



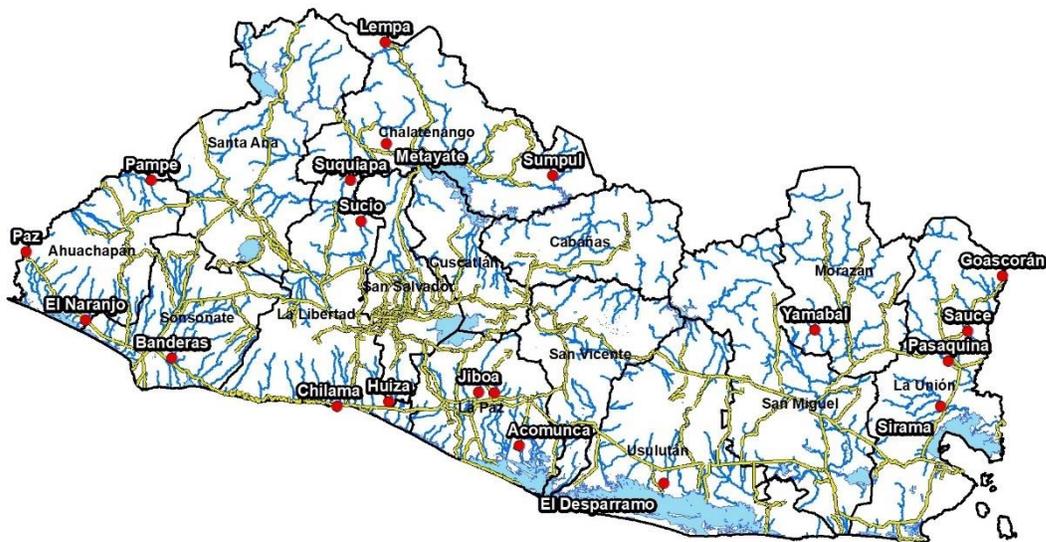
GOBIERNO DE
EL SALVADOR

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES



DETERMINACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES EN RÍOS DE EL SALVADOR Y DISEÑO DE RED DE MONITOREO

NÚMERO DE CONTRATO: MARN/AECID/SLV-056 B No. 11/2019



PRODUCTO 6

MÉTODO HIDROLÓGICO PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES AMBIENTALES
EN EL SALVADOR.

17 de junio de 2020

inypsa

| ÍNDICE | | PÁG. |
|---------------|---|-------------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2 | OBJETIVOS | 2 |
| 2.1 | Objetivo general | 2 |
| 1.1 | Objetivos Específicos | 2 |
| 3 | METODOLOGÍA..... | 3 |
| 3.1 | Ubicación del área de estudio | 3 |
| 3.2 | Caudales mínimos..... | 6 |
| 3.2.1 | Esquema metodológico..... | 6 |
| 3.2.2 | Datos hidrológicos de partida:..... | 6 |
| 3.2.3 | Desagregación de series..... | 7 |
| 3.2.4 | Clasificación de los tramos de estudio | 10 |
| 3.2.5 | Régimen de caudales ambientales en ríos permanentes..... | 11 |
| 3.2.6 | Régimen de caudales ambientales en ríos no permanentes..... | 16 |
| 3.2.7 | El factor de variación..... | 21 |
| 3.2.8 | Resultados | 22 |
| 3.3 | Caudales máximos | 26 |
| 3.3.1 | Metodología seguida para la estimación de la distribución estacional de caudales ecológicos máximos por métodos hidrológicos..... | 26 |
| 3.3.2 | Resultados | 27 |
| 3.4 | Tasa de cambio | 29 |
| 3.4.1 | Introducción y métodos | 29 |
| 3.4.2 | Tasa de ascenso y descenso..... | 31 |
| 3.4.3 | Resultados | 33 |
| 3.5 | Caracterización del régimen de crecidas | 33 |
| 3.5.1 | Caudal generador..... | 33 |
| 3.5.2 | Duración y momento de ocurrencia..... | 34 |
| 3.5.3 | Resultados | 34 |
| 4 | CONCLUSIONES | 35 |
| 4.1 | Río Lempa | 35 |
| 4.2 | Río Suquiapa | 35 |
| 4.3 | Río Sucio..... | 35 |
| 4.4 | Río Metayate | 35 |
| 4.5 | Río Sumpul | 35 |
| 4.6 | Río Pampe..... | 35 |
| 4.7 | Río Paz | 35 |
| 4.8 | Río El Naranjo..... | 35 |
| 4.9 | Río Banderas | 35 |
| 4.10 | Río Chilama..... | 35 |
| 4.11 | Río Huiza | 35 |
| 4.12 | Río Jiboa | 35 |
| 4.13 | Río Jalponga..... | 35 |
| 4.14 | Río Acomunca | 35 |
| 4.15 | Río Desparramo..... | 35 |
| 4.16 | Río Yamabal..... | 35 |
| 4.17 | Río Sirama..... | 35 |
| 4.18 | Río Pasaquina..... | 35 |
| 4.19 | Río El Sauce..... | 35 |
| 4.20 | Río Goascorán | 35 |

-
- Anexo1: Ajustes de Goodrich**
 - Anexo 2: Series de aportaciones**
 - Anexo 3: Caudales mínimos**
 - Anexo 4: Caudales máximos**
 - Anexo 5: Tasa de cambio y caudal generador**

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Regiones hidrográficas de El Salvador. Fuente PNGIRH MARN 2017 | 3 |
| Figura 2. Esquema metodológico. Fuente propia..... | 6 |
| Figura 3. Esquema metodológico. Fuente propia..... | 15 |
| Figura 4. Ejemplo de distribución temporal y duración del cese de caudal. Fuente propia..... | 20 |
| Figura 5. Ejemplo de curvas de ascenso y descenso de caudal. Fuente propia..... | 32 |

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el consumo de los recursos hidrológicos es cada vez más alto, debido al incremento de las actividades antropogénicas que demandan de este vital líquido, y que provoca en su mayoría conflictos hídricos cuando la escasez del agua que se incrementa (Garrido et al. 2009), aunado a los problemas asociados al Cambio Climático; que afectan más a los países que no están preparados para gestionar sus recursos hidrológicos de forma eficiente y con enfoque ecosistémico.

El Salvador ha avanzado significativamente en el diseño de estrategias de país para el manejo y uso adecuado del recurso hídrico, como es el caso del establecimiento por medio de la Política y Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH) como herramientas legales y técnicas para hacerle frente a los problemas asociados con el manejo del agua (MAG 2012, MARN 2011, MARN-FCAS 2014). Este plan resulta fundamental debido a que casi el 80% del territorio nacional está dentro del Corredor Seco de Centroamérica (MARN-SNET 2002) en donde se dan condiciones de sequías cíclicas relacionadas con el fenómeno de El Niño y otros eventos climatológicos extremos asociados provocados por el Cambio Climático.

Es por ello y debido a las condiciones climáticas inciertas y frecuentes en el país, se busca aplicar nuevas metodologías de carácter eco hidráulicas para la gestión del recurso hidrológico, que permitan mantener la integridad y función ecológica de los ríos del país.

En el presente entregable se detallan los principales resultados, conclusiones y recomendaciones de cálculo de caudales ambientales mediante métodos hidrológicos, buscando similitudes entre las diferentes zonas del país con el fin de obtener metodologías en función de dichas similitudes que sean válidas para extrapolar los cálculos de caudales ambientales en 20 + 6 masas de agua al resto de las masas del país en las cuales se pueda requerir dicho cálculo.

Las conclusiones obtenidas en este entregable aportarán una valiosa información para el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) quienes tendrán los insumos técnicos para las futuras tomas de decisiones.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Definir una metodología de tipo hidrológico de caudales ambientales para El Salvador.

1.1 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis considerando las similitudes existentes entre las diferentes Regiones Hidrográficas del país para obtener metodologías distintas en función de dichas similitudes.
- Realizar una comparación entre los resultados obtenidos únicamente por métodos hidrológicos y los resultados del “Producto 5 – Informe de simulación de la disponibilidad de hábitat físico de especies piscícolas prioritarias en ríos de El Salvador” basados en requerimientos de hábitat de las especies con base a las simulaciones hidrobiológicas.

3 METODOLOGÍA

3.1 Ubicación del área de estudio

Aunque el objetivo general de este “Producto 6 - Método hidrológico para el cálculo de caudales ambientales en El Salvador” es establecer una metodología de tipo hidrológico de caudales ambientales en El Salvador, se cuenta particularmente con 26 tramos de estudio situados en las 10 regiones hidrográficas de El Salvador, los cuales representan diferentes subcuencas distribuidas a lo largo del territorio salvadoreño.

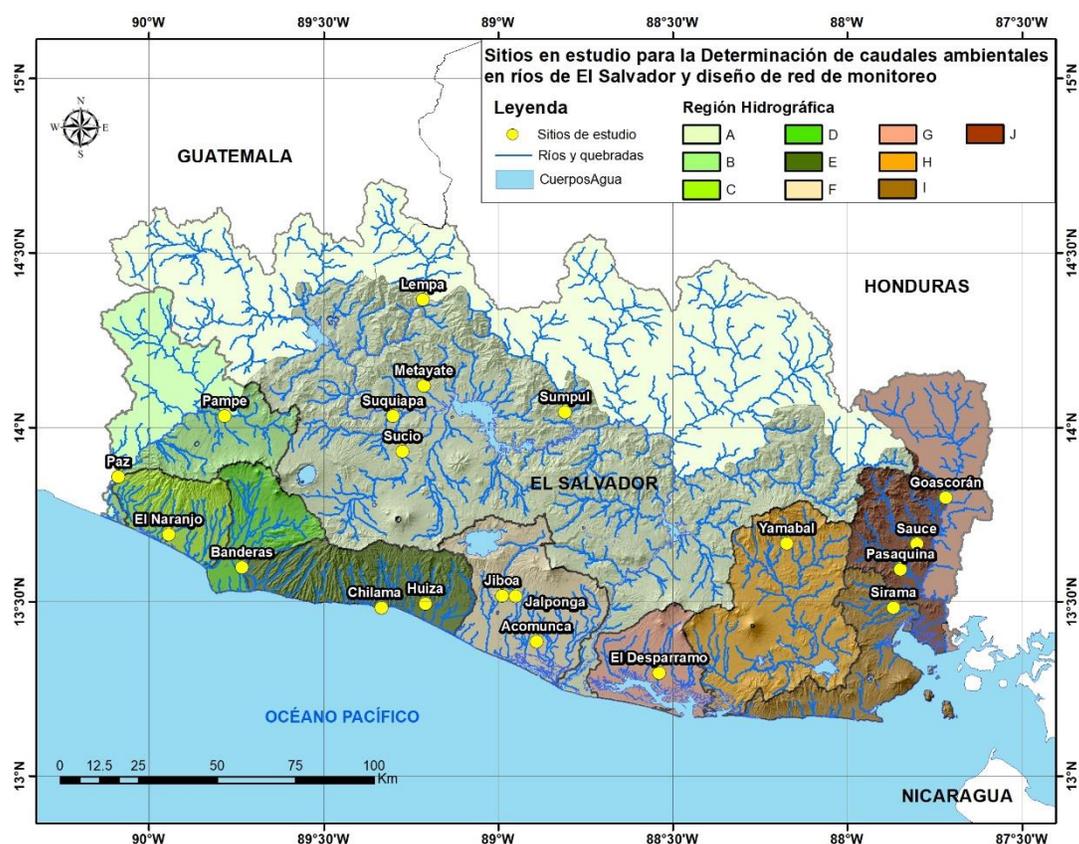


Figura 1. Regiones hidrográficas de El Salvador. Fuente PNGIRH MARN 2017

Dichos tramos presentan su ubicación (departamento y Región Hidrográfica), el área de la cuenca vertiente y su aportación media anual en la siguiente tabla:

Tabla 1. Ubicación de los ríos estudiados para el establecimiento de una metodología de tipo hidrológico para caudales ambientales en El Salvador

| Región | Región | Río | Departamento | Área (Km ²) | Aportación media (hm ³ /año) | Aportación específica (hm ³ /Km ² .año) |
|--------|--------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|---|---|
| A | Lempa | Lempa (cabecera) | Chalatenango | 860 | 707.11 | 0.82 |
| A | Lempa | Lempa (desembocadura) | Usulután | 17742 | 11335.74 | 0.64 |
| A | Lempa | Suquiapa | La Libertad | 475 | 290.56 | 0.61 |
| A | Lempa | Sucio | La Libertad | 720 | 636.33 | 0.88 |
| A | Lempa | Metayate | Chalatenango | 208 | 151.52 | 0.73 |
| A | Lempa | Tamulasco | Chalatenango | 69 | 64.06 | 0.93 |
| A | Lempa | Sumpul | Chalatenango | 884 | 989.89 | 1.12 |
| A | Lempa | Sapo | Morazán | 111 | 81.69 | 0.74 |
| B | Paz | Pampe | Ahuachapán | 368 | 205.07 | 0.56 |
| B | Paz | Paz | Ahuachapán | 2123 | 977.71 | 0.46 |
| C | Cara Sucia – San Pedro | Cara Sucia | Ahuachapán | 54 | 50.90 | 0.94 |
| C | Cara Sucia – San Pedro | El Naranjo | Ahuachapán | 36 | 29.51 | 0.82 |
| D | Grande de Sonsonate - Banderas | Cuyuapa | Sonsonate | 25 | 31.15 | 1.25 |
| D | Grande de Sonsonate - Banderas | Banderas | Sonsonate | 420 | 12.94 | 0.03 |
| E | Mandinga - Comalapa | Chilama | La Libertad | 75 | 41.62 | 0.55 |

| Región | Región | Río | Departamento | Área (Km2) | Aportación media (hm3/año) | Aportación específica (hm3/Km2.año) |
|---------------|---------------------------|---------------|---------------------|-------------------|-----------------------------------|--|
| E | Mandinga - Comalapa | Huiza | La Libertad | 81 | 44.66 | 0.55 |
| F | Jiboa – Estero Jaltepeque | Jiboa | La Paz | 429 | 203.51 | 0.47 |
| F | Jiboa – Estero Jaltepeque | Jalponga | La Paz | 35 | 44.30 | 1.27 |
| F | Jiboa – Estero Jaltepeque | Acomunca | La Paz | 31 | 36.74 | 1.19 |
| G | Bahía de Jiquilisco | El Desparramo | Usulután | 119 | 67.39 | 0.57 |
| H | Grande de San Miguel | Villerías | San Miguel | 224 | 42.78 | 0.19 |
| H | Grande de San Miguel | Yamabal | Morazán | 36 | 18.91 | 0.53 |
| I | Sirama | Sirama | La Unión | 233 | 121.05 | 0.52 |
| J | Goascorán | Pasaquina | La Unión | 1022 | 601.83 | 0.59 |
| J | Goascorán | El Sauce | La Unión | 299 | 248.12 | 0.83 |
| J | Goascorán | Goascorán | La Unión | 260 | 231.37 | 0.89 |

3.2 Caudales mínimos

3.2.1 Esquema metodológico

La obtención del régimen de caudales ambientales de El Salvador pasa por el siguiente esquema metodológico:

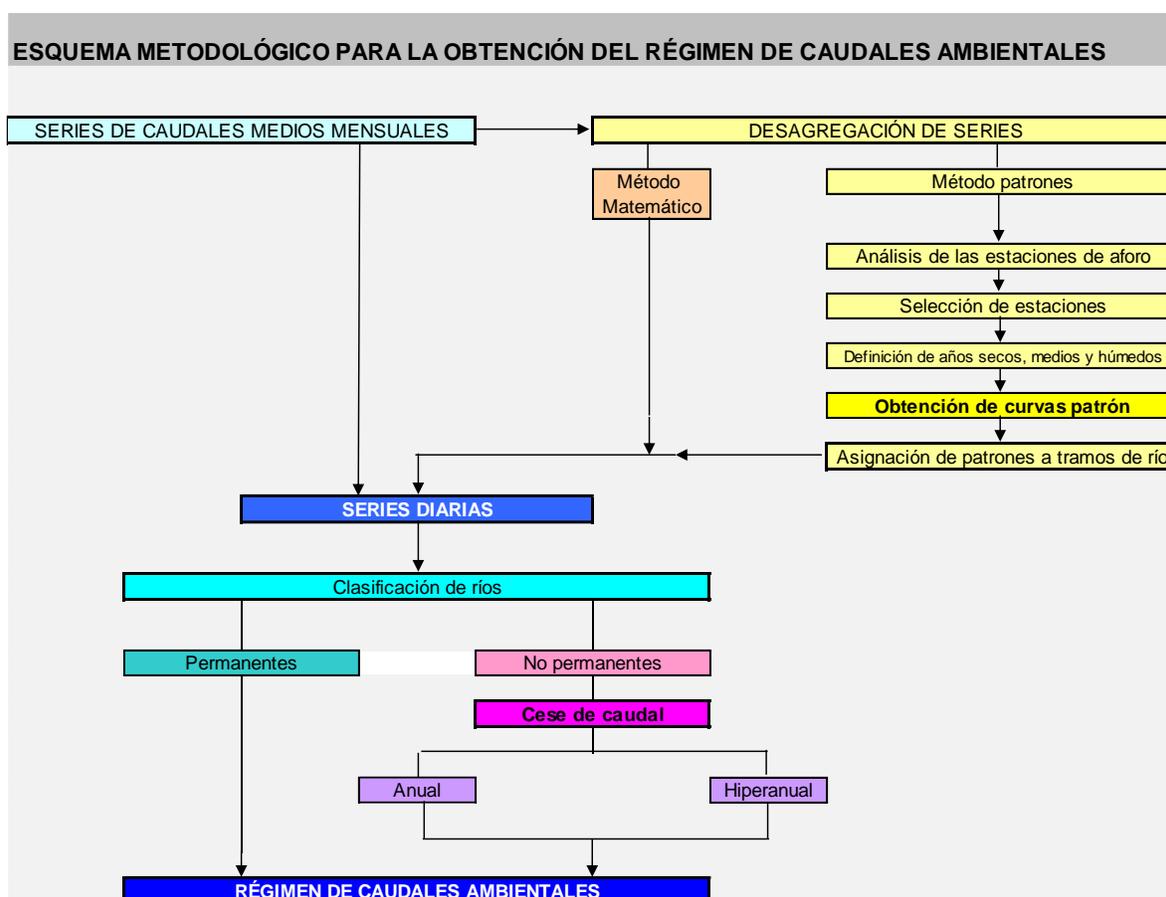


Figura 2. Esquema metodológico. Fuente propia

3.2.2 Datos hidrológicos de partida:

3.2.2.1 Caudales medios mensuales por tramos de río.

Los caudales medios mensuales en cada uno de los tramos de estudio listados anteriormente han sido suministrados provenientes de la restitución de las series de aforo realizada con el modelo de lluvia-escorrentía (Evalhid).

3.2.2.2 Datos de aforo

De ciertos tramos de río se ha contado con registros de aforo diarios. Concretamente 16 de los 26 tramos cuentan con registros diarios de mayor o menor duración. De esas 16 estaciones hidrométricas con datos diarios de caudal se han utilizado 14, al contar las otras 2 restantes con periodos de registro muy cortos.

3.2.3 *Desagregación de series*

3.2.3.1 Planteamiento general

Dado que las series de caudales procedentes de Evalhid se encuentran elaboradas a escala mensual, resulta en primer lugar necesario adecuar dichas series con el fin de lograr construir, mediante su desagregación, un régimen sintético diario que permita la aplicación de metodologías hidrológicas.

La desagregación de caudales es un proceso complicado e impreciso, a no ser que se disponga en el tramo en estudio de una estación de aforo que, en todo caso, debe ser fiable y disponer de una serie de registros de suficiente extensión. En dicho caso se podría aspirar a una superior precisión, aunque el tratamiento sea complicado y laborioso, por cuanto en la mayoría de los casos es necesaria la restitución al régimen natural cuyo buen fin también dependerá de la existencia y calidad de los datos de aportación y derivación o consumo. Cuando el caso no es el expuesto en el párrafo anterior, el proceso, en general, debe abordarse desde varios puntos de vista tratando, en todos los casos, de acotar el error que se comete y como puede incidir en los objetivos de la desagregación como son la obtención de curvas de caudales clasificados o de medias móviles en intervalos de bastante longitud relativa.

3.2.3.2 Obtención de patrones

Como metodología básica se propone que partiendo de estaciones de aforo representativas se obtendrán unos pesos que permitan distribuir a nivel diario la aportación mensual, siguiendo los siguientes pasos:

- Análisis de la serie diaria de partida analizando la variabilidad del peso diario frente a la aportación mensual en cada año de la serie.

- Elección de aquel patrón de distribución diaria del mes que más se aproxime a la aportación mensual media.
- Análisis sobre las menores desviaciones de la aportación anual respecto de la aportación anual media.

3.2.3.2.1 Definición de años secos, medios y húmedos

Para la construcción del patrón se han clasificado las series en años secos, medios y húmedos, de acuerdo con la ley de distribución de Goodrich aplicada a las aportaciones anuales de la serie sintética. De acuerdo con la aportación anual media (A_m), cada tipo de año se define de la siguiente manera:

| | |
|------------|----------------------------|
| Muy seco | Frecuencia < 15% |
| Seco | Frecuencia del 15% al 33% |
| Medio | Frecuencia del 33% al 66% |
| Húmedo | Frecuencia del 66% al 80% |
| Muy húmedo | Frecuencia del 80% al 100% |

Según la ley de distribución de cada tramo de estudio se han definido tres patrones para cada año: seco o extraseco, medio y húmedo o extrahúmedo que se asociarán a una determinada aportación.

En el Anexo 1. se incluyen los resultados de los ajustes de Goodrich realizados y, en consecuencia, las aportaciones anuales límite que definen los años secos, medios y húmedos. Y en el Anexo 2 se incluyen las series de aportaciones de cada uno de los tramos indicando la caracterización de cada año (húmedo, medio o seco) y su distribución mensual.

3.2.3.2.2 Construcción de las curvas patrón

Como ya se ha indicado esta será la metodología básica para la desagregación a nivel diario de las series de aportaciones mensuales del SIMPA y se basa en los registros históricos de las estaciones de aforo.

Los patrones obtenidos para cada estación serán uno por cada mes del año seco, del medio o húmedo, en total 36 patrones por estación de aforos.

Cada uno de estos patrones se construye a partir de la superposición de los caudales diarios de cada mes y año registrados en la estación de los que se van excluyendo los que no resulten representativos o ya estén representados por uno similar. Al final se adopta la media de los que no hayan sido eliminados de acuerdo con las consideraciones anteriores.

A través de gráficos que constituyen un abanico de la casuística encontrada a lo largo del proceso ha podido observarse tanto el camino seguido para su determinación como el grado de ajuste de la distribución de caudales diarios obtenidos desagregando la aportación mensual real con los caudales realmente medidos en la estación en el mes y año que se compara.

De la observación de este tipo de gráficos se extraen las siguientes conclusiones de cara a la construcción de los patrones:

- En los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre es cuando se producen las avenidas más significativas variando su intensidad en función de que el año sea seco medio o húmedo, concentrándose las de mayor cuantía en los meses de agosto y septiembre.
- Los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero se caracterizan por tener caudales medios inicialmente abundantes pero descendentes según avanzan los meses, sin que se produzcan episodios de crecidas significativas.
- En los meses de marzo, abril y mayo se concentran los caudales más bajo con una distribución más o menos uniforme.

En términos generales, independientemente del tipo de año y de la estación de que se trate, la distribución obtenida con el patrón a partir de las aportaciones reales se suele adaptar a la realidad de los distintos años de la serie histórica siempre teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El patrón de cada estación habitualmente se tendrá que transponer en el espacio (algunos de los tramos de estudio no están controlados por una estación de aforo) y en el tiempo (en la mayoría de los casos), ya que el período de cálculo se ha fijado entre 1970 y 2012 y las series en régimen natural no tienen datos del periodo completo.

- Los resultados finales no dependen del día en que se produce un determinado caudal tanto en cuantía como en relación a los inmediatamente precedentes o subsiguientes sino de que de hecho el suceso se produzca en ese mes concreto.
- En los casos en que se producen episodios de avenida importantes y no habituales los resultados distorsionan de forma más o menos importante la distribución de caudales diarios, aunque en la mayoría de los casos afectando poco a los caudales bajos que son los que más interesan. En todo caso, como se observa en los gráficos, a la hora de confeccionar los patrones ya se ha considerado una corrección por avenidas que es necesaria no solo para que estos caudales altos queden reflejados en la curva de caudales clasificados, cosa que tiene menor interés para la estimación del régimen de caudales ecológicos, sino también para no sobrevalorar el resto de los caudales del mes al distribuir el exceso también en los días no afectados por la avenida.

3.2.3.2.3 Asignación de patrones a los tramos de estudio

La asignación de patrones a las distintas masas de agua se realiza sobre la base de los siguientes criterios:

- Región Hidrográfica a la que pertenece la masa de agua en relación con la estación de aforos en la que se ha construido el patrón.
- Afinidad hidrológica.
- Proximidad geográfica

3.2.3.3 Series desagregadas:

En base a todo lo expuesto anteriormente, una vez obtenido un patrón húmedo, medio y seco para cada tramo, se desagregarán las series naturales en diarias mediante el uso del patrón que convenga en cada año en función de si es un año húmedo, medio o seco.

3.2.4 Clasificación de los tramos de estudio

Para la clasificación de las masas de agua el procedimiento a seguir es el siguiente:

- Agrupar los caudales diarios en años hidrológicos (desde mayo a abril).
- Contar para los años disponibles, el número de días al año con caudal de 0 l/s.

- Sobre la serie de nº de días al año con caudal de 0 l/s, calcular el percentil 80.
- Según el valor del percentil 80, clasificar el río según las siguientes clases:

Permanente: <7 días/año con $Q_{diario} < 1$ l/s

Estacional: 7-100 días/año con $Q_{diario} < 1$ l/s

Intermitente: 100-300 días/año con $Q_{diario} < 1$ l/s

Efímero: > 300 días/año con $Q_{diario} < 1$ l/s

Como puede observarse, las 26 masas de agua de la cuenca se clasifican como permanentes al contar con menos de 7 días al año con caudales diarios menores a 1 l/s según el percentil 80.

3.2.5 Régimen de caudales ambientales en ríos permanentes

Los métodos hidrológicos propuestos referentes al régimen de mínimos en ríos permanentes son los que se relacionan a continuación:

- **Método de NGPRP** (Northern Great Plains Resource Program; NGPRP, 1974). Se calcula como el caudal igualado o superado el 90% del tiempo sobre la curva de caudales clasificados obtenida una vez descartados los caudales extremos correspondientes a periodos secos y húmedos.

- **Método de Hoppe** (Hoppe, 1975). Similar al método anterior, trabaja con las curvas de caudales clasificados, estableciendo 3 niveles de caudales de mantenimiento, según tres objetivos (alimento y refugio, reproducción y regeneración del cauce), que define como caudales que son igualados o superados durante unos periodos de tiempo determinados.

- **Método 7Q2**. (Stalnaker & Arnette, 1976; Gordon et al., 1992). El caudal de mantenimiento es el valor correspondiente al caudal mínimo medio de siete días consecutivos, para un periodo de retorno de dos años.

- **Método de Utah** (Geer, 1980). Propone dividir el año en dos periodos y utiliza las medias aritméticas de los valores más bajos de caudales medios mensuales, para cada mes dentro de cada uno de los dos periodos.

- **Método NEFM** (New England Flow Method; USFWS, 1981). Se le conoce también como método ABF (Aquatic Base Flow). El caudal de mantenimiento se calcula como la media

aritmética de los valores de la mediana calculada para los caudales medios diarios del mes de abril, de cada año de la serie considerada.

- **Formula de Mathey** (UNESA, 1993). Es la base del que se conoce como “método suizo”. Para el cálculo del caudal de mantenimiento plantea un algoritmo basado en el Q347 (caudal igualado o superado durante 347 días al año)

- **Método 0,25 QMA** (Caissie & El-Jabi, 1995). Es una derivación más del método Montana. El caudal de mantenimiento se calcula directamente como el 25% del módulo anual.

- **Método QBM** (Caudal Básico de Mantenimiento; Palau 1994; Palau & Alcazar, 1996). A partir de series de caudales medios diarios y mediante la aplicación de medias móviles sobre intervalos crecientes de datos, se obtiene una distribución de caudales mínimos acumulados, sobre la que se define el Caudal Básico como el correspondiente a la discontinuidad o incremento relativo mayor.

- **Método RVA** (Range of Variability Approach; Ritchter et al., 1997). A partir de series de caudales medios diarios, se calculan una serie de indicadores de alteración hidrológica predefinidos y para cada uno se decide cual va a ser el objetivo en condiciones de regulación y las reglas para alcanzarlo.

3.2.5.1 Método QBM

El denominado “Método del Caudal Básico” parte de series de caudales medios diarios y, mediante la aplicación de medias móviles sobre intervalos crecientes de datos, obtiene una distribución de caudales mínimos acumulados, sobre la que se define el Caudal Básico como el correspondiente a la discontinuidad o incremento relativo mayor.

El Método del Caudal Básico es, en el marco de las distintas estrategias o métodos de cálculo de caudales ecológicos, básicamente de tipo hidrológico, pero incorpora aspectos hidráulicos y criterios biológicos de habitabilidad. La idea básica contenida en este método es que el caudal circulante por un tramo de río (series hidrológicas temporales), es la variable primaria que contiene toda la información necesaria para la organización física y biológica del ecosistema fluvial.

Este método presenta importantes ventajas frente a otras metodologías, entre las que se pueden referir las siguientes:

- 1) Resulta coherente con la distribución hidrológica de caudales circulantes por el tramo fluvial considerado, es decir, es representativo de un porcentaje importante de los volúmenes de agua circulantes. El modo de obtención de este caudal utiliza además el período de datos completo considerado dentro del estudio.
- 2) Es coherente con las variaciones estacionales de la distribución de caudales circulantes por el tramo. Ha de tenerse en cuenta al respecto que el caudal ecológico no puede resumirse a un módulo fijo, una cantidad o un porcentaje, sino que debe consistir en un régimen de caudales según las distintas épocas del año.
- 3) Persigue la conservación de las comunidades naturales del ecosistema fluvial en el tramo de estudio, incluyendo dentro del mismo, además de la ictiofauna, los macrófitos, los macroinvertebrados, y la herpetofauna (anfibios y reptiles). En general, las condiciones que permitan la conservación de estas comunidades van a garantizar los requerimientos de caudal de otros vertebrados ligados al medio acuático, como mamíferos y aves. El valor del régimen de caudales obtenido a través del Método del Caudal Básico, al partir de series históricas de caudal, habrá de permitir la conservación de las comunidades naturales, bien estén representadas en la zona, o bien constituyan la biota potencial. Ha de destacarse al respecto que existen comunidades cuyo mantenimiento precisa de las variaciones estacionales de caudal, precisando su mantenimiento de la modulación que proporciona el método aquí considerado. Así, los caudales elevados en momentos concretos del año hidrológico permitirán la diseminación de diásporas (esporas y semillas) de muchas especies vegetales, favoreciendo su colonización a lo largo de los ríos, además de movilizar materia orgánica, sedimentos y nutrientes. La experiencia demuestra que los caudales excesivamente reducidos a que conducen otras metodologías de tipo exclusivamente hidrológico puede dar lugar a la degradación del bosque de ribera.
- 4) Asegura la conservación de la diversidad ecológica mediante el establecimiento de un caudal que actúe como nivel base (el denominado “caudal básico”, al cual debe su nombre el método) por debajo del cual las poblaciones de las especies más exigentes experimentarían riesgo de extinción.
- 5) Permite en los tramos fluviales contaminados o degradados una mejora de la composición fisicoquímica del agua, así como de las condiciones de hábitat. No hay

que olvidar que las variaciones de caudal implican variaciones en la química del agua (concentraciones de iones conservativos, nivel de oxígeno disuelto, niveles de compuestos nitrogenados, compuestos de fósforo, ácido húmico, etc.) debidas a la dilución y a la modificación de la temperatura.

De todo lo antedicho se deduce la idoneidad del método considerado y es por todo ello por lo que se considera el método más adecuado de todos los calculados.

El componente fundamental de la metodología es el caudal básico, y corresponde al caudal mínimo necesario para que se conserve la estructura y función del ecosistema acuático afectado. Es, por tanto, el caudal mínimo que debe circular en todo momento por el río, aunque no siempre el recomendado.

Como dato de partida, el método requiere series continuas recientes de caudales medios diarios. A partir de estas series, el caudal básico se deduce de la aplicación de medias móviles sobre intervalos de amplitud creciente obtenidos de las series de caudales medios diarios (q_{ij} , donde “j” son los distintos años considerados, e “i” son los días del año y por tanto varía de 1 a 365) del nº de años hidrológicos en el que se estabiliza el valor del caudal básico. Las medias móviles se calculan con retardos crecientes comenzando en 1 (medias de datos tomados de 1 en 1) hasta un máximo de 100 (medias de datos tomadas de 100 en 100). El referido valor máximo, que corresponde a un intervalo de 100 días consecutivos, se considera suficiente para mantener los máximos períodos de estiaje.

Con ello se obtienen unas series secundarias que tienden hacia el valor del caudal medio anual. De cada una de estas series secundarias se calcula el caudal mínimo, obteniéndose una serie terciaria única sobre la que se calcula la razón de incremento entre cada par de valores consecutivos. El caudal básico corresponde al caudal superior del par de valores que recogen la mayor razón de incremento.

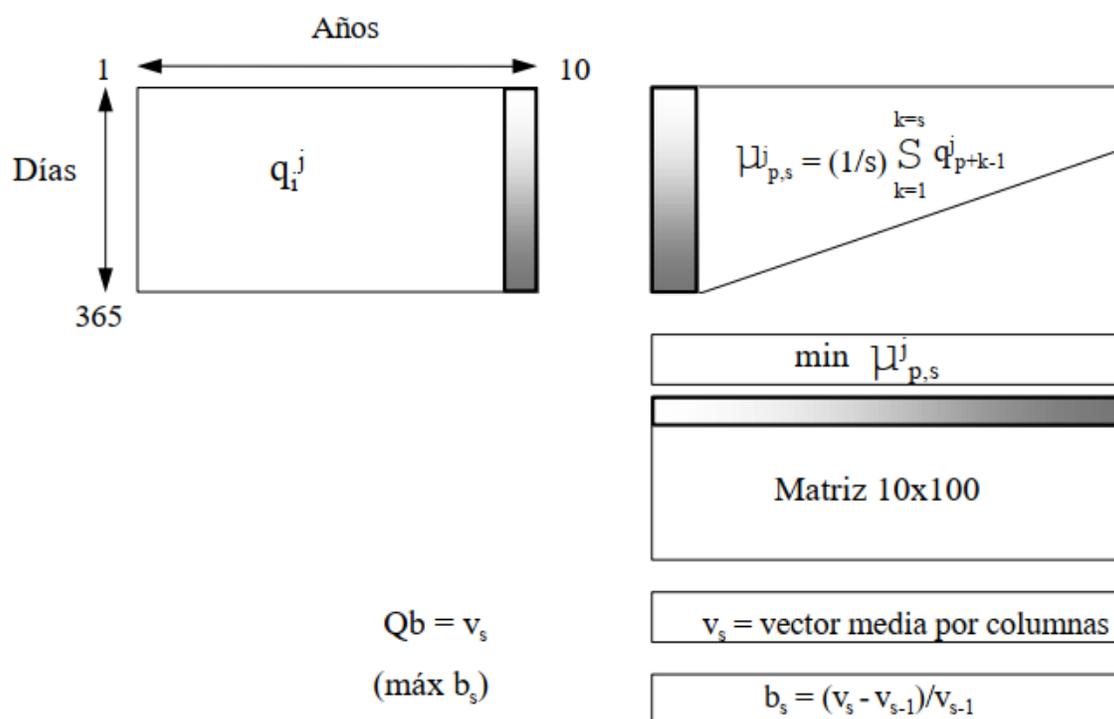


Figura 3. Esquema metodológico. Fuente propia

El caudal básico es, por tanto, una regularidad hidrológica situada entre el caudal mínimo absoluto y el caudal medio, cuya localización exacta depende de la forma del hidrograma, concretamente de la duración del período de menores caudales y de la simetría (pendientes) de los segmentos de hidrograma que encierran el citado período de caudales mínimos.

Si dicho período es breve, representa una situación excepcional para las comunidades acuáticas naturales, de modo que el caudal base tiende a aproximarse hacia el valor medio; por el contrario, si se trata de un período natural de mínimos dilatado, significa que tal circunstancia forma parte de una situación ordinaria en el río a la que las comunidades naturales están habituadas (forma parte de su coevolución con el medio físico), con lo cual el caudal base puede aproximarse más hacia el caudal mínimo).

3.2.6 Régimen de caudales ambientales en ríos no permanentes

Se propone aplicar los siguientes criterios metodológicos para la caracterización específica del régimen de caudales ambientales de ríos temporales (estacionales, intermitentes y efímeros):

- a) En ríos temporales se utilizarán los criterios definidos para la determinación de la distribución mensual de caudales mínimos y máximos en ríos permanentes. Se realizará, además, una caracterización del periodo de cese de caudal atendiendo a la frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de recesión de los episodios de cese de caudal característicos del régimen natural, utilizando una serie hidrológica representativa de, al menos, 20 años.
- b) En ríos intermitentes se caracterizarán los siguientes aspectos:
 - Periodo de cese de caudal, atendiendo a la frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de recesión de los episodios de cese de caudal característicos del régimen natural.
 - Conexión con las aguas subterráneas, definiendo los volúmenes mínimos necesarios para preservar el flujo subsuperficial que alimenta las pozas y remansos, de gran importancia como sumidero y refugio de las comunidades biológicas, a la espera de períodos hidrológicamente más favorables.
 - Magnitud de la crecida y período de tiempo de recesión al caudal base, que permiten el desarrollo del ciclo biológico de las comunidades adaptadas.
 - Caudal generador, que permite mantener la dimensión del canal principal del río y su buen funcionamiento morfodinámico.
- c) En ríos efímeros se determinarán, como elementos característicos, el tiempo de recesión tras la crecida, clave para el buen funcionamiento de las comunidades propias de estos sistemas, y el caudal generador, que permite mantener su funcionamiento morfodinámico.

En cuanto al establecimiento de caudales ambientales mínimos en ríos no permanentes (estacionales, intermitentes y efímeros), muchos de los métodos antes citados dan como resultado valores nulos o muy próximos a cero, por lo que se concluye que sólo se aplicarían a este tipo de ríos las metodologías cuyos caudales ecológicos, en dichos análisis, responden inversamente a la temporalidad. Quedan automáticamente excluidas

metodologías hidrológicas en las que los caudales ecológicos responden directamente a la temporalidad (como el QBM o el REC) y aquellas que no responden a la temporalidad (como los criterios de Montana y sus métodos derivados)

Serían aplicables, pues, aquellos métodos cuyos caudales ecológicos responden inversamente a la temporalidad, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- **RVA** (siglas en inglés de Range of Variability Approach, Método de Aproximación por Rangos de Variabilidad). Según sus autores, este método ha sido ideado para casos que tengan como primer objetivo de manejo la conservación de los ecosistemas. Se basa en datos de largos periodos de tiempo donde se describe la variabilidad hidrológica antes y después de una alteración hidrológica. Si bien en origen consiste en una descripción del flujo natural a través de 32 parámetros como claves en el funcionamiento del ecosistema para luego estimar un rango de variación máximo de estos parámetros, se ha modificado manteniendo únicamente el concepto de ventana objetivo, reduciendo el umbral mínimo a un intervalo situado entre el percentil del 5% (95% de excedencia) y el percentil de 10% (90% de excedencia).

- **Tessman**. Modificación del método de Tennant basada en el análisis de series largas de registros de aforo. Los datos básicos de estos métodos son registros medias anuales y medias mensuales de caudales, apoyadas en una serie limitada de mediciones realizadas en campo.

- **7Q2** (Método de caudal mínimo de 7 días con período de ocurrencia de 2 años). Proporciona un valor de caudal mínimo estadístico que corresponde al valor que, en media, cada dos años, será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivos. El método supone que a valores menores que éste puede generarse un stress ecológico.

- **7Q10** (Método de caudal mínimo de 7 días con período de ocurrencia de 10 años). Aproximación similar a la descrita del 7Q2, la cual utiliza igualmente la estadística hidrológica para describir las condiciones de sequía.

- **Q330**. Partiendo del análisis hidrológico basado en el régimen hidrológico normal a partir de la curva de caudales clasificados (o de frecuencia de caudales) del río. Representa los caudales superados 330 días al año.

- **Q347.** Sobre la misma base que el previamente indicado Q330, supone los caudales superados 347 días al año.

- **Hoppe.**

- **ABF** (siglas en inglés de Average Base Flow Method, Método del Caudal Medio Base).

Como paso previo, es preciso definir el período de cese de caudal ya sea permanentemente, es decir, todos los años, ya sea hiperanual en el que hay que detallar el número de años consecutivos en los que cesará el caudal así como el período de años en los que necesariamente ha de producirse este cese. En el apartado siguiente se explica la metodología seguida para evaluar este régimen.

3.2.6.1 Caracterización del cese de caudal

3.2.6.1.1 Descripción de las metodologías aplicables

La caracterización del periodo de cese de caudal forma parte de los trabajos a desarrollar para el establecimiento del régimen de caudales ecológicos en los ríos de carácter estacional e intermitente.

La caracterización del cese de caudal comprende la siguiente secuencia metodológica:

1. Agrupar los datos de caudal diario en años hidrológicos (desde mayo a abril).
2. Contar para los años disponibles, el número de días al año con caudal de 0 l/s.
3. Determinar la frecuencia de los eventos de cese de caudal.
 - Contar para cada uno de los años disponibles, el número de eventos con días cuyo caudal es de 0 l/s. Un evento se define como un periodo de cese de caudal (uno o varios meses).
 - A partir de la serie del número de eventos al año, seleccionar entre el percentil 25 y 75 para definir la frecuencia de eventos en la propuesta de caudales ambientales.
4. Determinar la duración del periodo de cese de caudal. A partir de la serie del número de días al año con caudal de 0 l/s, seleccionar entre el percentil 0 y 25 para definir en la propuesta de caudales ambientales la duración del período entre meses con caudal de 0 l/s
5. Determinar la estacionalidad de los eventos de cese de caudal

- Registrar el mes de ocurrencia para cada uno de los días con caudal de 0 l/s
- En el conjunto de todos los días con caudal de 0 l/s, determinar las frecuencias de ocurrencia para cada uno de los meses del año. A partir de la distribución de frecuencias obtenida, definir la estacionalidad para la propuesta de caudales ambientales

3.2.6.2 Propuesta de cese de anual e hiperanual

Los criterios anteriores permiten deducir los meses en los que todos los años cesará el caudal en un determinado tramo de río (al que llamaremos “cese anual”) pero no la cadencia interanual del cese en los meses en que lo hará de forma intermitente a lo largo de la historia (lo que denominamos “cese hiperanual”).

El método a seguir que se propone se basa en un conteo previo de los años consecutivos en los que en un determinado mes el caudal es superior o inferior a 1l/s y de acuerdo con las siguientes hipótesis de partida:

- El cese anual, entendiendo por tal los meses que en un determinado tramo de río ha de cesar el caudal todos los años, es inmediato por cuanto se referiría a los meses en los que realmente se produce cese por un período igual o superior a 10 años consecutivos.
- Se considera que cesa el caudal un mes completo cuando en dicho mes el caudal circulante es igual o inferior a 1 l/s durante, al menos, 20 días.
- Cuando las condiciones anteriores se cumplen tan solo en años alternos o aislados se prevé un cese hiperanual en las condiciones que se describen a continuación.

Realizado el conteo de años consecutivos en los que por un tramo de río, en un determinado mes del año, circula o no caudal apreciable (> 1 l/s) hay o no caudal en el río, se obtiene un gráfico como el que, a modo de ejemplo se adjunta a continuación, correspondiendo los meses consecutivos en los que hay caudal al percentil 80. Lo mismo ocurre con los años que está seco. A partir de los datos de este gráfico se tomará la decisión de que meses se cesa siempre, que meses no se cesa nunca y, finalmente, que meses se cesa en años alternantes con unos determinados criterios.

Distribución temporal y duración del cese

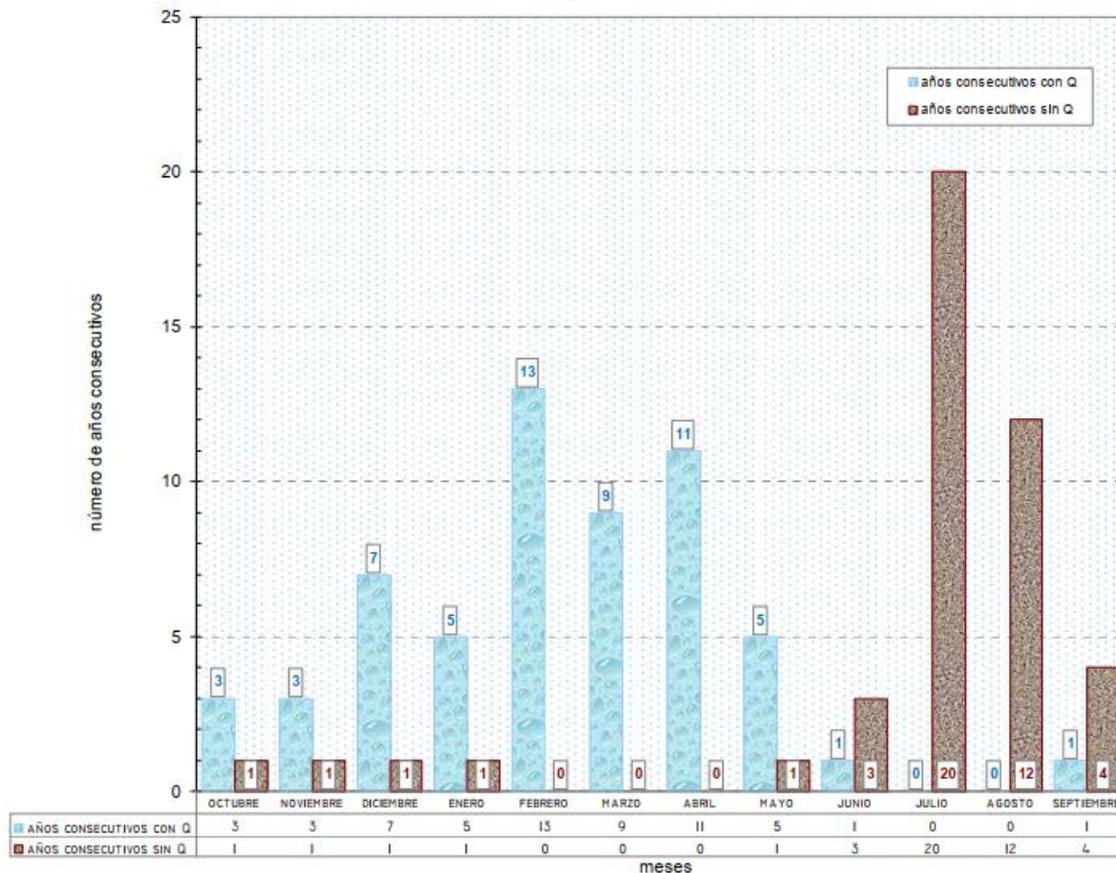


Figura 4. Ejemplo de distribución temporal y duración del cese de caudal. Fuente propia

La toma de decisiones, a la vista del gráfico en general se puede basar en los siguientes criterios:

- Si el caudal no cesa en períodos superiores a 9 años, es decir, si el cese que se deduce del gráfico es de 1 cada 10 años o más, no cesa nunca.
- Si el número de años consecutivos de cese es mayor que el de años que hay caudal se cesa todos los años.
- Si el número de años consecutivos que hay caudal es igual o superior en cuatro años al que se obtiene de cese, tampoco cesa nunca.

En el ejemplo propuesto (realizado para una cuenca en territorio español), en los meses de junio, julio, agosto y septiembre el caudal cesaría siempre, en el período diciembre-mayo

no cesaría nunca y en los meses de octubre y noviembre cesaría una vez en cada período de cuatro años.

3.2.6.3 Establecimiento de caudales mínimos

Una vez definido el período de cese de caudal en cada masa de agua resta obtener los caudales mínimos a garantizar en dichas masas y su distribución a nivel anual. En los ríos no permanentes, como ya se ha indicado anteriormente, no son utilizables todos los métodos descritos para ríos temporales, pero algunos de ellos si podrían aplicarse siempre que se modifique debidamente la metodología a seguir.

El primer camino sería la obtención de caudales mes por mes a partir de la curva de caudales clasificados específica para cada uno de los meses del año el segundo hacerlo para todo el año en su conjunto excluyendo los meses en los que el caudal cesa todos los años y el tercero consistente en dividir el año en dos periodos (seco y húmedo) y, excluyendo los meses de cese, aplicar la metodología de los permanentes partiendo de las curvas de caudales clasificados de cada uno de los dos periodos.

En el caso de El Salvador los periodos se definirían de la siguiente manera:

- Periodo húmedo: de junio a octubre, ambos inclusive.
- Periodo seco: restantes meses del año excluyendo aquellos en los que se establece cese de cauda.

3.2.7 *El factor de variación*

El caudal mínimo, obtenido por cualquiera de los métodos hidrológicos explicados con anterioridad hay que convertirlo en un régimen anual. El factor de variación es el encargado de adecuar el régimen de caudales mínimos a las tendencias de variación del hidrograma natural.

El factor de variación mensual consiste en considerar:

$F = 1$ para el mes de menor caudal medio (Q_{min}) y

$F = \sqrt{\frac{Q_{med}}{Q_{min}}}$ para el resto de caudales medios mensuales naturales (Q_{med})

El caudal de mantenimiento para cada mes se obtendrá de multiplicar Fv por el Caudal Básico definido

3.2.8 Resultados

Los resultados obtenidos para los caudales mínimos se presentan con detalle en el Anexo 3 para cada uno de los tramos de río de estudio y en las siguientes tablas se adjunta un resumen de los mismos incluyendo para cada tramo de río estudiado el caudal mínimo obtenido por cada uno de los métodos anteriormente descritos excepto el QBM, que se refleja aparte en la table posterior.

Tabla 2. Resumen de resultados de caudales mínimos

| Río | Q ₃₄₇ | Q ₃₃₀ | Q ₃₁₀ | Hoppe | | | ABF | 0.25Q _M | RVA | | Media Móvil | |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|--------|-------|--------------------|-------|--------|-------------|----------|
| | | | | 83 | 60 | 20 | | | 5 | 10 | Orden 25 | Orden 90 |
| Lempa (cabecera) | 0.66 | 0.95 | 1.36 | 41.51 | 11.76 | 1.85 | 0.95 | 5.60 | 0.76 | 1.03 | 0.74 | 1.61 |
| Lempa (desembocadura) | 84.07 | 97.10 | 106.01 | 619.60 | 254.47 | 115.86 | 97.81 | 89.82 | 91.76 | 102.06 | 88.38 | 111.46 |
| Suquiapa | 2.95 | 3.32 | 3.56 | 13.81 | 6.01 | 3.81 | 3.38 | 2.30 | 3.11 | 3.45 | 3.18 | 3.93 |
| Sucio | 9.43 | 10.43 | 11.14 | 30.46 | 16.62 | 11.73 | 10.50 | 5.04 | 10.30 | 10.94 | 9.77 | 12.09 |
| Metayate | 0.10 | 0.22 | 0.28 | 10.01 | 1.40 | 0.31 | 0.14 | 1.20 | 0.26 | 0.29 | 0.18 | 0.32 |
| Tamulasco | 0.07 | 0.10 | 0.11 | 4.45 | 0.97 | 0.13 | 0.06 | 0.51 | 0.09 | 0.10 | 0.07 | 0.11 |
| Sumpul | 11.23 | 14.38 | 16.91 | 42.83 | 29.22 | 19.65 | 18.12 | 7.85 | 23.16 | 24.20 | 16.07 | 24.39 |
| Sapo | 0.10 | 0.19 | 0.26 | 4.69 | 1.25 | 0.32 | 0.13 | 0.65 | 0.17 | 0.21 | 0.12 | 0.31 |
| Pampe | 1.88 | 2.08 | 2.21 | 10.82 | 3.51 | 2.35 | 2.27 | 1.63 | 2.05 | 2.16 | 1.98 | 2.50 |
| Paz | 6.83 | 7.83 | 8.52 | 49.44 | 16.71 | 9.21 | 8.69 | 7.75 | 7.21 | 8.16 | 7.50 | 9.82 |
| Cara Sucia | 0.38 | 0.55 | 0.63 | 2.44 | 1.43 | 0.71 | 0.53 | 0.40 | 0.52 | 0.60 | 0.43 | 0.78 |
| El Naranjo | 0.09 | 0.15 | 0.21 | 1.58 | 0.77 | 0.25 | 0.18 | 0.23 | 0.12 | 0.18 | 0.12 | 0.30 |
| Cuyuapa | 0.22 | 0.31 | 0.37 | 1.52 | 0.89 | 0.42 | 0.27 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.24 | 0.44 |
| Banderas | 3.10 | 3.91 | 4.42 | 16.03 | 8.18 | 4.83 | 4.41 | 2.63 | 4.40 | 4.75 | 3.69 | 5.31 |
| Chilama | 0.10 | 0.14 | 0.18 | 2.21 | 0.57 | 0.20 | 0.18 | 0.33 | 0.14 | 0.17 | 0.12 | 0.24 |
| Huiza | 0.12 | 0.17 | 0.20 | 2.34 | 0.60 | 0.23 | 0.21 | 0.35 | 0.18 | 0.21 | 0.15 | 0.27 |
| Jiboa | 0.51 | 0.70 | 0.84 | 11.03 | 4.46 | 1.00 | 0.84 | 1.61 | 0.60 | 0.73 | 0.60 | 1.31 |

| Río | Q ₃₄₇ | Q ₃₃₀ | Q ₃₁₀ | Hoppe | | | ABF | 0.25Q _M | RVA | | Media Móvil | |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|------|------|--------------------|------|------|-------------|----------|
| | | | | 83 | 60 | 20 | | | 5 | 10 | Orden 25 | Orden 90 |
| Jalponga | 0.12 | 0.15 | 0.17 | 2.57 | 0.85 | 0.20 | 0.17 | 0.35 | 0.13 | 0.16 | 0.12 | 0.18 |
| Acomunca | 0.09 | 0.10 | 0.13 | 2.10 | 0.73 | 0.16 | 0.12 | 0.29 | 0.09 | 0.11 | 0.08 | 0.13 |
| El Desparramo | 0.18 | 0.25 | 0.31 | 2.91 | 0.76 | 0.36 | 0.34 | 0.53 | 0.28 | 0.33 | 0.27 | 0.43 |
| Villerías | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 2.52 | 0.57 | 0.04 | 0.22 | 0.34 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.05 |
| Yamabal | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.91 | 0.40 | 0.13 | 0.12 | 0.15 | 0.10 | 0.13 | 0.09 | 0.20 |
| Sirama | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 7.16 | 1.19 | 0.04 | 0.22 | 0.96 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.03 |
| Pasaquina | 0.76 | 1.08 | 1.34 | 37.13 | 10.28 | 1.79 | 0.99 | 4.77 | 0.92 | 1.18 | 0.81 | 1.46 |
| El Sauce | 0.27 | 0.35 | 0.45 | 15.46 | 3.89 | 0.54 | 0.37 | 1.97 | 0.32 | 0.40 | 0.26 | 0.45 |
| Goascorán | 0.20 | 0.25 | 0.31 | 15.16 | 3.53 | 0.36 | 0.53 | 1.83 | 0.22 | 0.27 | 0.20 | 0.31 |

Tabla 3. Caudales mínimos obtenidos por el método QBM

| Río | Caudal Básico (m ³ /s) |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Lempa (cabecera) | 0.840 |
| Lempa (desembocadura) | 70.686 |
| Suquiapa | 2.748 |
| Sucio | 8.580 |
| Metayate | 0.109 |
| Tamulasco | 0.042 |
| Sumpul | 10.018 |
| Sapo | 0.084 |
| Pampe | 1.695 |
| Paz | 8.067 |
| Cara Sucia | 0.360 |
| El Naranjo | 0.083 |
| Cuyuapa | 0.223 |
| Banderas | 2.124 |
| Chilama | 0.150 |
| Huiza | 0.084 |
| Jiboa | 0.435 |
| Jalponga | 0.130 |
| Acomunca | 0.090 |
| El Desparramo | 0.333 |
| Villerías | 0.022 |
| Yamabal | 0.077 |
| Sirama | 0.011 |
| Pasaquina | 0.568 |
| El Sauce | 0.249 |
| Goascorán | 0.185 |

3.3 Caudales máximos

3.3.1 Metodología seguida para la estimación de la distribución estacional de caudales ecológicos máximos por métodos hidrológicos

Se refiere este capítulo a la estimación de los caudales máximos que no deben ser superados durante la operación y gestión ordinaria de las infraestructuras hidráulicas en las masas de agua situadas aguas abajo de dichas infraestructuras.

Estos caudales se estimarán para dos periodos: un periodo húmedo entre los meses de junio y octubre y un periodo seco que corresponde al resto de los meses del año, es decir, de noviembre a mayo, ambos inclusive.

La caracterización se realiza analizando los percentiles de excedencia mensuales de una serie representativa de caudales en régimen natural de al menos 20 años de duración, pero queda abierto al criterio del ejecutor el dato con el que ha de construirse la correspondiente curva de caudales clasificados que, lógicamente deberá estar en consonancia con las series disponibles. En estas condiciones se podrían seguir cuatro posibles procedimientos:

1. Selección por períodos (seco o húmedo) previa a la construcción de la curva de caudales clasificados:
 - Procedimiento 1. Serie de caudales medios mensuales máximos elegidos bien entre los meses de período seco o bien entre los meses de período húmedo. Se trataría de un dato (el máximo del período) por cada año, que procedería directamente de las aportaciones en régimen natural.
 - Procedimiento 2. Serie de caudales mensuales máximos elegidos bien entre los meses de período seco o bien entre los meses de período húmedo. Se trataría también de un dato (el máximo del período) por cada año, pero en este caso sería el máximo diario de la serie natural desagregada con patrones.
2. Selección por meses para, tras la obtención de la curva de caudales clasificados y establecido el percentil correspondiente, adoptar el máximo de cada uno de los dos períodos:
 - Procedimiento 3. Serie de caudales medios mensuales máximos elegidos mes por mes. Se trataría de un dato por cada mes (el medio mensual), que procedería directamente de las aportaciones en régimen natural.

- Procedimiento 4. Serie de caudales mensuales máximos elegidos mes por mes. Se trataría de un dato (el máximo) por cada mes, el medio diario de la serie natural desagregada con patrones

En los dos primeros procedimientos la curva de caudales clasificados sería única (una por cada período) y de ellas se tomaría el percentil que corresponda sin el 90%. El criterio podría ser para todos los casos igual, por ejemplo, fijar el 75% o el 80 % o diferente en función del punto donde cambie claramente la pendiente de la curva lo que denota que estamos ya en régimen de avenidas, es decir no ordinario. En general este punto en el que la pendiente sufre un claro incremento es precisamente el percentil 90 aunque en algunos casos este punto es más difuso y difícil de detectar con lo que quedaría una horquilla más o menos amplia para la decisión.

En el tercer y cuarto procedimientos se generarían 12 curvas que se agrupan en dos bloques: las del período seco y las del período húmedo. Entre ellas habría que elegir la del mes más desfavorable y dentro de ella el percentil adecuado.

3.3.2 Resultados

Los resultados obtenidos para los caudales máximos admisibles se presentan en el Anexo 4 para cada uno de los tramos de río de estudio, independientemente de que actualmente sólo sean de aplicación a los situados aguas abajo de las grandes infraestructuras. En la siguiente tabla se expone un resumen de los resultados obtenidos para el percentil 90.

Tabla 4. Resumen de resultados de caudales máximos

| Río | Húmedo (m ³ /s) | Seco (m ₃ /s) |
|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| Lempa (cabecera) | 109.57 | 17.17 |
| Lempa (desembocadura) | 1390.25 | 290.01 |
| Suquiapa | 32.14 | 6.80 |
| Sucio | 53.27 | 18.50 |
| Metayate | 23.17 | 2.11 |
| Tamulasco | 9.32 | 1.84 |

| Río | Húmedo (m ³ /s) | Seco (m ³ /s) |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Sumpul | 55.69 | 33.75 |
| Sapo | 14.03 | 2.09 |
| Pampe | 32.06 | 3.97 |
| Paz | 187.67 | 20.02 |
| Cara Sucia | 5.20 | 5.57 |
| El Naranjo | 3.94 | 2.03 |
| Cuyuapa | 2.84 | 1.56 |
| Banderas | 39.59 | 9.28 |
| Chilama | 8.66 | 0.86 |
| Huiza | 9.12 | 0.95 |
| Jiboa | 30.16 | 13.86 |
| Jalponga | 5.16 | 2.51 |
| Acomunca | 4.79 | 2.18 |
| El Desparramo | 17.05 | 1.57 |
| Villerías | 7.18 | 2.15 |
| Yamabal | 3.01 | 1.02 |
| Sirama | 23.82 | 10.64 |
| Pasaquina | 82.27 | 32.38 |
| El Sauce | 36.89 | 10.23 |
| Goascorán | 33.92 | 15.20 |

3.4 Tasa de cambio

3.4.1 Introducción y métodos

En los ríos regulados y para completar el régimen de caudales ecológicos de los mismos se definen dos tipos de caudales máximos: el denominado “caudal generador” y los caudales máximos que no deben ser superados durante la operación y gestión ordinaria de las grandes infraestructuras.

Por otra parte, los cambios bruscos de caudal que resultan perjudiciales para la mayoría de las especies acuáticas es preciso regularlos mediante el establecimiento de una tasa de cambio de caudal por unidad de tiempo que se debe aplicar a la hora de realizar sueltas desde algún tipo de infraestructura, ya sea para la explotación de centrales hidroeléctricas u otras demandas de entidad (en general regadíos) o caudal generador, obligado de forma periódica.

La aplicación de una tasa de cambio de caudal por unidad de tiempo es tan importante para los incrementos de caudal como para los decrementos, lo que supone la necesidad de contar con dos valores de “K”, uno para las fases de ascenso (K_a) y otro para las de descenso (K_d) de caudales.

La estimación se realizará a partir del análisis de avenidas ordinarias de una serie hidrológica representativa de caudales medios diarios de, al menos, 20 años de longitud.

En el caso que nos ocupa las series de partida han sido los caudales medios diarios obtenidos por desagregación de los caudales medios mensuales en régimen en el período 1970-2012, con ellas se ha obtenido la curva de diferencias de caudal entre dos días consecutivos clasificadas adoptándose como tasas de cambio ascendentes o descendentes las que corresponden al percentil 70, por cuanto se recomienda no superar este valor, aunque se admite llegar hasta el 90.

Estas tasas de cambio se obtienen a nivel diario, sin embargo, se apunta la conveniencia de que en determinados casos particulares se considere limitarlas a nivel horario cosa que podría ocurrir en cuencas pequeñas en las que las avenidas naturales no alcanzan nunca una duración superior al día ya sea por su corto tiempo de concentración o por la reducida duración del temporal o por ambas circunstancias a la vez.

En este sentido, la variación de caudales en los ríos debe ser lo más parecida posible a la natural o, lo que es lo mismo, debe ser similar a la forma de los hidrogramas de crecida que tiene el curso fluvial. Para que la variabilidad no sea demasiado alta para el funcionamiento natural del régimen del río.

Se trata pues de definir un hidrograma de referencia para la operación real en la presa cuando hayan de realizarse los necesarios desembalses.

De acuerdo con la bibliografía existente se trata de obtener una tasa de cambio K que se aplicará de forma gradual a lo largo del hidrograma y no en base a un valor constante. La duración puede fijarse entre cinco (5) y diez (10) minutos por escalón, rango que aun siendo arbitrario se considera que el resultado de la combinación de ese tiempo con la K aplicada a cada escalón es técnicamente operativa y da un resultado que se ajusta a lo ambientalmente deseado.

Hay que indicar que, tanto por el pequeño volumen de caudal a soltar para la implementación del régimen de caudales ecológicos como por razones de operatividad de los mecanismos de regulación de embalses y obras hidráulicas de regulación en general o de explotación de aprovechamientos hidráulicos, las tasas de cambio de caudal por unidad de tiempo deben ser calculadas para periodos de tiempo más pequeños, de acuerdo con el sentido común y las circunstancias de uso del agua y conservación del sistema fluvial, que converjan en cada caso. Para ello se utilizarán las siguientes expresiones, de aplicación general y basadas en conceptos de dinámica de poblaciones (Teoría ecológica. Margalef 1977).

$$Q_t = \frac{Q_{final}}{1 + e^{a-rt}}$$

para

$$r = \frac{a - \ln\left(\frac{1}{b} - 1\right)}{T_{total}} \quad \text{y} \quad a = \ln\left(\frac{Q_{final}}{Q_{inicial}} - 1\right)$$

donde “ Q_t ” es el caudal en un tiempo intermedio t , y “ b ” es un valor ajustable próximo a 1, siendo “ $Q_{inicial}$ ” y “ Q_{final} ” respectivamente los caudales de partida y final al que se quiere llegar.

3.4.2 Tasa de ascenso y descenso

La K_a debe oscilar entre el valor obtenido con la aplicación de la fórmula y un valor mínimo próximo a 1,000. La variación del valor de K_a será gradual a lo largo de la fase de ascenso y función del número de escalones predefinidos.

Las K_a mayores se aplican a los caudales menores (inicio ascenso), de modo que generen cambios relativos importantes, pero admisibles en valores absolutos. Por el contrario las K_a menores se aplican a la parte del hidrograma con caudales mayores (final ascenso) para obtener una atenuación de los cambios.

Al igual que para la fase de ascenso en la fase de descenso la K_d debe oscilar entre el valor máximo calculado y un valor mínimo próximo a 1,000. Las K_d menores se aplican a la parte del hidrograma con caudales mayores (inicio descenso) de modo que generen cambios reducidos. Por el contrario, las K_d mayores se aplican a los caudales menores generando cambios relativos importantes, pero admisibles en valores absolutos.

Fijado el tiempo total de ascenso o descenso en función de la diferencia entre el caudal máximo a desaguar y el caudal básico, se pueden obtener los diferentes valores de K_a (fase de ascenso) y K_b (fase de descenso) y, en consecuencia, los caudales correspondientes a cada escalón temporal.

La figura siguiente muestra unas curvas tipo resultante en las que puede observarse el efecto deseado en relación con la necesaria atenuación indicada para los momentos iniciales y finales de cada periodo.

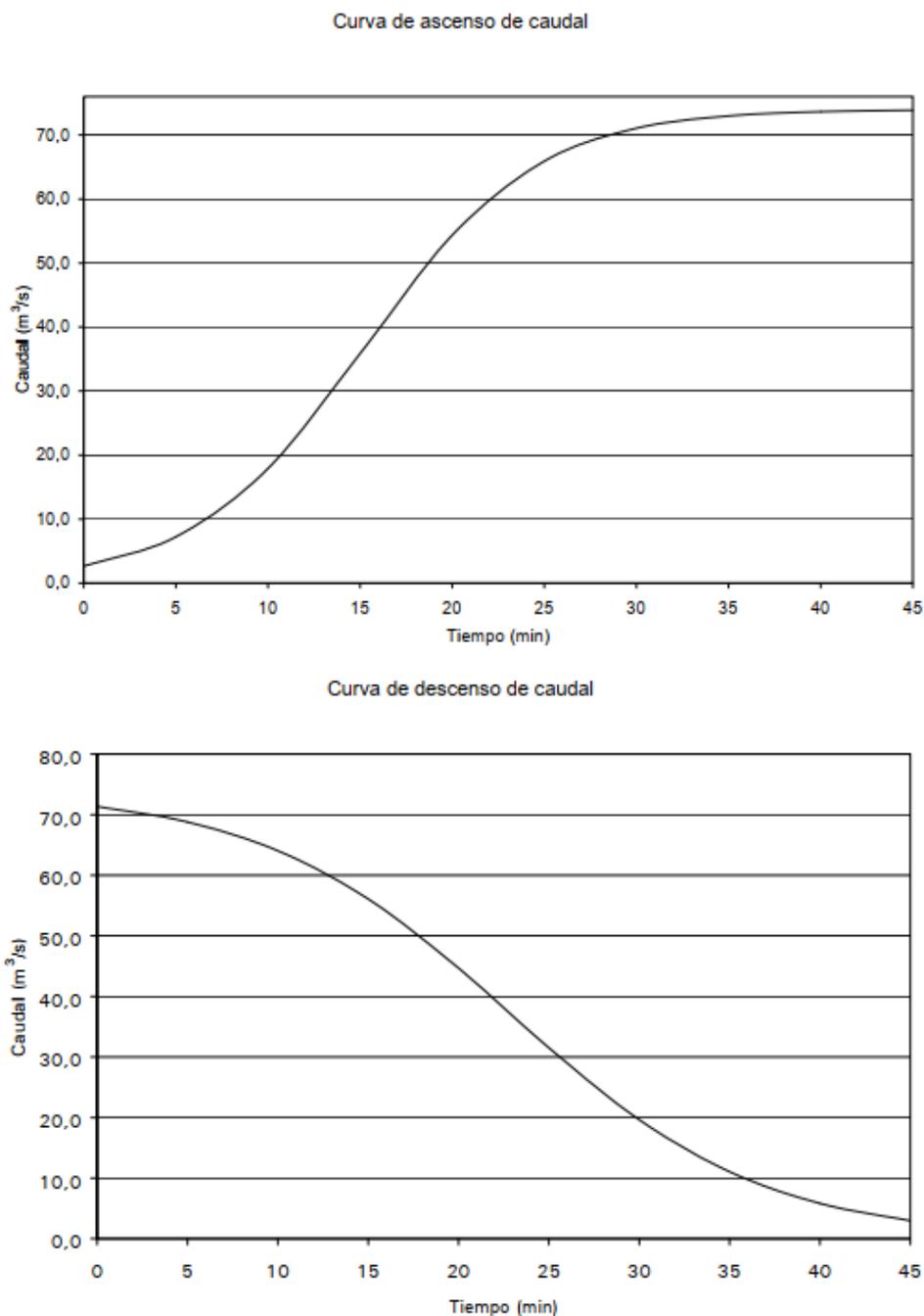


Figura 5. Ejemplo de curvas de ascenso y descenso de caudal. Fuente propia

El procedimiento descrito da unos resultados de tasa de cambio máxima a utilizar teniendo en cuenta los efectos que los cambios bruscos de caudal pueden producir en las comunidades biológicas presentes en el río pero pueden plantearse otros procedimientos

aplicables en general o, cuando menos en los ríos en los que el paso de avenidas es muy rápido, es decir muy inferior a las 24 horas y en los que la metodología descrita supone que las tasas de cambio diarias sean muy cortas y conducen a una prolongación de la operación en días excesiva, además de no acorde con la realidad del río.

En estos casos un método simple sería obtener un hidrograma triangular con base el tiempo de concentración de la cuenca y altura el caudal máximo a desembalsar. Este procedimiento presupone asimilar los caudales a desaguar a una avenida, del período de retorno que corresponda, producida por un temporal de duración igual al tiempo de concentración.

3.4.3 Resultados

Los resultados obtenidos para la tasa de cambio diaria se presentan en el Anexo 5 para cada uno de los tramos de río de estudio, independientemente de que actualmente sólo sean de aplicación a los situados aguas abajo de las grandes infraestructuras.

3.5 Caracterización del régimen de crecidas

3.5.1 Caudal generador

El caudal generador, al igual que la frecuencia y duración de la crecida asociada se obtiene mediante el análisis estadístico de una serie representativa del régimen hidrológico del río con, al menos, 20 años de datos. En concreto se aplicará la distribución de Gumbel, que es una de las que mejor se adaptan a valores extremos, a los caudales máximos anuales de la serie disponible, que es la serie de caudales medios mensuales en régimen natural (42 años) desagregada a nivel diario.

Se considera como caudal generador aquel que permitiría mantener la estructura actual del cauce, si bien algunos autores consideran que este valor de caudal generador se encuentra sobredimensionado para el mantenimiento del cauce ordinario que definiría dicho régimen, por lo que sería conveniente disminuirlo en la misma proporción que el caudal registrado medio interanual

3.5.2 Duración y momento de ocurrencia

SE caracteriza la crecida asociada al caudal generador incluyendo, además de su magnitud, su duración y estacionalidad. El mes más adecuado para la suelta del caudal generador de forma controlada, con un hidrograma similar al de las avenidas ordinarias naturales del río en el tramo objeto de estudio y siempre que se necesite porque no se produzcan sueltas de este orden de magnitud, es en el que de forma natural, se han registrado con más frecuencia valores diarios de caudales superiores al caudal generador previamente determinado.

3.5.3 Resultados

Los resultados obtenidos para la caracterización del régimen de crecidas se presentan en el Anexo 5 para cada uno de los tramos de río de estudio, independientemente de que se debe en principio circunscribir a los tramos situados aguas abajo de importantes infraestructuras de regulación.

4 CONCLUSIONES

4.1 Río Lempa

4.2 Río Suquiapa

4.3 Río Sucio

4.4 Río Metayate

4.5 Río Sumpul

4.6 Río Pampe

4.7 Río Paz

4.8 Río El Naranjo

4.9 Río Banderas

4.10 Río Chilama

4.11 Río Huiza

4.12 Río Jiboa

4.13 Río Jalponga

4.14 Río Acomunca

4.15 Río Desparramo

4.16 Río Yamabal

4.17 Río Sirama

4.18 Río Pasaquina

4.19 Río El Sauce

4.20 Río Goascorán