



Terra. Nueva Etapa
ISSN: 1012-7089
ISSN: 2542-3266
vidal.saezsaez@gmail.com
Universidad Central de Venezuela
Venezuela

Análisis del comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando índices: estudio de caso en la región costa del Ecuador

Giler-Ormaza, Andy; Zambrano Navarrete, Xiomara Alejandra; Chila Zambrano, José Luis; Arcentales Vera, Diego Armando; Guadamud Sánchez, Jean Paul; Félix Mera, John Enrique; Caicedo Toro, Micheal David; Alarcón Loo, José Ramón

Análisis del comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando índices: estudio de caso en la región costa del Ecuador

Terra. Nueva Etapa, vol. XXXV, núm. 58, 2019

Universidad Central de Venezuela, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72164777003>

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Análisis del comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando índices: estudio de caso en la región costa del Ecuador

Analysis of the hydrological behavior of tropical catchments using indices: case study in Ecuador coastal region.

Andy Giler-Ormaza

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador
andygiler90@hotmail.es

Redalyc: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72164777003>

Xiomara Alejandra Zambrano Navarrete

José Luis Chila Zambrano

Diego Armando Arcentales Vera

Jean Paul Guadamud Sánchez

John Enrique Félix Mera

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

Micheal David Caicedo Toro

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

José Ramón Alarcón Loo

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

RESUMEN:

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento hidrológico de cuencas tropicales utilizando índices. En la costa ecuatoriana, se seleccionan 3 microcuencas con áreas menores a 9 km. y se registran sus caudales, en alta resolución temporal durante un periodo de tiempo que abarca parte de las temporadas húmeda y seca de un año. Aquí nos enfocamos en los índices: variación diaria del flujo (QVAR), pendiente de la curva de duración de caudales (R2FDC), el Índice de Regulación Hidrológica (IRH), duración promedio de los pulsos bajos (DLQ75) y duración promedio de los pulsos altos (DHQ25). Los resultados de QVAR están entre 0,45 y 1,17, mismos que indicarían una variabilidad del flujo relativamente baja. Se obtuvo valores de IHR menores a 0,5 por lo cual se infiere que la capacidad de regulación hidrológica de las cuencas no es alta. En contraste, R2FDC es baja, lo que indica una buena capacidad de regulación hidrológica. Las DLQ75 y DHQ25 se encuentran entre 0,35 días y 2,44 días indicando magnitudes de flujo rápido a moderadamente cambiantes. A conocimiento de los autores, esta es la primera vez que éstos índices se aplican para la región costera del Ecuador.

PALABRAS CLAVE: Comportamiento hidrológico, Cuencas Hidrográficas, Índices, Clima Tropical, Región costa del Ecuador.

ABSTRACT:

The objective of the present work is to analyze the hydrological behavior of tropical river basins using indices. On the Ecuadorian coast, 3 micro-watersheds with areas smaller than 9 km. are selected and their flows are recorded in high temporal resolution during a period of time that covers part of the wet and dry seasons of one year. Here we focus on the indices: daily flow variation (QVAR), slope of the flow duration curve (R2FDC), the Hydrological Regulation Index (IRH), average duration of the low pulses (DLQ75) and average duration of the high pulses (DHQ25). The results of QVAR are between 0,45 and 1.17 which would indicate a relatively low flow variability. IHR values lower than 0,5 were obtained, so it is inferred that the hydrological regulation capacity of the basins is not high. In contrast, R2FDC is low, which indicates a good hydrological regulation capacity. The DLQ75 and DHQ25 are between 0, 35 days and 2, 44 days indicating fast-to-moderate changes in flow magnitudes. To the knowledge of the authors, this is the first time that these indices are applied for the coastal region of Ecuador.

KEYWORDS: Hydrologic Behavior, Catchments, Indices, Tropical Climate, Ecuadorean Coastal Region.

INTRODUCCIÓN

En comparación con sus contrapartes de climas templados, existe una falta generalizada de conocimiento sobre la hidrología de regiones tropicales (Muñoz-Villers y McDonnell, 2013; Elsenbeer y Vertessy, 2000). Esto a pesar de que muchas de las cuencas tropicales sostienen un gran porcentaje de la población humana y de las poblaciones de flora y fauna. Se conoce poca información sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas de la región costa del Ecuador, que se encuentra en una zona tropical. Entender el comportamiento actual de las cuencas y sus flujos es un paso hacia actividades de conservación y protección.

Es de particular interés entender el comportamiento de las cuencas que alimentan los embalses. Esto con el objetivo de conservar los recursos hídricos que los sustentan. Ante un constante cambio en el uso de la tierra en regiones tropicales, se puede esperar también cambios en la generación de escorrentías y el comportamiento de los flujos y cuencas (Bruijnzeel, 1990), lo cual repercutiría en la operación de los embalses. Por otra parte, tal como se da a nivel mundial (Gleick, 1998), se busca en Manabí aprovechar de forma sostenible el agua, no solo para beneficio de la población, sino también para conservar el equilibrio ecológico de los cursos de agua (Richter *et al.*, 2003).

Existen algunos desafíos para caracterizar las cuencas y flujos en la región. El primero es la falta de una red amplia de monitoreo que brinde datos hidrológicos de alta resolución temporal. Por otra parte, la región es climática e hidrológicamente diversa (Giler-Ormaza, 2018). La variación climática de la región costera ecuatoriana presenta retos y oportunidades, pero también grandes brechas de conocimiento. Se cree que no es posible la aplicación de hallazgos en otras áreas del mundo, con similares características climáticas, debido a diferencias en cobertura vegetal natural. Adicionalmente, se reconoce que los procesos hidrológicos en regiones húmedas tropicales son más variables debido a mayores flujos de energía (Wohl *et al.*, 2012), lo que añadiría dificultad para caracterizar las cuencas y flujos y para generalizar o extrapolar resultados de un lugar a otro.

Los caudales de los ríos pueden brindar información acerca del comportamiento hidrológico de las cuencas. Sin embargo, en muchas regiones tropicales en vías de desarrollo, como es el caso de Ecuador, únicamente se tiene información disponible para flujos de los ríos principales. Adicionalmente, se publican solo resúmenes básicos de datos de caudal, entre ellos: caudal medio diario (QDprom), caudal mediano (Q50), promedio mensual (Qmes) y sus magnitudes máximas (Qmax), medias y mínimas (Qmin) (p.ej. ver INAMHI, n.d.). La información más detallada sobre las características de los flujos no se encuentra disponible de forma pública, lo que limita las posibilidades de entender las variaciones sub-anales e interanuales de los recursos hídricos disponibles, así como del comportamiento de las cuencas. Adicionalmente, estos problemas afectan el manejo informado de los cauces y cuencas.

Los índices hidrológicos permiten conocer el comportamiento de los flujos y de las cuencas. Varios estudios utilizan índices como evidencia de los efectos que los cambios en la hidrología pueden tener sobre los flujos. Actualmente, se tiene a disposición una variedad de índices que se pueden aplicar. Sin embargo, en ocasiones, existe redundancia en la aplicación de índices (Olden y Poff, 2003) por lo que estos se deben seleccionar cuidadosamente con miras a mostrar diferentes aspectos de los fenómenos a estudiar. A conocimiento de los autores, en la región costera del Ecuador no se ha reportado un análisis de flujos utilizando índices diferentes a Qmax, Qmin, Q50, QDprom y Qmes.

Los índices hidrológicos ya se han aplicado en regiones tropicales como lo es la región costera del Ecuador. Así por ejemplo, Guzha *et al.* (2014) emplearon, en la amazonía brasileña, análisis de índices como percentiles de flujos altos y bajos, así como un análisis de curvas de duración de caudales (FDC). Utilizando dos cuencas, una mayormente con cobertura de bosque y otra con cobertura pasto, encontraron que el pasto libera hasta en un 50% más de caudales durante la temporada de flujos altos con respecto al bosque. Por ejemplo, una escorrentía de 10 mm por día ocurre en el pasto durante el 30% del tiempo, mientras que en el bosque, ocurre

solo un 10% del tiempo. No obstante encontraron que en temporadas de flujo base no hallaron mayores diferencias en los caudales.

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando índices. Para lograrlo, primero se seleccionan microcuencas de relevancia que alimentan a dos de los principales embalses de la región. Luego se procede a una recolección de caudal en alta resolución temporal. Se seleccionan índices hidrológicos relevantes y, finalmente, se aplican los índices para los datos recolectados. Debido a que la hidrología se ubica en el amplio campo del conocimiento de la geografía física (Dartmouth College, s.f.), se espera que la presente investigación sea también un aporte desde el punto de vista geográfico, en particular ilustrando el uso de herramientas computacionales y los hallazgos del comportamiento de cuencas hidrográficas de diferentes partes del globo.

MÉTODOS

Área de estudio

Las microcuencas seleccionadas se ubican en la costa ecuatoriana, en la provincia de Manabí, donde se encuentran 4 embalses de importancia mayor. Tres de ellos interconectados. Estos reservorios son independientes de los deshielos de Los Andes, y proveen de agua para múltiples usos a una población mayor a 800 000 personas distribuida en 12 cantones (OAS *et al.*, 1991). Para seleccionar las microcuencas (ver diagrama en Figura 1), se utilizó los siguientes criterios: a) Ser aportantes a los principales embalses de los cuales la provincia se sirve; b) tener un caudal continuo todo el año (río perenne); c) ser accesible –cerca de una carretera o vía, d) tener un área menor a 10 km². En la literatura se encuentra que los índices hidrológicos se aplican a cuencas de diferentes tamaños, por ejemplo: desde 32 hectáreas (Sikka *et al.*, 2003) hasta 1 millón de km². (Gao *et al.*, 2012). Sin embargo, se prefirió cuencas pequeñas que presenten características físicas similares entre ellas.

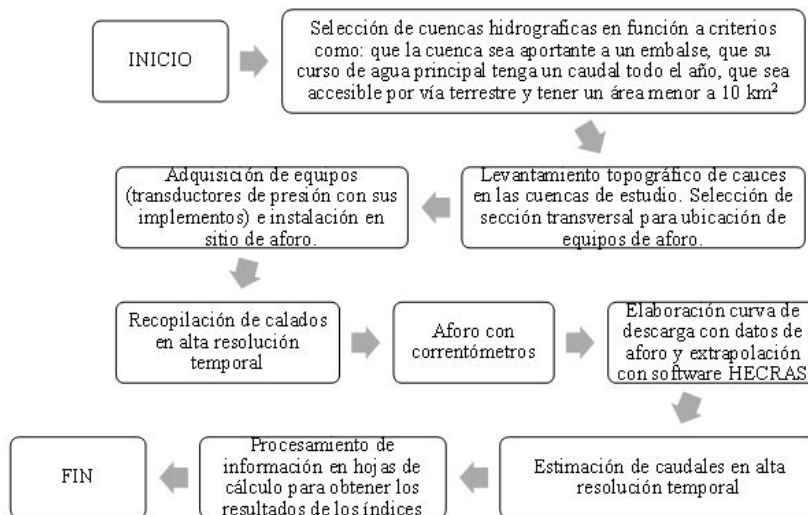


Figura 1 Diagrama de flujo metodológico para recolección de datos de campo

Se utilizó Sistemas de Información Geográfica (GIS), visitas de campo, modelos digitales de elevación (DEM) e imágenes satelitales con resolución de pixel de 30m x 30m (USGS & SRTM, n.d.) para generar

las áreas de las cuencas aguas arriba del punto de interés (ver Figura 2). Se ha preferido aquí QuantumGIS (QGIS, 2020) para los análisis donde se utilizaron varios algoritmos. Para rellenar los vacíos en el DEM se empleó el Fill Sinks (Wang y Liu, 2006), luego se generó, a partir del DEM, una red hídrica con el método de Strahler (SAGA-GIS) y con sus números de orden correspondientes. Mediante visitas de campo se georeferenciaron los puntos para ubicar los aforadores de caudal y luego se cargaron al SIG. Tomando esos puntos de aforo como referencia, se aplicó el método Upslope Area con la opción Deterministic 8 (O’Callaghan & Mark, 1984) para generar las áreas de las cuencas aguas arriba del punto de interés. Con eso se pudo tener capas o *shapefiles* de las cuencas de estudio.

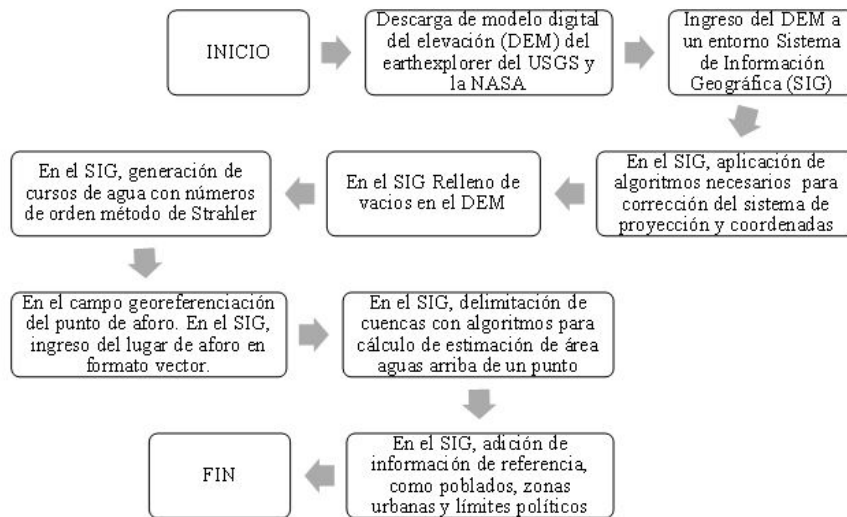


Figura 2 Diagrama de flujo metodológico procesos para cartografía.

Debido a la marcada estacionalidad en las precipitaciones (Pourrut, 1994), y a la cobertura limitada de la red de vías, pocas microcuencas cumplieron los requisitos. Se seleccionó dos microcuencas afluentes al embalse La Esperanza – La Mina (LM) y Rancho Palo (RP) cerca del sitio Membrillo, y una microcuenca aportante al embalse Poza Honda – Las Flores, cerca de San Sebastián (SS) (ver Figura 3). Se realizó una evaluación de las características físicas de las cuencas seleccionadas para considerar la posible influencia de estas características sobre el comportamiento del flujo.

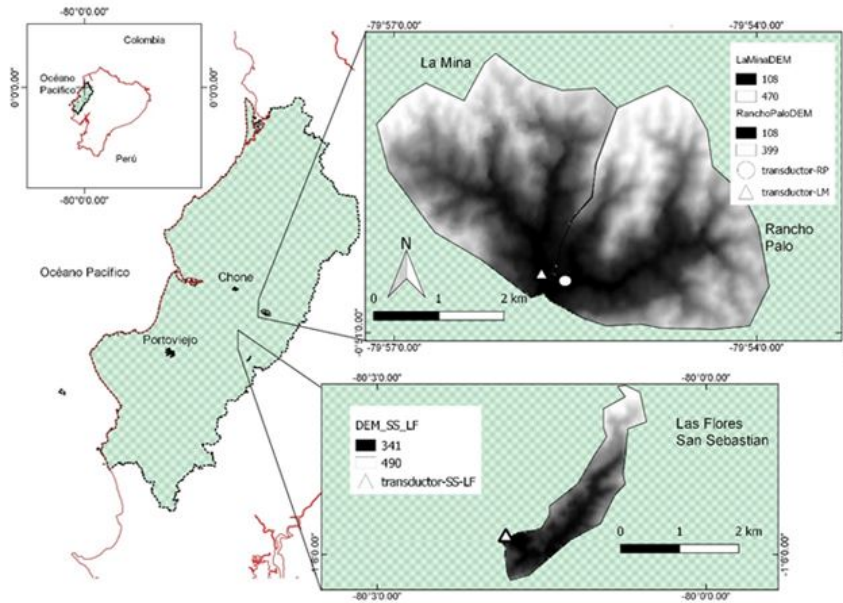


Figura 3 Área de estudio. Microcuencas se presentan con su ubicación en la Provincia de Manabí

Según los mapas generados con datos de MAGAP-MAE (2015) no existen grandes diferencias en el uso de la tierra de las tres microcuencas. En general, son áreas deforestadas con actividades agrícolas y ganaderas. Así presentan un alto porcentaje de cobertura de pastizales (76.3% LM, 69.3% RP, 55% SS) y un bajo porcentaje de cobertura con bosque nativo (12% LM, 18%RP, 4.1% SS) (Donoso y Zambrano, 2018; Molina y Valladares, 2018; Rodríguez y Santos, 2018). El bosque nativo se encuentra entre las categorías *Bosque Siempreverde Piemontano* y *Bosque de Neblina Montano*. En el caso del *Bosque Piemontano* cuenta con especies de alrededor de 30 metros de altura que pueden incluir las familias *Myristicaceae*, *Lauraceae*, *Moraceae* y *Euphorbiaceae*, así como herbáceas de familias *Arecaceae*, *Cyclanthaceae*, *Piperaceae* y helechos (Sierra, 1999). Por otra parte, entre los cultivos se cuenta con cacao y mandarina.

Las principales características de las cuencas estudiadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales características físicas de las microcuencas. Fuente: Molina y Valladares (2018), Donoso y Zambrano (2018); Rodríguez y Santos (2018).

CÓDIGO	ALTITUD	ÁREA	FORMA	PENDIENTE	TIPOS DE SUELO	USO DEL SUELO (%)
UNIDADES	[m]	[km ²]	a	b	c	d
LM	471 - 108	7,75	CO	MP	MH,CH,ML	BN(12,05); PF(5,77); P(76,3); VA(5,89)
RP	399 - 108	7,97	CO	MP	MH,ML	BN(17,98); P(69,25); VA(8,16); ZA(0,43); MF(4,18)
SS	490 - 341	2,40	SO	O	MH;ML	BN(4,95); P(57,17); VA(1,11); MI(29,75);MF(7,02)

Fuente: Elaboración propia

^a SO: Ovalado Estirado ; O: Ovalado; CO: Circular Ovalado

^b P: Plano; O: Ondulado Moderado; PR: Pronunciado; MP: Muy pronunciado

^c MH: Limo de alta plasticidad; CH: Arcilla de alta plasticidad; ML: Limo arenoso

^d BN: Bosque nativo; PL: Plantación forestal; P: Pastizal; VA: Vegetación arbustiva; ZA: Zona antrópica; MF: Misceláneo de frutales; MI: Misceláneo indiferenciado

Se recolectó datos por un periodo promedio de 5 meses, incluyendo dos meses de la temporada lluviosa y tres meses de la temporada seca. Se utilizó un transductor de presión tipo HOB0 U20L Water Level Data Logger a la salida de cada microcuenca. Este dispositivo permitió obtener datos en alta resolución temporal –cada 15 minutos de presión y, por lo consiguiente, calados. Los calados se transformaron luego a caudales utilizando una curva de descarga vs calado, siguiendo las recomendaciones de Lang *et al.* (2010) donde fue posible. Por ejemplo, en el sitio SS, el transductor se ubica justo aguas arriba de una caída natural de agua. Otra recomendación seguida es que, para ríos angostos, en la sección de aforo, una variación de 1cm en el calado no debería representar una variación en el caudal mayor a 5% (Lang *et al.*, 2010). Particular atención se prestó al momento de las mediciones de caudal evitando el flujo no permanente. Esto debido a que, en condiciones de flujo no permanente, un mismo calado puede representar dos caudales diferentes: uno el segmento de aumento del Hidrograma y un caudal en la curva de recesión del Hidrograma (Baldassarre y Montanari, 2009).

La curva de descarga se construyó empleando el método de velocidad por área para las mediciones de caudal, y mediante simulaciones hidrodinámicas en una dimensión (1D). Las velocidades se obtuvieron con un molinete que relaciona el número de revoluciones de la hélice con la rapidez del flujo; mientras que varias secciones transversales del tramo de cada río (cada 20 metros) fueron obtenidas con una estación total tipo SOKKIA SET520k. Se ejecutaron varias simulaciones hidráulicas en 1D con el software HEC-RAS (Brunner, 2016). Según Dose *et al.* (2002) un modelado hidráulico mejora la extrapolación de curvas de descargas ya que toman en cuenta las condiciones aguas abajo de la estación de aforo. Para las simulaciones, números de rugosidad de Manning fueron seleccionados de las tablas de Arcement y Schneider (1989). Las curvas de duración de caudales (FDC, por sus siglas en inglés) fueron elaboradas siguiendo el procedimiento en Oregon State University (2005).

Índices hidrológicos utilizados

Diferentes índices para diferentes propósitos se han presentado en la literatura. Por ejemplo, se ha utilizado coeficientes de variación (QVAR o CV) con fines de estudiar regímenes de flujo en diversas partes del globo. Se ha encontrado en la literatura valores de QVAR entre 0,2 para regiones húmedas y valores mayores a

1 para regiones semi-áridas (Thoms y Sheldon, 2000). Otros índices se basan en la curva de duración de caudales (FDC). La pendiente entre el 33% y el 66% de la curva de duración de caudales (FDC) se ha utilizado anteriormente como un indicador de regulación hidrológica (Olden y Poff, 2003). Una pendiente pronunciada se asocia con una respuesta rápida de la cuenca a la precipitación, mientras que una curva con pendiente suave representa un comportamiento amortiguado y una capacidad de almacenamiento mayor (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2016).

En ocasiones se usan percentiles de flujo en la FDC o múltiplos de algún flujo en particular en la FDC. Archer y Newson (2002) utilizaron el flujo mediano (M) como referencia. En su estudio se midió el número de pulsos y las duraciones totales de estos por sobre varios umbrales. Entre ellos el umbral 5M (5 veces el flujo mediano) y 10M (10 veces el flujo mediano). Para flujos bajos, Sikka *et al.* (2003) utilizó el índice de flujos bajos (LFI) seleccionando el percentil 95% como umbral. Con dicho umbral, se obtiene el flujo que se excede el 95% del tiempo. Por otro lado, en Ochoa-Tocachi *et al.* (2016), la duración promedio de los pulsos bajos se obtuvo a partir de los flujos que se exceden con una probabilidad del 75% (DLQ75), mientras que utilizaron las duraciones promedio de los pulsos altos midiendo los flujos que se exceden con una probabilidad menor al 25% (DHQ25). Huh *et al.* (2005) utilizaron un enfoque similar para su estudio. De hecho, (Richter *et al.*, 1996; Richter *et al.*, 1997 y Gao *et al.*, 2012) indican que índices como el DHQ25 y el DLQ75 están dentro de los Índices de Alteración Hidrológica (IHA) y el Enfoque de Rango de Variabilidad (RVA), lo cual los ubica como los más utilizados para caracterizar variación en el flujo e inferir información sobre el comportamiento de las cuencas.

Basados en la revisión de literatura, tratando de evitar la redundancia en el uso de índices (Olden y Poff, 2003) y brindando preferencia a índices IHA e índices RVA, para el presente estudio nos enfocamos en los siguientes índices: variación diaria del flujo (QVAR), pendiente de la curva de duración de caudales (R2FDC), el Índice de Regulación Hidrológica (IRH), duración promedio de los pulsos bajos (DLQ75) y duración promedio de los pulsos altos (DHQ25). La Tabla 2 muestra la definición de cada índice junto con su respectiva fórmula y unidades:

Tabla 2. Índices hidrológicos utilizados. Adaptado de Ochoa-Tocachi et al. (2016).

Abreviación	Fórmula	Unidades	Definición
QVAR	σ_Q/Q_{prom}	mm mm ⁻¹	Coficiente de variación en los flujos diarios durante el periodo monitoreado. Es igual al valor de la desviación estándar dividido por la media.
R2FDC	$(\log_{10}(Q_{66}) - \log_{10}(Q_{33})) / (0,66 - 0,33)$	(-)	Pendiente en el tercio medio de la curva de duración de caudales en escala logarítmica. Es igual al logaritmo de Q_{66} menos el logaritmo de Q_{33} dividido para 0,66 menos 0,33
IRH	$\Sigma(Q_{Q < Q_{50}}) / \Sigma(Q)$	(-)	Índice de regulación hidrológica. Volumen por debajo del percentil de flujo 50 (Q_{50}) en la curva de duración de caudales dividido para el volumen total.
DLQ75	$\Sigma(D_{Q < Q_{75}}) / N_{Q < Q_{75}}$	Días	Duración promedio de los pulsos bajos –definidos como flujos por debajo del flujo que ocurre el 75% de las veces (Q_{75})– durante el periodo monitoreado.
DHQ25	$\Sigma(D_{Q > Q_{25}}) / N_{Q > Q_{25}}$	Días	Duración promedio de los pulsos altos –definidos como flujos por sobre el flujo que ocurre solo un 25% de las veces (Q_{25})– durante el periodo monitoreado.

fuelle: Elaboración propia. Datos del proyecto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los caudales en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ se muestran a continuación. Q50 de las microcuencas son 0,065 (LM); 0,079 (RP) y 0,340 (SS). El caudal umbral para pulsos bajos Q75 es 0,048 (LM); 0,058 (RP) y 0,250 (SS); mientras que el caudal umbral para flujos altos Q25 es 0,145 (LM); 0,120 (RP) y 0,430 (SS). Según Trancoso *et al.* (2016) una mayor disponibilidad de agua subterránea conduce a un aumento en la contribución del flujo base que estabiliza la respuesta del flujo y aproxima los valores de los flujos altos y bajos hacia el flujo medio, llevando de esa forma el flujo hacia una condición más perenne. Por lo tanto, las aguas subterráneas, mismas que se cree tienen influencia en nuestras cuencas de estudio, serían un mecanismo hidrológico dominante que puede controlar los índices de caudales relacionados a los caudales altos y bajos.

Los caudales se adaptan reconociendo las limitaciones existentes en cuanto a logística y recursos disponibles. Sin embargo, una potencial fuente de errores que aquí se ha evitado es la presencia de mediciones en condiciones de flujo no permanente (FNP) (Chow, 1959) que, de realizarse, podrían producir dos caudales diferentes para un mismo calado (Baldassarre y Montanari, 2009) dependiendo de si se está aforando en el segmento de aumento o en la curva de recesión del hidrograma. Sin embargo, no trabajar con FNP limitó los aforos y se requirió mayor extrapolación en interpolación de la curva de descarga. En cuanto al ajuste de la curva de descarga, para SS la curva es de tipo potencial; sin embargo, para LM y RP la mejor curva de descarga es del tipo polinómica, la cual, según Baldassarre y Montanari (2009) podría proveer un mejor ajuste y una mejor representación que las curvas de tipo potencial.

Los resultados de los índices se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de resultados de índices hidrológicos para cada microcuenca.

CÓDIGO	PERIÓDO MONITOREADO	QVAR	R2FDC	IRH	DLQ75	DHQ25
UNIDADES		[mm mm^{-1}]	[-]	[-]	días	días
LM	07/03/2018-26/07/2018	1,170	-0,690	0,180	0,350	1,170
RP	01/04/2018-26/07/2018	0,804	-0,600	0,263	0,821	1,787
SS	14/03/2018-29/07/2018	0,450	-0,495	0,340	1,070	2,440

fuelle: Elaboración propia. Datos del proyecto.

En cuanto a la variación de caudales, el coeficiente de variación (QVAR) para las tres microcuencas resultó en 1,17 (LM), 0,8 (RP), 0,45 (SS). Según Ochoa-Tocachi *et al.* (2016) valores anuales menores a 1.1 indicarían una baja variabilidad del flujo. Por otra parte, Thoms y Sheldon (2000) nos indican que valores anuales más bajos se han encontrado para regiones húmedas en Europa (0,2), Asia (0,2) y Norteamérica (0,3). Kuenz *et al.* (2017) reportan para Europa valores que están mayormente entre cero y 1,3 con valores superiores a 1,5 en regiones mediterráneas sujetas a mayor estrés hídrico. Por otra parte, valores anuales promedios en regiones áridas o semi-áridas están alrededor del 0,99. En el caso del sur de Australia, con condiciones semi-áridas, se reportan valores de coeficiente de variación particularmente altos de 2,6 y 3,2 para cuencas con áreas de drenaje de 48000 km. y 650000 km., produciendo caudales medios entre 19 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y 124 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente (Thoms y Sheldon, 2000). Las microcuencas aquí estudiadas presentarían valores relativamente altos en comparación con sus contrapartes de otras regiones húmedas pero en un rango aceptable. Esto podría responder a la marcada estacionalidad de la precipitación en Manabí y a cambios en el uso de la tierra.

Analizando la capacidad de regulación hídrica de las cuencas, las tres microcuencas tienen un índice de regulación hidrológica (IHR) menor a 0,5 (0,18 LM, 0,26 RP, 0,34 SS) lo cual indicaría que su capacidad de regulación hidrológica no es alta (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2016). Sin embargo, y en contraste, la pendiente en

el tercio medio de la FDC (ver Figura 2) es baja ($R2FDC > -0,7$) para las tres microcuencas (-0,69 LM, -0,60 RP, -0,495 SS), lo que indicaría una buena capacidad de regulación hidrológica (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2016). Como referencia, valores de R2FDC alrededor de -2 se ha encontrado para ecosistemas de Puna húmeda, mientras que valores R2FDC alrededor de -3 se encontró para Puna Seca. En el este de Australia, en cuencas que van desde climas tropicales hasta climas mediterráneos, se ha encontrado que cuencas más empinadas tienen valores altos de pendiente de la FDC, algunos mayores a 6 y que dichas cuencas están caracterizadas por mayores influencias de la lluvia y el dominio del flujo de retorno en sus hidrogramas; indicando que el agua no permanece almacenada por mucho tiempo (Trancoso *et al.*, 2016). Los resultados de R2FDC entre -0,5 y -0,7 son similares a la de los páramos ecuatorianos y del norte del Perú.

Según Monsalve (1995) los extremos de las FDC pueden brindar cierta información sobre las cuencas (Ver Figura 4). Enfocándonos en la parte inferior derecha de la FDC (parte baja) se observa que las tres microcuencas tienen curvas del tipo 1 y 2, lo cual es un indicador de que i) aguas subterráneas aportan caudales a la cuenca; ii) la permeabilidad es regular o mala; y iii) una capacidad de retención de agua de regular a buena. En cuanto a la parte superior izquierda de la FDC (parte alta), esta se clasifica como Curva tipo 1 para las tres microcuencas, lo que es un indicador de una cuenca pequeña en zona montañosa donde la lluvia tiene lugar en pocos meses del año. Monsalve (1995) indica que cuencas con FDC de curva tipo 1 en su parte alta “podrían tener alta capacidad de drenaje y poca capacidad de retener el agua” p.281.

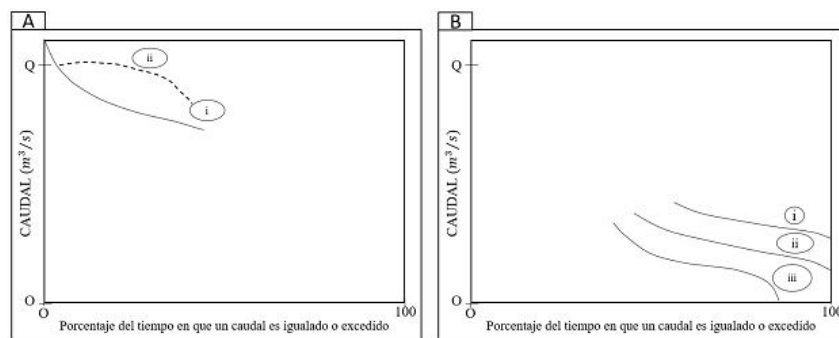


Figura 4. Se presentan los tipos de curva de duración de caudales (FDC) según Monsalve (1995). En A) la parte alta y en B) la parte baja

Las duraciones promedio de pulsos altos y bajos, encontradas en nuestro estudio, están dentro de los rangos reportados en la literatura. Nótese, sin embargo, que estos rangos son amplios. En el estudio de Archer y Newson (2002) para una microcuenca templada (1,5km.), se encuentran duraciones promedio de pulsos que son menores a 35 horas (1,46 días) para flujos 3M (3 veces el valor mediano). Mientras que para flujos 10M, las duraciones promedio no exceden las 12 horas. Huh *et al.* (2005) en Norteamérica, tomando datos de diferentes cuencas, encontraron duraciones promedio entre 3 y 22 días para pulsos altos. Para pulsos bajos, se encontraron duraciones promedio entre 0 y 75 días. De forma similar, Richter *et al.* (1996) presentan duraciones de pulsos entre 3 y 7 días para un río con percentiles de caudal bajo y alto igual a $97 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $258 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente (rango usual de caudales). Finalmente, para un río de 1 millón de km. de área aportante Gao *et al.* (2012) las duraciones van de 20 a 50 días. En nuestras tres cuencas las duraciones de pulsos altos

y bajos están entre 0.35 y 2.44 días, un reflejo de cuencas pequeñas y con cierta similitud a los hallazgos de Archer y Newson (2002).

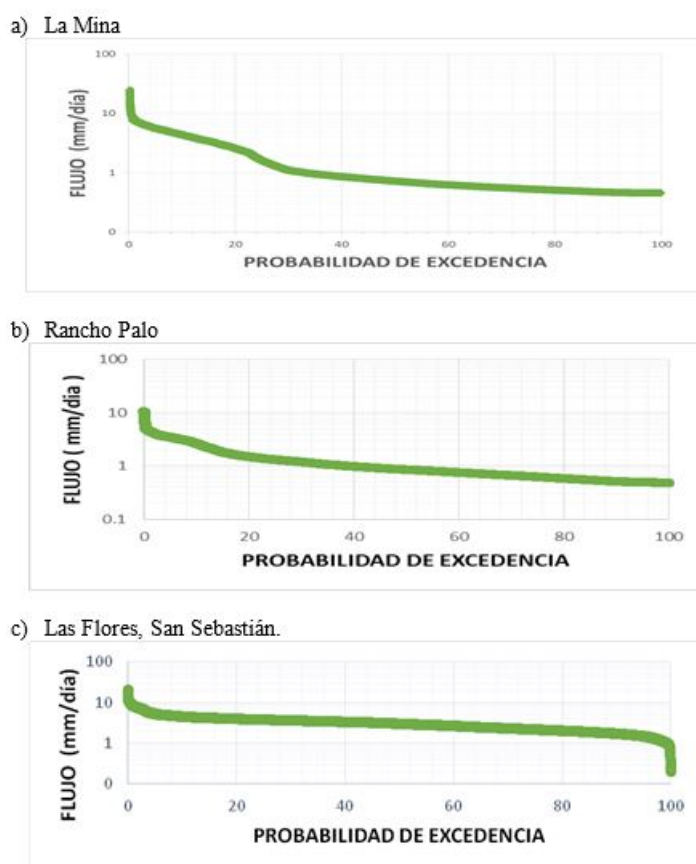


Figura 5 Curvas de duración de caudales (FDC) para las microcuencas estudiadas.

Los valores de los índices son más similares entre LM y RP (aportantes al embalse La Esperanza). SS (aportante a Poza Honda) presenta valores que son un tanto diferentes a LM Y RP. Esta similitud de resultados podría estar relacionada con las características físicas de las microcuencas, en particular, las pendientes y la forma de las cuencas. Las pendientes son más altas en LM y RP; y la morfología se clasifica como CO para las aportantes al embalse La Esperanza y SO para la aportante al embalse Poza Honda. Las FDC son también más similares entre LM y RP.

Se debe considerar que el periodo de tiempo de nuestro análisis es sub-anual; en promedio 5 meses, tomando 2 meses de la temporada lluviosa y 3 meses de la temporada seca. Este periodo es menor al usual (1 año) reportado mayormente en la literatura. Sin embargo, los 5 meses representan las dos únicas temporadas existentes (seca y lluviosa) en la región costera del Ecuador. Por esto creemos que los resultados aquí obtenidos pueden ser útiles como una aproximación a los resultados anuales que, especulamos, no son muy diferentes. No obstante se recomienda que se continúe este análisis para periodos de 12 meses durante varios años. De esa forma se podría tener una mejor idea del comportamiento anual de los caudales del área de estudio.

CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando índices. Para evitar la redundancia en el uso de índices y brindando preferencia a Indicadores de

Alteración Hidrológica (IHA) y al Enfoque de Rango de Variabilidad (RVA), aquí nos hemos enfocado en los índices de variación diaria del flujo (QVAR), pendiente de la curva de duración de caudales (R2FDC), el Índice de Regulación Hidrológica (IRH), duración promedio de los pulsos bajos (DLQ75) y duración promedio de los pulsos altos (DHQ25). Se seleccionaron 3 microcuencas con áreas menores a 9 km. en la costa del Ecuador y se registraron sus caudales en alta resolución temporal, durante un periodo de tiempo que abarcó las temporadas húmeda y seca de un año.

Los resultados de QVAR indicarían una variabilidad del flujo relativamente baja acorde con otras regiones semi-húmedas. Se obtuvo valores de IHR que señalan una capacidad de regulación hidrológica que no es alta; pero en contraste, R2FDC es baja, lo que indica una buena capacidad de regulación hidrológica. Las DLQ75 y DHQ25 indican magnitudes de flujo rápidamente cambiantes (*flashy*) a moderadamente cambiantes. Se recomienda que se continúe este análisis por periodos de varios años. De esa forma se podría tener una mejor idea del comportamiento anual de las cuencas. Mirando más allá, creemos que los resultados aquí obtenidos pueden servir como una línea base para evaluar futuros efectos de los cambios en el uso de la tierra. A conocimiento de los autores, esta es la primera vez que los índices seleccionados se aplican para la región costera del Ecuador.

Contribución de los autores

AGO lideró la escritura y desarrollo del manuscrito, el diseño de investigación y la recolección de datos. XZ, LC, DA, JPG contribuyeron con la recolección de datos. Todos los autores contribuyeron con el procesamiento de datos. AGO, JRA, JF y MC lideraron la depuración de datos. Todos los autores han contribuido al desarrollo de ideas y al proceso de reflexión y análisis.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer a las personas que colaboraron con datos y trabajo de campo; en particular a Luis Zambrano, Miguel Molina, Jordano Valladares, Verny Santos, Miller Rodríguez y Sergio Donoso.

REFERENCIAS

- Arcement, G., y V. Schneider. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficient for natural channels and flood plains*. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf>
- Archer, D., y M. Newson. (2002). The use of indices of flow variability in assessing the hydrological and instream habitat impacts of upland afforestation and drainage. *Journal of Hydrology*, 268(1–4), 244–258. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00171-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00171-3)
- Baldassarre, G. Di, y A. Montanari. (2009). Uncertainty in river discharge observations#: a quantitative analysis, 913–921.
- Bruijnzeel, L. (1990). *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state of knowledge review*. Unesco (Vol. 129). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90061-L](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90061-L)
- Brunner, G. (2016). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual.pdf*. Hydrologic Engineering Center. U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%20Reference%20Manual.pdf>.
- Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York : McGraw-Hill Higher Education, 680 p.
- Dartmouth College (s.f.) Research Guides: Defining hydrology and hydrography. https://researchguides.dartmouth.edu/physical_geography/hydrology#:~:text=Hydrology%20%2D%20the%20study%20of%20the,generation%20of%20hydroelectric%20power.
- Elsenbeer, H., y R. A. Vertessy. (2000). Stormflow generation and flowpath characteristics in an Amazonian rainforest catchment. *Hydrological Processes*, 14(14), 2367–2381. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2367::AID-HYP107>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2367::AID-HYP107>3.0.CO;2-H)

- Gao, B., Yang, D., Zhao, T., y H. Yang. (2012). Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology*, 448.449, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.045>
- Giler-Ormaza, A. (2018). A province with several climates: What knowledge of hydrology can be useful? A literature review. *Maskana*, 9(2), 41–51. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.06>
- Gleick, P. H. (1998). Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 8(3), 571–579. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0571:WICPTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0571:WICPTS]2.0.CO;2)
- Guzha, A. C., Nobrega, R. L. B., Kovacs, K., Rebola - Lichtenberg, J., Amorim, R. S. S. y G. Gerold. (2015), Characterizing rainfall - runoff signatures from micro - catchments with contrasting land cover characteristics in southern Amazonia, *Hydrol. Process*, 29, pages 508– 521, doi: 10.1002/hyp.10161
- Huh, S., Dickey, D. A., Meador, M. R., y K. E. Ruhl. (2005). Temporal analysis of the frequency and duration of low and high streamflow#: years of record needed to characterize streamflow variability, 310, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.008>
- INAMHI. (n.d.). Anuarios Hidrológicos. Retrieved from <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/?C=N;O=D>
- Kuentz, A., Arheimer, B., Hundecha, Y., y T. Wagener. (2017). Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 2863–2879, <https://doi.org/10.5194/hess-21-2863-2017>.
- Lang, M., Pobanz, K., Renard, B., Renouf, E., y E. Sauquet. (2010). Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling , with application to flood frequency analysis, 6667. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.504186>
- MAGAP-MAE. (2015). Mapa de Cobertura y uso de la Tierra de Ecuador Continental 2013 -2014. Retrieved from <http://sni.gob.ec/mapa-cobertura-uso>.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Primera Edición. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 356 p.
- Muñoz-Villers, L. E., y J. J. McDonnell. (2013). Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(9), 3543–3560. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3543-2013>
- OAS, República del Ecuador, CRM, INERHI, y CONADE. (1991). Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Manabi. Retrieved from <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea40s/begin.htm#Contents>
- O'Callaghan, J.F. y Mark, D.M. (1984): 'The extraction of drainage networks from digital elevation data', *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28:323-344 http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.3.0/ta_hydrology_4.html
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Céleri, R., Crespo, P., Villacís, M., y S. Arias. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Olden, J. D., y N. L. Poff. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2), 101–121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
- Oregon State University. (2005). *Analysis Techniques: Flow Duration Analysis*. Retrieved from <http://streamflow.eng.oregonstate.edu/analysis/flow/index.htm>
- Pourrut, P. (1994). *L'eau en Equateur: principaux acquis en hydroclimatologie*. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_2/etudes_theses/40584.pdf
- QGIS.org (2020). QGIS Sistema de Información Geográfica. Proyecto de Fundación Geoespacial de Código Abierto. [Http://qgis.org](http://qgis.org)
- Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., y D. Braun. (1997). How much water does a river need#? *Freshwater Biology*, 37, 231–249.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., y D. P. Braun. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.2307/2387152>

- Richter, B., Mathews, R., Harrison, D., y R. Wigington. (2003). Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity. *Ecological Applications*, 13(1), 206–224. <https://doi.org/10.3145/epi.2008.mar.18>
- SAGA-GIS(s.f.) Tool Strahler Order. http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/4.1.0/ta_channels_6.html. Accedido el 12 de Julio 2020.
- Sierra, R. (1999). *Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4520.9287>
- Sikka, A. K., Samra, J. S., Sharda, V. N., Samraj, P., y V. Lakshmanan. (2003). Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. *Journal of Hydrology*, 270(1–2), 12–26. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00172-5)
- Thoms, M. C., y F. Sheldon. (2000). Water resource development and hydrological change in a large dryland river: The Barwon-Darling River, Australia. *Journal of Hydrology*, 228(1–2), 10–21. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00191-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00191-2)
- Trancoso, Larsen, McAlpine, McVicar, Phinn (2016) Linking the Budyko framework and the Dunne diagram. *Journal of Hydrology*. Volume 535. ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.017>.
- USGS y SRTM. (n.d.). Earthexplorer. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wang, L. y H. Liu (2006): An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 20, No. 2: 193-213. http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.1.3/ta_preprocessor_4.html
- Wohl, E., Barros, A., Brunzell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., y F. Ogden. (2012). The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 2(9), 655–662. <https://doi.org/10.1038/nclimate1556>

ANEXO

Simbología utilizada en el presente manuscrito.

<i>CÓDIGO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
<i>CV</i>	Coeficiente de variación
<i>DHQ25</i>	Duración promedio de los pulsos altos - definidos como flujos por sobre el flujo que ocurre solo un 25% de las veces Q_{25} .
<i>DLQ75</i>	Duración promedio de los pulsos bajos - definidos como flujos por debajo del flujo que ocurre el 75% de las veces (Q_{75}).
<i>FDC</i>	Curva de duración de caudales.
<i>FNP</i>	Flujo No Permanente.
<i>IHA</i>	Indicadores de Alteración Hidrológica.
<i>IRH</i>	Índice de regulación hidrológica.
<i>LFI</i>	Índice de flujos altos.
<i>LM</i>	La Mina
<i>Q25</i>	Caudal umbral para flujos altos.
<i>Q50</i>	Caudal Medio.
<i>Q75</i>	Caudal umbral para pulsos bajos.
<i>QDprom</i>	Caudal medio diario
<i>Qmáx.</i>	Caudal máximo
<i>Qmes</i>	Promedio mensual.
<i>Qmin</i>	Caudal mínimo
<i>QVAR</i>	Coeficiente de variación en los flujos diarios.
<i>R2FDC</i>	Pendiente en el tercio medio de la curva de duración de caudales en escala logarítmica.
<i>RP</i>	Rancho Palo.
<i>RVA</i>	Rango de variabilidad.
<i>SS</i>	San Sebastián.

CC BY-NC-ND