de nuevas técnicas y materiales que permiten su construcción de manera rápida y económica (concreto compactado con rodillo CCR, gaviones, etcétera). Actualmente, los canales escalonados se usan como vertedores y/o canales para peces en presas y diques, como disipadores de energía en canales y ríos, o como aireadores en plantas de tratamiento y torrentes contaminados. Diversos investigadores han estudiado el flujo en vertedores escalonados, enfocándose en estructuras de gran pendiente ($\theta \approx 45°$), por lo que a la fecha, el comportamiento del flujo sobre vertedores con pendientes moderadas ($\theta \approx 15$ a $30°$) no ha sido totalmente entendido. El presente artículo comprende un estudio experimental de las propiedades físicas del flujo aire-agua sobre canales escalonados con pendientes moderadas, típicas en presas de materiales sueltos. Un extenso rango de gastos en condiciones de flujo rasante se investigó en dos modelos experimentales a gran escala ($L_e = 3$ a 6): un canal con pendiente 3.5H:1V ($\theta \approx 16°$) y dos alturas de escalón distintas (h = 0.1 y 0.05 m), y un canal con pendiente 2.5H:1V ($\theta \approx 22°$) y una altura de escalón de h = 0.1 m. Los resultados incluyen un análisis detallado de las propiedades del flujo en vertedores escalonados con pendientes moderadas y un nuevo criterio de diseño hidráulico, el cual está basado en los resultados experimentales obtenidos.

Palabras clave: vertedores escalonados, flujo aire-agua, flujo rasante, vórtices recirculantes, intercambio de *momentum*, modelos físicos.

Introducción

En presas de gravedad (o concreto), el uso de canales escalonados como vertedores es común, debido a que el método de colocación del CCR es compatible con la superficie escalonada de la cara aguas abajo de la cortina de la presa (ilustración 1). La presencia de los escalones aumenta de manera considerable la resistencia al flujo y la disipación de energía, lo cual permite suprimir o reducir el tamaño de las estructuras disipadoras de energía aguas abajo de la rápida (i.e. tanques amortiguadores y/o cubetas de lanzamiento). La auto-aireación del flujo en canales escalonados contribuye además a prevenir riesgos de cavitación en la rápida.

Diversos investigadores han estudiado el flujo en vertedores escalonados. Sin embargo, en los estudios previos a 1993 no se consideraron los efectos de la auto-aireación del flujo. A partir de esta fecha, la mayoría de los estudios se han enfocado en vertedores escalonados con grandes pendientes ($\theta \approx 45°$), típicas en presas de gravedad. En la actualidad, los canales escalonados, además de ser usados para evacuar avenidas en presas de concreto, se usan como canales para peces en diques, como disipadores de energía en canales y ríos, o como aireadores en plantas de tratamiento y torrentes contaminados, donde el aire ingresado oxigena artificialmente las corrientes con bajo contenido de oxígeno disuelto. Diversas técnicas constructivas (*i.e.* colchones "Reno", gaviones de rip-rap, etcétera) han promovido la propagación de estas aplicaciones (ilustración 2).

Otra aplicación se trata de los "vertedores de derrame en presas de materiales sueltos o enrocamiento". Este concepto consiste en colocar escalones de CCR o bloques de concreto pre-fabricado sobre la cara aguas

Ilustración 1. Vertedor de la presa "Riou", Francia, 1990. Presa de gravedad construida con CCR, y vertedor escalonado. Altura de escalón: h = 0.43 m.

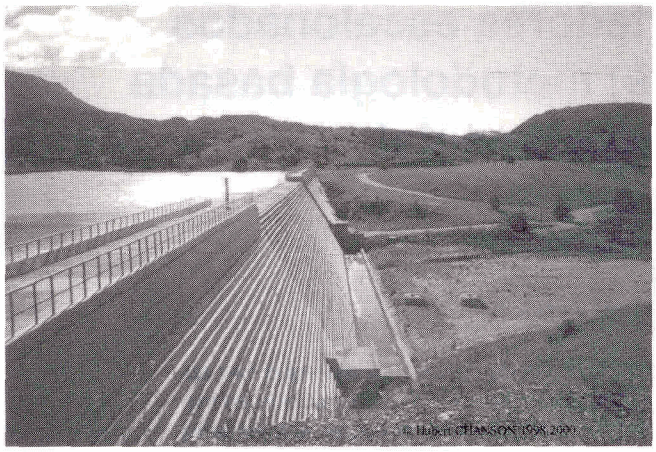
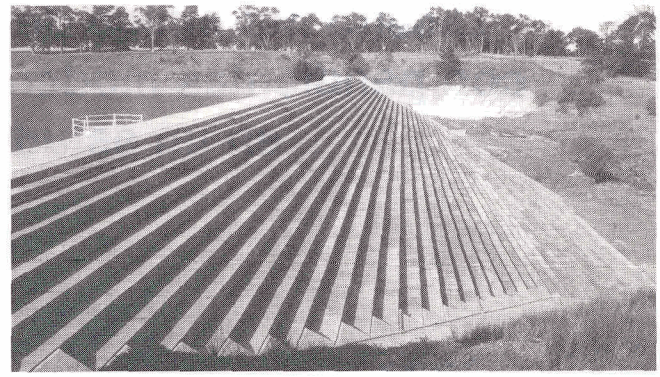


Ilustración 2. Vertedor de gaviones con pendiente moderada, Gold Coast, Australia, 1996. Altura de escalón: h = 0.3 m.

abajo de la cortina de estas presas, para que una sección o toda la cortina funcione como vertedor al ser rebasada (ilustración 3).

Las ventajas de este concepto son la rapidez de colocación, su bajo costo y la posibilidad de construcción sin interferir en la operación del embalse. Este tipo de presas normalmente tienen una altura de 15 a 20 m, y el talud de su paramento aguas abajo puede variar entre 10 y 30°. Los fondos escalonados utilizados en canales y ríos generalmente también tienen pendientes del mismo orden. A pesar de la proliferación de estas nuevas aplicaciones, el comportamiento del flujo sobre vertedores con pendientes moderadas ($\theta \approx$ 10 a 30°) ha sido es-

Ilustración 3. Presa de materiales sueltos "Melton", Victoria, Australia (1916). El vertedor de derrame se agregó a la cortina en 1994.



casamente estudiado, por lo que sus propiedades físicas no han sido totalmente comprendidas a la fecha. La naturaleza altamente turbulenta y el gran contenido de aire de estos flujos tampoco han permitido el desarrollo de un modelo analítico confiable para predecir sus características, por lo que el análisis de dicho flujo debe hacerse por medio de estudios experimentales.

El presente artículo comprende un estudio experimental de las propiedades físicas del flujo aire-agua sobre canales escalonados con pendientes moderadas. Los resultados proporcionan un mejor entendimiento de los procesos turbulentos en los flujos aire-agua que ocurren en canales escalonados y clarifican la influencia de éstos en las propiedades disipadoras de dichas estructuras (*i.e.* intercambio de *momentum*, ingreso de aire y turbulencia). En este estudio se presenta, además, un nuevo criterio de diseño hidráulico para vertedores escalonados con pendientes moderadas, el cual está basado en los resultados experimentales obtenidos.

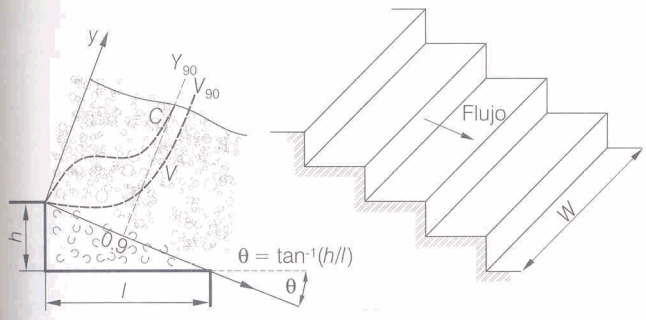
Conceptos básicos en la hidráulica de canales escalonados

Un canal escalonado es un canal artificial inclinado formado por escalones, donde h es la altura, L es la huella y θ es la pendiente del escalón (ilustración 4).

El flujo que escurre sobre canales escalonados es altamente turbulento y presenta autoaireación o "aguas blancas", por lo que para caracterizar debidamente las propiedades del flujo, dicha aireación siempre debe tomarse en cuenta.

En el presente estudio se utilizaron sondas de conductividad de doble punta para medir las propiedades del flujo aireado en un extenso rango de gastos en flujo rasante. Dichas sondas son capaces de medir concen-

Ilustración 4. Definiciones básicas del flujo en un vertedor escalonado.



tración de aire, velocidad, turbulencia y tirantes característicos en flujos aire-agua. La concentración de aire o relación de vacíos en flujos aireados se define como el volumen de aire no disuelto contenido en un volumen de flujo aire-agua. La concentración de aire media se calcula como:

$$\overline{C} = \int_0^{Y_{90}} C \cdot dy \qquad (1)$$

donde y es la distancia normal al pseudo-fondo formado por los vértices de los escalones y Y_{90} es el tirante correspondiente a una concentración de aire igual a 90% ($C = 0.9$). El tirante del flujo aire-agua se calcula tomando en cuenta la concentración de aire:

$$d = \int_0^{Y_{90}} (1-C) \cdot dy = \left(1-\overline{C}\right) \cdot Y_{90} \qquad (2)$$

y la velocidad media del flujo se calcula como:

$$U_w = \frac{q_w}{d} \qquad (3)$$

donde q_w es el gasto unitario medido sobre la cresta del vertedor.

Tipos de flujo en un vertedor escalonado

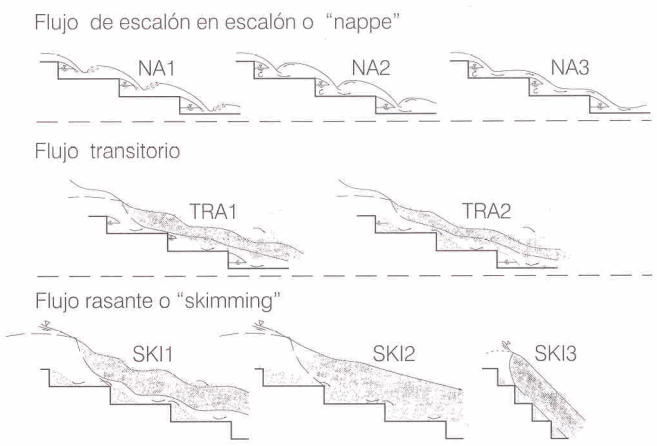
El flujo sobre un vertedor escalonado se divide en función del gasto de operación en tres diferentes regímenes: flujo saltante (también llamado de escalón en escalón o "*nappe*"), flujo transitorio, y flujo rasante o "*skimming*" (ilustración 5).

Para gastos pequeños, el flujo escurre sobre el vertedor en forma de caídas sucesivas que saltan de un escalón a otro impactando en la huella del escalón. Chanson (2002) propuso que el flujo saltante puede a su vez ser dividido en tres subtipos: flujo saltante con salto hidráulico total o parcialmente desarrollado (tipo NA1 o NA2, respectivamente), y tipo NA3 o flujo saltante sin salto (ilustración 5). El flujo saltante no se incluye en el presente estudio. Estudios autoritarios de éste pueden encontrarse en Peyras *et al.* (1992), Chamani y Rajaratnam (1994), Toombes y Chanson (2000), y Toombes (2002).

El flujo en transición se observa cuando el vertedor opera con gastos intermedios. Este régimen presenta fuertes fluctuaciones hidrodinámicas y una apariencia caótica con gran aireación de flujo y gran cantidad de atomización o "spray", lo cual provoca que las propiedades del flujo cambien de un escalón a otro (ilustración 5). A pesar de no haberlo estudiado a fondo, Elviro y Mateos (1995), y Ohtsu y Yasuda (1997) fueron los primeros en describirlo. Chanson y Toombes (2004) realizaron una de las pocas caracterizaciones de flujo transitorio con las que se cuenta hasta la fecha; sin embargo, la información que se tiene acerca de este tipo de flujo es aún muy limitada. Dichos autores dividieron el flujo transitorio en dos subtipos: flujo TRA1, el cual presenta cavidades de aire de diversos tamaños debajo de la corriente principal del flujo, y flujo TRA2, donde dichas cavidades de aire alternan con vórtices de flujo recirculante (ilustración 5).

Para gastos mayores se observa el flujo rasante, el cual resbala de manera coherente sobre el pseudo-fondo formado por los vértices de los escalones (ilustración 5). Debajo de la corriente principal del flujo, en las cavidades formadas por los escalones, se observan vórtices de flujo recirculante (Chamani y Rajaratnam, 1994). Dichos vórtices se mantienen debido a la transmisión de esfuerzo cortante con la corriente principal del flujo y contribuyen de manera importante a la disipación de energía (González y Chanson, 2004).

Ilustración 5. Tipos de flujo en vertedores escalonados.



Chanson (1997) propuso tres subdivisiones para el flujo rasante con base en las características de los vórtices debajo de la corriente principal del flujo. Ohtsu *et al.* (2004) presentaron otra clasificación muy similar con base en el comportamiento de la superficie libre del flujo. Dichos estudios establecen que en canales con pendiente baja a moderada ($5^o < \theta < 22^o$) se presentan dos subtipos de flujo rasante: flujo SK1 para gastos pequeños y flujo SK2 para gastos mayores. Para canales de mayor pendiente ($\theta > 22^o$) se presenta el flujo SK3. En el flujo SK1, los vórtices recirculantes abarcan sólo la parte de aguas arriba de la huella del escalón; la corriente principal del flujo impacta aproximadamente en la mitad de la huella del escalón y escurre paralela al escalón, provocando fricción entre flujo y huella. En el flujo SK2, el flujo escurre paralelo al pseudo-fondo formado por los escalones. Los vórtices que se presentan debajo del flujo abarcan casi toda la huella del escalón, interfiriendo en ocasiones con el siguiente vórtice aguas abajo (ilustración 5). En el flujo SK3, la corriente también escurre paralela al pseudo-fondo, independientemente de la geometría del escalón. Sin embargo, en este tipo de flujo los vórtices recirculantes presentan un tamaño cuasi-estable (ilustración 5).

González (2005) señaló el comportamiento tridimensional de los vórtices recirculantes, observando de tres a cuatro celdas transversales en modelos relativamente anchos ($W = 1$ m) con pendiente moderada ($\theta = 16$ y 22°). Matos y Yasuda (comunicación personal) realizaron observaciones similares en vertedores de gran pendiente.

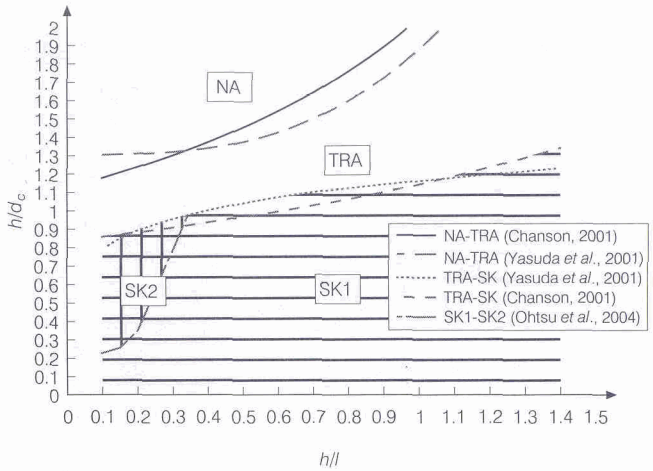
Predicción del tipo de flujo

El tipo de flujo sobre canales escalonados es función del gasto de operación y de la geometría de los escalones. Chanson (2002) y Yasuda *et al.* (2001) recomendaron límites para predecir los tipos de flujo en canales escalonados (ilustración 6). Ohtsu *et al.* (2004) propusieron un criterio que permite predecir el límite entre los subtipos SK1 y SK2 en canales con pendientes entre 5.7 y 19°. Éste también se incluye en la ilustración 6.

Ingreso de aire en flujos rasantes

El flujo rasante tiene una apariencia similar al flujo en rápidas de fondo liso. En la parte aguas arriba, el flujo es transparente, sin embargo en la cresta del vertedor se genera turbulencia y se desarrolla una capa límite turbulenta. Cuando ésta alcanza la superficie libre del flujo se inicia el proceso de auto-aireación del flujo. A este punto se le conoce como punto de inicio de ingreso de aire. En las inmediaciones del punto de inicio de ingreso de aire

Ilustración 6. Criterios de cambio de régimen en vertedores escalonados.



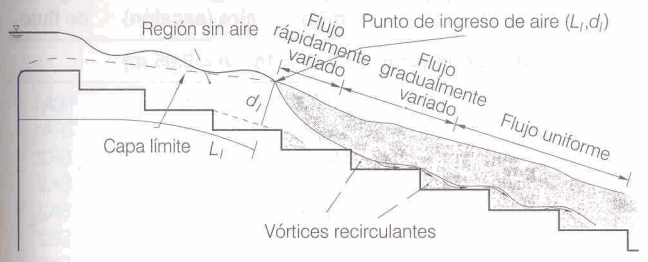
diversos autores han observado una región de flujo rápidamente variado. (Chamani y Rajaratnam, 1999a; Chamani y Rajaratnam, 1999b; Matos, 2000; Ohtsu y Yasuda, 1997). En esta región, grandes cantidades de aire son atrapadas cerca de la superficie libre del flujo. La turbulencia en esta zona es lo suficientemente grande como para vencer la tensión superficial y la fuerza de flotación de las burbujas, inyectando el aire atrapado al flujo e iniciando la autoaireación. Aguas abajo de este punto, el flujo es completamente desarrollado y presenta una zona de flujo gradualmente variado donde ocurre una rápida auto-aireación, la cual se extiende hasta alcanzar una zona de flujo en equilibrio (o flujo uniforme) en la cual las características del flujo permanecen cuasi-constantes (ilustración 7).

En la zona de desarrollo de la capa límite, la distribución de velocidad sigue un modelo potencial que puede ser expresado por:

$$\frac{V}{V_{máx}} = \left(\frac{y}{\partial_{BL}}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{para } 0 < \frac{y}{\partial_{BL}} < 1 \qquad (4)$$

donde ∂_{BL} es el grosor de la capa límite; y es la distancia normal al pseudo-fondo formado por los escalones; $V_{máx}$ es la velocidad ideal del flujo $V_{máx} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_l - d \cdot \cos\theta)}$; g, la aceleración de la gravedad; H_1, la energía total del flujo; d, el tirante del flujo, y θ es la pendiente de la rápida. Amador (2005) reportó valores de "n" = 3 en vertedores de mayor pendiente. Diversos autores han tratado de predecir el crecimiento de la capa límite para localizar el punto de inicio de la

Ilustración 7. Detalle de flujo rasante en un vertedor escalonado con pendiente moderada.



autoaireación. Chanson (2002) reanalizó la información experimental obtenida en diversos estudios (Beitz y Lawless, 1992; Bindo *et al.*, 1993; Frizzell y Mefford, 1991; Sorensen, 1985; Tozzi, 1992) y la comparó con información obtenida en prototipos, incluyendo la avenida que se presentó en la presa Trigomil antes de ser terminada en enero de 1992. El mejor ajuste de los datos arrojó el siguiente criterio:

$$\frac{L_I}{h \cdot \cos\theta} = 9.719 \cdot (\sin\theta)^{0.0796} \cdot (F^*)^{0.713} \quad (5)$$

$$\frac{d_I}{h \cdot \cos\theta} = \frac{0.4034}{(\sin\theta)^{0.04}} \cdot (F^*)^{0.592} \quad (6)$$

donde L_I y d_I son la distancia al punto de inicio de ingreso de aire y el tirante en el mismo sitio, F^* es el número de Froude en términos de la altura de rugosidad equivalente del escalón $k_s = h \cdot \cos\theta$:

$$F^* = \frac{q_w}{\sqrt{g \cdot \text{sen}(\theta) \cdot (k_s)^3}} \quad (7)$$

siendo q_w el gasto unitario y h la altura del escalón.

Instalación experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en el laboratorio de hidráulica Gordon Mackay de la Universidad de Queensland, Australia, en una instalación hidráulica equipada con dos canales escalonados de pendiente distinta (cuadro 1), uno de ellos ($\theta = 16^o$) fue equipado con dos alturas de escalón intercambiables (h = 0.1 y 0.05 m) para realizar un riguroso análisis de los efectos de escala. La instalación consistió en un tanque conectado al canal escalonado por medio de una contracción (4.8:1). El canal estuvo precedido por un vertedor de cresta ancha de esquinas redondeadas con una longitud de 0.62 m y un ancho de 1 m, y seguido de un tanque amortiguador horizontal y un cárcamo de bombeo para permitir recirculación. Los gastos fueron controlados por una bomba conectada a un inversor electrónico Toshiba Tosvert VF-A5P®, garantizando un preciso control de éstos durante los experimentos. El mayor gasto que la bomba entregó fue $Q = 0.35$ m^3/s.

El tamaño de los modelos correspondió a escalas geométricas L_e = 3 a 6, con base en una altura de escalón en prototipo de $h = 0.3$ m (altura común de las capas de CCR).

Mediciones experimentales

En la primera configuración del canal 1 ($\theta = 16^o$, $h = 0.1$ m) se midieron doce gastos dentro del rango $0.6 < d_c/h < 1.7$ mientras que en la segunda configuración del mismo ($\theta = 16^o$, $h = 0.05$ m) se midieron nueve gastos dentro del rango $0.7 < d_c/h < 3.2$ (d_c es el tirante de flujo crítico sobre la cresta del vertedor). En el segundo canal ($\theta = 22^o$, $h = 0.1$ m), se midieron cuatro gastos dentro del rango $1.1 < d_c/h < 1.7$ (cuadro 2). Los gastos ensayados en ambos canales correspondieron a flujo rasante.

Los tirantes y las velocidades del flujo sobre la cresta del vertedor fueron medidos con limnímetros de punta y tubos de Pitot, respectivamente (ϕ = 3.3 mm). Las propiedades del flujo aire-agua en el canal escalonado se midieron con sondas de conductividad de doble punta, operando en conjunto con un detector de burbujas. Las sondas se componen de dos sensores de diámetro microscópico (ϕ = 0.025 mm), los cuales, al ser alineados en la dirección del flujo, detectan la diferencia de conductividad eléctrica entre las burbujas de aire y las gotas de agua que las impactan, enviando una señal de voltaje que puede ser leída con voltímetros, osciloscopios o computadoras (Chanson, 1997).

Cuadro 1. Características principales de los modelos experimentales.

	Longitud (m)	Ancho (m)	Pendiente (θ) grados (°)	Número de escalones	Altura de escalón (m)	Huella (m)
Canal 1, configuración 1	3.15	1	16	9	0.1	0.35
Canal 1, configuración 2	3.15	1	16	18	0.05	0.175
Canal 2	2.5	1	22	10	0.1	0.25

Cuadro 2. Condiciones de flujo durante las mediciones experimentales.

Núm.	d_c/h	d_{crest}/h	q_w m²/s	Ingreso de aire (escalón)	Régimen de flujo
Canal 1, configuración 1 (θ = 16°, h = 0.1 m)					
1	0.835	0.835	0.0756	3	TRA1
2	0.6	0.6	0.0460	3	TRA1
3	0.7	0.7	0.0580	3	TRA1
4	0.9	0.9	0.0846	3	TRA1
5	1.0	1.0	0.0990	4	TRA2
6	1.1	1.1	0.1143	4	TRA2
7	1.2	1.2	0.1302	entre 4 y 5	TRA2
8	1.3	1.3	0.1468	5	TRA2/SK2
9	1.4	1.4	0.1641	5	SK2
10	1.5	1.5	0.1820	6	SK2
11	1.6	1.6	0.2005	6	SK2
12	1.7	1.7	0.2195	6	SK2
Canal 1, configuración 2 (θ = 16°, h = 0.05 m)					
1	0.7	0.7	0.0205	4	TRA1
2	0.9	0.9	0.0298	4	TRA1
3	1.5	1.5	0.0643	8	SK2
4	1.7	1.7	0.0776	8	SK2
5	2	2	0.0990	10	SK2
6	2.2	2.2	0.1143	12	SK2
7	2.4	2.4	0.1302	13	SK2
8	2.7	2.7	0.1550	14	SK2
9	3.2	3.2	0.2000	15	SK2
Canal 2 (θ = 22°, h = 0.1 m)					
1	1.1	1.05	0.103	5	SK2
2	1.3	1.2	0.126	6	SK2
3	1.5	1.35	0.153	6	SK2
4	1.7	1.5	0.176	6	SK2

Una descripción detallada de la operación de dichas sondas se presenta en Toombes (2002) y González (2005). En la dirección normal al flujo, las sondas fueron trasladadas con un mecanismo conectado a un limnímetro electrónico Mitutoyo digimatic®, con una precisión de Δy = 0.1 mm; mientras que en la dirección del flujo, la translación de las sondas se realizó con una precisión de Δx = 1 mm. Las propiedades del flujo se midieron colocando la sonda al centro del canal en cada uno de los vértices aguas abajo del punto de ingreso de aire y entre éstos, a 25, 50 y 75% de la distancia que los separa. En la dirección normal al flujo, las mediciones se realizaron desde el fondo del canal hasta el tirante Y_{90}. Los resultados experimentales obtenidos con la sonda incluyeron concentración de aire, frecuencia y tamaño de burbujas, velocidad y turbulencia.

Procesamiento de datos

La concentración de aire C se calculó como el tiempo que la sonda permanece en aire. La frecuencia F se estimó como el número de burbujas que impactan la sonda durante el periodo de medición. La velocidad se obtuvo con base en la detección sucesiva de volúmenes aire-agua por ambos sensores de la sonda (ilustración 8).

En flujos altamente turbulentos es muy improbable que ambos sensores detecten el mismo número de burbujas, por lo que es necesario utilizar una técnica de correlación cruzada (Crowe *et al.*, 1998). La velocidad promedio del flujo se calculó como:

$$V = \frac{\Delta x}{T} \qquad (8)$$

donde Δx es la distancia entre ambos sensores y T es el tiempo correspondiente al máximo valor de la correlación cruzada (ilustración 8). La turbulencia se calculó comparando las desviaciones estándar de la correlación cruzada y la autocorrelación de la señal principal:

$$Tu = \frac{u'}{V} \approx 0.851 \frac{\sqrt{\Delta_T^{\,2} - \Delta_t^{\,2}}}{T} \qquad (9)$$

donde Δ_t es el tiempo para el cual la auto-correlación es igual a 0.5 (valor mínimo necesario para garantizar autosimilitud de la señal del sensor principal) y Δ_T es el tiempo correspondiente a la mitad del valor máximo de la correlación cruzada (ilustración 8).

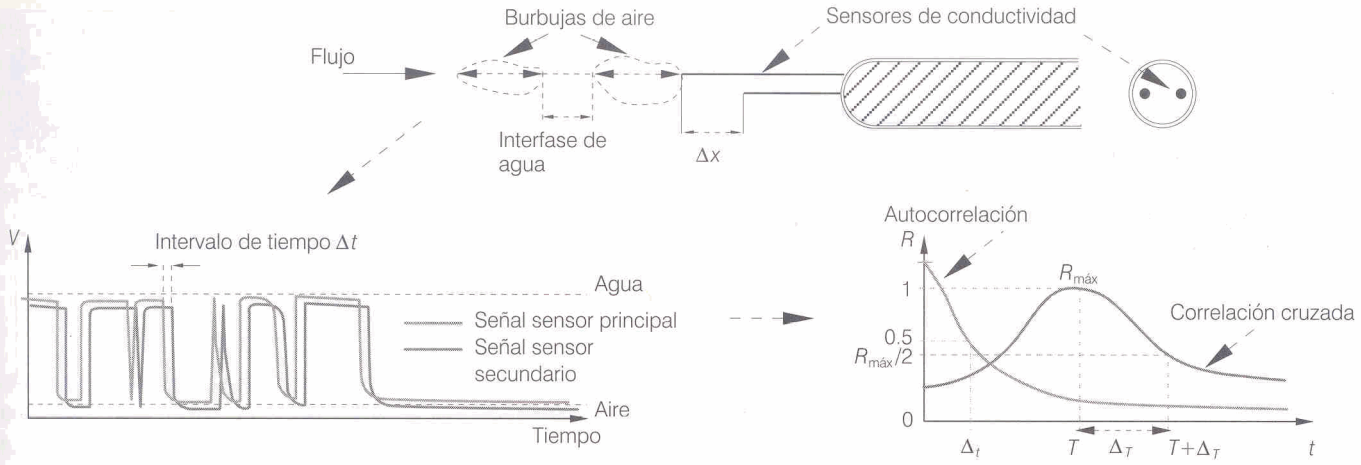
La turbulencia aquí obtenida es una velocidad adimensional característica de las fluctuaciones de la velocidad entre los dos sensores (Chanson y Toombes, 2001; Chanson y Toombes, 2002). Nótese que no es estrictamente idéntica a la intensidad turbulenta, sino solamente una estimación. En este estudio sólo se midieron velocidades y turbulencias en sentido del flujo, ya que las sondas no pueden medir las demás componentes de la velocidad.

Resultados experimentales

En la ilustración 9 se presentan perfiles experimentales de las propiedades de flujo obtenidos en ambos canales (θ = 16 y 22°), donde Y_{90} y V_{90} son el tirante y velocidad correspondientes a una concentración de aire C = 0.9; F es la frecuencia de burbujas y Tu es la turbulencia.

La ilustración 9a presenta perfiles típicos de concentración de aire. Se observa que los datos obtenidos arri-

Ilustración 8. Medición experimental de la velocidad del flujo aire-agua.



ba del pseudo-fondo en ambos canales fueron similares y siguieron de cerca una solución de la ecuación de difusión (Chanson y Toombes, 2001). Sin embargo, los valores medidos en la parte aguas abajo de los escalones indicaron una mayor aireación del flujo entre éstos ($y < 0$). Matos (2001) reportó resultados similares. Chanson y Toombes (2002) indicaron que la inercia de las burbujas de aire atrapadas en el centro de los vórtices debajo de la corriente aumenta la aireación en las zonas entre escalones. Los presentes resultados coinciden con dicha hipótesis.

La ilustración 9b presenta perfiles típicos de velocidad de flujo bifásico. Se observa que los perfiles obtenidos encima de los vértices de escalón siguieron una ley potencial:

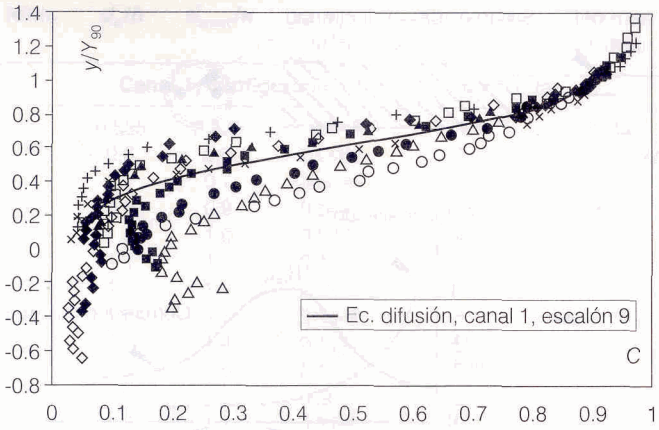
$$\frac{V}{V_{90}} = \left(\frac{y}{Y_{90}}\right)^{\frac{1}{n}} \text{ para } \frac{y}{Y_{90}} \leq 1 \text{ y } \frac{y}{Y_{90}} \geq 1 \qquad (10)$$

donde V_{90} es la velocidad correspondiente a Y_{90} ($C = 0.9$). Los valores del exponente "n" oscilaron entre 7.8 y 11.8 para flujos rasantes. Los perfiles obtenidos entre escalones indicaron mayores velocidades en las zonas inmediatamente encima de los vórtices recirculantes ($0 \leq y/Y_{90} \leq 0.3$). Estos resultados coinciden con la hipótesis de que la capa límite que se crea aguas abajo de cada escalón afecta a la corriente principal de flujo y a los vórtices debajo de ésta.

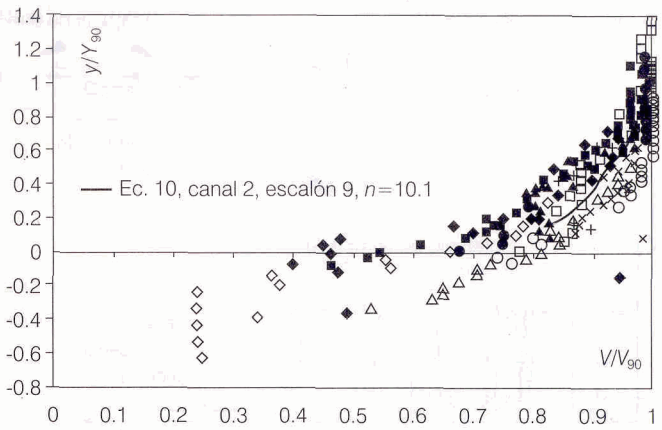
En la ilustración 9c se presentan perfiles experimentales de intensidad turbulenta (Tu). Los valores obtenidos son mayores a 100%. De acuerdo con mediciones de turbulencia en flujos entre rocas (Sumer *et al.*, 2001) y en la zona de flujo no aireado en flujos rasantes (Amador *et al.*, 2004; Ohtsu y Yasuda, 1997), los valores obtenidos indicaron una mayor turbulencia en flujos rasantes sobre canales escalonados y rugosos que en canales de fondo liso. Los resultados también indicaron un aumento en los niveles de turbulencia en la parte aguas abajo de los escalones. Por ejemplo, en la ilustración 9c, las mayores turbulencias (Tu = 110 y 140%) se observaron a 50 y 75% de la distancia entre vértices, respectivamente. Estos resultados son consistentes con observaciones del flujo en la segunda mitad de los escalones, zona donde los vórtices recirculantes recargan y expulsan fluido hacia la corriente principal. En la primera mitad de los escalones, los perfiles de turbulencia mostraron patrones distintos a los perfiles obtenidos en la segunda mitad. Estas discrepancias se atribuyen a la influencia de la capa límite en desarrollo y el intercambio de *momentum* entre la corriente principal y el flujo recirculante. Chanson y Toombes (2002) indicaron que el incremento en turbulencia en canales escalonados se puede atribuir a varios procesos interfaciales que afectan la velocidad de flujo, incluyendo la colisión, partición y coalición de estructuras aire-agua. La ilustración 9d presenta perfiles adimensionales de frecuencia de burbujas $F{\cdot}d_c/V_c$, donde d_c y V_c son el tirante y la velocidad críticos del flujo, medidos sobre la cresta del vertedor. Los valores obtenidos indicaron que en los canales con misma altura de escalón (h = 0.1 m), el número de burbujas registrado por la sonda fue similar en todas las posiciones de medición (encima de o entre los vértices de escalón).

Con base en los resultados aquí obtenidos, se cree que las interacciones entre la capa límite aguas abajo de cada vértice, la corriente principal del flujo y los vórtices que se observan debajo de ésta, afectan las propiedades del flujo (velocidad, turbulencia y concentración de aire) y ulteriormente contribuyen a incrementar la tasa de disipación de energía en vertedores escalonados con pendientes moderadas.

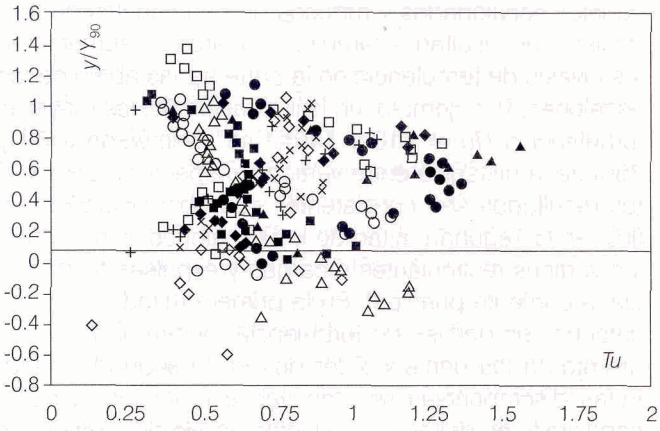
Ilustración 9. Propiedades experimentales del flujo aire-agua sobre vertedores escalonados con pendiente moderada.



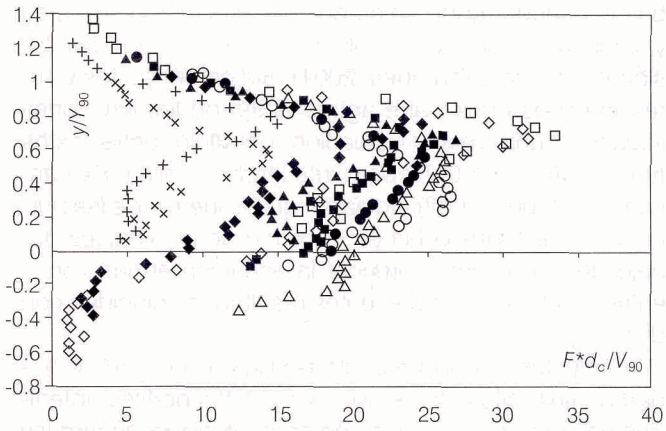
a) Concentración de aire



b) Velocidad de flujo



c) Turbulencia



d) Frecuencia de burbujas

Simbología de la ilustración 9.

Geometría del canal ($\theta = 16°$, $h = 0.1$)		Geometría del canal ($\theta = 16°$, $h = 0.05$)		Geometría del canal ($\theta = 22°$, $h = 0.1$)	
□	Escalón 8	+	Escalón 10	▲	Escalón 9
◇	81	X	Escalón 11	◆	91
△	82			■	92
○	83			●	93

Nota: 81, 82 y 83 son posiciones ubicadas a 25, 50 y 75% de la distancia entre los vértices de los escalones 8 y 9; mientras que 91, 92 y 93 representan posiciones similares entre los escalones 9 y 10.

Resistencia al flujo

En vertedores lisos, la mayor parte de las pérdidas de energía se debe a la fricción entre flujo y fondo del canal. En vertedores escalonados existen otros mecanismos que incrementan la resistencia al flujo (vórtices recirculantes debajo de la corriente principal e intercambios de *momentum* entre ésta y la capa límite que se forma aguas abajo de cada vértice). En canales escalonados con pendiente moderada, la combinación de estos mecanismos incrementa aún más la resistencia al flujo. Este estudio presenta factores de fricción experimentales para vertedores escalonados con pendientes de 16 y 22°. A pesar de sus limitaciones en flujos bifásicos turbulentos, la fórmula de Darcy-Weisbach se usó para calcular los factores de fricción experimentales debido a su uso común en el diseño de estructuras hidráulicas.

Pérdidas de energía en vertedores operando con flujos rasantes

En la zona de equilibrio de un flujo rasante totalmente desarrollado, el principio de *momentum* establece que la fricción se opone a la componente en la dirección del flujo del peso del volumen del fluido.

$$\tau_0 \cdot P_w = \rho_w \cdot g \cdot A_w \cdot \sin\theta \qquad (11)$$

donde τ_0 es el esfuerzo cortante promedio entre la corriente del flujo y los vórtices recirculantes debajo de ella, P_w es el perímetro mojado, A_w es el área del flujo y θ es la pendiente del canal. En términos adimensionales para un canal ancho de sección rectangular, la ecuación (11) se simplifica:

$$f_e \frac{8\tau_0}{\rho_w \cdot U_w^2} = \frac{8 \cdot g}{q_w^2} \cdot \left(\int_{y=0}^{y=Y_{90}} (1-C)dy \right)^3 \cdot \text{sen}\,\theta \qquad (12)$$

donde f_e es el factor de fricción de Darcy, equivalente al flujo aire-agua; C, la concentración de aire; y, el tirante de flujo; Y_{90}, el tirante correspondiente a C = 90%; U_w, la velocidad media del flujo (ecuación 3); q_w, el gasto unitario, y d es el tirante equivalente al flujo sin aire (ecuación 2).

En flujos totalmente desarrollados que no han alcanzado la zona de flujo en equilibrio, el esfuerzo cortante entre la corriente y los vórtices recirculantes debe deducirse usando la pendiente de fricción. Para un canal ancho de sección rectangular, la ecuación resulta:

$$f_e = \frac{8 \cdot g}{q_w^2} \cdot \left(\int_{y=0}^{y=Y_{90}} (1-C)dy \right)^3 \cdot S_f \qquad (13)$$

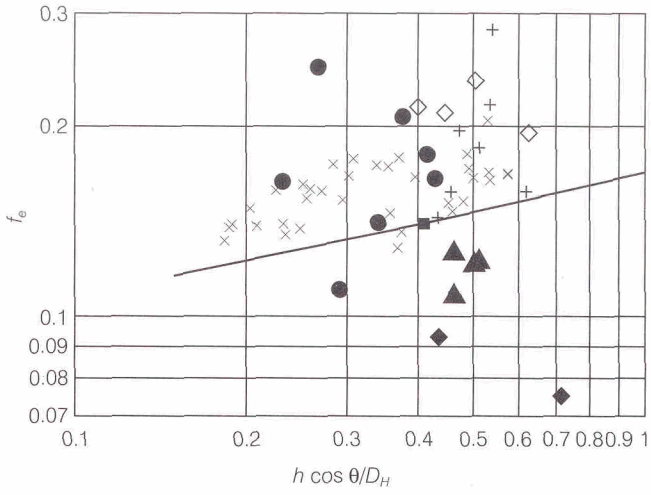
donde q_w es el gasto unitario; S_f, la pendiente de fricción $S_f = -\partial H/\partial x$; H, la energía total, y x es una distancia medida en la dirección de flujo. Ambos canales utilizados en este estudio fueron relativamente cortos, por lo que el flujo no alcanzó condiciones de equilibrio al pie del vertedor. Todas las mediciones fueron hechas en la sección de flujo gradualmente variado, por tanto, los factores de fricción se calcularon con base en las velocidades experimentales, usando la ecuación (13).

La ilustración 10 compara los valores de factores de fricción para ambos modelos (θ = 16 y 22°) con factores de fricción previamente obtenidos en la misma instalación experimental por Chanson y Toombes (2001), y con valores obtenidos en dos modelos con pendientes de 11 y 19°, y diversas alturas de escalón (h = 0.025, 0.0393, 0.05 y 0.0785 m) por Yasuda y Ohtsu (1999).

Los resultados también son comparados con una gruesa aproximación que ajustó 188 datos experimentales medidos en modelos de laboratorio con pendientes bajas a moderadas (Chanson *et al.*, 2002):

$$\frac{1}{\sqrt{f_m}} = 2.43 - 0.2676 \cdot \ln\left(\frac{h \cdot \cos\theta}{D_H}\right) \qquad (14)$$

Ilustración 10. Factores de fricción experimentales obtenidos en canales escalonados.



Simbología de la ilustración 10.

Geometría del canal	Símbolo	Bibliografía
θ = 16°, h = 0.1 m	▲	CG201 (González, 2005)
θ = 16°, h = 0.05 m	●	CG201 (González, 2005)
θ = 16°, h = 0.1 m	■	(Chanson y Toombes, 2001a)
θ = 22°, h = 0.1 m	◇	CG202 (González, 2005)
θ = 22°, h = 0.1 m	+	(Chanson y Toombes, 2001a)
θ = 22°, h = 0.1 m	X	(Chanson y Toombes, 2001a)
θ = 22°, h = 0.1 m	◆	Yasuda y Ohtsu (1999)

Ecuación 14 (θ = 16°, h = 0.1 m).

donde f_m es el factor de fricción experimental, h es la altura de escalón y D_H es el diámetro hidráulico. Los factores de fricción correspondientes a la primera configuración del canal 1 (θ = 16°, h = 0.1 m) promediaron un valor de f_m = 0.12; los valores correspondientes a la segunda configuración (θ = 16°, h = 0.05 m) promediaron f_m = 0.18; los valores obtenidos para al canal 2 (θ = 22°, h = 0.1 m) promediaron f_m = 0.19.

Los presentes resultados coincidieron con la ecuación (14) y con valores experimentales previamente obtenidos en modelos con distintas pendientes (Ohtsu y Yasuda, 1997), y sugieren que en vertedores con pendientes moderadas (10°< θ < 22°), la resistencia al flujo es directamente proporcional a la pendiente del canal y alcanza un máximo para canales con pendiente de 22°.

Efectos de escala

Análisis dimensional

Las propiedades del flujo aire-agua sobre canales escalonados dependen de la geometría de los escalones, de

las propiedades del aire y agua y del gasto de operación. El análisis dimensional de un flujo rasante en equilibrio sobre un canal escalonado de sección rectangular (por medio del teorema de Buckingham-Vaschy) arrojó la siguiente relación:

$$F_2\left(\frac{U_W}{\sqrt{g\cdot d}};\frac{U_w\cdot d}{\mu_w};\frac{g\cdot\mu_w^4}{\rho_w\cdot\sigma^3};\overline{C};\frac{h}{d};\frac{W}{d};\theta;\frac{k_s'}{d}\right)=0 \qquad (15)$$

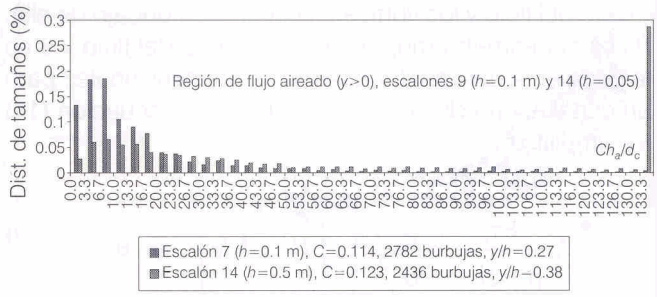
donde los primeros tres términos son los números de Froude, Reynolds y Morton (equivalente al de Weber), respectivamente, y los últimos cinco términos caracterizan la geometría del escalón y la rugosidad de su superficie, siendo U_w y $\overline{C}$ la velocidad y concentración de aire medias del flujo; d, el tirante del flujo aire agua; θ y W, la pendiente y el ancho del canal; h, la altura del escalón; k_s', la rugosidad de la huella del escalón; ρ_w y μ_w, la densidad y viscosidad dinámica del agua, y σ la tensión superficial. En el presente estudio se utilizó una similitud de números de Froude para garantizar la semejanza dinámica, debido a que es imposible lograr la similitud de números de Froude, Reynolds y Weber usando los mismos fluidos en modelo y prototipo, a menos que sus tamaños sean iguales ($L_e = 1$). En modelos de tamaño reducido ($L_e >> 1$), las burbujas de aire contenidas en el flujo mantienen el mismo tamaño en modelo y prototipo, violando toda semejanza geométrica y dinámica (Chanson, 1997; Kobus, 1984; Wood, 1991).

Efectos de escala en las propiedades del flujo aire-agua

En la ilustración 9 se comparan perfiles experimentales de las propiedades del flujo aire-agua obtenidos en el canal 1 (con dos alturas de escalón, h = 0.1 y 0.05 m) operando con el mismo gasto adimensional d_c/h. La similitud de gasto adimensional d_c/h garantiza la similitud dinámica, ya que el cociente d_c/h es análogo al número de Froude ($d_c/h \sim Fr^{2/3}$).

En las ilustraciones 9a y 9b se comparan las distribuciones de concentración de aire y velocidad. Puede observarse que la concentración de aire y velocidad de flujo fueron similares para ambas configuraciones (h = 0.1 y 0.05 m), lo que demuestra que estas propiedades no son susceptibles a efectos de escala cuando se utiliza una similitud de Froude. En las ilustraciones 9c y 9d se comparan las distribuciones de turbulencia y frecuencia de burbujas, respectivamente. Aquí puede observarse que la turbulencia y la frecuencia de burbujas correspondientes a la menor altura de escalón (h = 0.05 m) fueron un 30 a 50% menores a las obtenidas con h = 0.1 m.

Ilustración 11. Distribución de burbujas de distintos tamaños en el flujo aire-agua sobre un vertedor escalonado.



Dichos resultados sugieren efectos de escala en ambas propiedades.

En la ilustración 11 se comparan distribuciones del tamaño de burbujas contenidas en el flujo para ambas configuraciones (h = 0.1 y 0.05 m). Éstas se obtuvieron a una distancia equivalente al punto de ingreso de aire. Los resultados también sugieren efectos de escala en el tamaño de burbujas, ya que fueron comparativamente mayores en la configuración 1 (h = 0.05 m); es decir, a diferencia de la altura de escalón, el tamaño de las burbujas en la configuración 2 no fue el doble del tamaño de las burbujas en la configuración 1.

Efectos de escala en la resistencia al flujo

En la actualidad, los resultados experimentales se usan comúnmente para estimar la pérdida de energía en prototipos. Diversos investigadores han medido factores de fricción hasta 15 veces mayores que aquellos medidos en vertedores lisos (Chanson *et al.*, 2002; Ohtsu *et al.*, 2004; Rajaratnam, 1990). Sin embargo, los efectos de escala, producto de la extrapolación de resultados obtenidos en modelos altamente escalados, son en muchas ocasiones ignorados o "maquillados" con factores empíricos. Entre otros resultados, la ilustración 10 presenta factores de fricción obtenidos con base en las mediciones realizadas en el canal 1 con dos alturas de escalón distintas ($\theta = 16^o$, h = 0.05, y = 0.1 m). Los factores de fricción obtenidos indicaron que a pesar de la pequeña escala geométrica existente entre las dos alturas de escalón en el canal 1 (L_e = 2), los valores correspondientes a la configuración con menor altura de escalón fueron mayores que aquellos obtenidos en la configuración con h = 0.1 m ($f_m = 0.18 > 0.12$). Nótese que esta última hipótesis está basada en un banco de datos limitado, por lo que se necesita más información experimental para demostrarla definitivamente.

Discusión

En general, los resultados demostraron que en el modelo con escalones de menor tamaño (h = 0.05 m), el flujo fue menos turbulento y contuvo un menor número de burbujas comparativamente más grandes que en el modelo con escalones mayores (h = 0.1 m). Dichos efectos de escala afectan directamente la proporcionalidad que existe entre la turbulencia y el número de burbujas de aire en el flujo ($Tu \propto F^{1.5}$) y posteriormente contribuyen a que la resistencia al flujo sea mayor en vertedores de pendiente moderada. Los factores de fricción obtenidos confirman dicha hipótesis. Con base en los resultados anteriores se recomienda no extrapolar resultados obtenidos en modelos altamente escalados a prototipos, ya que los experimentos hechos en modelos pequeños subestiman la disipación de energía y la tasa de aireación de flujo en canales escalonados.

Criterio de diseño

A pesar del incremento en el uso de vertedores escalonados con pendientes moderadas, a la fecha sólo existen dos criterios para su diseño: los recomendados por Chanson (2002) y los de Ohtsu *et al.* (2004). A pesar de estos estudios, aún existen aspectos del flujo sobre vertedores escalonados con pendientes moderadas que no han sido totalmente comprendidos, por lo que los criterios de diseño también deben ser mejorados para aprovechar al máximo las propiedades disipadoras de estas estructuras, y reducir el tamaño y costo de otras estructuras disipadoras al pie de la cortina.

Esta sección presenta avances en el diseño de vertedores escalonados con pendientes moderadas basados en los presentes resultados. Se discuten dos tipos de aplicaciones: vertedores en presas de gravedad de CCR, y en embalses de materiales sueltos o enrocamiento con protección escalonada en la cara de aguas abajo de la cortina.

Las presas de materiales sueltos con protección en la cortina típicamente son menores a 30 m, con taludes (en la cara aguas abajo) de pendientes moderadas (2H:1V a 4H:1V). Mientras que las presas de gravedad construidas con CCR son generalmente menores a 60 m de altura y presentan taludes ligeramente más inclinados que las presas de materiales sueltos (6H:1V a 1H:1V).

Consideraciones generales de diseño

En el diseño de un vertedor escalonado se conocen la altura de la cortina, el talud de su cara aguas abajo, el gasto de diseño y el tamaño de escalón, el cual generalmente se rige por la técnica constructiva utilizada (h = 0.3 a 0.6 m para CCR o gaviones). Por tanto, el diseñador tiene que estimar la capacidad del vertedor y la disipación de energía.

En vertedores escalonados, la máxima capacidad se obtiene con flujos rasantes, mientras que la máxima disipación de energía se alcanza con flujos saltantes. Por tanto, el régimen de flujo de operación en el vertedor se selecciona con base en las necesidades del proyecto (mayor disipación de energía o mayor gasto de diseño).

Este criterio se enfoca en vertedores operando con flujos rasantes. Para presas de gravedad y enrocamiento, donde se requiere conducir el mayor gasto posible, se recomienda que el vertedor opere con flujo rasante para la mayoría de gastos a transitar (incluyendo avenidas menores a las de diseño). El flujo transitorio debe ser evitado, ya que puede causar fluctuaciones hidrodinámicas importantes en el vertedor y provocar fallas.

Diseño de la cresta

Los vertedores de cresta ancha son convenientes en presas de materiales sueltos, ya que los escalones modifican el flujo en el fondo de la cresta. Cuando se usan crestas tipo Ogee o circular, las presiones al inicio de la rápida difieren de la óptima atmosférica y pueden causar separación de flujo y cavitación. La cresta ancha además facilita el acceso de maquinaria durante la construcción y permite colocar presas inflables para incrementar la capacidad del embalse en etapas futuras. Para presas de gravedad de CCR con mayores pendientes de talud se prefieren las crestas tipo Ogee o circular, con una transición de escalones pequeños entre la cresta y la rápida para evitar cavitación.

Diseño hidráulico de la rápida

La ilustración 12 presenta el criterio de diseño hidráulico para rápidas escalonadas con pendientes moderadas. Normalmente el ancho W, la pendiente θ y longitud del canal L, así como la altura de la cortina H_d y el gasto de diseño Q_w son conocidos. Por tanto, el primer paso es calcular el tirante crítico de flujo sobre la cresta:

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{Q_w^2}{g \cdot W^2}} \qquad (16)$$

Posteriormente se escoge la altura de escalón para que el canal opere con condiciones de flujo rasante siguiendo los criterios de Chanson (2002) y/o Ohtsu *et al.* (2004) (ilustración 6). Ambos pueden ser usados indistintamente. En la ilustración 12 se muestra el primer criterio:

$$\frac{d_c}{h} > 1.2 - 0.325 \cdot \tan\theta \qquad (17)$$

Una vez seleccionados el gasto y la altura de escalón, se localiza el punto de ingreso de aire, asegurándose que la aireación ocurra en la primera mitad del vertedor, para que el flujo alcance condiciones de equilibrio antes del pie de la rápida (ilustración 7). Las coordenadas del punto de ingreso de aire pueden calcularse con las ecuaciones (5) y (6).

En flujos rasantes, la capacidad del vertedor aumenta y la resistencia al flujo baja al disminuir la altura de escalón (Chanson, 1995). En el caso extremo, cuando los escalones son muy pequeños, éstos representan una rugosidad insignificante para el flujo, y las pérdidas de energía se reducen drásticamente. Por tanto hay que cerciorarse de que el gasto adimensional d_c/h elegido sea menor que el máximo d_c/h para el cual los escalones dejan de actuar como superficie rugosa. Con base en datos experimentales en canales de roca con grandes rugosidades, Chanson (1995) sugirió una máxima altura de escalón de:

$$h \leq 15 \cdot d_c \cdot \cos\theta \qquad (18)$$

Para garantizar que el flujo sea totalmente desarrollado antes del pie del vertedor, la longitud y pendiente del canal tienen que cumplir con la siguiente restricción:

$$\frac{d_c}{h} < \frac{1}{0.1193 \cdot \cos\theta \times \sin\theta^{0.259} \times \left(\frac{L}{h \cdot \cos\theta}\right)^{0.935}} \qquad (19)$$

A partir de este punto se deben seguir dos caminos distintos, dependiendo de las condiciones del flujo al pie del vertedor.

Flujo uniforme

Si el canal es lo suficientemente largo como para que el flujo alcance condiciones de equilibrio, el tirante característico del flujo se calcula como:

$$d = d_c \cdot \sqrt[3]{\frac{f_e}{8 \cdot \sin\theta}} \qquad (20)$$

donde f_e es el valor experimental del factor de fricción de Darcy correspondiente al flujo aire-agua, el cual es inversamente proporcional a la concentración media de aire en el flujo ($\overline{C}$) y se calcula como:

$$\frac{f_e}{f_m} = 0.5 \cdot \left(1 + \tanh\left(2.5 \cdot \frac{0.5 - \overline{C}}{\overline{C} \cdot (1 - \overline{C})}\right)\right) \qquad (21)$$

($\overline{C}$) puede ser calculada con el criterio de Ohtsu *et al.* (2004) y f_m se calcula con base en los presentes datos experimentales (ecuación 14).

$$\overline{C} = D - 0.3 \cdot e^{\left\{-5\left(\frac{h}{d_c}\right)^2 - 4\left(\frac{h}{d_c}\right)\right\}} \qquad (22)$$

donde $D = 0.3$ para $5.7° < \theta < 19°$ y $D = -0.00024 \cdot \theta^2 + 0.0214 \cdot \theta - 0.0357$ para $\theta \geq 19°$.

Una vez que el tirante característico de flujo se conoce, se calculan la velocidad U_w (ecuación 3), Y_{90} (ecuación 2), el bordo libre B.L. $= 0.4 \cdot Y_{90}$ y la altura de pared $h_w = 1.4 \cdot Y_{90}$.

Flujo gradualmente variado

Si el canal no es lo suficientemente largo como para que el flujo alcance condiciones de equilibrio, el tirante característico del flujo se deduce integrando la ecuación de la energía, donde la pendiente de fricción S_f se calcula como:

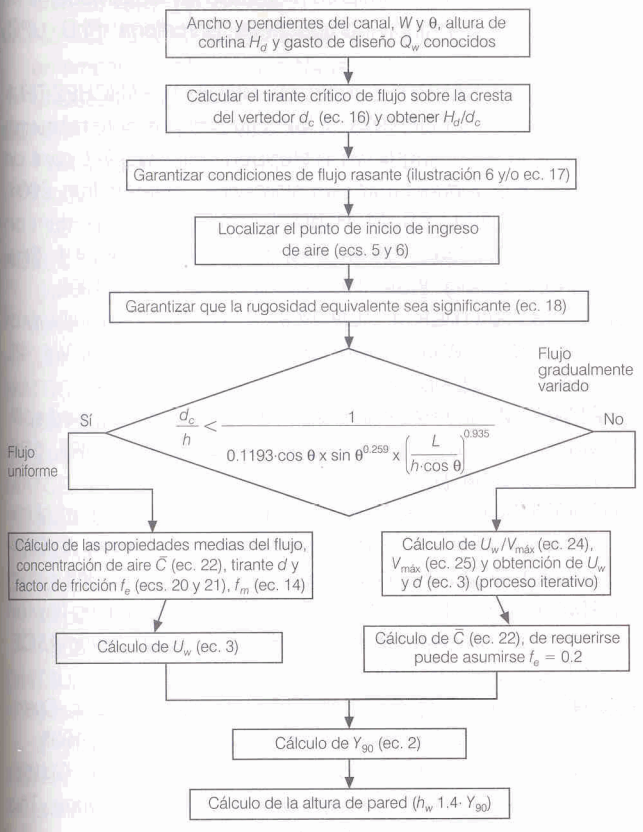
$$S_f = -\frac{\partial H}{\partial x} = \sqrt{\frac{f_e}{8}} \cdot \frac{q_w^2}{g \cdot d^3} \quad \text{para canales anchos rectangulares} \qquad (23)$$

donde H es la energía total del flujo y x es la distancia a lo largo del fondo del canal desde la cresta hasta la región de flujo gradualmente variado (ilustración 7). Diversos investigadores han tratado de aplicar este criterio para calcular el tirante de flujo característico y los factores de fricción de flujo, violando diversos principios básicos, ya que dicha ecuación es válida solamente para flujos totalmente desarrollados. Debe notarse que este criterio es tedioso y no aplica a todos los casos.

Un método alternativo puede usarse para el diseño preliminar de vertedores escalonados, donde el flujo no alcanza las condiciones de equilibrio (González, 2005).

Este método se basa en la combinación de resultados experimentales en flujos en desarrollo (aguas arriba del punto de ingreso de aire) y flujos con condiciones en equilibrio (ilustración 13). En esta ilustración se comparan datos experimentales obtenidos en el presente estudio con ecuaciones para flujos en desarrollo y flujos con condiciones en equilibrio (Chanson, 2002). La curva correspondiente al mejor ajuste de la información experimental une ambas ecuaciones y provee un medio alternativo para estimar las propiedades del flujo gradualmente variado:

Ilustración 12. Criterio de diseño hidráulico para vertedores escalonados con pendientes moderadas.

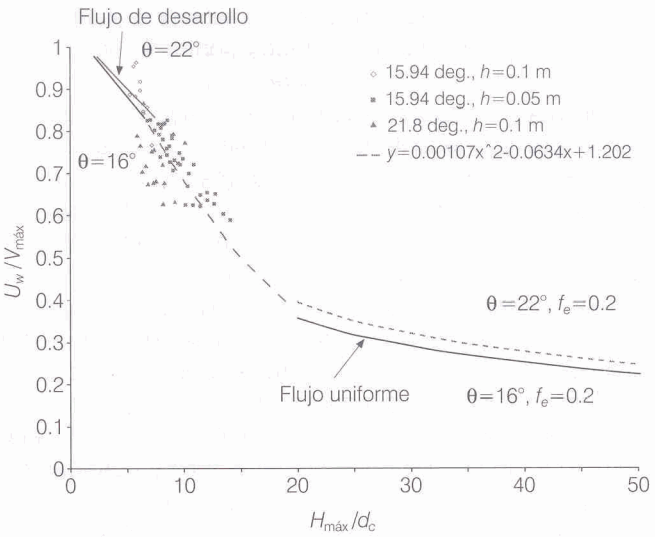


$$\frac{U_w}{V_{máx}} = 0.00107 \cdot \left(\frac{H_{máx}}{d_c}\right)^2 - 0.0634 \cdot \left(\frac{H_{máx}}{d_c}\right) + 1.202 \qquad 7 < H_{máx}/d_c < 20 \tag{24}$$

donde $H_{máx}$ es la energía total aguas arriba del embalse y $V_{máx}$ es la velocidad de flujo ideal al pie del vertedor. Nótese que el método anterior sólo es aplicable dentro del rango señalado. Para $H_{máx}/d_c > 20$, la velocidad de flujo U_w se calcula con la ecuación de continuidad (ecuación 3) y el tirante d se calcula con la ecuación (20).

Una vez que la velocidad adimensional $U_w/V_{máx}$ se conoce, la velocidad U_w y el tirante al pie del vertedor d pueden calcularse por medio de un sencillo proceso iterativo, en el cual se asume inicialmente que la velocidad ideal de flujo $V_{máx}$ es igual a la velocidad máxima al pie del vertedor $V_{máx} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{máx}}$. Ya que U_w se conoce, el tirante d se calcula por medio de la ecuación de continuidad (ecuación 3) y con éste se obtiene el valor real

Ilustración 13. Velocidad al pie de vertedores escalonados con pendientes entre 16 y 22° y 7 < $H_{máx}/d_c$ < 20.



de la velocidad ideal de flujo por medio de la ecuación de Bernoulli:

$$V_{máx} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{máx} - d \cdot \cos\theta)} \tag{25}$$

Con la velocidad ideal de flujo $V_{máx}$ obtenida, se calcula el valor definitivo de U_w (utilizando nuevamente la ecuación 24). Finalmente se recalcula el tirante característico de flujo d con la ecuación (3). Este proceso se repite hasta que los valores de las velocidades y tirantes al pie del vertedor converjan.

Una vez que el tirante característico de flujo (d) se conoce, se calculan Y_{90} (ecuación 2), el bordo libre B.L. = 0.4·Y_{90} y la altura de pared h_w = 1.4·Y_{90}. En vertedores escalonados, operando con flujo rasante, el factor de fricción puede asumirse como f_e = 0.2.

Nótese que este método se basó en información experimental limitada, asumiendo un factor de fricción experimental f_e = 0.2 para la zona de flujo en equilibrio y sólo es válido para flujos rasantes en canales escalonados con pendientes entre 16 y 22°.

Conclusión

El comportamiento del flujo sobre vertedores con pendientes moderadas (θ ≈ 15 a 30°) ha sido escasamente estudiado, por lo que sus propiedades físicas no han sido totalmente comprendidas a la fecha. La naturaleza altamente turbulenta y el gran contenido de aire en el flujo sobre dichas estructuras no han permitido el desarrollo de un modelo analítico confiable para predecir sus

características, por lo que el análisis de dicho flujo debe hacerse por medio de modelos experimentales. A la fecha, la mayoría de los estudios en vertedores escalonados se han realizado en modelos experimentales muy pequeños, provocando resultados contradictorios debido a los fuertes efectos de escala.

Un nuevo estudio experimental de las propiedades físicas del flujo rasante sobre canales escalonados con pendientes moderadas se realizó usando dos canales de distinta pendiente ($\theta = 16$ y 22°), uno de ellos con escalones intercambiables a una escala geométrica $L_e = 2$ ($h = 0.05$ y 0.1 m). Los experimentos se realizaron en ambos modelos con base en una similitud de Froude. A pesar de la pequeña escala geométrica existente entre ambos modelos ($L_e = 2$), las propiedades de flujo en el modelo con escalones menores ($h = 0.05$ m) mostraron fuertes efectos de escala, en función de la turbulencia, número y tamaño de burbujas en el flujo y pérdidas de energía.

De acuerdo con investigaciones previas en flujos aire-agua (Chanson, 1997; Kobus, 1984; Wood, 1991), en el presente estudio se observó que en modelos de tamaño reducido ($L_e >> 1$), las burbujas de aire contenidas en el flujo mantienen el mismo tamaño en modelo y prototipo, violando toda semejanza geométrica y dinámica. Por tanto, se recomienda no extrapolar resultados obtenidos en modelos altamente escalados a prototipos, ya que los experimentos realizados en modelos pequeños subestiman principalmente la disipación de energía y la tasa de aireación de flujo en canales escalonados.

Con base en los resultados obtenidos, se cree que las interacciones entre la capa límite aguas abajo de cada vértice, la corriente principal del flujo y los vórtices que se observan debajo, afectan las propiedades del flujo y contribuyen a incrementar la resistencia al flujo en vertedores escalonados con pendientes moderadas.

Finalmente, se destaca que el criterio de diseño recomendado se basó en resultados experimentales, por lo que deben considerarse varios aspectos claves al usarlo (*i.e.* erosión de la superficie escalonada, tubificación de flujo a través de la cortina y/o escalones, interacciones entre los escalones y los bancos de la cortina, etcétera).

Agradecimientos

Los autores agradecen los valiosos comentarios de los profesores Martí Sánchez-Juny, UPC, y de Gabriel Echávez, UNAM, así como los hechos por los revisores. El primer autor agradece el apoyo del Conacyt para la realización de este estudio.

Recibido: 27/03/2006
Aprobado: 05/12/2006

Referencias

AMADOR , A. Comportamiento hidráulico de los aliviaderos en presas de hormigón compactado. Barcelona: PhD, UPC, 2005.

AMADOR , A., SÁNCHEZ-JUNY, M., DOLZ, J., SÁNCHEZ-TEMBLEQUE, F. y PUERTAS, J. Velocity and pressure measurements in skimming flows in stepped spillways. *Intl. conf. on hydraulics of dams and river structures*. Teherán, Irán, 2004.

BEITZ, E. y LAWLESS, M. Hydraulic model study for dam on GFHL 3791 Isaac River at Burton Gorge. *REP/24.1*. Brisbane, Australia: Water Resources Commission, 1992.

BINDO, M., GAUTIER, J. y LACROIX, F. The stepped spillway of M'Bali dam. *Water Power and Dam Construction*. Vol. 45, núm. 1, 1993, pp. 35-46.

CHAMANI, M. R. y RAJARATNAM, N. Jet flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. Vol. 125, núm. 9, 1994, pp. 969-971.

CHAMANI, M.R. y RAJARATNAM, N. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. Vol. 125, núm. 4, 1999a, pp. 361-368.

CHAMANI, M.R. y RAJARATNAM, N. Onset of skimming flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. Vol. 125, núm. 9, 1999b, pp. 969-971.

CHANSON, H. *Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways*, Oxford, UK: Pergamon, 1995.

CHANSON, H. Flow aeration at stepped cascades. *CE155*. Brisbane, Australia: Department of Civil Engineering, The University of Queensland, 1997.

CHANSON, H. *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. Lisse: A.A. Balkema Publishers, 2002.

CHANSON, H. y TOOMBES, L. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute: application to embankment overflow stepped Spillways. *CE 158*. Brisbane, Australia: Dept. of Civil Engineering, University of Queensland, 2001.

CHANSON, H. y TOOMBES, L. Air-water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations. *Intl. Journal of Multiphase Flow*. Vol. 28, núm. 11, 2002, pp. 1737-1761.

CHANSON, H. y TOOMBES, L. Experimental study of gas-liquid interfacial properties. *Environmental Fluid Mechanics*. Vol. 2, 2004, pp. 241-263.

CHANSON, H., YASUDA, Y. y OHTSU, I. Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 29, núm. 6, 2002, pp. 809-819.

CROWE, C.T., SOMMERFELD, M. y TSUJI, Y. *Multiphase flows with droplets and particles*, Boca Raton, EU: CRC Press, 1998.

ELVIRO, V. y MATEOS, C. Spanish Research into Stepped Spillways. *Intenational Journal of Hydropower and Dams*. Vol. 2, núm. 5, 1995, pp. 61-65.

FRIZZELL, K.H. y MEFFORD, B.W. Designing spillways to prevent cavitation damage. *Concrete International*. Vol. 13, núm. 5, 1991, pp. 58-64.

GONZÁLEZ, C.A. *An experimental study of free-surface aeration on embankment stepped chutes*. Thesis (Ph.D.). University of Queensland, 2005.

GONZÁLEZ, C.A. y CHANSON, H. Interactions between Cavity Flow and Mainstream Skimming Flows: an Experimental Study. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 31, núm. 1, 2004, pp. 33-44.

KOBUS, H. *Local Air Entrainment and Detrainment*. International Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures IAHR. Esslingen, Alemania: Institut fur Wasserbau, University of Stuttgart, 1984.

MATOS, J. Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams. *Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*. Zurich, Suiza: Balkema, 2000, pp. 187-194.

MATOS, J. Onset of skimming flow on stepped spillways - Discussion. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*. Vol. 127, núm. 6, 2001, pp. 519-521.

OHTSU, I. y YASUDA, Y. Characteristics of flow conditions on stepped channels. *27th IAHR Biennial Congress*. Vol. D. ASCE. San Francisco, 1997, pp. 583-588.

OHTSU, I., YASUDA, Y. y TAKAHASHI, M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. Vol. 130, núm. 9, 2004, pp. 860-869.

PEYRAS, L., ROYET, P. y DEGOUTTE, G. Flow and energy-dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. Vol. 118, núm. 5, 1992, pp. 707-717.

RAJARATNAM, N. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*. Vol. 116, núm. 4, 1990, pp. 587-591.

SORENSEN, R.M. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. Vol. 111, núm. 12, 1985, pp. 1461-1472.

TOOMBES, L. *Experimental study of air-water flow properties on low-gradient stepped cascades*. Ph.D. Brisbane, Australia: The University of Queensland, 2002.

TOOMBES, L. y CHANSON, H. *Air-water flow and gas transfer at aeration cascades: a comparative study of smooth and stepped chutes*. International workshop on Hydraulics of Stepped Spillways. Zurich, Suiza: Balkema, 2000, pp. 77-84.

TOZZI, M.J. *Caracterizacao/comportamento de escoamentos en vertedouros com paramento em degraus*. Ph.D. Sao Paulo: University of Sao Paulo, 1992.

WOOD, I.R. *Air entrainment in free-surface flows*. Rotterdam, Los Países Bajos: Balkema, 1991.

YASUDA, Y. y OHTSU, I. Flow resistance of skimming flow in stepped channels. *Proc. 28th IAHR Congress*. Graz, Austria: IAHR, 1999.

YASUDA, Y., OHTSU, I. y TAKAHASHI, M. Energy dissipation of skimming flows on stepped-channel chutes. *29th IAHR Biennial Congress*, Beijing, China: Tsinghua University Press, 2001.

ISSN-0186-4076

Revista interdisciplinaria de ciencia y tecnología del agua

Vol. XXII, núm. 2, II Época • abril-junio de 2007

ingeniería hidráulica en méxico

Incluida en el *Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica, actualización 2002* del Conacyt