



2º Congreso
Latinoamericano
de Ingeniería

2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



PREDICCIÓN HIDROLÓGICA EN CUENCAS NO INSTRUMENTADAS – REVISIÓN

Guillermo Hernández Torres, Germán Ricardo Santos Granados

**Escuela Colombiana de Ingeniería
Bogotá, Colombia**

Resumen

El trabajo presenta un estado del arte acerca de modelos de predicción hidrológica utilizados en cuencas no instrumentadas. Tradicionalmente, el análisis hidrológico se ha fundamentado en la disponibilidad de información climatológica e hidrológica en una cuenca hidrográfica que permite, junto con el análisis de las condiciones geográficas, geológicas y ambientales, la simulación de fenómenos naturales diversos como la sequía, inundaciones, crecientes súbitas, disponibilidad de oferta hídrica entre otros que resultan ser insumos esenciales para la gestión integral del agua.

Sin embargo, cuando se carece de instrumentación en una cuenca, no es posible aplicar los protocolos clásicos de modelación y los hidrólogos se enfrentan al problema de cuantificar el recurso hídrico de formas indirectas y a veces con poco sustento científico. Es así, como surgen las metodologías de regionalización basadas en análisis de registros de caudal disponibles en cuencas instrumentadas y en la calibración de modelos hidrológicos regionales a distintas resoluciones temporales. Estos modelos son calibrados y validados de tal forma que permiten estimar de manera incierta la oferta hídrica en zonas donde no existe información, asumiendo como primicia comportamientos de similitud y vecindad.

Con el avance y uso de tecnologías de medición remota, acompañadas de un estudio exhaustivo sobre la incertidumbre de las predicciones que generan, representan metodologías que merecen ser evaluadas en el campo de la hidrología teórica y aplicada, así como su uso en la estimación de caudales en cuencas con poca o nula instrumentación. En el trabajo se presentan casos de estudio en cuencas colombianas, y una síntesis conceptual de metodologías y resultados publicados en revistas de alto impacto científico. Al final, teniendo en cuenta las condiciones de instrumentación en nuestro país, se argumenta la importancia y relevancia del estudio y su impacto a nivel local.

El artículo muestra un avance en el estado del arte de la predicción en cuencas no instrumentadas. Se analizan un marco conceptual general y las diversas metodologías para la estimación de variables hidrológicas en sitios con escasa o nula información.

Palabras clave: cuencas no instrumentadas; modelación hidrológica; retos en hidrología

Abstract

The work presents a state of the art about hydrological prediction models used in non-instrumented basins. Traditionally, the hydrological analysis has been based on the availability of climatological and hydrological information in a watershed that allows, together with the analysis of the geographical, geological and environmental conditions, the simulation of diverse natural phenomena such as drought, floods, sudden floods, availability of water supply among others that turn out to be essential inputs for the integral management of water.

However, when instrumentation is lacking in a basin, it is not possible to apply the classic modeling protocols and hydrologists face the problem of quantifying water resources in indirect ways and sometimes with little scientific support. This is how regionalization methodologies based on analysis of flow records available in instrumented basins and in the calibration of regional hydrological models at different temporal resolutions emerge. These models are calibrated and validated in such a way that they allow to estimate in an uncertain way the water supply in areas where there is no information, assuming as a scoop behavior of similarity and neighborhood.

With the advance and use of remote measurement technologies, accompanied by an exhaustive study on the uncertainty of the predictions they generate, they represent methodologies that deserve to be evaluated in the field of theoretical and applied hydrology, as well as their use in the estimation of flows in basins with little or no instrumentation. The work presents case studies in Colombian watersheds, and a conceptual synthesis of methodologies and results published in journals of high scientific impact. In the end, taking into account the conditions of instrumentation in our country, the importance and relevance of the study and its impact at the local level are argued.

The article shows an advance in the state of the art of prediction in non-instrumented basins. A general conceptual framework and the different methodologies for the estimation of hydrological variables in sites with little or no information are analyzed.

Keywords: ungauged basins; hydrological modeling; challenges in hydrology

1. INTRODUCCIÓN

El artículo presenta un estado del arte acerca de los modelos de predicción hidrológica utilizados en cuencas no instrumentadas. Tradicionalmente, el análisis y pronóstico hidrológico se fundamentan en la disponibilidad y procesamiento de información climatológica e hidrológica medida sobre la superficie terrestre. El uso de esta información permite, junto con el análisis de

condiciones geográficas, geológicas y ambientales, la simulación de fenómenos naturales asociados al ciclo del agua como son las sequías, inundaciones, análisis de crecientes, estimación de oferta hídrica, balances hídricos entre otros, que sirven de sustento e insumo técnico para la gestión integral del agua en el territorio.

Sin embargo, cuando se carece de instrumentación en una cuenca, no es posible tener información medida que permita aplicar los protocolos clásicos de modelación, y es así como los hidrólogos se enfrentan al problema de cuantificar el recurso hídrico de formas indirectas y a veces con poco sustento científico. Es así, como surgen metodologías de análisis para cuencas no instrumentadas, casi todas fundamentadas en el desarrollo de métodos de regionalización los que en la mayoría de los casos se basan en el análisis de registros de caudal disponibles y en la calibración de modelos hidrológicos regionales a distintas resoluciones temporales (horaria, diaria, mensual, anual, decadal).

Estos modelos son calibrados y validados de tal forma que permiten estimar de manera incierta la oferta hídrica en zonas donde no existe información, asumiendo como primicia comportamientos de similitud y vecindad. Con el avance y uso de tecnologías de medición remota, se ha evidenciado la necesidad de investigar en nuevas metodologías de estimación hidrológica en cuencas no instrumentadas que usen este tipo de información acompañada de un estudio exhaustivo sobre la incertidumbre de las predicciones y la confiabilidad de estas. Estas metodologías presentan un avance significativo que merece la atención científica en el campo de la hidrología teórica y aplicada.

2. MARCO TEÓRICO

El comportamiento del caudal en una cuenca hidrográfica es no estacionario, modificado directa o indirectamente por las actividades antrópicas y el desarrollo de proyectos de aprovechamiento del recurso hídrico. Bajo tales condiciones, la estimación de variables hidrológicas es difícil y altamente incierto. En la mayoría de los casos, los hidrólogos no tienen los datos necesarios para el análisis hidrológico y/o modelación y la variable debe ser estimada sobre la base de toda la información disponible en la región. Este método de estimación se conoce como regionalización.

2.1 Principios básicos de regionalización

Los métodos de regionalización se utilizan para extender información disponible en un número limitado de puntos a un área completa. En hidrología tales métodos se usan para estimar una variable hidrológica en un sitio dado (sitio objetivo) mediante la combinación de información regional procedente de sitios instrumentados similares al sitio objetivo.

La regionalización por consiguiente requiere el desarrollo de un método capaz de explicar la variable de interés. Este método se aplica entonces al sitio no instrumentado por considerar.

2.2 Desarrollo de un modelo regional

Un modelo regional puede desarrollarse en dos fases principales:

Determinación de regiones homogéneas con respecto a la variable hidrológica de interés.
Desarrollo de un método para estimar la variable hidrológica de interés dentro de cada región homogénea.

Con base en un número de cuencas hidrográficas instrumentadas se identifica la relación estadística entre la variable hidrológica y las características que explican los valores observados o estimados en cualquier parte de la cuenca (ej. fisiográficos y/o climáticos). El desarrollo de un modelo regional requiere datos suficientes de un número suficiente de sitios instrumentados en la región. La variable por regionalizar debe por consiguiente primero estimarse para cada uno de los sitios instrumentados de la región.

2.3 Modelo regional lluvia–escorrentía

La regionalización de parámetros de un modelo de simulación lluvia–escorrentía requiere un procedimiento que permita calibrar/validar los parámetros del modelo hidrológico para cada sitio instrumentado. La elaboración del modelo requiere los siguientes pasos:

Calibración del modelo regional: requiere la selección de regiones homogéneas, escogencia de la estructura del modelo y estimación de los parámetros del modelo usado para estimar la variable de interés.

Validación del modelo regional.

Cada uno de estos dos pasos hace uso de los datos disponibles en los sitios instrumentados. Una submuestra de la muestra completa de los sitios instrumentados se utiliza para calibrar el modelo regional y los otros sitios instrumentados se utilizan para validar el modelo.

2.4 Aplicación de modelos regionales lluvia–escorrentía

Una vez que se ha desarrollado el modelo regional y se ha calibrado y validado, se puede estimar la variable hidrológica de interés para el sitio objetivo con base en pocas mediciones y aun sin ellas. Esto puede llevarse a efecto en dos pasos:

Identificación de la región homogénea a la que el sitio pertenece.

Aplicación para el sitio del método de estimación regional desarrollado para esta región.

Por ejemplo, si se ha identificado una relación entre las características fisiográficas y climáticas de las cuencas instrumentadas y la variable hidrológica de interés, esta relación se usa para deducir la variable requerida a partir de las características fisiográficas/climáticas de la cuenca no instrumentada.

Determinación de regiones homogéneas

Criterios de homogeneidad: Una región se considera homogénea desde el punto de vista hidrológico, si incluye zonas con características fisiográficas y climáticas que producen un comportamiento hidrológico similar.

Los métodos principales, usados en hidrología, para definir regiones homogéneas incluyen los basados en criterios geográficos, fisiográficos y/o climáticos o hidrológicos, así como los métodos basados en la noción de “vecindades”.

Determinación basada en criterios geográficos: Es la aproximación más simple y más ampliamente usada para determinar regiones homogéneas. Las regiones obtenidas por delineación geográfica son necesariamente continuas respecto al espacio.

La determinación geográfica, con frecuencia usada por conveniencia, es adecuada si los factores que determinan la respuesta hidrológica de las cuencas de drenaje (geología, relieve, precipitación promedio anual, tipo de suelo) son especialmente consistentes.

Determinación basada en criterios fisiográficos y/o climáticos: Las regiones definidas por este método en principio no son espacialmente continuas. Las características fisiográficas y climáticas más ampliamente usadas son: el área de la cuenca, la precipitación anual, el uso de la tierra y la elevación.

Una vez que los criterios fisiográficos y/o climáticos han sido definidos, pueden usarse varios algoritmos para delinear las regiones. La mayoría son técnicas de análisis multivariado, tales como análisis factorial, análisis de componentes principales, análisis de correspondencia, análisis de clúster o análisis de discriminante.

Determinación basada en criterios hidrológicos: El uso de estos criterios no es altamente recomendado con excepción de lo relacionado con las características de estacionalidad porque en principio son menos sensibles a los problemas de muestreo. Otro problema encontrado cuando se hace delineación de regiones homogéneas con base en criterios hidrológicos es el hecho de que las características hidrológicas de las cuencas sin datos generalmente no se conocen. Es por consiguiente difícil de asignar una cuenca no medida a un grupo específico y se requiere un método de estimación adicional antes de que esto pueda hacerse. Por ejemplo, un análisis discriminante basado en criterios fisiográficos y climáticos puede aplicarse para que sea posible asignar cuencas no instrumentadas a grupos identificados.

El principio de análisis discriminante consiste en encontrar una combinación (generalmente lineal) de características fisiográficas y climáticas que minimiza la relación de la varianza promedio de las medias de las características hidrológicas del intergrupo y los valores del intragrupo.

Métodos basados en la vecindad: Para evitar la noción de límites fijos entre regiones supuestamente homogéneas, ciertos autores proponen métodos basados en la vecindad. Con tal método, cada sitio posee su propia región homogénea integrada por cuencas hidrográficas que son las más cercanas en términos de ciertos criterios geográficos, fisiográficos, climáticos y/o hidrológicos. Desde este punto de vista, las aproximaciones más ampliamente usadas son el análisis de correlación canónico y el método de la región de influencia. El análisis canónico es una técnica de análisis multivariado que puede usarse para describir la dependencia entre dos conjuntos de variables aleatorias $x = [x_1 x_2 \dots x_p]$ y $y = [y_1 y_2 \dots y_q]$ con $p \geq q$. Con base en variables

canónicas asociadas con las variables X e Y , el análisis canónico determina vecindades hidrológicas entre diferentes sitios considerados en la región.

La ventaja de usar solamente dos variables hidrológicas es que conduce a solamente dos pares de variables canónicas, lo que hace más fácil interpretar los resultados. El método puede usarse para cuencas instrumentadas y no instrumentadas. En el método de la región de influencia, cada sitio se considera el centro de cada región integrada por sitios similares. Para sitios no instrumentados solamente deben considerarse características fisiográficas y climáticas.

Escogencia de un método de determinación

Las regiones homogéneas obtenidas por la aplicación de cualquiera de los métodos presentados dependen del método usado y para un método dado, de los criterios de similitud seleccionados. Además, el buen funcionamiento del método de estimación regional aumenta el grado de homogeneidad real de las regiones. Dependiendo del método escogido la homogeneidad real de las regiones a las que se hace referencia como homogéneas para las necesidades de regionalización puede, de hecho, ser relativamente reducida.

La escogencia de un método de determinación y la escogencia de las variables por considerar para la determinación deben estar siempre basados sobre datos disponibles, la experiencia del hidrólogo y un adecuado conocimiento técnico de los procesos dominantes relacionados con la variable hidrológica estudiada. Un análisis preliminar de sitios instrumentados es por consiguiente siempre necesario. La determinación no debe en general nunca basarse solo en criterios geográficos, climáticos y/o fisiográficos. Para cuencas no instrumentadas, no se recomienda determinar regiones homogéneas sobre criterios hidrológicos únicamente.

La escogencia de un método para la determinación de regiones homogéneas está en principio basada en valores cuantitativos que pueden usarse para evaluar su funcionamiento, tales como estadísticos que miden el grado de homogeneidad de regiones con respecto a la variable hidrológica de interés. Para optimizar el funcionamiento del método regional, la puesta en marcha de un método para determinar regiones homogéneas es con frecuencia un proceso iterativo.

Pruebas de homogeneidad

Las regiones homogéneas obtenidas por la aplicación de cualquiera de los métodos presentados están sujetas a un número relativamente importante de suposiciones. En ciertos casos, la validez de estas suposiciones puede verificarse por pruebas estadísticas.

Desde el punto de vista estadístico, una región se declara homogénea cuando las observaciones en los sitios que integran la región se extraen de la misma población de origen.

Métodos de estimación de variables hidrológicas

Varios métodos pueden usarse para estimar una variable hidrológica. En este aparte se presentan métodos empíricos, análogos, geoestadísticos y de regresión, así como métodos que hacen uso de un modelo de frecuencia regional.

Métodos Empíricos

Por oposición a los métodos estadísticos, los métodos empíricos generalmente tienen una estructura impuesta resultante de la experiencia adquirida y de una cierta conceptualización del comportamiento hidrológico de la cuenca de drenaje.

Si el grado de conceptualización es elevado, el modelo es referenciado como pseudo-empírico. Este es el caso del método racional, el modelo empírico más ampliamente usado para la estimación de caudales de creciente y para muchas aproximaciones derivadas de este método.

La ventaja de los métodos empíricos consiste en las pocas observaciones requeridas para su parametrización, comparados con los métodos estadísticos. Además, generalmente toman mejor en cuenta las particularidades locales del comportamiento hidrológico considerado. Por otra parte, los métodos empíricos se basan en suposiciones simplificadas que son con frecuencia no válidas o válidas solamente para algunas cuencas hidrográficas. Por ejemplo, las suposiciones que sustentan el método racional (coeficiente de escorrentía constante en el tiempo y el espacio, así como también precipitación uniforme y constante sobre la totalidad de la cuenca de drenaje) restringen su uso a cuencas de drenaje de superficie reducida.

Métodos Analógicos

Consisten en transponer información obtenida de una o más cuencas análogas instrumentadas, a la cuenca de drenaje objetivo. La cuenca análoga usada es a veces una cuenca instrumentada situada aguas arriba o aguas abajo de la cuenca objetivo.

La información transpuesta a la cuenca objetivo puede también ser la relación identificada entre la variable por estimar y las variables exploratorias conocidas o el conjunto de parámetros de un modelo (ej. un modelo lluvia-escorrentía). En este caso, el conjunto completo de parámetros estimado para una cuenca análoga se asigna a la cuenca objetivo.

Esta aproximación presenta la ventaja de transponer un conjunto de parámetros plausible y tomar en cuenta interdependencias posibles entre parámetros del modelo. Algunos autores seleccionaron la cuenca análoga como la cuenca con el mínimo índice de similaridad \emptyset , definido como:

$$\emptyset = \sum_{i=1}^k \frac{x_{G,i} - x_{U,i}}{\Delta x_i}$$

Donde $x_{G,i}$ y $x_{U,i}$ son respectivamente la i -ésima característica fisiográfica de la cuenca análoga (instrumentada) y la cuenca objetivo (no instrumentada) y donde Δx_i es un factor de normalización. Este factor es aquí el rango de la característica i .

3.3 Métodos geoestadísticos

Estos métodos, como el Kriging, se usan espacialmente para la interpolación de ciertas variables climáticas como la precipitación media anual estacional y precipitación máxima promedio.

Estos métodos se usan solamente para la regionalización de variables hidrológicas excepto algunas veces para los parámetros de ciertos modelos. Se han utilizado el coeficiente de escorrentía del método racional para los parámetros de un modelo lluvia–escorrentía y para los parámetros del modelo IDF de Montana (intensidad, duración, frecuencia).

Modelos de regresión

Los métodos de regresión consisten en construir una relación lineal entre la variable por explicar y las diferentes variables capaces de explicar una máxima cantidad de la varianza.

Por ejemplo, para una región hidrológica homogénea, la variable y_i por explicar para la cuenca i se obtiene sobre la base de una regresión múltiple del siguiente tipo:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1i} + \dots + \alpha_p x_{pi} + \varepsilon_i$$

Donde $x_{1i} \dots x_{pi}$ son características fisiográficas y/o climáticas que explican la variación de y_i . $\alpha_0, \alpha_1 \dots \alpha_p$ son parámetros de regresión que deben estimarse y ε_i es el error del modelo de regresión. Los parámetros se estiman con frecuencia usando el método de mínimos cuadrados. Este método analítico se basa en la suposición de que la varianza del modelo de errores ε_i , no depende de i (condición de homoscedasticidad).

El método de regresión puede usarse para estimar cualquier variable hidrológica. Puede también usarse para estimar alguno o todos los parámetros de un modelo hidrológico.

Modelos de frecuencia regional

Con frecuencia es necesario estimar para la variable hidrológica considerada, el cuartil correspondiente a una frecuencia dada de excedencia o de no excedencia (periodo de retorno para caudales máximos de creciente, caudales mínimos o precipitaciones máximas promedio y número de días excedidos por año para curvas de duración de caudales).

Cuando el sitio de interés está instrumentado y el número de observaciones es suficiente, este cuartil puede obtenerse por un análisis de frecuencia apropiado.

Cuando el sitio no está instrumentado, el cuartil requerido puede estimarse sobre la base de un modelo de frecuencia regional previamente determinado a partir de datos disponibles en sitios instrumentados y un factor de escala. El cuartil por determinar tiene entonces la siguiente expresión:

$$y_{iT} = \mu_i \cdot y_{RT}$$

Donde, y_{RT} es el valor del modelo de frecuencia regional para la frecuencia requerida de excedencia o no excedencia (i.e, para el periodo de retorno T o el número de días por año N para el que el valor es excedido). y_{iT} se denomina el factor de crecimiento que corresponde a la frecuencia seleccionada y es generalmente independiente del sitio. El factor de escala μ_i para el sitio considerado es independiente de la frecuencia. Otra expresión frecuente para un modelo regional de frecuencia es:

$$y_{iT} = \mu_i + \sigma_y K_T$$

Donde, μ_i es el factor de escala y σ_y y K_T son respectivamente la desviación estándar y el factor de crecimiento de la distribución estandarizada para la distribución GEV (Distribución de valor extremo general); por ejemplo, K_T se expresa como:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.577 + \ln \left[\ln \frac{T}{1-T} \right] \right\}$$

Esta aproximación se basa en la suposición que, dentro de una región homogénea, la variable hidrológica tiene la misma distribución estadística estandarizada para todos los sitios de la región. Estandarización se refiere a la división por un factor de escala que representa la variación inter-sitio de la distribución real de la variable. La distribución estandarizada se llama la curva de crecimiento regional. La distribución estadística de diferentes sitios siempre muestra ciertas diferencias con respecto a la distribución regional. Un modelo de error es por consiguiente necesario para representar las incertidumbres asociadas.

Todas las distribuciones comúnmente usadas para análisis de frecuencia pueden usarse para modelar la curva regional de crecimiento (GEV, Log-normal, Log-Pearson tipo III). Un único valor regional es generalmente usado para los parámetros de forma del modelo de frecuencia estandarizado (dispersión, asimetría, curtosis). Si la variabilidad inter-sitio del parámetro de dispersión es elevada entonces puede estimarse usando un modelo regional. Si está disponible un número suficiente de observaciones para la cuenca objetivo este parámetro también se estima sobre la base de las observaciones.

Escogencia de un método de estimación

Los métodos disponibles para estimar la variable de interés son altamente variados. Además, a veces se combinan varios métodos para la estimación. Se puede establecer por ejemplo un modelo lineal de regresión con base en las observaciones de N sitios que son análogos al sitio objetivo considerado.

Ningún método puede considerarse como consistentemente mejor que los otros. La escogencia del mejor método para un caso dado depende principalmente de la variable hidrológica de interés y de los datos disponibles en el sitio y en la región.

Consistencia de la estimación

La regresión directa, es el método usado más ampliamente, especialmente debido a la fácil puesta en marcha, en este caso es relativamente inapropiado. La razón principal es que los modelos de regresión requeridos para la estimación de las diferentes variables se desarrollan generalmente de forma separada para cada una de las variables considerando que son independientes. En consecuencia, son posibles ciertas inconsistencias, por ejemplo, la no-monotonía de la relación entre los caudales calculados por regresión y las correspondientes frecuencias de no-excedencia para una cuenca dada.

El caudal estimado de 10 años puede algunas veces ser mayor que el caudal estimado de 100 años. El mismo problema puede encontrarse cuando se estiman diferentes caudales característicos de una curva de caudal-duración. Los métodos regionales que deben preferirse en este contexto son los basados en un modelo de frecuencia regional (ej. método del índice de creciente, curvas regionales de caudal-duración), con esto asegurando consistencia hidrológica entre las diferentes posibles variables estimadas.

De manera semejante, los parámetros de un modelo hidrológico donde están con frecuencia altamente intercorrelacionados, conduce a la posibilidad de que varios conjuntos de parámetros proporcionan un funcionamiento idéntico de modelo. Si el método usado para calibrar los parámetros del modelo hidrológico no se adopta de manera argumentada para reducir tales problemas de equifinalidad, al aplicar el método de regresión directa para los parámetros calibrados puede conducir a un modelo hidrológico regionalizado con funcionamiento mediocre. Una estimación global de los parámetros de regresión con base en un criterio de funcionamiento hidrológico puede resolver parcialmente este problema.

El método análogo es en efecto una mejor alternativa dado que el conjunto de parámetros óptimo para la cuenca o cuencas análogas consideradas toma en cuenta correlaciones entre parámetros. Este método sin embargo únicamente funciona si es posible identificar verdaderas cuencas análogas instrumentadas, lo que no siempre es el caso. El potencial para el éxito del método análogo se incrementa con el número de cuencas instrumentadas y su diversidad.

Robustez de estimaciones

El desarrollo de un modelo regional toma en cuenta principalmente todas las observaciones disponibles en la región considerada, incluyendo aquellos sitios con solamente períodos cortos de mediciones. El método de estimación que debe preferirse en este caso debe poder dar más peso a las estimaciones de sitios con muchas medidas y que sean relativamente insensibles a los problemas de muestreo. Los métodos basados en un modelo de frecuencia regional son una vez más de nuevo preferidos al método de regresión directa porque son menos tales problemas cuando están asociados con un método robusto para determinar las curvas de crecimiento regionales.

3. METODOLOGÍA

3.1 Aspectos generales de la zona de estudio

El primer paso en la caracterización de un estudio hidrológico consiste en delimitar las áreas hidrográficas de interés. Los avances en computación y el desarrollo de sistemas de información geográfica (SIG) facilitan esta labor a través del uso de los más desarrollados modelos de elevación digital (DEM)

Estas herramientas permiten el trazado de cuencas, así como determinar sus condiciones fisiográficas de mayor interés como son el área, perímetro, relaciones de forma y tamaño, pendientes y condiciones morfológicas relevantes para los estudios.

Uso y cobertura del suelo

Para caracterizar las coberturas y uso del suelo en la zona de estudio se deben utilizar los mapas de cobertura de tierra elaborados por las entidades de gobierno junto con metodologías mundialmente aceptadas como Corine Land Cover. En Colombia, esta metodología ha sido adaptada y generada a partir de imágenes Landsat del periodo 2005-2009, con el fin de identificar el uso de los suelos al interior de las cuencas hidrográficas para así definir el potencial de escorrentía de estos.

Descripción agrológica de suelos

Para la descripción de los tipos de suelos presentes en el interior de las cuencas se utilizan los estudios generales de suelos y zonificación de tierras a escala 1:100000.

Registros hidroclimatológicos

Para los estudios hidrológicos, la información más relevante considera la precipitación, el caudal y las variables meteorológicas involucradas en el cálculo de la pérdida por evapotranspiración, así como las condiciones del suelo que permiten inferir el comportamiento del proceso de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. Sin importar la información, se puede aplicar una metodología general de análisis como la propuesta por Castro y Carvajal (2010).

Análisis exploratorio gráfico

El análisis exploratorio gráfico se realiza con el fin de comprobar tendencias y cambios en las series de tiempo por medio visual. Se considera el primer análisis por realizar antes de cualquier análisis confirmatorio (cuantitativo) y, más aun, antes de utilizar la información hidroclimatológica para modelos y simulaciones. Este análisis comprende los gráficos de series de tiempo y el análisis box-plot (diagrama de cajas) junto con los histogramas.

Gráficas de series de tiempo

Representan los datos ordenados cronológicamente en las ordenadas y el tiempo en las abscisas. Son gráficos en los que se pueden observar las tendencias, los cambios en el valor medio, la irreversibilidad y la intermitencia entre otros.

Diagrama de cajas e histograma.

El diagrama de cajas se considera un resumen de la información ya que brinda una idea de la tendencia central, la variabilidad, la simetría y la frecuencia de puntos atípicos. En el diagrama de cajas se muestran los percentiles 50 (la mediana), 25 y 75 (límite inferior y superior de la caja respectivamente), el menor y el mayor valor observados sin ser considerados atípicos, además de puntos atípicos.

Para determinar si existe un cambio en la medida de la tendencia central en la serie hidroclimática, se divide la misma en dos o más partes, de tal forma que se pueda observar a partir del diagrama de cajas de cada una de ellas si existen diferencias entre las características estadísticas de cada una de las partes de la serie.

Análisis estadístico básico: se elabora un análisis de cada una de las series de tiempo usadas teniendo en cuenta el número de datos procesados (casos), la cantidad de registros disponibles y faltantes, así como los estadísticos descriptivos básicos.

Análisis descriptivo.

En el análisis descriptivo se incluye un conteo de casos (número de registros para cada serie de tiempo) donde se analizan los casos válidos (registros disponibles) así como los casos perdidos (registros faltantes).

Valores extremos.

Se identifican valores extremos en cada serie. Estos valores se retiran de las series para evitar valores atípicos (por encima o por debajo) que puedan interferir en los procesos de calibración y validación de los modelos. Esta metodología se aplica a las series de caudal (datos atípicos altos y bajos); para la precipitación solamente se tienen en cuenta los valores extremos altos ya que los atípicos bajos siempre tendrán un valor numérico de 0,0.

Gráficos de normalidad.

Se trata de graficar la información en un papel de probabilidad normal. Si la gráfica muestra una línea recta, indicará que la información se distribuye normalmente, de otra manera la información no se distribuye siguiendo esta distribución y será necesario realizar una transformación de la variable.

Análisis confirmatorio: para describir el comportamiento estadístico de los datos hidroclimatológicos, se han utilizado diversas funciones de distribución, pero de hecho la mayoría

de los modelos suponen una distribución normal de la variable, lo cual implica realizar una prueba estadística confirmatoria para rechazar o no la hipótesis nula de que la distribución de los datos sigue ese tipo de distribución teórica.

Estabilidad de la media.

Se puede determinar si la serie hidroclimatológica es estable en la media a partir de la comparación de subconjuntos de la información. En la mayoría de los casos se recomienda dividir la serie original en dos partes de tal forma que se puedan aplicar test estadísticos de comparación de medias para determinar si vienen de la misma población.

Datos atípicos y llenado de datos.

Para el llenado de datos faltantes se tienen en cuenta solamente los meses (dentro de las series diarias) con un porcentaje de datos faltantes inferior al 10% (es decir menos de 3 datos faltantes por mes). Para los caudales se llenan los datos ausentes tomando en cuenta los registros diarios del día anterior y del día posterior. Para el caso de los datos de precipitación se realiza el llenado teniendo en cuenta los registros de las estaciones cercanas y con el siguiente criterio: si las estaciones cercanas presentan registros diferentes a 0,0 se promedian para generar el dato faltante, de lo contrario se rellenan con precipitación cero (0).

Análisis de homogeneidad y consistencia: para el análisis de homogeneidad se elaboran curvas de doble más para los caudales acumulados en relación con la precipitación acumulada en los procesos de calibración y modelación.

Calibración de modelos: para la fase de calibración de los modelos descritos anteriormente se utilizó el software computacional MATLAB donde se accede al código estructurado del RRMT y se desarrollan los algoritmos para introducir la información requerida para cada modelo.

Funciones Objetivo

Para el presente estudio se utilizaron dos (2) metodologías ampliamente reconocidas como son el factor de eficiencia de Nash y el coeficiente de determinación R^2 . El coeficiente NSE (Nash Surcliffe Efficiency) fue introducido para comparar la eficiencia de modelos. La ecuación básica es:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [o_i - c_i(\theta)]^2}{\sum_{i=1}^N [o_i - \bar{o}]^2}$$

Así mismo el coeficiente de determinación se minimiza de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\{\sum_{i=1}^N [(o_i - \bar{o})(c_i(\theta) - \bar{c}(\theta))]\}^2}{\sum_{i=1}^N [o_i - \bar{o}]^2 \sum_{i=1}^N [c_i(\theta) - \bar{c}(\theta)]^2}$$

Calibración regional

Para la calibración regional se tomaron en cuenta los periodos ya definidos. Para cada uno de ellos se realizaron pruebas de ajuste de acuerdo con las funciones objetivo planteadas anteriormente y para cada uno de los modelos de balance hídrico.

4. REFERENCIAS

- Wolter, K., 1987. "The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis". J. Climate Appl. Meteor., 26, 540-558.
- Castro, L.; Carvajal, Yesid., 2010. "Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas". Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, núm. 9, enero–diciembre, pp. 15-25. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- Gulliver, J. S., & Arndt, R. E. (1991). "Hydropower Engineering Handbook". New York: McGraw-Hill.
- B, Hingray et alt. Hydrology as ciencia for engineers. (2014) Nw, USA. CRCRESS.

Sobre los autores

- **Guillermo Hernández Torres.** Ingeniero Agrícola y Magíster en Ingeniería-Recursos Hidráulicos egresado de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ingeniería y su área de investigación se enfoca en la modelación computacional en hidrología. guillermo.hernandez@mail.escuelaing.edu.co
- **Germán Ricardo Santos Granados.** Ingeniero Civil egresado de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Magíster y Doctor en Ingeniería de Virginia Tech. Actualmente se desempeña como director de Posgrados en la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- german.santos@escuelaing.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)