

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XVIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

SIMILITUD DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS

OSWALDO ORTIZ V.¹

RESUMEN

Una de las grandes aplicaciones de los parámetros adimensionales de los fenómenos físicos ocurridos en sistemas similares es el de servir como parámetros de transferencia de ciertas características de un sistema a otro. El objetivo del presente trabajo es encontrar las condiciones de similitud entre sistemas hidrológicos, en base de lo cual sea posible transferir información desde sistemas con datos disponibles hacia sistemas similares carentes o con escasa información. La metodología consiste en determinar el conjunto de parámetros adimensionales del fenómeno físico estudiado - en este caso la precipitación como causa y la escorrentía como efecto - para luego definir que parámetros determinan la similitud geométrica, cinemática y dinámica. Luego de un proceso comparativo, se ha podido establecer que el **coeficiente de compacidad** define la geometría, la **relación de confluencias** define la geometría de la red de flujo, y finalmente el **coeficiente orográfico** determina la relación de fuerzas, con lo cual se completa las tres condiciones de similitud total entre sistemas hidrológicos. El estudio de la teoría de modelos físicos, nos hace entender que entre modelo y prototipo se esperan respuestas similares frente a la acción de la misma variable de entrada; en este caso la escorrentía como efecto con el correr del tiempo ha determinado macro patrones de flujo similares debido a que la naturaleza de los sistemas (suelo, geología, relieve, cobertura vegetal, etc.) también es similar. Los resultados del estudio de similitud de sistemas hidrológicos son bastante elocuentes, permitiéndonos concluir que jamás existe similitud total, aun entre modelo y prototipo, lográndose sólo aproximaciones que son suficientes para fines prácticos.

¹Profesor Principal, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca – mail: ingoov@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La falta o escasa información de escorrentías, como base de todo proyecto de aprovechamiento hídrico, unido a la falta de metodologías que permita un análisis regional consistente con poca cantidad de datos; determina toda una problemática que dificulta el planeamiento, diseño y operación de todos los proyectos que tienen al agua como recurso básico. Esto conlleva a la búsqueda de metodologías sencillas que permitan generar información donde no la hay, con calidad lo suficientemente aceptable para fines prácticos, lo cual se consigue con sistemas hidrológicos fuente y destino aproximadamente similares.

El estudio de similitud entre modelo y prototipo, unido a la adecuada operación del modelo, ha hecho posible la construcción de grandes obras en los diferentes capos de la ingeniería. Sin embargo, aun siendo el hombre el artífice de todo esto, no se ha podido conseguir una total similitud; pero estos resultados transferidos al prototipo han sido suficientes en la práctica. En los sistemas hidrológicos ocurre algo similar, la naturaleza a través de miles de años, se encargó de construir dicha similitud que ahora el hombre puede aprovechar para fines de transferencia de información. Para ello, hay necesidad que definir cuales son las condiciones determinantes de la similitud total entre sistemas.

Los criterios de similitud entre sistemas hidrológicos son los mismos que se utilizan en mecánica de fluidos, puesto que la escorrentía superficial a través de los cursos naturales, constituye un verdadero patrón de flujo a nivel macro.

2. METODOLOGÍA

El fenómeno físico de escorrentía (respuesta o efecto) es el producto de la incidencia de la precipitación (causa) como única variable de entrada y el comportamiento del sistema, el mismo que depende de su naturaleza intrínseca (suelo, geología, relieve, cobertura, etc). Todas las variables que componen este importante fenómeno, determinadas luego de un proceso de selección, son las que se muestran en el Cuadro N° 01.

| Cuadro N° 01. 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 |

Ortiz V. (2003), empleando el teorema PI o de Buckingham, ha agrupado las variables del Cuadro N° 01 en cinco parámetros adimensionales siguientes:

$$p_1 = \frac{Q}{AP} \quad (1)$$

$$p_2 = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$$p_3 = \frac{I * t}{H} \quad (3)$$

$$p_4 = \frac{Q}{I * A} \quad (4)$$

$$p_5 = \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

Donde:

- p = 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 la lluvia
- p = Perímetro de la cuenca

El parámetro adimensional de la ecuación (5) describe la geometría o forma de la cuenca, la misma que influye en las características de la respuesta del sistema frente a la variable causal. Multiplicando ambos miembros de esta ecuación por 0.28, resulta el parámetro adimensional de la ecuación (6), donde el primer miembro ($K_c = 0.28 * p_5$) se conoce como **Índice de Compacidad** o **Coefficiente de Gravelius**, el mismo que se expresa como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro que tendría un círculo imaginario de igual área que la cuenca.

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

K_c = Índice de Compacidad o Coeficiente de Gravelius

Se demuestra que este parámetro es el que describe con mayor precisión la geometría o forma de la cuenca, la misma que influye de manera directa en la magnitud de los caudales pico de esorrentía directa (máximas avenidas). El cuadro N° 02 muestra los tipos de geometría de los sistemas hidrológicos en base al Coeficiente de Compacidad.

| Cuadro N° 02. Formas de la Cuenca de acuerdo al Coeficiente de Gravelius | | |
|--|----------------|------------------------------------|
| Clase de Geometría | Rango de Clase | Forma de la Cuenca |
| K_{c1} | 1.0 a 1.25 | Casi redonda a oval-redonda |
| K_{c2} | 1.25 a 1.50 | Oval-redonda a oval-oblonga |
| K_{c3} | 1.50 a 1.75 | Oval-oblonga a rectangular-oblonga |

“Dos sistemas hidrológicos de igual Índice de Compacidad tienen similitud geométrica”.

El parámetro adimensional de la ecuación (4) representa el flujo de escorrentía directa instantáneo durante un evento de precipitación pluvial, donde el primer miembro representa el coeficiente de escorrentía (C) del vetusto, pero hasta hoy aplicable **Método Racional**, que despejando el caudal de dicha expresión dado resulta la ecuación (7).

$$Q = CIA \quad (7)$$

- Q = Caudal máximo de escorrentía directa
 C = Coeficiente de escorrentía
 I = Intensidad máxima para el tiempo de concentración de la cuenca.
 A = Área proyectada sobre un plano horizontal.

El número adimensional de la ecuación (2) representa fuerzas potenciales del flujo de escorrentía en la cuenca. Elevando al cuadrado, miembro a miembro, esta expresión se transforma en la ecuación (8), donde el primer miembro ($p_2^2 = C_o$) toma el nombre de **Coeficiente Orográfico**, que es otro parámetro adimensional de gran importancia porque representa fuerzas potenciales degradantes o potenciales hidroenergéticos de la cuenca.

$$C_o = \frac{H^2}{A} \quad (8)$$

- C_o = Coeficiente Orográfico

El coeficiente orográfico incluye explícitamente a la pendiente de la cuenca. Pues, como se puede apreciar en la ecuación (2) a mayor pendiente de laderas menor área proyectada (A) y mayor potencial de degradación hídrica o hidroenergética, y viceversa. Este parámetro es muy importante como indicador para la evaluación de potenciales hidroenergéticos en las cuencas o para medir riesgos de vulnerabilidad erosiva. Las cuencas andinas de la vertiente del Pacífico se caracterizan por tener altos potenciales en ambos sentidos, aunque en el aspecto hidrenergético las mayores caídas o saltos se compensan con las menores disponibilidades de agua.

“Dos sistemas hidrológicos de igual Coeficiente Orográfico tienen similitud dinámica”.

Finalmente, el parámetro adimensional que describe la geometría del patrón de flujo superficial o red hidrográfica es la **Relación de Confluencias**, dada por la ecuación (9).

$$R_c = \frac{n_i}{n_{i+1}} \quad (9)$$

R_c = Relación de confluencias

n_i = Número total de cursos naturales de orden i

n_{i+1} = Número total de cursos naturales de orden inmediatamente superior a i (i= 1, 2, 3,.....,N-1)

N = Orden de la cuenca.

La red hidrográfica o de drenaje natural es para la cuenca lo que el campo de líneas de corriente es para la hidráulica a través de las estructuras.

“Dos sistemas hidrológicos de igual Relación de Confluencias promedio tienen similitud cinemática”.

La relación de confluencias es el número sin dimensiones que expresa el grado de ramificación de la red de drenaje superficial, la cual se va formando a través del tiempo, en miles de años, en concordancia con el tipo de suelo, geología, pendiente, cobertura vegetal, características de pluviosidad y condiciones climáticas en general. Sólo sistemas hidrológicos que tienen similitud en tales características, lo tendrán también en la geometría de la red de drenaje natural.

En todo sistema hidrológico, el número de cursos naturales del orden inmediato superior es menor que los de orden i ($n_i > n_{i+1}$), por lo que la relación de confluencias será siempre mayor que la unidad, incrementándose mientras mayor sea la densidad de ramificaciones de menor orden.

Consecuentemente, dos cuencas similares cinemáticamente implica en forma explícita, similares en suelos, geología, pendiente de laderas, características de pluviosidad y en climatología.

En suma, ***“dos sistemas hidrológicos son similares totalmente sólo si tienen similitud geométrica, cinemática y dinámica”***

3. RESULTADOS Y COMENTARIOS

El cuadro N° 03 muestra los resultados de los parámetros de similitud de 22 sistemas hidrológicos de la región Cajamarca al norte de Perú muy cerca de la divisoria de aguas que separa las vertientes del Atlántico y del Pacífico, en las cabeceras de las cuencas de los ríos Jequetepeque (vertiente del Pacífico) y Cajamarquino (vertiente del Atlántico). Todos los sistemas son aproximadamente similares unos con otros, observándose en ciertos sistemas mayor discrepancia en la similitud dinámica (Coeficiente Orográfico). Por ejemplo, el sistema del río Chonta es similar al del Mashcón, con una discrepancia en la similitud de forma (Índice de Compacidad) de 0.7%, en la similitud cinemática (Relación de Confluencias) de 8.1% y en la similitud dinámica (Coeficiente Orográfico) de 17.5%; ambos sistemas pertenecen a la vertiente del Atlántico.

Otro ejemplo lo constituye la similitud de los sistemas de los ríos Porcón y La Leche, donde no existe discrepancia en la similitud de forma; pero sin embargo, la discrepancia en la similitud cinemática es de 1.0% y en la similitud dinámica de 17.3%. Podríamos afirmar en este caso que la semejanza de forma es 100%, la cinemática 99.0% y la dinámica sólo en 82.7%. Ambos sistemas también forman parte de la misma vertiente (Atlántico).

Analicemos ahora la similitud de sistemas de la vertiente del pacífico. Tomemos los sistemas hidrológicos de los ríos Poclush y Rejo; las discrepancias de la similitud de forma, cinemática y dinámica son de 1.3%, 1.2%, y 2.3%, respectivamente. En lo que respecta a los sistemas de las quebrada Huertas y Chausís; las discrepancias de la similitud de forma, cinemática y dinámica, son de 3.0%, 10.4%, 1.8%, respectivamente.

En general, notamos la misma tendencia de discrepancias cuando se trata de sistemas hidrológicos pertenecientes a la misma vertiente.

Por último, tomemos los sistemas hidrológicos similares de vertiente diferentes, como son los ríos Quismache (vertiente Atlántico) y Grande (vertiente del Pacífico), las discrepancias de similitud de forma, cinemática y dinámica, son de 2.4%, 0.4% y 7.6%, respectivamente. Para los sistemas San Juan (vertiente del Pacífico) y Quebrada Onda (Vertiente del Atlántico), las discrepancias de similitud de forma, cinemática y dinámica son de 0.0%, 9.5% y 11.5, respectivamente.

En general, podemos afirmar que la similitud puede darse entre sistemas de una misma vertiente o entre sistemas de vertientes vecinas diferentes, siendo la similitud dinámica la más discrepante, en ambos casos.

El detalle de la red hidrográfica es mayor mientras mayor sea la escala cartográfica y viceversa, por lo que la **Relación de Confluencias** es sensible a sufrir efectos de escala. Este hecho obliga a que los parámetros adimensionales de los sistemas hidrológicos deben obtenerse a partir de mapas geográficos a la misma escala.

| Cuadro N° 3. Parámetros Adimensionales de Similitud de algunas Micro cuencas de la Región Nor Oriental del Marañón Cajamarca-Perú (Escala 1/100 000) | | | | | | |
|---|-------------------------------|----------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| Micro cuenca | A (Km²) | N | K_c | R_c | C_o (%) | Sistema Hidrológico |
| 1. Río Grande | 72.5 | 3 | 1.27 | 2.70 | 8.22 | Atlántico |
| 2. Qda. Tallal | 14.0 | 2 | 1.23 | 2.68 | 44.6 | Pacífico |
| 3. Río Quismache | 183.8 | 4 | 1.24 | 2.74 | 2.90 | Atlántico |
| 4. Río Grande | 456.5 | 4 | 1.27 | 2.75 | 2.68 | Pacífico |
| 5. Río Cospán | 196.5 | 4 | 1.28 | 2.56 | 4.40 | Pacífico |
| 6. Río Porcón | 81.6 | 3 | 1.16 | 1.88 | 11.03 | Atlántico |
| 7. Río La Leche | 116.5 | 3 | 1.16 | 1.90 | 12.94 | Atlántico |
| 8. Río Huagayoc | 12.5 | 2 | 1.15 | 1.85 | 72.02 | Atlántico |
| 9. Río Ronquillo | 36.8 | 3 | 1.12 | 1.93 | 22.85 | Atlántico |
| 10. Río Mashcón | 276.1 | 4 | 1.31 | 3.45 | 1.88 | Atlántico |
| 11. Río Chonta | 352.8 | 4 | 1.32 | 3.73 | 1.55 | Atlántico |
| 12. Qda. Huertas | 105.5 | 3 | 1.34 | 2.98 | 3.87 | Pacífico |
| 13. Qda. Chasis | 207.3 | 4 | 1.38 | 2.67 | 3.80 | Pacífico |
| 14. Río Llaucán | 595.0 | 4 | 1.41 | 2.55 | 0.89 | Atlántico |
| 15. Río Cascasén | 114.2 | 4 | 1.42 | 3.12 | 6.88 | Atlántico |
| 16. Río Azufre | 45.0 | 2 | 1.45 | 3.13 | 7.22 | Atlántico |
| 17. Río Poclush | 882.5 | 5 | 1.56 | 3.20 | 4.82 | Pacífico |
| 18. Río Rejo | 201.4 | 4 | 1.58 | 3.16 | 4.93 | Pacífico |
| 19. Río San Juan | 271.2 | 4 | 1.60 | 3.89 | 5.55 | Pacífico |
| 20. Qda. Onda | 130.0 | 3 | 1.60 | 3.52 | 4.91 | Atlántico |
| 21. Río Magdalena | 807.2 | 4 | 1.70 | 4.60 | 3.38 | Pacífico |
| 22. Río Naranjo | 51.4 | 2 | 1.70 | 1.50 | 23.00 | Pacífico |

N = Número de orden de la cuenca

4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- Teóricamente, la similitud total de sistemas hidrológicos se logra cuando se satisface simultáneamente las tres condiciones de similitud: de forma, cinemática y dinámica. En sistemas hidrológicos, la similitud total es imposible de encontrar, pero para fines prácticos es suficiente una similitud aproximada.
- El estudio regional, realizado en Cajamarca al norte de Perú, demuestra que en la naturaleza es imposible encontrar sistemas hidrológicos con similitud total. La razón es por demás

obvia, pues mientras en hidrología buscamos sistemas similares, en la mecánica de fluidos en cambio el hombre trata de construir sistemas similares entre modelo y prototipo y aún así no la consigue. Sin embargo, en la práctica es suficiente una similitud hidrológica aproximada para realizar transferencias de información, pues es mejor la generación de datos bajo tales condiciones que medir una variable en forma aislada de una población hidrológica siempre infinita. Es el caso de aforamientos de caudales; pero sin embargo este hecho puede servir como indicador para medir la calidad de la información generada.

- Toda información generada no reemplaza, de ninguna manera a los **datos vírgenes**; sin embargo constituye una información valiosa para fines prácticos en sistemas hidrológicos carentes de cierta información, como son las escorrentías.
- La similitud aproximada entre sistemas hidrológicos, puede darse entre cuencas pertenecientes a la misma vertiente o a vertientes diferentes, así como entre las partes de un mismo sistema hidrológico.
- Generalmente, la mayor discrepancia de similitud encontrada es en lo referente a la similitud dinámica, la misma que puede aceptarse para fines prácticos hasta un 25%.
- La geometría de las cuencas, medida por el índice de compacidad, para los sistemas hidrológicos estudiados, varía entre 1.12 (oval-redonda) y 1.70 (rectangular-oblonga). Formas que influyen en las características dinámicas de la escorrentía directa, desde hidrogramas con gastos pico muy fuertes hasta hidrogramas más atenuados y recesiones sostenidas, respectivamente.
- La similitud de los sistemas hidrológicos es independiente del número de orden N e incluye explícitamente la naturaleza de los sistemas, como son: relieve, geología, tipo de suelo y variables climáticas.
- El estudio de similitud del presente trabajo se ha realizado en vertientes contiguas a la línea divisoria común de aguas; esto es con sistemas hidrológicos vecinos; por lo que sería pertinente realizar un estudio mucho más amplio entre sistemas hidrológicos alejados unos de otros.

5. REFERENCIAS

E. Buckingham, "Model Experiments and the Form of Empirical Equation", Trans. ASME, vol 37.

Víctor L. 1999. Streeter, "Mecánica de Fluidos", 9ª Edición, Mc Graw Hill.

Ven Te Chow, 1993. "Hidrología Aplicada", Mc Graw Hill.

O. Ortiz Vera, 2003. "Pronóstico de Variables Aleatorias en el Diseño de Ingeniería", UNC.

G. Sotelo Ávila, 1977. "Hidráulica General", Edit. Limusa, 1ª Edición.

F.S. Aparicio Mijares, 1996. "Fundamentos de Hidráulica de Superficie", Edit. Limusa.

Miguel A. Vergara S. 1993. "Técnicas de Modelación en Hidráulica", Ediciones Alfaomega.