

Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica

• Oswaldo Ortiz-Vera* •
Universidad Nacional de Cajamarca, Perú
*Autor de correspondencia

Resumen

Ortiz-Vera, O. (julio-agosto, 2015). Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 25-44.

El objeto de este estudio fue determinar las leyes que rigen la similitud hidráulica entre sistemas hidrológicos altoandinos. Para ello, los parámetros adimensionales en hidrología, al igual que en hidráulica de modelos físicos, jugaron papel preponderante. Se encontró que los parámetros índice Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico, son condiciones necesarias y suficientes para una aproximación de similitud hidráulica. Los parámetros obtenidos mediante análisis dimensional, unidos a las condiciones de semejanza, permite intercambiar información entre sistemas hidrológicos similares. La morfometría adimensional en la que se sustenta esta metodología permite generalizar su aplicación a sistemas hidrológicos de otra región o interregiones subnacionales e internacionales.

Palabras clave: sistemas hidrológicos altoandinos, similitud hidráulica, transferencia, información hidrometeorológica.

Abstract

Ortiz-Vera, O. (July-August, 2015). *Hydraulic Similarities among the High Andean Hydrological Systems and Transfer of Hydrometeorological Information*. Water Technology and Sciences (in Spanish), 6(4), 25-44.

The objective of this work was to determine the laws governing hydraulic similarities among the high Andean hydrological systems. To this end, dimensionless hydrological parameters and physical hydraulic models play an important role. The study finds that the Gravelius index, the convergence ratio and the orographic coefficient are necessary and sufficient conditions to determine hydraulic similarity. The parameters obtained from the dimensionless analysis along with conditions of similarity enable exchanging information among similar hydrological systems. Given the dimensionless morphometry on which this methodology is based, its application can be generalized to hydrological systems in other regions, among regions within countries as well as internationally.

Keywords: Andean hydrological systems, hydraulic similarity, transfer, hydrometeorological information.

Recibido: 26/09/2014

Aceptado: 14/04/2015

Introducción

En general, la información hidrometeorológica es escasa y más aún la información de escorrentías, la misma que constituye base fundamental en cualquier proyecto hidráulico; obviamente, las mayores dificultades lo afrontan los países en vías de desarrollo (Jimenez & Farías, 2005). La falta o escasez de información hidrométrica y sedimentológica en las cuencas impide un análisis regional consistente, problema que afecta el planeamiento, diseño y operación de los

proyectos hidráulicos (Jimenez & Farías, 2005; ICOLD, 2008). Esta situación obliga a la búsqueda constante de metodologías sencillas que permitan generar información local en cantidad y calidad lo suficientemente aceptable para fines prácticos, lo cual se logra usando criterios aproximativos de similitud hidráulica entre sistemas hidrológicos.

El estudio de similitud entre modelo y prototipo, con una adecuada operación del modelo a escala, ha hecho posible la construcción de grandes obras de ingeniería, que han contribuido al desarrollo de la humanidad (Sotelo-Ávila,

1977; Rodríguez Díaz, 2001). No obstante que el hombre es artífice de todo ello, no ha podido conseguir una exacta similitud entre modelo y prototipo; pero aun así los resultados del modelo transferidos al prototipo han sido suficientes para solucionar gran cantidad de problemas en la práctica (Streeter & Wilie, 2000; Vergara, 1993; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001). Este aspecto fue motivo de inspiración para el desarrollo del presente trabajo, consistente en identificar en la propia naturaleza sistemas hidrológicos con similitud hidráulica, cuyas condiciones pueden aprovecharse para transferir información de un sistema a otro similar (Streeter & Wilie, 2000; Vergara, 1993; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001). En el maravilloso escenario de la naturaleza, a través de millones de años, ha sucedido algo parecido a lo que suele hacer el hombre artificialmente en materia de similitud, donde mediante acciones dinámicas naturales de causa-efecto recurrentes en sistemas de naturaleza intrínseca similar, se han ido construyendo sistemas hidrológicos unos a imagen de otros.

El objeto de este trabajo es desarrollar una base metodológica que permita identificar sistemas hidrológicos similares, usando parámetros adimensionales como referentes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Estos parámetros de semejanza y otros deducidos dimensionalmente de fenómenos físicos que tienen como escenario la cuenca, mediante el principio de similitud hidráulica, se convierten en funciones de transferencia de información entre sistemas hidrológicos altoandinos similares (Streeter & Wilie, 2000; Vergara, 1993; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001).

La metodología restringe su aplicación a sistemas altoandinos, donde la superficie receptora de precipitaciones coincide con la superficie colectora y donde la precipitación es la variable más importante y única de entrada al sistema. El hecho de que, territorialmente, las cuencas altoandinas sean las unidades hidrológicas más lejanas del sistema hidrográfico, determina también que sean las más afectadas en materia

de disponibilidad de información (Jimenez & Farías, 2005; Rocha, 2006).

Se tiene la certeza de que los resultados de esta investigación sean capitalizados por el Ministerio del Ambiente de Perú, a través de los centros de investigación de los sectores Autoridad Nacional del Agua (ANA) y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamih), e instituciones nacionales e internacionales ligadas con la investigación sobre cambio climático global.

Metodología

Área de estudio

Comprende una muestra de 70 microcuencas altoandinas, todas ubicadas en superficie territorial del departamento de Cajamarca, en el norte de Perú, donde la presencia de la cordillera de los Andes determina una topografía muy abrupta e irregular, cuyos relieves escarpados y estrechos valles interandinos dan lugar a una gran variedad de pisos ecológicos, con biodiversidad impresionante, propia de cada microclima. Todas las unidades hidrológicas se desarrollan entre los 1 500 y 4 200 msnm, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre 9 °C (zonas más altas) y 25 °C (zonas bajas), y precipitaciones medias anuales que varían entre 400 y 1 200 mm/año. Muchas de estas microcuencas, reguladas mediante pequeñas presas, fueron la base fundamental del desarrollo agrícola en los valles interandinos, que sirvió de sustento a importantes poblaciones de culturas preincaicas.

Análisis dimensional de sistemas hidrológicos

El fenómeno físico más importante en microcuencas altoandinas es el de precipitación-escorrentía, variables causa y efecto, respectivamente. La primera, dependiente de las características climáticas, y la segunda de la naturaleza de cada microcuenca (Chow, 1993). Sencillamente, si se desprecia la evapotranspiración real, el fenó-

meno simplificado queda representado por las variables mostradas en el cuadro 1.

Las variables se agruparon en parámetros adimensionales, mediante la aplicación del teorema PI de Vaschy-Buckingham (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001). El producto de este análisis condujo a la obtención de las leyes físicas que rigen los sistemas hidrológicos altoandinos, representadas por los parámetros adimensionales de las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5):

$$\pi_1 = \frac{Q}{AP} \quad (1)$$

$$\pi_2 = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$$\pi_3 = \frac{I^* t}{H} \quad (3)$$

$$\pi_4 = \frac{Q}{I^* A} \quad (4)$$

$$\pi_5 = \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

Donde:

π = parámetro adimensional.

Q = caudal de escurrimiento.

A = proyección del área receptora-colectora sobre un plano horizontal.

P = precipitación pluviométrica.

H = altitud media sobre el nivel del mar.

I = intensidad de precipitación.

t = periodo de duración de intensidad de precipitación.

p = perímetro de la cuenca.

El hecho de haber despreciado la evapotranspiración real en este análisis se justifica porque los tiempos de duración de las tormentas son relativamente cortos; para períodos de tiempo más largos, los balances hidrológicos deben tomar en cuenta esta componente o bien incluirla como perdida en los coeficientes de escorrentía (Chow, 1993; Aparicio, 1997).

Parámetro adimensional de semejanza geométrica

Está dado por el parámetro adimensional de la ecuación (5), donde multiplicando ambos miembros por 0.28 resulta el índice de Gravelius ($K_c = 0.28 * \pi_5$) dado por la ecuación (6); parámetro adimensional que se obtiene relacionando el perímetro de una cuenca y el perímetro que tendría un círculo imaginario de la misma área que la cuenca (Askoia-Ibízate, 2004; Docampo, De Víkeña, Rico, & Rallo, 2009; Gravelius, 1914).

$$K_c = 0.28 \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

El índice de Gravelius tiene influencia en la configuración de la red de drenaje superficial y

Cuadro 1. Variables y dimensiones del fenómeno precipitación-escorrentía.

Variables principales del fenómeno físico precipitación-escorrentía	
Variable	Dimensión
1. Precipitación pluvial: P	LT^{-1}
2. Intensidad de precipitación pluvial: I	LT^{-1}
3. Periodo de duración de la lluvia: t	T
4. Proyección del área receptora colectora: A	L^2
5. Desnivel sobre el nivel del mar: H	L
6. Caudal de escurrimiento: Q	L^3T^{-1}
7. Perímetro de la cuenca: p	L

en la geometría del hidrograma de escorrentía directa y, por tanto, en la magnitud del caudal pico de avenidas (Senciales, 2005; Askoia-Ibáñez, 2004; Docampo, De Vikeña, Rico, & Rallo, 2009; Antigüedad, 1980; Gaspari *et al.*, 2012). Además, los rangos de este parámetro han sido de mucha utilidad en la clasificación de cuencas por su geometría, tal como el que se plasma en el cuadro 2 (Henaos, 1988). Este parámetro, por ser descriptor más eficaz de la forma de la cuenca, es un buen referente de similitud geométrica entre sistemas hidrológicos.

Por analogía, con la hidráulica de modelos físicos se puede inferir entonces que: "dos o más sistemas hidrológicos son geométricamente semejantes si tienen igual índice de Gravelius". Conviene resaltar que el término "igual" no tiene connotación matemática, sino simplemente el de una "igualdad hidrológica", que al igual que en estadística, se acepta con cierto nivel de aproximación válida para fines prácticos.

Las microcuencas de forma oval concenan más rápidamente los flujos superficiales, generando picos súbitos violentos y recessiones rápidas ante tormentas extraordinarias, características que favorecen la escorrentía directa y la erosión hídrica, en detrimento de la recarga de acuíferos, contrariamente al comportamiento de las cuencas alargadas (Ibáñez, Moreno, & Gisberbert, 2005; Docampo, De Vikeña, Rico, & Rallo, 2009; Antigüedad, 1980; Gaspari *et al.*, 2012; Gaspari, 2002; Martínez, 1986).

Parámetro adimensional de escorrimento instantáneo

Está dado por el parámetro adimensional de la ecuación (4), donde sustituyendo el primer miembro por un coeficiente de escorrentía directa ($\pi_4 = C$), se convierte en la ecuación

del vetusto método Racional (7); metodología sencilla, aún vigente, para estimar descargas máximas (picos de hidrogramas), a partir de datos de precipitación (Chow, 1993; Aparicio, 1997):

$$Q_{\max} = CIA \quad (7)$$

Donde:

- Q_{\max} = caudal máximo de escorrentía directa.
 C = coeficiente de escorrentía.
 I = intensidad máxima de precipitación, inherente al tiempo de concentración de la cuenca.
 A = área receptora-colectora proyectada sobre un plano horizontal.

Parámetro adimensional de escorrimento sostenido

Está dado por la ecuación (1), donde sustituyendo el primer miembro por un coeficiente promedio ($K = \pi_1$) se transforma en la ecuación (8), expresión que puede usarse para la determinación de caudales promedio multianuales de escorrentía, que involucra a las componentes de escorrentía directa y subterránea (Chow, 1993; Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, s.f.); Aparicio, 1997):

$$Q = KAP \quad (8)$$

Donde:

- Q = caudal promedio en el periodo considerado.
 A = área de la cuenca receptora-colectora de precipitaciones.
 P = "Precipitación efectiva" en el periodo considerado.
 K = coeficiente de escorrentía.

Cuadro 2. Formas estándar de cuencas con base en el índice de Gravelius.

Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de Gravelius		
Clase de geometría	Rango de clase	Forma de cuenca
K_{c1}	$1 < K_c \leq 1.25$	Oval redonda
K_{c2}	$1.25 < K_c \leq 1.50$	Oval oblonga
K_{c3}	$1.50 < K_c \leq 1.75$	Oblonga alargada

El término “precipitación efectiva”, por tratarse de períodos más largos, obviamente, incluye pérdidas por evapotranspiración real y almacenamiento en el suelo.

Parámetro adimensional orográfico y semejanza dinámica

Está representado por la ecuación (2), donde elevando al cuadrado ambos miembros resulta el parámetro adimensional de la ecuación (9), conocido como coeficiente orográfico, C_o ($\pi^2 = C_o$), parámetro asociado con las fuerzas gravitacionales de los flujos superficiales y, por ende, con los potenciales de erosión hídrica y de generación de energía hidráulica (Henaos, 1988):

$$C_o = \frac{H^2}{A} \quad (9)$$

Los sistemas altoandinos de relieve escarpado, ubicados a gran altitud, tienen coeficientes orográficos muy altos, siendo indicativos de una gran capacidad erosiva y de transporte de sedimentos (Henaos, 1988). Por todo ello, se considera que este parámetro constituye un buen referente de similitud dinámica.

Por analogía, con la hidráulica de modelos físicos se puede inferir que: “dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son semejantes, dinámicamente, si tienen igual coeficiente orográfico”, con similar consideración del término “igual” que para el caso de semejanza geométrica.

Parámetro de relación de confluencias promedio y semejanza cinemática

Este parámetro adimensional, influenciado también por el índice de Gravelius, describe la configuración espacial o geometría de la red de drenaje y expresa el grado de ramificaciones de la red (Askoa-Ibáñez, 2004; Docampo, De Vikeña, Rico, & Rallo, 2009; Antigüedad, 1980; Cruz-Santillán, & Tamés, 1983; Horton, 1945;

Gaspari, 2002). Se cuantifica mediante la aplicación de las ecuaciones (10) y (11), para lo cual es necesaria la categorización previa de la red de drenaje superficial, prefiriéndose la metodología de Horton (Antigüedad, 1980; Cruz-Santillán, & Tamés, 1983; Gaspari *et al.*, 2012; Gravelius, 1914; Gaspari, 2002; Martínez, 1986).

Por la influencia que ejerce en la configuración espacial de la red de drenaje, se considera que la relación de confluencias promedio es un buen referente de la similitud cinemática de los sistemas hidrológicos.

$$r_c = \frac{n_i}{n_{i+1}} \quad (10)$$

$$R_C = \frac{1}{n} \sum_i^n r_{ci} \quad (11)$$

Donde:

- r_c = relación de confluencias parcial.
- n_i = número de cursos naturales de orden i .
- n_{i+1} = número de cauces de orden inmediatamente superior a i ($i = 1, 2, 3, \dots, N-1$).
- N = número de orden de la cuenca.
- r_{ci} = cada uno de los “n” valores parciales.
- R_C = relación de confluencias promedio.

Por analogía, entre modelo y prototipo, se infiere que: “dos sistemas hidrológicos son semejantes, cinemáticamente, si tienen igual relación de confluencias promedio”, con la misma indicación del término “igual” que para los dos casos de semejanza anteriores.

Parámetro adimensional de lluvia

Este parámetro, dado por la ecuación (3), describe las características de la precipitación pluviométrica sobre la cuenca como una variable con distribución espacial y temporal. Se observa que las mayores intensidades ocurren en períodos cortos de tiempo y a mayor altitud sobre el ni-

vel del mar y viceversa (Chow, 1993; Aparicio, 1997). Es muy importante en la generación de escorrentías máximas (caudales pico) a partir de datos de precipitación; pero, además, explica que en cuencas altoandinas la precipitación es dependiente de la altitud sobre el nivel del mar.

Condición de semejanza hidráulica de sistemas hidrológicos

Por analogía, con la hidráulica de modelos físicos a escala, "dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son semejantes si cumplen simultáneamente las condiciones de semejanza geométrica, cinemática y dinámica", con cierto nivel de aproximación previamente adoptado.

Parámetros adimensionales de transferencia

Establecida la similitud hidráulica entre sistemas, todos los parámetros adimensionales que controlan las leyes del fenómeno estudiado (ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5)) se convierten en funciones de transferencia, dependiendo en qué parámetro se ubique la variable de interés (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001).

En ocasiones, con el propósito de mejorar la calidad de transferencia, se pueden realizar combinaciones entre parámetros para obtener otro(s) parámetro adimensional(es) con mayor cantidad de variables, tal como el parámetro adimensional de la ecuación (12), resultado de combinar las ecuaciones (1) y (2), muy importante para transferir escorrentías (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001):

$$\pi_{12} = \frac{QH}{A^{3/2}P} \quad (12)$$

Aplicando el principio de similitud para una dupla de cuencas origen y destino, el parámetro adimensional de la ecuación (12) queda conforme lo establece la ecuación (13), o su equivalente

(15), en función de escalas (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001):

$$\frac{Q_o H_o}{A_o^{3/2} P_o} = \frac{Q_d H_d}{A_d^{3/2} P_d} \quad (13)$$

Los subíndices de las variables del primer y segundo miembro de esta ecuación corresponden a los sistemas hidrológicos de origen y destino, respectivamente:

$$Q_d = \left(\frac{H_o}{H_d} \right) \left(\frac{P_d}{P_o} \right) \left(\frac{A_d}{A_o} \right)^{3/2} Q_o \quad (14)$$

$$Q_d = H_e^{-1} P_e A_e^{3/2} Q_o \quad (15)$$

Donde:

H_e = escala de altitudes.

P_e = escala de precipitaciones.

A_e = escala de áreas.

Q_o = caudal total en la cuenca de origen.

Q_d = caudal total transferido a la cuenca destino.

Otras de las variables de mayor escasez son las intensidades de tormentas máximas, cuya función de transferencia se obtiene a partir de la ecuación (3), la que mediante el principio de similitud se convierte en la ecuación (16) o su equivalente (17), en función de escalas:

$$\frac{I_o t_o}{H_o} = \frac{I_d t_d}{H_d} \quad (16)$$

$$I_d = \left(\frac{H_d}{H_o} \right) \left(\frac{t_o}{t_d} \right) I_o = H_e t_e^{-1} I_o \quad (17)$$

Donde:

I_d = intensidad de precipitación en la cuenca destino.

I_o = intensidad de precipitación en la cuenca de origen.

t_e = escala de períodos de duración.

H_e = escala de altitudes.

Muestra de microcuencas altoandinas-región Cajamarca

Se seleccionaron aleatoriamente 70 microcuencas altoandinas de la región Cajamarca-Perú (cuadro 3), ubicadas en cabeceras de las vertientes del Pacífico y Atlántico, y desarrolladas por encima de los 1 500 msnm. Con el fin de controlar errores y costos en el presente estudio, se ha establecido un protocolo consistente en lo siguiente:

- Uso de mapas cartográficos a la misma escala, 1/100 000.
- Mapas cartográficos elaborados por una misma institución (IGN, Perú), como garantía de que se hayan usado los mismos criterios para su elaboración.
- Procesamiento de información cartográfica empleando la misma metodología para cada caso (delimitación de cuenca, área, perímetro, altitud, jerarquización de la red de drenaje, etc.). De preferencia, deben usarse modelos digitales de altitudes 3D y procedimientos en SIG.

- Estimación de variables involucradas en los parámetros adimensionales de semejanza, siguiendo la misma metodología para cada caso. Para la determinación de la altitud media sobre el nivel del mar se ha utilizado el método momentos estáticos de Varignon, dado por la ecuación (18) (Chow, 1993; Apario, 1997):

$$\bar{H} = \frac{1}{A} \sum_A \Delta A_i \bar{h}_i \quad (18)$$

Donde:

\bar{H} = altitud media sobre el nivel del mar.

A = área de la cuenca.

ΔA_i = área parcial entre curvas de nivel consecutivas.

\bar{h}_i = promedio de cotas de las dos curvas de nivel que limitan cada área parcial.

La división de áreas parciales entre curvas de nivel de la cuenca de estudio se realizó en concordancia con la topografía y, generalmente, entre curvas maestras (Chow, 1993).

Cuadro 3. Parámetros de semejanza entre unidades hidrológicas altoandinas de la región Cajamarca, Perú.

Parámetros adimensionales de similitud hidráulica de microcuencas alto-andinas, región Cajamarca-Perú (escala 1/100 000)						
Microcuenca	A (km ²)	N	K_c	R_c	C_o (%)	Vertiente
1. Río Grande1	72.50	3	1.27	2.70	8.22	Atlántico
2. Qda. Tallal	14.00	2	1.23	2.68	44.6	Pacífico
3. Río Quismache	183.80	4	1.24	2.74	2.90	Atlántico
4. Río Grande2	456.50	4	1.27	2.75	2.68	Pacífico
5. Río Cospán	196.50	4	1.28	2.56	4.40	Pacífico
6. Río Porcón	81.60	3	1.16	1.88	11.03	Atlántico
7. Río La Leche	116.50	3	1.16	1.90	12.04	Atlántico
8. Río Huagayoc	12.50	2	1.15	1.85	72.02	Atlántico
9. Río Ronquillo	36.80	3	1.12	1.93	22.85	Atlántico
10. Río Mashcón	276.10	4	1.31	3.45	1.88	Atlántico
11. Río Chonta	352.80	4	1.32	3.73	1.55	Atlántico
12. Qda. Huertas	105.50	3	1.34	2.98	3.87	Pacífico
13. Qda. Chausis	207.30	4	1.38	2.67	3.80	Pacífico
14. Río Llaucán	595.00	4	1.41	2.55	0.89	Atlántico

Cuadro 3 (continuación). Parámetros adimensionales de similitud de micro cuencas de la región Cajamarca-Perú
(Escala 1/100 000).

Microcuenca	A (km ²)	N	K _{cl,5258}	R _c	C _o (%)	Vertiente
15. Río Cascasén	114.20	4	1.42	3.12	6.88	Atlántico
16. Río Azufre	45.00	2	1.45	3.13	7.22	Atlántico
17. Río Pooclush	882.50	5	1.56	3.20	4.82	Pacífico
18. Río Rejo*	201.40	4	1.58	3.16	4.93	Pacífico
19. Río San Juan-1	271.20	4	1.60	3.89	5.55	Pacífico
20. Qda. Onda	130.00	3	1.60	3.52	4.81	Atlántico
21. Río Magdalena	807.20	4	1.70	4.60	3.98	Pacífico
22. Río Naranjo	51.40	2	1.70	1.50	23.00	Pacífico
23. Río San Miguel	1 047.20	5	1.53	5.89	0.90	Pacífico
24. Río San Pablo	182.43	3	1.29	4.20	3.26	Pacífico
25. Río Chetillano	180.10	4	1.42	4.10	4.40	Pacífico
26. Río San Juan-2	638.43	4	1.21	4.35	1.16	Pacífico
27. Qda. Chantilla	94.49	3	1.31	3.25	6.51	Pacífico
28. Río Pallac	235.28	4	1.34	3.23	2.38	Pacífico
29. Río Contumazá	198.40	4	1.72	4.20	3.90	Pacífico
30. Qda. La Bamba	52.21	2	1.73	4.00	4.03	Pacífico
31. Qda. Chiminote	200.76	4	1.36	2.83	1.90	Pacífico
32. Qda. Nazario	30.90	2	1.19	2.00	8.32	Pacífico
33. Qda. La Ramada	19.14	2	1.18	1.00	8.64	Pacífico
34. Qda. Del Chorro	19.63	2	1.68	1.00	19.11	Pacífico
35. Qda. Cajón	22.15	2	1.17	1.00	4.06	Pacífico
36. Qda. La Ramada	34.67	2	1.33	3.00	3.00	Pacífico
37. Río LLapa	210.32	4	1.57	3.13	5.43	Pacífico
38. Qda. Honda	110.20	3	1.76	3.90	11.21	Pacífico
39. Río Tumbadén	309.30	4	1.37	3.56	3.71	Pacífico
40. Qda. El Cardo	29.92	3	1.26	1.76	17.63	Pacífico
41. Qda. Yamulán	59.85	3	1.23	2.25	12.27	Pacífico
42. Qda. Chorro Blanco	36.83	3	1.46	1.75	27.13	Pacífico
43. Río El Carrizo	111.64	4	1.39	2.72	9.50	Pacífico
44. Qda. Amillas	31.18	2	1.41	1.00	23.76	Pacífico
45. Qda. Del Qilengo	30.75	2	1.43	2.00	23.51	Pacífico
46. Río San Juan-3	204.35	4	1.72	3.89	4.07	Pacífico
47. Río Asunción	76.47	3	1.24	2.34	10.10	Pacífico
48. Río Pinche	21.03	2	1.34	1.00	32.35	Pacífico
49. Qda Quinuas	65.38	2	1.49	7.00	11.94	Pacífico
50. Río Yaucán	49.91	2	1.37	3.00	15.97	Pacífico
51. Qda. Tallal	19.50	2	1.43	1.00	36.88	Pacífico
52. Río Namora	475.70	4	1.43	4.42	2.50	Atlántico
53. Río Huacraruco	136.90	4	1.29	3.83	8.51	Pacífico
54. Río Muyoc	319.26	4	1.41	3.38	3.28	Atlántico
55. Río Llantén	401.70	4	1.26	2.57	2.49	Atlántico
56. Río Sanagorán	608.10	4	1.42	4.35	2.03	Atlántico

Cuadro 3 (continuación). Parámetros adimensionales de similitud de micro cuencas de la región Cajamarca-Perú
(Escala 1/100 000).

Microcuenca	A (km^2)	N	$K_{c1,5258}$	R_c	C_o (%)	Vertiente
57. Río Cañad	249.20	4	1.40	3.22	2.70	Pacífico
58. Qda. Pencayoc	243.4	4	1.49	4.50	4.65	Pacífico
59. Río Puerto Blanco	247.50	4	1.43	3.79	2.32	Atlántico
60. Río Chanta	97.20	3	1.40	3.73	4.40	Pacífico
61. Río Callayuc	346.74	4	1.42	3.92	2.96	Atlántico
62. Río Llantén	298.78	4	1.32	3.49	3.73	Pacífico
63. Río El Sauce	170.00	3	1.44	4.17	3.43	Atlántico
64. Río Chilca	84.87	3	1.46	4.17	13.00	Atlántico
65. Río Chancayano	598.04	4	1.48	6.63	1.55	Pacífico
66. Río San Juan-4	118.91	3	1.42	3.25	8.93	Atlántico
67. Río Llaucano	121.73	3	1.70	2.20	9.90	Atlántico
68. Río Gansul	100.37	3	1.32	3.58	8.30	Atlántico
69. Río San Juan Pampa	122.42	3	1.36	2.75	8.50	Pacífico
70. Río Jadibamba	243.45	4	1.49	4.50	4.65	Atlántico
Media	1.40	3.13	9.42			
Desviación estándar	0.1587	1.2242	11.6612			
Coeficiente de variación	0.1133	0.3911	1.2379			

N = número de orden de la cuenca.

*Modelo de manejo de cuenca piloto, forestación Granja Porcón.

Identificación de microcuenca hidráulicamente similares

El protocolo establecido para la identificación o reconocimiento de sistemas hidrológicos altoandinos con similitud hidráulica se resume en las siguientes actividades:

- Estimación de parámetros morfométricos de similitud hidráulica: índice de Gravelius, relación de confluencias, coeficiente orográfico.
- Agrupación de microcuenca por su geometría, utilizando el criterio de rangos del índice de Gravelius del cuadro 2. Resulta obvio considerar que todas las unidades hidrológicas comprendidas en un mismo rango son geométricamente semejantes.
- Se excluyen de cada grupo geométrico aquellas unidades hidrológicas más dispares, de tal modo que el coeficiente de variación del índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico no

exceda de 0.05, 0.20 y 0.30, respectivamente. Este nivel de aproximación, aceptado en la práctica, se justifica por los niveles de error cometidos en la estimación de variables y efectos de escala.

- Las unidades hidrológicas que quedan, luego del paso precedente, son microcuenca hidráulicamente similares.

Transferencia de información hidrometeorológica

Sistema hidrológico con información de tormentas máximas

Para ilustrar la aplicación de transferencia de información mediante esta metodología, se tomó como sistema origen la microcuenca río Mashcón (cuadro 9), en cuya cuenca baja se ubica la estación pluviométrica Weberbauer ($07^{\circ} 10' S$, $78^{\circ} 30' W$; altitud: 2 536 msnm) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamih-Perú), en las inmediaciones del cam-

pus universitario de la Universidad Nacional de Cajamarca, estación que hasta hace muy poco tiempo era única en su género a nivel regional con registro de información pluviográfica.

El análisis de frecuencias de tormentas máximas anuales de 50 años de registro y el ajuste de datos al modelo de variable extrema Gumbel permitió modelar y simular las intensidades de máximas tormentas anuales, algunos de cuyos resultados se presentan en el cuadro 10 (Chow, 1993; Aparicio, 1997). No se incluye aquí el procedimiento de este análisis, por no ser objeto del presente estudio, sino el de simplemente transferir información.

Sistema hidrológico sin información de máximas tormentas

Se seleccionó a priori la microcuenca del río Jadibamba (altitud media: 3 218 msnm), pero pudo haber sido cualquier otra del mismo grupo geométrico de similitud hidráulica que la cuenca origen (ver cuadro 9). Esta cuenca, así como otras de la región de estudio, carece de información de máximas tormentas, muy importante para cualquier proyecto de drenaje superficial y obras de captación (drenaje de carreteras, drenaje pluvial urbano, defensas ribereñas, presas de regulación, canales de riego, centrales hidroeléctricas, captaciones de aguas de lluvia, prevención de inundaciones, etc.).

Los datos pueden transferirse a cualquier punto de interés del sistema hidrológico destino; sin embargo, no existiendo preferencia particular, se optó, para efectos de la ilustración, el punto correspondiente a la altitud media de la cuenca destino (3 218 msnm).

Resultados

Parámetros morfométricos adimensionales de similitud hidráulica

Los resultados de los estudios de morfometría adimensional dan cuenta que se trata de una muestra bastante heterogénea, cuya variabilidad se percibe a través de los coeficientes de variación de cada uno de los parámetros adi-

mensionales de similitud hidráulica mostrados en el cuadro 3, donde la menor discrepancia corresponde al índice de Gravelius, seguido en forma ascendente por la relación confluencias y coeficiente orográfico, lo cual clarifica el orden de influencia de la geometría de la cuenca.

Los estadísticos del índice de Gravelius de 1.40, 0.1587 y 0.1133, para la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación, respectivamente, son indicadores de baja variabilidad de la forma geométrica y un alto predominio de la forma oval oblonga (media, $K_c = 1.40$), sobre las otras dos formas geométricas (figura 1).

En cambio, los estadísticos de la muestra para la relación de confluencias dan cuenta de una mayor variabilidad ($C_v = 39.11\%$) en la configuración de la red de drenaje, pero siempre coincidentemente inclinándose las mayores bifurcaciones a la forma oval oblonga de la cuenca promedio.

El caso extremo corresponde al coeficiente orográfico, cuya variabilidad es muy alta (123.79%), muy sensible con la ubicación de los sistemas respecto del nivel del mar.

Clasificación morfométrica de microcuencas

Las unidades hidrológicas de la muestra fueron clasificadas de acuerdo con el criterio de rangos del índice de Gravelius plasmado en el cuadro 2, resultando los grupos siguientes:

Microcuencas de la forma oval redonda

Este grupo (cuadro 4), conformado por 12 unidades hidrológicas (17.1%), está caracterizado por tener tiempos de concentración relativamente cortos, generando hidrogramas de salida del tipo leptikúrtico, donde las crecidas efluentes son muy súbitas y violentas, con altos riesgos de inundaciones ante tormentas extraordinarias.

Microcuencas de la forma oval oblonga

Este grupo geométrico (cuadro 5), conformado por 44 microcuencas (62.9%), tiene característi-

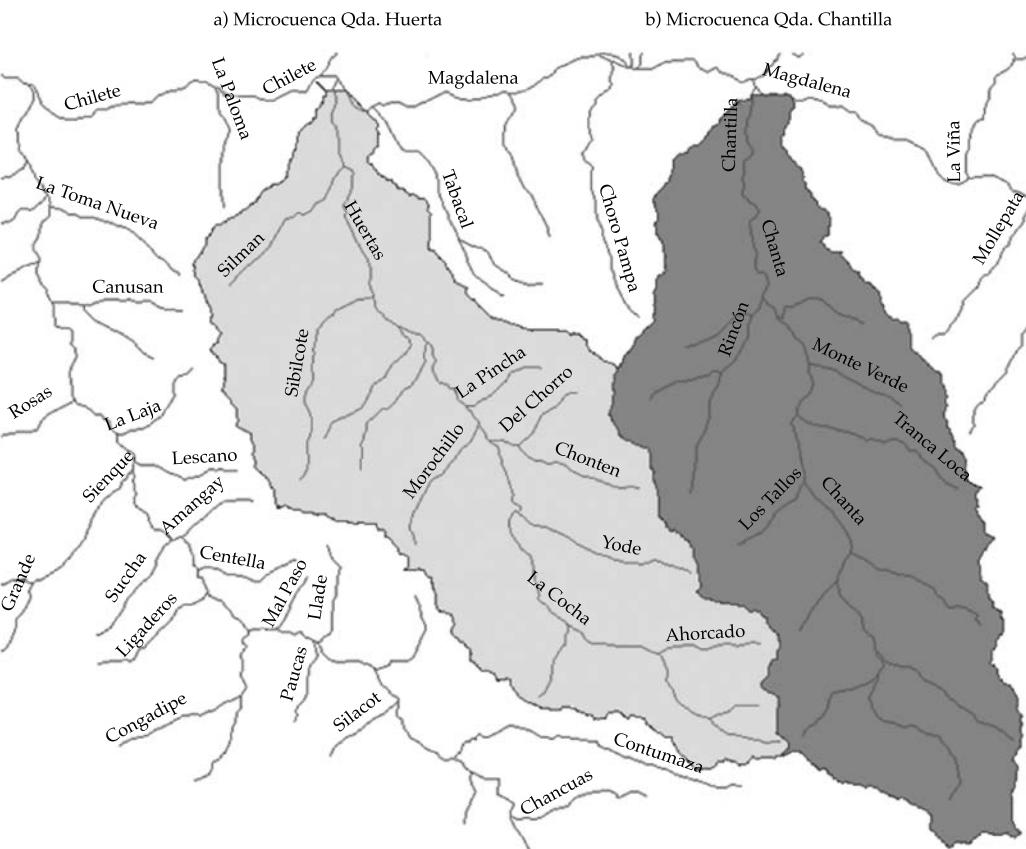


Figura 1. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos en la forma oval oblonga.

Cuadro 4. Grupo de microcuenca de la forma oval redonda.

Microcuenca	Coeficiente de Gravelius $1 < K_c \leq 1.25$	Forma de la cuenca
1. Qda. Tallal-1	1.23	Oval redonda
2. Río Quismache	1.24	Oval redonda
3. Río Porcón	1.16	Oval redonda
4. Río La Leche	1.16	Oval redonda
5. Río Hualgayoc	1.15	Oval redonda
6. Río Ronquillo	1.12	Oval redonda
7. Río San Juan-2	1.21	Oval redonda
8. Qda. Nazario	1.19	Oval redonda
9. Qda. La Ramada-1	1.18	Oval redonda
10. Qda. Cajón	1.17	Oval redonda
11. Qda. Yamulán	1.23	Oval redonda
12. Río Asunción	1.24	Oval redonda
Media	1.18	
Desviación estándar	0.0411	
Coeficiente de variación	0.0348	

Cuadro 5. Grupo de microcuenca de la forma oval oblonga.

Microcuenca	Coeficiente de Gravelius $1.25 < K_c \leq 1.50$	Forma de la cuenca
1. Río Grande 1	1.27	Oval oblonga
2. Río Grande 2	1.27	Oval oblonga
3. Río Cospán	1.28	Oval oblonga
4. Río Mashcón	1.31	Oval oblonga
5. Río Chonta	1.32	Oval oblonga
6. Qda. Huertas	1.34	Oval oblonga
7. Qda. Chausís	1.38	Oval oblonga
8. Río Llaucán	1.41	Oval oblonga
9. Río Cascasén	1.42	Oval oblonga
10. Río Azufre	1.45	Oval oblonga
11. Río San Pablo	1.29	Oval oblonga
12. Río Chetillano	1.42	Oval oblonga
13. Qda. Chantilla	1.31	Oval oblonga
14. Río Pallac	1.34	Oval oblonga
15. Qda. Chiminote	1.36	Oval oblonga
16. Qda. La Ramada-2	1.33	Oval oblonga
17. Río Tumbadén	1.37	Oval oblonga
18. Qda. El Cardo	1.26	Oval oblonga
19. Qda. Chorro Blanco	1.46	Oval oblonga
20. Río El Carrizo	1.39	Oval oblonga
21. Qda. Amillas	1.41	Oval oblonga
22. Qda. Del Qilengo	1.43	Oval oblonga
23. Río Pinche	1.34	Oval oblonga
24. Qda. Quinuas	1.49	Oval oblonga
25. Río Yaucán	1.37	Oval oblonga
26. Quebrada Tallal-2	1.43	Oval oblonga
27. Río Namora	1.43	Oval oblonga
28. Río Huacrarucro	1.29	Oval oblonga
29. Río Muyoc	1.41	Oval oblonga
30. Río Llantén	1.26	Oval oblonga
31. Río Sanagorán	1.42	Oval oblonga
32. Río Cañad	1.40	Oval oblonga
33. Qda. Pencayoc	1.49	Oval oblonga
34. Río Puerto Blanco	1.43	Oval oblonga
35. Río Chanta	1.40	Oval oblonga
36. Río Callayuc	1.42	Oval oblonga
37. Río Llantén	1.32	Oval oblonga
38. Río El Sauce	1.44	Oval oblonga
39. Río Chilca	1.46	Oval oblonga
40. Río Chancayano	1.48	Oval oblonga
41. Río San Juan-4	1.42	Oval oblonga
42. Río Ganzul	1.32	Oval oblonga
43. Río San Juan Pampa	1.36	Oval oblonga
44. Río Jadibamba	1.49	Oval oblonga
Media	1.38	
Desviación estándar	0.0677	
Coeficiente de variación	0.0491	

cas hidrológicas muy parecidas a las del grupo oval redonda, pero con respuestas ligeramente menos intensas ante tormentas extraordinarias. Es la geometría de cuencas con mayor presencia en la región de estudio (figura 1).

Microcuencas de la forma oblonga alargada

Este grupo (cuadro 6), conformado por 14 unidades hidrológicas (20%), se caracteriza porque los tiempos de concentración son relativamente mayores que en las dos formas anteriores, generando hidrogramas de crecidas efluentes del tipo platikúrtico, con caudales más sostenidos y recessiones más duraderas. A diferencia de los dos tipos de geometría anteriores, en este caso las condiciones para la recarga de acuíferos son más favorables y las pérdidas por escorrentía directa menores (figura 2).

En los tres grupos de clasificación, el coeficiente de variación cayó estrepitosamente por debajo de 5% respecto de su valor muestral (11.3%), lo cual confirma la solidez del criterio de esta clasificación.

Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos

En cada cuadro de clasificación geométrica anterior se han identificado, por descarte, los sistemas con similitud hidráulica, teniendo en cuenta el límite de error establecido para cada uno de los parámetros de similitud hidráulica.

Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos de forma oval redonda

En el grupo de esta forma se identificaron cuatro microcuencas con similitud hidráulica (cuadro 7), que representan 33.3% del total del grupo y sólo 5.7% del total de la muestra.

Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos de la forma oblonga alargada

Dentro de esta clase geométrica se identificaron siete microcuencas con similitud hidráulica (cuadro 8), equivalente a 50% del total del grupo y sólo el 10% del total de la muestra.

Cuadro 6. Grupo de microcuencas de la forma oblonga alargada.

Microcuenca	Coeficiente de Gravelius $1.50 < K_c \leq 1.75$	Forma de la cuenca
1. Río Poclush	1.56	Oblonga alargada
2. Río Rejo*	1.58	Oblonga alargada
3. Río San Juan-1	1.60	Oblonga alargada
4. Qda. Onda	1.60	Oblonga alargada
5. Río Magdalena	1.70	Oblonga alargada
6. Río Naranjo	1.70	Oblonga alargada
7. Río San Miguel	1.53	Oblonga alargada
8. Río Contumazá	1.72	Oblonga alargada
9. Qda. Bamba	1.73	Oblonga alargada
10. Qda. Del Chorro	1.68	Oblonga alargada
11. Río Llapa	1.57	Oblonga alargada
12. Qda. Honda	1.76	Oblonga alargada
13. Río San Juan-3	1.75	Oblonga alargada
14. Río Llaucano	1.70	Oblonga alargada
Media	1.65	
Desviación estándar	0.0761	
Coeficiente de variación	0.0461	

*Modelo de manejo de cuenca piloto, forestación Granja Porcón.

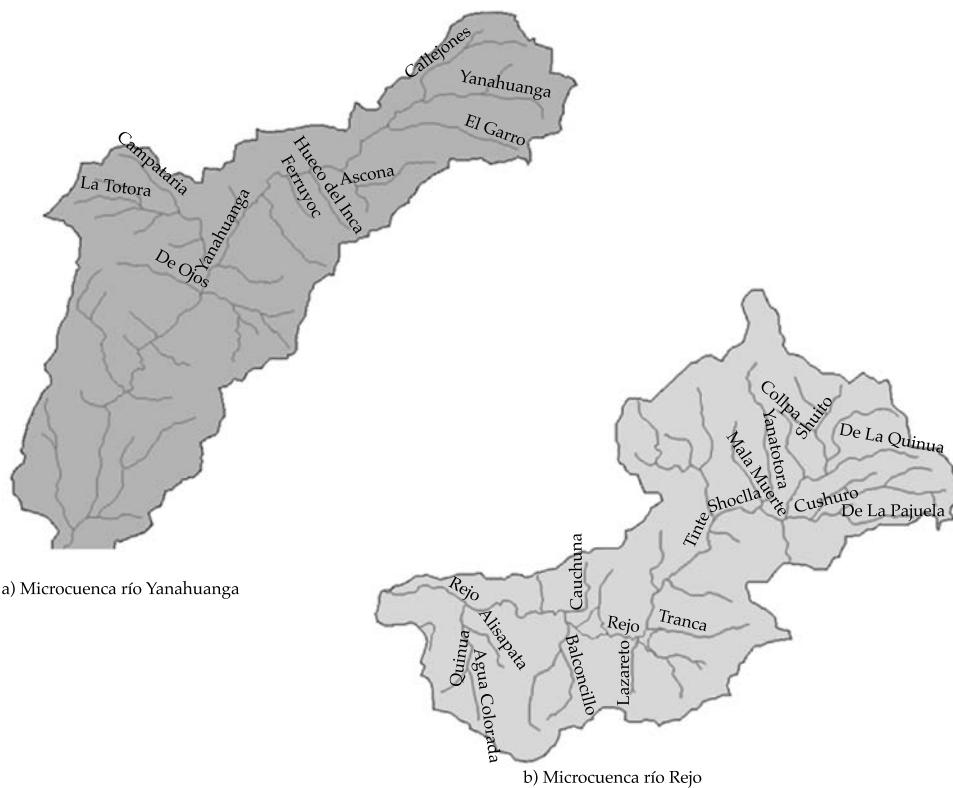


Figura 2. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos en la forma oblonga alargada.

Cuadro 7. Microcuenca altoandinas de la forma oval redonda con similitud hidráulica.

Microcuenca	Coeficiente de Gravelius $1.00 < K_c \leq 1.25$	Relación de confluencias (R_c)	Coeficiente orográfico (%) (C_o)	Forma de microcuenca	Vertiente
1. Río Porcón	1.16	1.88	11.83	Oval redonda	Pacífico
2. Río La leche	1.16	1.90	12.04	Oval redonda	Atlántico
3. Qda. Yamulán	1.23	2.25	12.27	Oval redonda	Pacífico
4. Río Asunción	1.24	2.34	10.90	Oval redonda	Pacífico
Media	1.20	2.10	11.76		
Desv. estándar	0.0435	0.2368	0.1941		
Coef. variación	0.0363	0.1128	0.0165		

Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos de la forma oval oblonga

En este tipo de geometría se identificaron 23 unidades hidrológicas hidráulicamente similares (cuadro 9), equivalentes a 52.3% del total del grupo y a 32.9% de la totalidad de la muestra. Se aprecia claramente la supremacía absoluta

de similitud hidráulica de microcuenca de esta geometría, estadística que no sólo refleja la significativa presencia de unidades hidrológicas de esta geometría, sino también la alta tendencia de similitud hidráulica dentro de su misma clase o grupo.

Es importante destacar que en los tres grupos geométricos, la cantidad porcentual de unidades

Cuadro 8. Microcuenas altoandinas de la forma oblonga alargada con similitud hidráulica.

Microcuenca	Coeficiente de Gravelius $1.50 < K_c \leq 1.75$	Relación de confluencias (R_c)	Coeficiente orográfico (%) (C_o)	Forma de microcuenca	Vertiente
1. Río Poclush	1.56	3.20	4.82	Oblonga alargada	Pacífico
2. Río Rejo	1.58	3.16	4.93	Oblonga alargada	Pacífico
3. Qda. Onda	1.60	3.52	4.91	Oblonga alargada	Atlántico
4. Río Magdalena	1.70	4.60	3.98	Oblonga alargada	Pacífico
5. Río Contumazá	1.72	4.20	3.90	Oblonga alargada	Pacífico
6. Qda. Bamba	1.73	4.00	4.03	Oblonga alargada	Pacífico
7. Río San Juan-3	1.7	3.29	4.07	Oblonga alargada	Pacífico
Media	1.66	3.71	4.38		
Desv. estándar	0.0797	0.5614	0.4806		
Coef. variación	0.0479	0.1513	0.1098		

hidrológicas con tendencia a la similitud hidráulica en el mismo grupo de clase está siempre por encima de 33%; porcentaje muy significativo si se hace extensivo a la región de estudio.

Transferencia de información hidrometeorológica

Sistema hidrológico de origen con información de tormentas máximas

La simulación del modelo probabilístico Gumbel, calibrado mediante técnicas estadísticas de mejor ajuste, permitió la generación de información con la más diversa gama de probabilidades de ocurrencia; algunos de estos resultados se presentan en el cuadro 10, información que corresponde a la ubicación de la estación pluviométrica Weberbauer en la cuenca baja de la unidad hidrológica río Mashcón (2 536 msnm).

Sistema hidrológico destino sin información de tormentas máximas

Teniendo como información de partida los datos del cuadro 10, la ubicación de la estación Weberbauer (2 536 msnm) en la cuenca baja del río Mashcón y la altitud media de la microcuenca destino río Jadibamba (3 218 msnm), mediante la aplicación de la función de transferencia de la ecuación(17), considerando que los períodos de

duración estándar de las intensidades se mantienen (escala tiempos, $t_e = 1$), y que la escala de altitudes es $H_e = 1.27$, se obtuvieron los datos transferidos del cuadro 11.

Discusión

De las características morfométricas adimensionales de la muestra

La muestra está caracterizada por el distinto grado de variabilidad de los parámetros de similitud hidráulica, denotado por los coeficientes de variación de 11.3, 39.1 y 123.8%, correspondientes al índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico, respectivamente. Comportamiento que indica el grado de influencia que tiene la forma de la cuenca sobre la configuración de la red de drenaje y los factores de relieve en el mismo orden.

La mayor proximidad entre valores de los coeficientes de variación del índice de Gravelius (11.3%) y relación de confluencias (39.1) es indicador de la mayor influencia que tiene la forma de la cuenca sobre la configuración de la red de drenaje.

Las microcuenas con la más alta vulnerabilidad a la degradación hídrica (mayores valores del coeficiente orográfico) y con elevada capacidad de drenaje superficial (redes de drenaje con mayores bifurcaciones), se concentran

Cuadro 9. Microcuencas altoandinas de la forma oval oblonga con similitud hidráulica.

Microcuenca	Coeficiente de Gravelius $1.25 < K_c \leq 1.50$	Relación de confluencias (R_c)	Coeficiente orográfico (%) (C_o)	Forma de microcuenca	Vertiente
1. Río Grande 2	1.27	2.75	2.68	Oval-oblonga	Pacífico
2. Río Cospán	1.28	2.56	4.40	Oval-oblonga	Pacífico
3. Río Mashcón	1.31	3.45	1.88	Oval-oblonga	Atlántico
4. Río Chonta	1.32	3.73	1.55	Oval-oblonga	Atlántico
5. Qda. Huertas	1.34	2.98	3.87	Oval-oblonga	Pacífico
6. Qda. Chausís	1.38	2.67	3.80	Oval-oblonga	Pacífico
7. Río Pallac	1.34	3.23	2.38	Oval-oblonga	Pacífico
8. Qda. Chiminote	1.36	2.83	1.90	Oval-oblonga	Pacífico
9. Qda. La Ramada 2	1.33	3.00	3.00	Oval-oblonga	Pacífico
10. Río Tumbadén	1.37	3.56	3.71	Oval-oblonga	Pacífico
11. Río Llantén 1	1.26	2.57	2.49	Oval-oblonga	Atlántico
12. Río Cañada	1.40	3.22	2.70	Oval-oblonga	Pacífico
13. Río Puerto Blanco	1.43	3.79	2.32	Oval-oblonga	Atlántico
14. Río Chanta	1.40	3.73	4.40	Oval-oblonga	Pacífico
15. Río Callalluc	1.42	3.92	2.96	Oval-oblonga	Atlántico
16. Río Llantén 2	1.32	3.49	3.73	Oval-oblonga	Atlántico
17. Río Muyoc	1.41	3.38	3.28	Oval-oblonga	Pacífico
18. Río El Sauce	1.44	4.17	3.43	Oval-oblonga	Atlántico
19. Río Namora	1.43	4.42	2.50	Oval-oblonga	Atlántico
20. Río Sanagorán	1.42	4.35	2.03	Oval-oblonga	Atlántico
21. Río San Pablo	1.29	4.20	3.26	Oval-oblonga	Pacífico
22. Río Chetillano	1.42	4.10	4.40	Oval-oblonga	Pacífico
23. Río Jadibamba	1.49	4.50	4.65	Oval-oblonga	Atlántico
Promedio	1.37	3.50	3.10		
Desv. estándar	0.062	0.617	0.909		
Coef. variación	0.0457	0.1761	0.2932		

mayormente en la cabecera de la vertiente del Pacífico.

De la influencia de la geometría de la cuenca

El resultado de clasificar las cuencas por su geometría arrojó 12 de la forma oval redonda (17%), 44 de la forma oval oblonga (63%) y 14 de la forma oblonga alargada (20%). La presencia superlativa de la forma oval (80%) en la muestra regional evidencia la primacía de sistemas altamente vulnerables a la erosión hídrica, pérdidas excesivas por escorrentía superficial y capaci-

dades muy altas de erosión y de transporte de sedimentos.

En cada grupo de clasificación, el coeficiente de variación del índice de Gravelius está por debajo de 5%, lo cual evidencia la solidez del criterio de clasificación mediante rangos del índice de Gravelius.

La caída estrepitosa del coeficiente de variación del índice de Gravelius en cada grupo de clasificación (menos del 5%), respecto de su valor muestral (11.3%) corrobora una vez más la gran influencia de la geometría de la cuenca en la similitud hidráulica.

Cuadro 10. Intensidades máximas de precipitación-estación pluviométrica Weberbauer (altitud: 2 536 msnm), microcuenca del río Mashcón.

N	J (%)	Tr (años)	Intensidades máximas (mm/h)				
			5 min	10 min	30 min	60 min	120 min
	00	∞	-	-	-	-	-
5	1	498.0	156.9	109.6	58.9	36.3	23.8
	2	248.0	147.0	103.2	55.4	34.1	22.2
	5	98.0	133.7	94.7	50.8	31.1	20.0
	10	48.0	123.4	88.2	47.2	28.7	18.4
	15	31.3	117.2	84.2	45.0	27.4	17.3
	20	22.9	112.7	81.3	43.4	26.3	16.6
	25	17.9	109.1	79.0	42.2	25.5	16.0
	30	14.5	106.0	77.0	41.1	24.8	15.5
	40	10.3	100.9	73.8	39.3	23.6	14.7
	50	7.7	96.4	71.0	37.8	22.7	13.9
	60	6.0	92.6	68.5	36.4	21.8	13.3
	70	4.7	88.7	66.0	35.1	20.1	12.7
	80	3.6	84.3	63.2	33.5	19.9	12.0
	90	2.7	79.3	60.0	31.8	18.8	11.1
	100	1.0	-	-	-	-	-
	00	∞	-	-	-	-	-
10	1	995.5	165.5	115.9	62.4	38.6	25.5
	2	495.4	156.8	109.5	58.9	36.3	23.8
	5	195.5	143.6	101.0	54.2	33.3	21.6
	10	95.4	133.3	94.5	50.6	31.0	20.0
	15	62.0	127.1	90.5	48.5	29.6	19.0
	20	45.3	122.6	87.6	46.9	28.6	18.2
	25	35.3	119.0	85.3	45.6	27.7	17.6
	30	28.5	115.8	83.3	44.6	27.0	17.1
	40	20.1	110.8	80.1	42.8	25.9	16.3
	50	14.9	106.4	77.3	41.2	24.9	15.6
	60	11.4	102.4	74.7	39.8	24.0	14.9
	70	8.8	98.5	72.2	38.5	23.1	14.3
	80	6.7	94.3	69.6	37.0	22.2	13.6
	90	4.9	89.4	66.4	25.3	21.1	12.8
	100	1.0	-	-	-	-	-
	00						-
25	1	2 488.0	179.9	124.2	66.9	41.5	27.6
	2	1 238.0	169.9	117.9	63.4	39.3	26.0
	5	487.9	156.6	109.4	58.8	36.3	23.8
	10	237.8	146.4	102.8	55.2	33.9	22.1
	15	154.3	140.2	98.9	53.1	32.5	21.1
	20	112.5	135.6	96.0	51.5	31.5	20.4
	25	87.4	132.0	93.7	50.2	30.7	19.8
	30	70.6	129.0	91.7	49.1	30.0	19.3
	40	49.4	123.8	88.4	47.3	28.8	18.4
	50	36.6	119.5	85.7	45.8	27.9	17.7
	60	27.8	115.5	83.1	44.4	27.0	17.6
	70	21.3	111.6	80.6	43.1	26.1	16.4
	80	16.0	107.4	78.0	41.6	25.1	15.7
	90	11.4	102.4	74.7	39.8	24.0	14.9
	100	1.0	-	-	-	-	-

N es periodo de años consecutivos; J, incertidumbre; Tr, tiempo de retorno.

Cuadro 11. Intensidades máximas de precipitación transferidas a la microcuenca río Jadibamba (altitud media: 3 218 msnm).

N	J (%)	Tr (años)	Intensidades máximas (mm/h)				
			5 min	10 min	30 min	60 min	120 min
	00	∞	-	-	-	-	-
5	1	498.0	199.3	139.2	74.8	46.1	30.2
	2	248.0	186.7	131.1	70.4	43.3	28.2
	5	98.0	169.8	120.3	64.5	39.5	25.4
	10	48.0	156.7	112.0	59.9	36.4	23.4
	15	31.3	148.8	106.9	57.2	34.8	22.0
	20	22.9	143.1	103.2	55.1	33.4	21.1
	25	17.9	138.6	100.3	53.6	32.4	20.3
	30	14.5	134.6	97.8	52.2	31.5	19.7
	40	10.3	128.1	93.7	49.9	30.0	18.7
	50	7.7	122.4	90.2	48.0	28.8	17.7
	60	6.0	117.6	87.0	46.2	27.7	17.0
	70	4.7	112.6	83.8	44.6	25.5	16.1
	80	3.6	106.9	80.3	42.5	25.3	15.2
	90	2.7	100.7	76.2	40.4	23.9	14.1
	100	1.0	-	-	-	-	-
	00	∞	-	-	-	-	-
10	1	995.5	210.2	147.2	79.2	49.0	32.4
	2	495.4	199.1	139.1	74.8	46.1	30.2
	5	195.5	182.4	128.3	68.8	42.3	27.4
	10	95.4	169.3	120.0	64.3	39.4	25.4
	15	62.0	161.4	114.9	61.6	37.6	24.1
	20	45.3	155.7	111.3	59.6	36.3	23.1
	25	35.3	151.1	108.3	57.9	35.2	22.4
	30	28.5	147.1	105.8	56.6	34.3	21.7
	40	20.1	140.7	101.7	54.4	32.9	20.7
	50	14.9	135.1	98.2	52.3	31.6	19.8
	60	11.4	130.0	94.9	50.5	30.5	18.9
	70	8.8	125.1	91.7	48.9	29.3	18.2
	80	6.7	119.8	88.4	47.0	28.2	17.3
	90	4.9	113.5	84.3	32.1	26.8	16.3
	100	1.0	-	-	-	-	-
	00						-
25	1	2 488.0	228.5	157.7	85.0	52.7	35.0
	2	1 238.0	215.8	149.7	80.5	49.9	33.0
	5	487.9	198.9	138.9	74.7	46.1	30.2
	10	237.8	185.9	130.6	70.1	43.0	28.1
	15	154.3	178.0	125.6	67.4	41.3	26.8
	20	112.5	172.2	121.9	65.4	40.0	25.9
	25	87.4	167.6	119.0	63.8	39.0	25.1
	30	70.6	163.8	116.5	62.4	38.1	24.5
	40	49.4	157.2	112.3	60.1	36.6	23.4
	50	36.6	151.8	108.8	58.2	35.4	22.5
	60	27.8	146.7	105.5	56.4	34.3	22.4
	70	21.3	141.7	102.4	54.7	33.1	20.8
	80	16.0	136.4	99.1	52.8	31.9	19.9
	90	11.4	130.0	94.9	50.5	30.5	18.9
	100	1.0	-	-	-	-	-

N es periodo de años consecutivos; J, incertidumbre; Tr, tiempo de retorno.

De la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos

La frecuencia con que se da la similitud hidráulica en cada grupo geométrico bajo los límites establecidos es de 52, 50 y 33%, correspondiente a la forma oval oblonga, oblonga alarga y oval redonda, respectivamente, lo que demuestra una tendencia importante a la similitud hidráulica dentro de cada grupo. Sin embargo, respecto a la muestra, estos porcentajes se reducen a 33, 10 y 6% en el mismo orden citado, donde se vuelve a notar el amplio predominio de similitud hidráulica en las cuencas de la forma oval oblonga.

El grado de aproximación de la similitud, en cambio, es mayor en cuencas de forma oval redonda, seguido por la forma oval alargada y oval oblonga respecto al límite fijado para cada parámetro de similitud hidráulica.

De la transferencia de información hidrometeorológica

En general, la información de intensidades correspondientes a máximas tormentas es muy escasa, pero a su vez muy útil para generar escorrentías máximas partiendo de esta información en microcuencas sin datos hidrométricos de máximas avenidas. Esta metodología resuelve, de manera sencilla, el problema en cuencas con similitud hidráulica.

La selección de la variable de diseño (cuadros 10 y 11) —donde existe una gama muy amplia de opciones en cuanto a períodos de vida útil (N), incertidumbre (J), tiempos de retorno (T_r) y periodo de duración, acorde con el tiempo de concentración de la superficie receptora/ colectora— permite adecuarla a la naturaleza e importancia de cualquier proyecto hidráulico.

Finalmente, utilizando otra de las leyes de los sistemas hidrológicos altoandinos, dado el parámetro adimensional de la ecuación (3), de donde se deriva el método Racional, permite convertir o transformar la intensidad de precipitación en escorrentía.

Conclusiones

Las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos con base en el fenómeno precipitación-escorrentía se rigen por la morfometría adimensional representada por las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5), cuyo conjunto constituye la base científica de esta metodología.

El trípode sobre el que descansa la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos está conformado por el índice de Gravelius, relación confluencias y coeficiente orográfico, como garantía de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, respectivamente, bajo niveles de aproximación previamente establecidos.

Para los niveles de aproximación de similitud aceptables para fines prácticos medidos mediante el coeficiente de variación pueden tomarse como máximos referenciales los valores de 0.05, 0.20 y 0.30, para el índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico, respectivamente. Sin embargo, esto queda a criterio del investigador, según sus intereses.

La metodología aquí desarrollada, por su naturaleza adimensional, puede aplicarse a cualquier región o interregiones, subnacionales o internacionales, siempre y cuando cumplan las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos (ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5)).

Los estudios de regionalización morfométrica pueden ayudar, en gran medida, a solucionar problemas de escasez de información hidrometeorológica con fines de manejo integral de cuencas hidrográficas piloto, que sean motivo de réplica en cuencas similares, que coadyuven a enfrentar fenómenos de cambio climático global, incluyendo fenómenos extremos de El Niño.

El intercambio de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos similares, mediante técnicas de morfometría adimensional, es un proceso sencillo a diferencia de otras metodologías de análisis regional, las que requieren de mucha información distribuida en espacio y tiempo para conseguir resultados aceptables.

Este estudio muestral de morfometría adimensional de la región Cajamarca reporta un amplio predominio de sistemas hidrológicos con altos potenciales de erosión hídrica (80%), traducido en una excesiva capacidad de drenaje superficial y de transporte de sedimentos y, por tanto, altos riesgos de peligrosidad de inundaciones ante eventos pluviométricos extraordinarios, acrecentándose con la presencia de eventos extraordinarios de fenómenos de El Niño.

Referencias

- Antigüedad, I. (1980). Estudio morfométrico de la cuenca del río Arratia (Viscaya). *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, 66, 31-52.
- Aparicio, M. (1997). *Fundamentos de hidrología de superficie* (303 pp.). Barcelona: Limusa, S. A.
- Askoa-Ibáñez, G. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la AGE*, 38, 311-329.
- Chow, V. T. (1993). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá: McGraw Hill.
- Cruz-Santillán, J., & Tamés, P. (1983). Análisis cuantitativo de la red de drenaje de la cuenca del río Deba. *Lurralde*, 6, 95-117.
- Docampo, B. G., De Vikeña, E., Rico, E., & Rallo, A. (2009). Morfometría de las cuencas de la red hidrográfica (País Vasco, España). España: Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco.
- Gaspari, F. G. (2002). *Plan de ordenamiento territorial de cuencas degradadas*. Aplicación de SIG (179 pp.). Huelva, España / Buenos Aires: Ediciones Cooperativas.
- Gaspari, F. J., Rodriguez, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Deldado, M. I., & Besterio, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. VII Congreso de Medio Ambiente AUGM, del 22 al 24 de mayo de 2012, UNLP, La Plata, Argentina.
- Gravelius, H. (1914). *Morphometry of Drainage Basins*. Amsterdam: Elsevier.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisberbert, J. (2005). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Recuperado de ruinet.upv.es/bitstream/
- Henaos, J. E. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas* (396 pp.). Bogotá: Universidad Santo Tomás, Centro de Enseñanza Desescolarizada.
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- ICOLD (2008). *International Commission of Large Dams*, ICOLD. Recuperado de <http://www.icoldcigb.net/>, <http://www.dams.org>.
- Jimenez, O. & Fariñas, H. (2005). Problemática de la sedimentación del embalse Valdesia, República Dominicana. Santo Domingo: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República Dominicana (INDRHI).
- Martínez, J. (1986). Características morfométricas de la red de drenaje de algunas cuencas de la sierra de los Álamos (Moratalla, Murcia). *Papeles de Geografía Física*, 11, 45-51.
- Rocha, A. (2006). *Problemática de la sedimentación de embalses en el aprovechamiento de los ríos peruanos, aplicada al embalse de Poechos*. I Congreso Internacional de Hidráulica, Saneamiento y Medio Ambiente, Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG), Lima, Perú. Recuperado de <http://www.imefen.uni.edu.pe>.
- Rodríguez-Díaz, H. A. (2001). *Hidráulica experimental* (337 pp.). Santafé de Bogotá: Centro Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Senciales, J. (2005). *El Análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico*. Málaga, España: Departamento de Geografía, Universidad de Málaga. Recuperado de dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/109746.pdf.
- Sotelo-Ávila, G. (1977). *Hidráulica general. Vol. I. Fundamentos* (551 pp.). México, DF: Limusa.
- Streeter, V., & Wilie, E. (2000). *Mecánica de fluidos* (9a edición). Santafé de Bogotá: McGraw Hill Internacional, S.A.
- Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín (s.f.) *HidroSIG*. Medellín: Escuela de Ciencias y Medio Ambiente. Recuperado de www.medellin.unal.edu.co/hidrosig.
- Vergara, M. (1993). *Técnicas de modelación en hidráulica*. Buenos Aires: Ediciones Alfa Omega.

Dirección institucional del autor

Mg. Oswaldo Ortiz Vera

Universidad Nacional Agraria La Molina
Apdo. 456-La Molina, Lima, PERÚ
Teléfono: +51 (016) 3495 647
Fax: +51 (016) 3495 670
ingoov@gmail.com
pdrh@glamolina.edu.pe
pdrh.epg@gmail.com