

UNIDAD 3 - APLICACIÓN DE DATOS HIDROLÓGICOS EN SERIES HISTÓRICAS Y ESTUDIOS

RESUMEN

LISTA DE FIGURAS.....	04
1 APLICACIÓN DE DATOS HIDROLÓGICOS EN SERIES HISTÓRICAS Y ESTUDIOS.....	05
1.1 Estudios de caudales máximos y mínimos.....	05
1.1.1 Caudales máximos.....	05
2 CAUDALES MÁXIMOS CON BASE EN UNA SERIE HISTÓRICA.....	08
2.1 Caudales mínimos.....	08
2.2 Cálculo de precipitación media en cuencas hidrográficas.....	09
2.2.1 Método de la Media Aritmética.....	10
2.2.2 Método de Thiessen.....	12
2.2.3 Método de las Isoyetas.....	15
3 REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES.....	18
3.1 Métodos que regionalizan parámetros de una distribución estadística.....	19
3.2 Métodos que regionalizan el caudal con un determinado riesgo.....	20
3.3 Métodos que regionalizan una curva de probabilidad adimensional y el factor de adimensionalidad.....	20
3.3.1 Fases del desarrollo de la regionalización.....	22
4 REGULARIZACIÓN DE CAUDALES (EMBALSES) Y CONTROL DE ESTÍOS....	23
4.1 Curva de permanencia.....	29
4.2 Control de estífo.....	31
5 PRONÓSTICO Y PROPAGACIÓN DE INUNDACIONES.....	32
5.1 Pronóstico de inundaciones.....	32
5.2 Propagación de inundaciones.....	34
6 SISTEMA DE SOPORTE A LA DECISIÓN (SSD).....	36
6.1 Herramienta computacional AQUANET.....	38
7 CALIDAD DEL AGUA: CAUDALES DE DILUCIÓN Y DECAÍDA DE CONTAMINANTES.....	43
7.1 Autodepuración.....	43
7.2 Caudal de dilución.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hidrograma típico

Figura 2 – Cuenca Hidrográfica utilizada para el cálculo de la precipitación media por el método de la media aritmética.

Figura 3 - Cuenca Hidrográfica utilizada para el cálculo de la precipitación media por el método de Thiessen.

Figura 4 – Trazado de líneas uniendo puntos pluviométricos de la cuenca en estudio.

Figura 5 – Determinación del punto medio y trazado de la línea perpendicular.

Figura 6 – Definición de la región de influencia de cada punto.

Figura 7 - División de las líneas escribiendo los valores de precipitación interpolados.

Figura 8 - Trazado de las isolíneas.

Figura 9 - Determinación de la precipitación media utilizando el método de las isoyetas.

Figura 10 – Hidrógrafo de entrada de un embalse

Figura 11 – Volúmenes actuales del embalse

Figura 12 - Curva de permanencia de caudal típico.

Figura 13 – Diagrama de masa para dos períodos de estío

Figura 14 – Propagación de una onda de creciente.

Figura 15 – Características de un sistema de soporte para decisiones

Figura 16 – Interfaz del modelo AQUANET

Figura 17 - Perfil de las zonas de autodepuración a lo largo del trecho de un río.

1 APLICACIÓN DE DATOS HIDROLÓGICOS EN SERIES HISTÓRICAS Y ESTUDIOS

Un conjunto de datos hidrológicos debe ser previamente analizado con base en algunos indicadores para que se puedan, efectivamente, desarrollar estudios y arribar a resultados deseados. De acuerdo con Chevallier (1993), es esencial recordar que la adquisición de datos hidrológicos de buena calidad es bastante difícil, aunque la medición y los aparatos sean simples. Sin embargo, es muy raro encontrar una serie de datos pluviométricos o pluviográficos confiable. Antes de analizar la consistencia de los datos, es de suma importancia conocer los métodos de adquisición y los aparatos usados.

Los temas a continuación mostraron la aplicación de algunos datos hidrológicos existentes.

1.1 Estudios de caudales máximos y mínimos

1.1.1 Caudales máximos

El caudal máximo de un río es entendido como el valor asociado a un riesgo de ser igualado o superado, que puede producir inundaciones sobre las márgenes. Estas pueden ser controladas por obras hidráulicas como conductos, desagüederos y canales, que permiten el drenaje del escurrimiento. La estimación del caudal máximo es de suma importancia para la determinación de las dimensiones de tales obras (TUCCI, 1993).

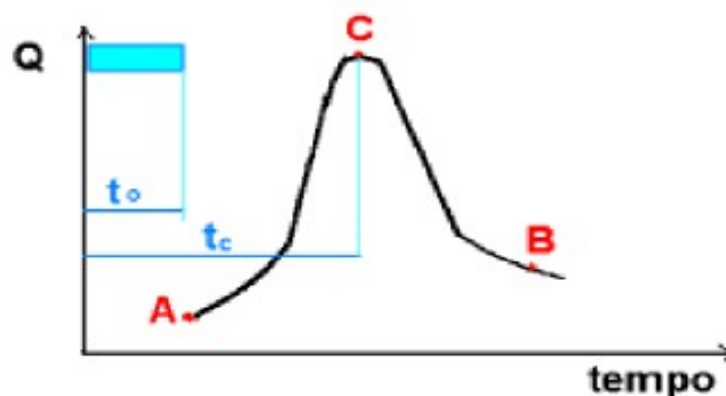
Los caudales máximos son de gran interés para el estudio de crecientes e inundaciones, siendo los caudales más elevados los que ocurren en una sección del río (DESTEFANI, 2005). Villela y Mattos (1975) explican que no toda creciente causa

inundaciones; la inundación se caracteriza por un gran caudal de escurrimiento y las inundaciones son consideradas cuando se produce un desborde de las aguas del canal.

Una herramienta importante en el estudio de los caudales máximos es el hidrograma, que representa gráficamente la distribución del caudal en función del tiempo en una determinada sección de un curso de agua. Esta distribución es interpretada como la respuesta de la cuenca hidrográfica o área de drenaje cuando estimulada por las lluvias que se precipitan sobre esa área (RIGHETTO, 1998). Un hidrograma de proyecto o hidrograma tipo es una secuencia temporal de caudales relacionada con un riesgo de incidencia, considerando el volumen, la distribución temporal y el valor máximo de la lluvia (pico del hidrograma) (TUCCI, 1993).

Un hidrograma típico producido por una lluvia intensa presenta una curva con un pico único (Figura 1). Sin embargo, si hubiere variaciones abruptas en la intensidad de la lluvia, una secuencia de lluvias intensas o una recesión anormal del escurrimiento subterráneo, el hidrograma generado puede presentar picos múltiples (Porto et al., 1999).

Figura 1 – Hidrograma típico



Fuente: Porto et al., 1999

La determinación de caudales máximos y la construcción de hidrogramas son necesarias para el control y la atenuación de las crecientes en una determinada área, la determinación de las dimensiones de obras hidráulicas de drenaje urbano, delimitación del perímetro de riego, la construcción de diques y aliviadores de represas, etc. Las estimaciones de estos valores tienen importancia decisiva en los costos y en la seguridad de proyectos de ingeniería y pueden ser realizadas con base (TUCCI, 1993):

- en el ajuste de una distribución estadística;
- en la regionalización de caudales; y
- en la precipitación (método racional).

Tucci (1993) cita que la distribución estadística puede ser ajustada si existieren datos históricos de caudal en el lugar de interés y las condiciones de la cuenca hidrográfica no se modificaren, y puede ser utilizada para la estimación del caudal máximo para un riesgo escogido. Ya en el caso de no existir datos o que exista una serie de datos pequeña, la estimación de caudal máximo puede darse por la regionalización de caudales máximos o por las precipitaciones. La regionalización permite estimar el caudal máximo en lugares sin datos con base en puntos de la región y será presentada posteriormente. Las precipitaciones máximas son transformadas en caudal a través de modelos matemáticos ya presentados.

2 CAUDALES MÁXIMOS CON BASE EN UNA SERIE HISTÓRICA

Todos los valores de caudales máximos deben ser ajustados y para esto son utilizadas distribuciones estadísticas. Las series de muestras para este cálculo de caudal máximo pueden ser anuales o parciales. Las series anuales son los caudales máximos ocurridos cada año, desconsiderando otros valores ocurridos. El ajuste de series parciales utiliza los valores máximos escogidos a partir de un determinado caudal elegido. La diferencia de resultados entre las dos series apenas ocurre para un tiempo de retorno pequeño (TUCCI, 1993).

2.1 Caudales mínimos

Los caudales mínimos son generalmente considerados los de estío, siendo representados por los valores más bajos de la serie histórica. Sin embargo, el caudal mínimo mensual es el valor inferior de cada mes y no es necesariamente un caudal correspondiente a un período de estío. Normalmente, el caudal mínimo es aplicado a la evaluación de la demanda mínima que un río puede ofrecer (DESTEFANI, 2005).

El caudal mínimo es utilizado para el planeamiento de la cuenca hidrográfica, para la evaluación del cumplimiento de los estándares ambientales del cuerpo receptor y para la asignación de cargas contaminantes. Así, la determinación de las eficiencias requeridas para los tratamientos de los diversos vertidos debe ser determinada en las condiciones críticas. Estas condiciones críticas en el cuerpo receptor ocurren exactamente en el período de caudal mínimo, en el que la capacidad de dilución es menor. El caudal crítico debe ser calculado a partir de datos fluviométricos históricos del curso de agua (VON SPERLING, 1996).

Es un importante parámetro hidrológico con gran aplicación en los estudios de planeamiento y gestión del uso de los recursos hídricos. Además de ello, constituye un importante instrumento de la Política Nacional de los Recursos Hídricos de Brasil, puesto que proporciona la estimación estadística de la disponibilidad hídrica de los escurrimientos naturales de agua.

Teniendo en cuenta la necesidad de establecer directrices generales para la definición del caudal mínimo remanente, a ser observado en las evaluaciones de disponibilidad hídrica, el Consejo Nacional de Recursos Hídricos - CNRH publicó la Resolución N° 129, del 29 de junio de 2011, definiendo tales directrices.

De acuerdo con Tucci (1993), los caudales mínimos, en algunos casos, se caracterizan por los menores valores de las series anuales. Son asociados a una duración t . Por ejemplo, el caudal mínimo de un año cualquiera con duración de 30 días, indica que es el menor valor del año del caudal medio de 30 días consecutivos.

Usualmente, el caudal mínimo de 1 día tiene poca utilidad, ya que la secuencia de caudales bajos es la condición más crítica en la utilización del agua. La curva de probabilidad de caudales mínimos posibilita encontrar la estimación de riesgos de que se produzcan caudales menores que un valor enumerado. Esta curva puede ser utilizada en la regularización de caudal para abastecimiento de agua y riego, estudios de calidad del agua y otros tantos fines.

2.2 Cálculo de precipitación media en cuencas hidrográficas

Con el propósito de calcular la precipitación media en una superficie determinada, debemos utilizar las observaciones dentro de esa área o región (aledaños). La

precipitación media es dada como la lámina de agua con altura uniforme sobre un área considerada, que debe estar asociada a un período de tiempo.

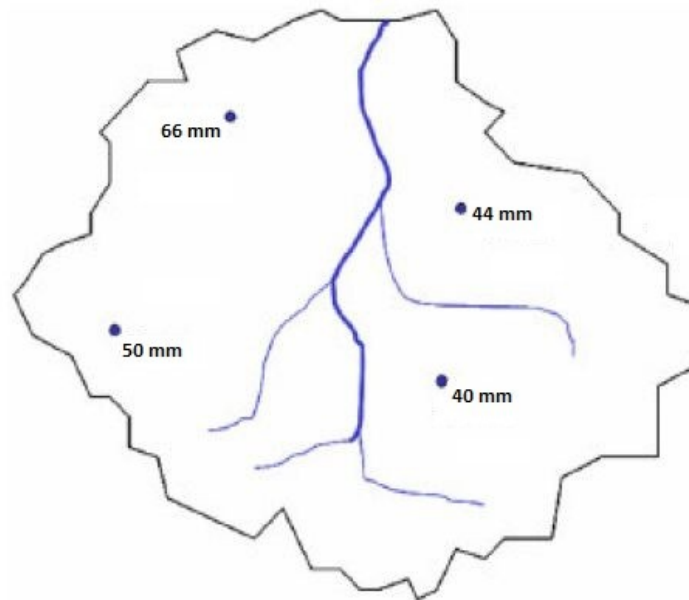
Para calcular la precipitación media en cuencas hidrográficas (o área) existen varios métodos, aunque los más usuales son el Método de la Media Aritmética, el Método de Thiessen y el Método de las Isoyetas, que serán vistos a continuación.

2.2.1 Método de la Media Aritmética

Según Bertoni y Tucci, 1993 la precipitación media es calculada a través de la media aritmética de los valores medios de precipitación. Es importante resaltar que el método ignora las variaciones geográficas de la precipitación, y por tanto solo puede ser aplicado en regiones donde ello puede ser hecho sin cometer grandes errores, como por ejemplo, en áreas planas con variación gradual, suave gradiente pluviométrico y con cobertura de puntos de medición bastante densa.

Un ejemplo de la aplicación de este método puede ser observado abajo en la figura 2.

Figura 2 – Cuenca Hidrográfica utilizada para el cálculo de la precipitación media por el método de la media aritmética.



Fuente: Teixeira, 2010.

Ecuación – Ecuación para determinación de la media aritmética

$$P_m = \frac{1}{n} \cdot \sum P_i$$

Donde:

P_n = precipitación media en el área (mm);

P_i = precipitación media en el i-ésimo pluviómetro (mm);

n = número total de pluviómetros.

Entonces:

$$P_m = \frac{(66 + 50 + 44 + 40)}{4} = 50 \text{ mm}$$

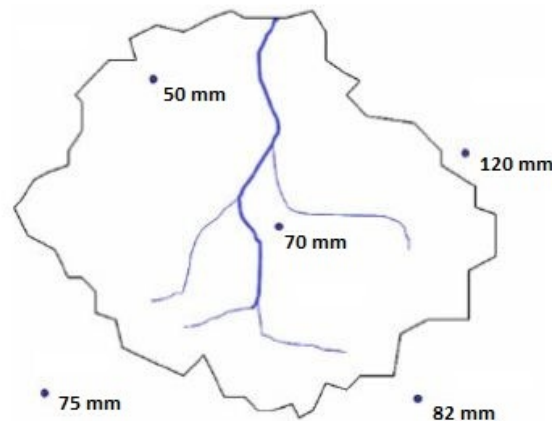
2.2.2 Método de Thiessen

El método de Thiessen también es conocido como el método del vecino más próximo, siendo uno de los más utilizados. Él considera que la no uniformidad de la distribución espacial de las estaciones, pero no tiene en cuenta la topografía de la cuenca.

En este método debe ser definida el área de influencia de cada punto pluviométrico dentro de la cuenca hidrográfica.

Conforme Teixeira (2010), para calcular la precipitación en una cuenca hidrográfica con valores medios de precipitación, en un área total de 100km^2 (Figura 3), debemos adoptar los siguientes pasos.

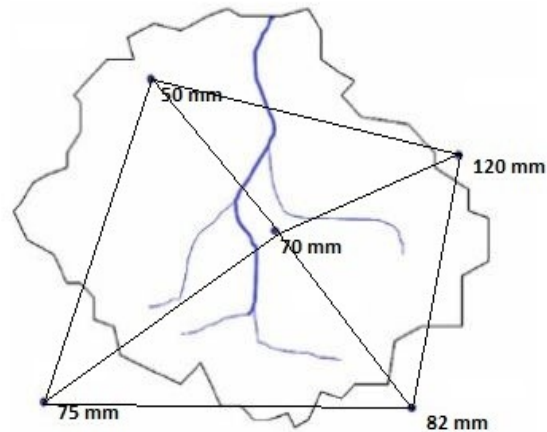
Figura 3 - Cuenca Hidrográfica utilizada para el cálculo de la precipitación media por el método de Thiessen.



Fuente: Teixeira, 2010

En primer lugar debemos trazar líneas que unan los puntos pluviométricos más próximos, conforme muestra la figura 4.

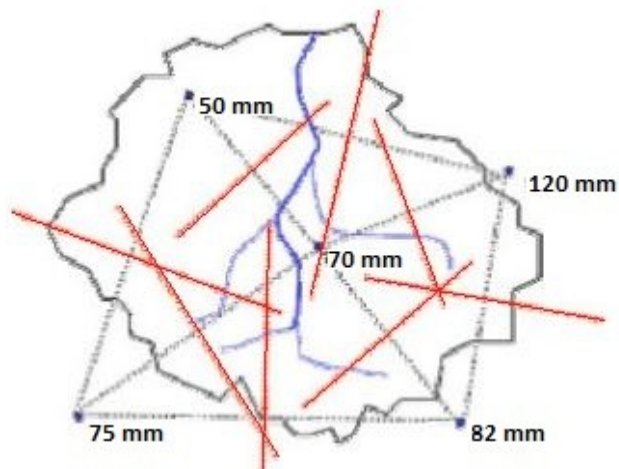
Figura 4 – Trazado de líneas uniendo puntos pluviométricos de la cuenca en estudio.



Fuente: Teixeira, 2010

Luego se debe determinar el punto medio en cada una de las líneas que fueron trazadas, y a partir de ello, trazar una línea perpendicular como muestra la figura 5.

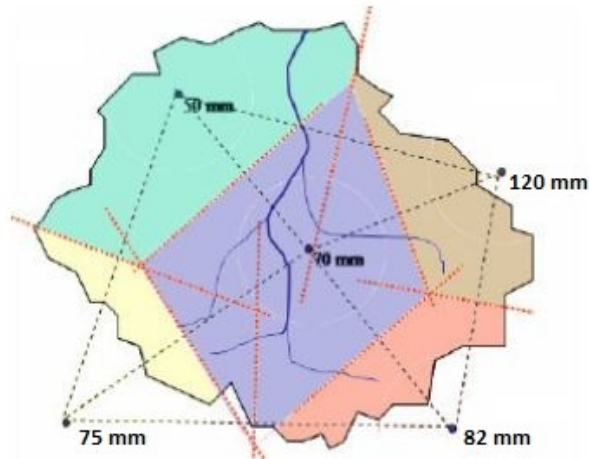
Figura 5 – Determinación del punto medio y trazado de la línea perpendicular.



Fuente: Teixeira, 2010

A través de la intercepción de las líneas medias que fueron trazadas entre si, más el límite de la cuenca, tenemos el área de influencia de cada uno de los puntos conforme muestra la figura 6.

Figura 6 – Definición de la región de influencia de cada punto.



Fuente: Teixeira, 2010

Según Teixeira (2010), resulta que:

El área sobre la influencia del punto con 120 mm es de 15 km²;

El área sobre la influencia del punto con 70 mm es de 40 km²;

El área sobre la influencia del punto con 50 mm es de 30 km²;

El área sobre la influencia del punto con 75 mm es de 5 km²;

El área sobre la influencia del punto con 82 mm es de 10 km².

Entonces, la precipitación media de la cuenca será dada por:

Ecuación – Precipitación media

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{A}$$

Donde:

A_i : área de influencia del punto i ;

P_i : precipitación registrada en el punto i ;
 A : área total de la cuenca.

De este modo resulta que:

$$P_m = 120 \cdot \frac{15}{100} + 70 \cdot \frac{40}{100} + 50 \cdot \frac{30}{100} + 75 \cdot \frac{5}{100} + 82 \cdot \frac{10}{100}$$

$$P_m = 73 \text{ mm}$$

Si el método de la media aritmética fuese utilizado tendríamos apenas dos puntos en el interior de la cuenca, y así la media sería 60 mm. Y en el caso de ser realizada la media utilizando los puntos que están fuera de la cuenca, llegaríamos a 79,5 mm.

2.2.3 Método de las Isoyetas

Este método utiliza líneas, llamadas isoyetas, que unen puntos de igual precipitación dentro de una cuenca hidrográfica.

Luego de obtener los valores de lluvia en cada punto, se unen estos con líneas rectas en las cuales se interpolan linealmente los valores para los cuales se pretende trazar las isolíneas¹. Considerando la misma cuenca del método de Thiessen, con área total de 100km², aplicaremos el método de Isoyetas.

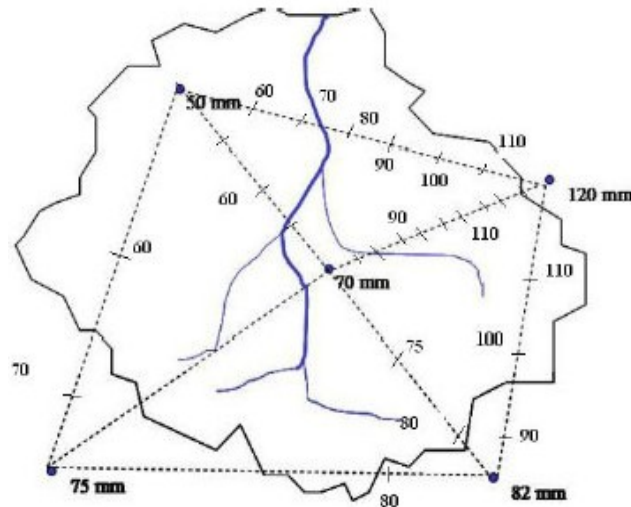
Debe ser hecho el mismo procedimiento mostrado en la figura 8, donde se deben trazar las líneas que unen los puntos pluviométricos más próximos entre si.

¹

Isolíneas son líneas de mismo valor; misma precipitación pluviométrica.

Según Teixeira (2010), luego se dividen las líneas escribiendo los valores de la precipitación interpolados linealmente, como muestra la figura 7.

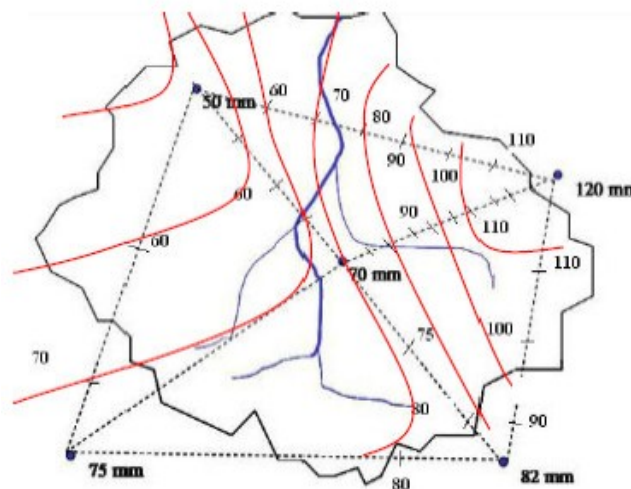
Figura 7 - División de las líneas escribiendo los valores de precipitación interpolados.



Fuente: Teixeira, 2010.

El próximo paso será trazar las isolíneas, conforme mostrado en la figura 8

Figura 8 - Trazado de las isolíneas.



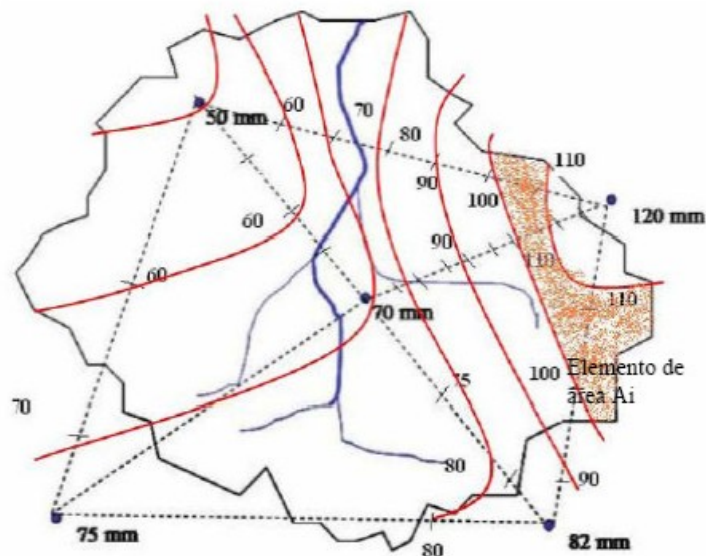
Fuente: Teixeira, 2010

Tras realizar el trazado de las isolíneas, se determina la precipitación media en la cuenca hidrográfica. La figura 9 muestra un área con sombreado que llamaremos área A_i , que es delimitada por dos isoyetas. Esta área es utilizada como ponderador, según la siguiente ecuación:

Ecuación

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Figura 9 - Determinación de la precipitación media utilizando el método de las isoyetas.



Fuente: Teixeira, 2010

3 REGIONALIZACIÓN DE CAUDALES

La regionalización de datos hidrológicos es el blanco principal de los estudios hidrológicos que involucran la implantación y operación de redes hidrométricas, la caracterización geomorfológica de las cuencas hidrográficas y la modelación matemática (SMITH, 1989² apud RIGHETTO, 1998).

La obtención de datos para los estudios en hidrología y recursos hídricos es muy trabajosa y, por eso, los hidrólogos intentan buscar formas y transferencias de informaciones de un lugar a otro de la cuenca, dentro de un área con comportamiento hidrológico semejante. Como la implantación, el mantenimiento y la operación de una red hidrométrica son relativamente caras, se torna importante la optimización de las informaciones disponibles (TUCCI, 1993).

De esta forma, Tucci (1993) explica que la regionalización de caudales consiste en un conjunto de herramientas que explotan al máximo las informaciones existentes, con miras a la estimación de las variables hidrológicas en lugares sin datos o con datos insuficientes, pudiendo ser usadas para explotar mejor las muestras puntuales y, por consiguiente, mejorar las estimaciones de las variables; verificar la consistencia de las series hidrológicas e identificar la falta de puntos de observación.

Tucci (1993) clasifica los métodos de regionalización en tres clases: métodos que regionalizan parámetros de una distribución estadística, métodos que regionalizan un evento de caudal con un determinado riesgo y los métodos de regionalización de la curva adimensional de frecuencias, denominados métodos de regionalización *index-flood*.

2

SMITH, J. A., 1989, "Regional Flood Frequency Analysis Using Extreme Order Statistics of the Annual Peak Record", *Water Resources Research*, vol. 25, nº 2, PP. 311 – 317.

De acuerdo con Pinto & Naghettini (1999)³ apud Davis & Naghettini (2000), independientemente del método de regionalización a ser utilizado, uno de los puntos cruciales es la definición de regiones estadísticamente homogéneas, o sea, de aquellas que contienen varias estaciones cuyas series son oriundas de poblaciones regidas por la misma distribución de probabilidades, con los parámetros de posición y escala variando entre las estaciones.

Los siguientes puntos esclarecerán cómo funciona cada método clasificado por Tucci, 1993.

3.1 Métodos que regionalizan parámetros de una distribución estadística

Este método analiza que una distribución estadística ajusta bien los datos de los puntos de la región escogida, considerando diferentes cuencas. Siendo μ y σ los parámetros, se obtienen las estimaciones $\mu_1, \sigma_1; \mu_2, \sigma_2; \dots; \mu_n, \sigma_n$, donde n es el número de cuencas o puntos. Los parámetros obtenidos son relacionados con las características físicas y meteorológicas de las cuencas, arribando a las siguientes expresiones:

$$\mu = f_1 (A, P, S, \dots)$$

$$\sigma = f_2 (A, P, S, \dots)$$

Donde:

A = área (km²);

P = precipitación (mm);

S = declive (m).

3

PINTO, E.J.A. & NAGHETTINI, M. Definición de regiones homogéneas y regionalización de frecuencia de las precipitaciones diarias máximas anuales de la cuenca del alto río São Francisco. Anales. 13° SIMPOSIO BRASILEÑO DE RECURSOS HÍDRICOS (CD-ROM), Belo Horizonte, 1999.

Para aquellos puntos que no poseyeren datos o que contaren con datos insuficientes, los parámetros μ y σ son estimados con base en las expresiones presentadas, luego de la determinación de las características físicas y climáticas de mapas disponibles. De esta forma, sabiendo cuáles son los parámetros de la distribución estadística, pueden ser encontrados los caudales con el riesgo deseado.

3.2 Métodos que regionalizan el caudal con un determinado riesgo

De igual modo que en el método anterior, las distribuciones de caudales de diferentes puntos o cuencas son ajustadas. El caudal de algunos tiempos de retorno de interés es obtenido a partir de las distribuciones ajustadas en cada punto y con base en estos datos la regresión es establecida entre los caudales y las características físicas de las cuencas, obteniéndose las siguientes relaciones:

$$Q_{T1} = G_1 (A, P, S, \dots)$$

$$Q_{T2} = G_2 (A, P, S, \dots)$$

$$Q_{Tn} = G_n (A, P, S, \dots)$$

Donde:

$G_n(A, P, S, \dots)$ = ecuación de regresión para el tiempo de retorno T_m .

Para aquellas cuencas sin datos son utilizadas directamente las ecuaciones anteriores. En este procedimiento se pueden utilizar diferentes distribuciones para los puntos.

3.3 Métodos que regionalizan una curva de probabilidad adimensional y el factor de adimensionalidad

Este método dimensiona las curvas individuales de probabilidad con base en su valor medio, y establece una curva adimensional regional media de los puntos con la misma tendencia. Esta curva puede ser expresada por:

$$F_1(Q_T/Q_m) = 1/T$$

Donde:

T= tiempo de retorno

Q_m = valor medio

Q_T = valor con tiempo de retorno T

Separando los dos componentes de probabilidad, el caudal medio y la curva adimensional de probabilidad, es posible estimar cada una de las partes, de acuerdo con las informaciones disponibles, siendo muy útil principalmente para lugares con series de menos de 10 años.

Tucci (1993) cita además otros dos métodos de regionalización. Uno de ellos es el de funciones específicas que relacionan variables hidrológicas, resultando en una curva de regularización, curva de infiltración y curva de permanencia. Son usualmente utilizados dos procedimientos: ajuste de una función matemática a los datos de cada punto y regionalización de los parámetros de la función matemática y; adimensión de la función, obtención de una curva media con base en las curvas adimensionales de los diferentes puntos, y regresión entre la variable de adimensión y características físicas y climáticas. El otro método es el de parámetros de modelos hidrológicos, que no siempre presentan relaciones definidas entre las características físicas del sistema y sus parámetros. Cuando el lugar de interés posee datos observados, la estimación de estos parámetros puede ser realizada. Sin embargo, cuando esto no ocurre, la estimación puede ser hecha con base en experiencias de otras cuencas.

Uno de los criterios para este procedimiento es la regionalización, que posee dos criterios: determinación de ecuación de regresión entre el parámetro o combinación de parámetros y características físicas y climáticas de las cuencas, que puedan ser estimadas con base en mapas y; definición del intervalo de variación posible de los parámetros con base en informaciones características de las cuencas.

3.3.1 Fases del desarrollo de la regionalización

La regionalización de las curvas de probabilidad de caudales aquí presentada sigue los métodos que regionalizan una curva de probabilidad adimensional y el factor de adimensionalidad. Las fases pueden ser las siguientes (TUCCI, 1993):

- Análisis de los datos básicos;
- Curva adimensional de probabilidad;
- Regresión del caudal de adimensión;
- Regiones homogéneas;
- Mapeo de los caudales específicos.

4 REGULARIZACIÓN DE CAUDALES (EMBALSES) Y CONTROL DE ESTÍOS

La regularización de los caudales naturales es un proceso que tiene como objetivo la mejor utilización de los recursos hídricos. Para este fin, es necesario que se promueva el represamiento de las aguas, a través de la construcción de represas (embalses) en secciones bien determinadas de los cursos de agua naturales. Con la regularización de los caudales por medio de la construcción de embalses se pretende, además, alcanzar otros diversos objetivos, entre ellos: la atención a las necesidades del abastecimiento urbano o rural (riego); el aprovechamiento hidroeléctrico (generación de energía); la atenuación de crecientes (combate de inundaciones); el control de estíos; el control de sedimentos; actividades recreativas; y también permitir la navegación fluvial.

Puesto que el aprovechamiento del agua prevé la retirada de un caudal de una dada proporción de un río, se debe confrontar este valor con los caudales naturales de este curso de agua. Si los caudales naturales fueren expresivamente mayores que la retirada, incluso durante los períodos de estío (caudales naturales mínimos), no existirá la necesidad de regularización del caudal. Sin embargo, si el caudal a ser retirado es superior al mínimo del curso de agua, se torna necesaria la reserva de los excesos sobre el caudal derivado para atender a los períodos cuyos caudales naturales son menores que aquellos derivados (VILLELA & MATTOS, 1975).

Sabiendo que los caudales fluviales son muy variables, teniendo como resultado visible la incidencia de exceso hídrico en los períodos húmedos y la carencia en los períodos de sequía, se torna necesario preconizar la formación de reservas durante las épocas lluviosas, a fin de suplir las necesidades durante los períodos secos. Como las incidencias de lluvias son eventuales, no es posible prever con precisión el tamaño de reserva de agua necesaria para suplir la demanda futura, llevando los planeadores de recursos hídricos a dos situaciones ineficientes: superdimensión de las reservas a

costas de altas inversiones, o la subdivisión de las reservas considerando el racionamiento durante el período seco (LANNA, 1993).

Lanna (1993) también alega que la dimensión óptima para un embalse deberá ser considerada en función de un compromiso entre el costo de inversión para su implantación y el costo de la escasez de agua durante los períodos secos. El costo de la inversión es directamente proporcional y el segundo es inversamente proporcional a la dimensión del embalse. Aún así, existen otros factores que pueden influir en la toma de decisión: la demanda de agua también puede ser variable y aleatoria como el caudal, y existen pérdidas de agua en un embalse, por evaporación, infiltración y pérdidas. El hecho es que el estudio de un embalse de regularización de caudales exige el conocimiento de su dimensión, de los caudales afluentes, de la demanda a ser suplida y de las pérdidas que podrán ocurrir.

En primer lugar, conocidos los caudales naturales, o de entrada en el embalse, se puede calcular el volumen para atender a una dada ley para los caudales regularizados o de salida del embalse. Es posible también, dado un cierto embalse, determinar una ley, para los caudales regularizados, que más se acerque a la regularización total, esto es, a la derivación constante del caudal medio. Las soluciones a estos problemas son básicas para el proyecto y operación de embalses de regularización de caudales (VILLELA & MATTOS, 1975).

Para calcular el volumen del embalse con el propósito de atender a una ley de regularización, se aplica la siguiente función:

Ecuación – Ley de regularización

$$Y(t) = \frac{Q_r(t)}{Q_{med}}$$

Donde:

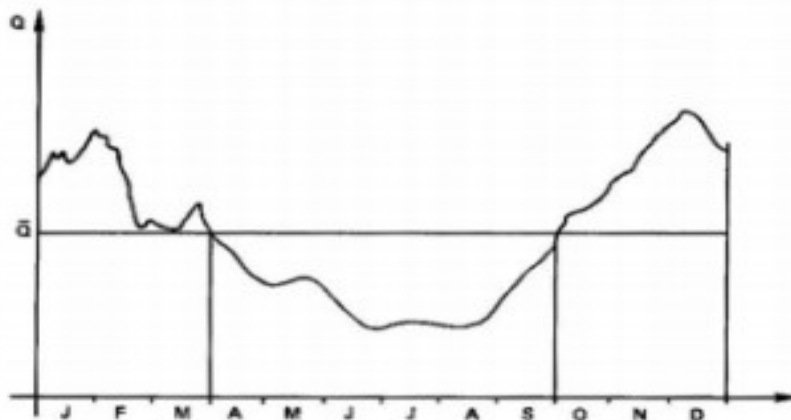
$Q_r(t)$ = caudal regularizado en función del tiempo (t) (suma de todos los caudales que emanan del embalse);

Q_{med} = caudal medio en el período considerado.

De acuerdo con Villela & Mattos (1975), la capacidad mínima de un embalse para atender a una cierta ley de regularización es dada por la diferencia entre el volumen acumulado que sería necesario para atender a las exigencias de esa ley durante el período más crítico de estío y el volumen acumulado que afluye al embalse en el mismo período. Teniendo en cuenta diversos períodos de estío, el más crítico es aquel que tiene como resultado la mayor capacidad del embalse. De esta manera, se puede calcular la capacidad del embalse para varios períodos de estío y adoptar la mayor capacidad encontrada.

La figura 10, por ejemplo, presenta un hidrógrafo con datos de entrada de un año:

Figura 10 – Hidrógrafo de entrada de un embalse



Fuente: Villela & Mattos, 1975

Observando la figura, es fácil percibir que el período crítico para esta ley de regularización es determinado entre los meses de abril y septiembre.

Suponiendo que se desea la siguiente ley de regularización:

$$Y(t) = 1$$

Esto significa que se desea un caudal regularizado constante e igual a la media (Q_{med}).

El volumen necesario para mantener el caudal Q_{med} , durante los meses críticos es:

Ecuación – Volumen necesario

$$V_n = Q_{med} \cdot (\Delta t_{abr.} + \Delta t_{mai.} + \Delta t_{jun.} + \Delta t_{jul.} + \Delta t_{ago.} + \Delta t_{set.})$$

Donde:

V_n volumen necesario (m^3);

$\Delta t_{abr.}$ = número de segundos del mes de abril;

$\Delta t_{mai.}$ = número de segundos del mes de mayo y así en adelante;

Q_{med} = caudal medio (m^3/s).

El volumen que llega (V_a) al embalse en este período es:

Ecuación – Volumen que llega al embalse

$$V_a = Q_{abr.} \Delta t_{abr.} + Q_{mai.} \Delta t_{mai.} + Q_{jun.} \Delta t_{jun.} + Q_{jul.} \Delta t_{jul.} + Q_{ago.} \Delta t_{ago.} + Q_{set.} \Delta t_{set.}$$

De esta forma, la capacidad (C_r) mínima del embalse para mantener aquella ley de regularización, será:

Ecuación – Capacidad mínima

$$C_r = V_n - V_a$$

Donde:

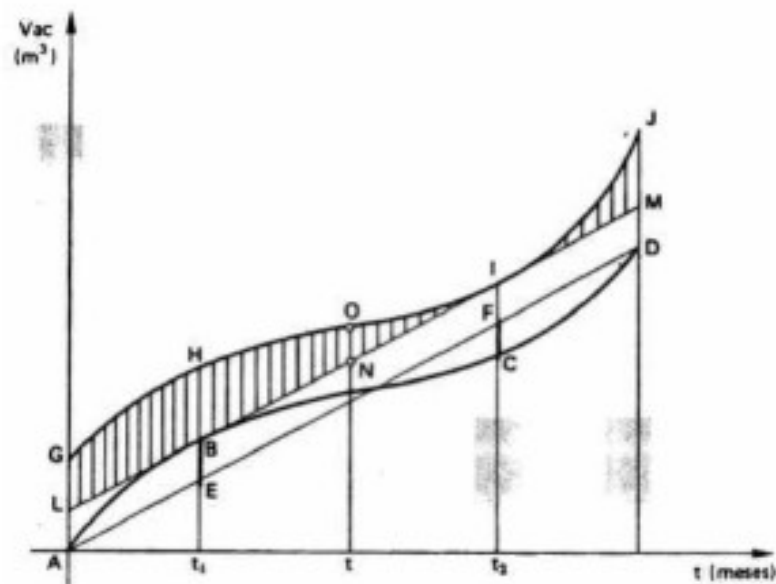
C_r = capacidad mínima del embalse (m^3);

V_n = volumen necesario (m^3);

V_a = volumen que llega al embalse (m^3).

Luego de conocer la ley de regularización y la capacidad del embalse, es posible determinar los volúmenes actuales del embalse. Vilela y Mattos (1975) sugieren un diagrama de masas (curvas ABCD), y que, a través de la ley de regularización, se construya la curva integral de los caudales regularizados (curva AEFD de la Figura 11).

Figura 11 – Volúmenes actuales del embalse



Fuente: Villela & Mattos, 1975.

Conforme fue visto, la capacidad del embalse será dada por la suma de los segmentos BE y CF. Construyendo la curva del diagrama de masas desplazada hacia arriba a partir del valor de la capacidad del embalse, se obtiene la curva GHIJ.

Diseñando la curva integral de los caudales regularizados desplazada hacia arriba del segmento BE, se obtiene la recta LBIM. Observando la figura, se puede verificar que en el tiempo t_1 el embalse estará completamente lleno, ya que se derivó un caudal n_p intervalo (Dt_1) mucho menor que los caudales naturales.

En el intervalo de tiempo (t_1, t_2) el embalse se vaciará, ya que se derivará un caudal mayor que los naturales. Entonces, suponiendo que en el tiempo t_1 el embalse esté completamente lleno, los volúmenes actuales (V) del embalse serán dados por:

Ecuación – Volumen actual del embalse

$$V = C_r + \int_{t_1}^t Q dt - \int_{t_1}^t Q_r dt$$

Donde:

V = volumen en el tiempo t (m^3);

C_r = capacidad del embalse (m^3);

Q = caudales naturales (m^3/s);

Q_r = caudales regularizados (m^3/s);

t = tiempo genérico (s).

Es fácil observar que el volumen (V) es dado por el segmento NO de la figura y además que, para cualquier tiempo t , los volúmenes del embalse pueden ser dados por las diferencias entre las curvas $GHOIJ$ y $LBNIM$.

4.1 Curva de permanencia

La curva de permanencia también es conocida también como curva de duración. La elaboración de la curva de permanencia consiste en la construcción de un gráfico que informa con qué frecuencia el caudal de dada magnitud es igualado o excedido durante el período de registro de caudales. La figura 12 presenta una curva de permanencia de caudal típico.

Figura 12 - Curva de permanencia de caudal típico.



Fuente: Barbosa, 2005

En un sentido estadístico la curva de permanencia representa una curva de distribución de las frecuencias acumuladas de incidencia de los caudales en un río determinado.

Construcción de la curva de permanencia

Esta curva es construida con base en los registros de caudales en una determinada estación fluviométrica. La curva puede ser construida para caudales diarios (caudal

medio diario), caudales medios mensuales o en caudales medios anuales. Según Barbosa (2005), es muy probable que la curva de permanencia con caudales medios anuales difiera significativamente de aquella construida con caudales medios mensuales, o diarios. Como en general existe una variación media del caudal de un río mes a mes, que mantiene un valor medio anual aproximadamente constante, la curva de permanencia para caudales medios mensuales tendrá una forma aproximada a la de la Figura 12.

Para construir la curva de permanencia, el procedimiento utilizado se presenta como a continuación:

Distribuir los caudales observados en el período considerado en orden decreciente;
Con la amplitud de la variación de los caudales, se definen los intervalos de clase;

Una primera idea es hacer $N = \sqrt{n} \rightarrow k = \frac{A}{N}$

Llamando:

n = número de datos de caudales medios;

A = amplitud de la variación de los caudales ($Q_{\max} - Q_{\min}$);

N = número de intervalo de clase;

K = amplitud del intervalo de clase.

Distribuir los intervalos en orden decreciente y verificar el número de eventos ocurridos en cada intervalo – frecuencia absoluta.

Calcular la frecuencia relativa (frecuencia absoluta / número de datos) para cada intervalo y acumularla siguiendo el orden anterior.

Representar en un gráfico el límite inferior de cada intervalo (ordenada) y la correspondiente frecuencia relativa acumulada (abscisa) y se obtendrá la curva de permanencia de los caudales.

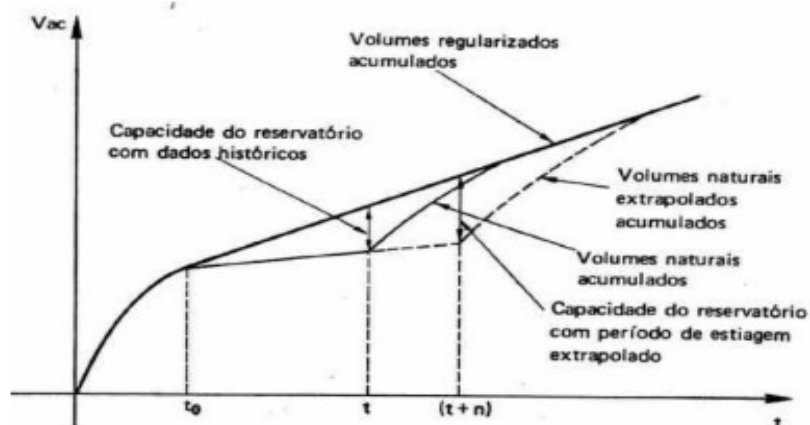
4.2 Control de estío

Cuando consideramos una historia de caudal de, por ejemplo, 30 años, la elección del período más crítico de estío, o sea, de menores caudales durante el mayor intervalo de tiempo, tendrá el valor estadístico de 30 años de tiempo de recurrencia.

La determinación de las dimensiones de un embalse para conocer su capacidad es, a fines prácticos, adecuada cuando se usan estos datos. No obstante, cuando se cuenta solo con una historia pequeña de datos (5 años, por ejemplo), el período más crítico de estío puede no ser el adecuado para la determinación de las dimensiones del embalse. De esta forma, se puede estudiar, extrapolando la curva de probabilidad de los períodos de estío, cuál es el número de días sin lluvia que tendría la probabilidad, por ejemplo, de 1 a 30. A partir de la ecuación de agotamiento, se puede encontrar el mínimo caudal al final de ese período.

La curva así extrapolada sería más adecuada para la determinación de las dimensiones del embalse que la curva de los datos históricos de 5 años. La figura 13 muestra más claramente el efecto del estío en la determinación de las dimensiones del embalse.

Figura 13 – Diagrama de masa para dos períodos de estío



Fuente: Villela & Mattos, 1975.

5 PRONÓSTICO Y PROPAGACIÓN DE INUNDACIONES

5.1 Pronóstico de inundaciones

Los anegamientos importan eventos anormales en el escurrimiento superficial, que ocurren debido al exceso de lluvia, del que resulta muchas veces una inundación. La inundación, a su vez, es el desborde de agua del canal natural de un río.

Calcular la inundación en un determinado río tiene como objetivo suministrar el máximo caudal para la elaboración del proyecto y, cuando posible el hidrograma de proyecto, que muestra la variación del caudal en el tiempo. Para obtener el caudal de proyecto, una de las maneras es realizando la extrapolación de los datos históricos para condiciones críticas, aplicando estadística de los datos de caudal máximos ya observados. Es importante recordar que el caudal de proyecto está siempre asociado al período de retorno.

El período de retorno, o tiempo de recurrencia como también es conocido, no es más que el tiempo medio en años en que un evento es igualado o superado por lo menos una vez.

Existe la siguiente relación entre el período de retorno y la probabilidad de ocurrencia (P): $T = 1/P$

Para ejemplificar, resulta que: si una creciente es igualada o excedida **en media cada 20 años** tendrá un período de retorno $T = 20$ años. En otras palabras, se dice que esta creciente tiene 5% de probabilidad de ser igualada o excedida en **cualquier año**.

Según Villela y Mattos (1975) la determinación del período de retorno de las inundaciones en obras hidráulicas se hace por criterios, tales como:

- Vida útil de la obra;
- Tipo de estructura;
- Facilidad de reparación y ampliación; y
- Peligro de pérdida de vida.

Así, al dimensionar una:

- Represa de tierra: $T = 1000$ años;
- Represa de concreto: $T = 500$ años;
- Galería de aguas pluviales: $T = 5$ a 20 años;
- Pequeñas represas de concreto para fines de abastecimiento de agua: $T = 5$ a 100 años.

Otro criterio utilizado para la elección de T es la fijación del riesgo que se desea correr, en el caso que la obra falle dentro de su tiempo de vida útil.

Según Villela y Mattos (1975) el riesgo de que la obra falle una o más veces a lo largo de su vida útil puede ser deducido de los conceptos fundamentales de la teoría de las probabilidades, que es igual a:

- Ecuación – Teoría de las probabilidades

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Donde:

T = período de retorno (años);

n = vida útil de la obra (años);

R = riesgo permisible (%).

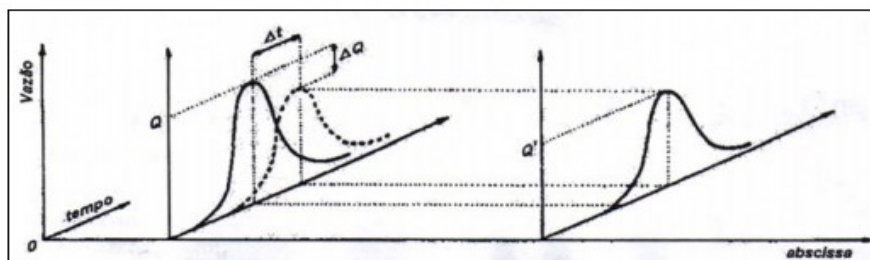
Con miras a ejemplificar la ecuación citada anteriormente, se tiene que: suponiendo que el riesgo de canalización de un río determinado falle una o más veces considerando que el proyecto haya sido efectuado para $T = 500$ años con vida útil de 50 años, ¿cuál es su riesgo permitido con base en estas afirmaciones?

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{500}\right)^{50} = 0,1 = 10\%$$

5.2 Propagación de inundaciones

Luego de la ocurrencia de una precipitación acontece un evento de creciente, donde se forma una onda que desplaza el flujo del curso de agua desde aguas arriba hacia aguas abajo. Este desplazamiento es denominado propagación. Cuando se produce el fenómeno de propagación, ocurre una disminución del caudal máximo del evento y el aumento del tiempo de propagación. La figura 14 muestra la propagación de una onda de creciente.

Figura 14 – Propagación de una onda de creciente.



Fuente: Baptista (1995)⁴ apud Marins (2004).

⁴

Baptista, M. B. Contribution a la l'étude de la propagation de curves en Hidrologie. Tese de Doutorado: ENPC, 1990.

Según Marins (2004), se puede decir entonces que la onda de creciente sufre una amortiguación de su caudal máximo, o caudal pico. Esta reducción es función de características físicas del curso de agua donde se produce el escurrimiento.

Según Holtz y Pinto (1976) cuando conocemos el hidrograma de los caudales afluentes (Q_a) al embalse o a la extremidad aguas arriba del río, el problema se resume a la determinación del correspondiente hidrograma de caudales efluentes (Q_e), a través de la descarga de la represa o de la sección aguas abajo del trecho de río. El fenómeno es descrito por la ecuación de continuidad.

- Ecuación – Ecuación de continuidad

$$Q_a = Q_e + \frac{dV}{dT}$$

Donde:

dV = variación del volumen acumulado en el embalse o en el propio río, debido a su variación de nivel, en el intervalo elemental de tiempo dT .

La resolución de la ecuación de continuidad es bastante simple para los embalses, dado que los efectos dinámicos son despreciables y las variables Q_e y V son funciones, exclusivamente, del nivel de las aguas represadas, o sea, en condiciones existentes aguas arriba.

Para propagación de crecientes en embalses dotados de compuertas, consultar Holtz y Pinto (1976).

6 SISTEMA DE SOPORTE A LA DECISIÓN (SSD)

Con el correr del tiempo, las demandas de agua están creciendo, de modo que están aumentando los conflictos y disputas por este recurso, haciendo que los sistemas se tornen mayores y más complejos, presentándose la necesidad de planeamientos estratégicos que incluyan la eficiencia económica, sustentabilidad, flexibilidad y equidad.

La eficiencia del uso del agua es un asunto de suma preocupación entre órganos gestores de recursos hídricos en todo el País. Una meta importante a alcanzar es el uso racional del agua a través de acciones de planeamiento y de la gestión de recursos hídricos. Como diversos ambientes poseen múltiples usos, el buen conocimiento de las necesidades de los diversos usuarios y de las disponibilidades hídricas es fundamental para una buena gestión; No obstante, las incertidumbres hidrológicas, las variaciones de las demandas y el gran número de variables representativas de los procesos físicos, químicos y biológicos, atribuyen un elevado nivel de complejidad al análisis de los sistemas de recursos hídricos (CARVALHO et al., 2009).

Así, en el proceso de gestión de recursos hídricos, la decisión debe ser escogida entre las diversas alternativas existentes. Estas decisiones deben ser tomadas a partir de conocimientos sólidos sobre los aspectos ambientales, hidrológicos, económicos, políticos y sociales. Para tanto, es necesaria la elección de la mejor solución entre las alternativas existentes (ZORZAL, 2009).

Para auxiliar en la toma de decisiones y permitir tratar y resolver los problemas de gestión de recursos hídricos de forma más rápida y eficiente, pueden ser utilizadas determinadas herramientas, como los Sistemas de Soporte para Decisiones (SSD), que tornan las acciones más claras y objetivas. Carvalho (2003) resalta que estas

herramientas tienen por objetivo ayudar a individuos que toman decisiones en la solución de problemas no estructurados (o parcialmente estructurados).

Según Carvalho (2003), existen actualmente algunos SSD que simulan con eficiencia sistemas complejos de recursos hídricos, así como modelos que calculan la demanda de riego total y/o suplementaria, aunque ninguno de ellos incorpora estas dos características.

Porto & Azevedo (1997)⁵ apud Carvalho (2003), resaltan que el SSD no es construido para tomar decisiones, sino para apoyar o asistir a un individuo o grupo de individuos en la ejecución de esta tarea. Es necesario definir cuáles son los principios que orientarán la elección, sea para llegar a una solución “óptima” o a una solución “satisfactoria”, dispuesto a asumir riesgos o no. Se debe procurar expresar las alternativas en términos monetarios o en términos de otro indicador de desempeño (por ejemplo, atención a un caudal de demanda con determinada garantía).

La figura 15 presenta de modo general, los atributos de un sistema de soporte de decisiones.

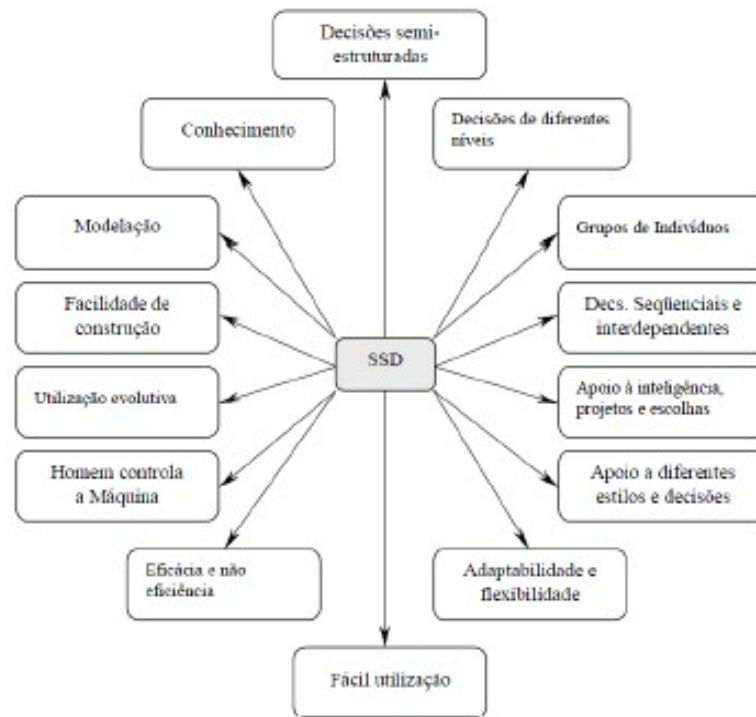
Básicamente, los SSD están compuestos por tres partes (ANA/BANCO MUNDIAL/PROAGUA NACIONAL/COGERH, 2010):

- un módulo de diálogo, (generalmente una interfaz gráfica);
- una base de datos/conocimientos;
- y una base de modelos, (de optimización y simulación).

⁵

Porto, R. L. L.; Azevedo, L. G. T. Sistemas de soporte para decisiones de recursos hídricos. In: Porto, R. L. L. Técnicas cuantitativas para la gestión de recursos hídricos. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1997. cap. 2, p.43-95.

Figura 15 – Características de un sistema de soporte para decisiones



Fuente: Tuban (1993) apud Porto y Azevedo (1997) apud Carvalho (2003).

En este contexto, abordaremos una herramienta computacional de SSD, la plataforma AQUANET, que fue desarrollada por el Laboratorio de Sistema de Soporte para Decisiones de la Universidad de São Paulo (USP).

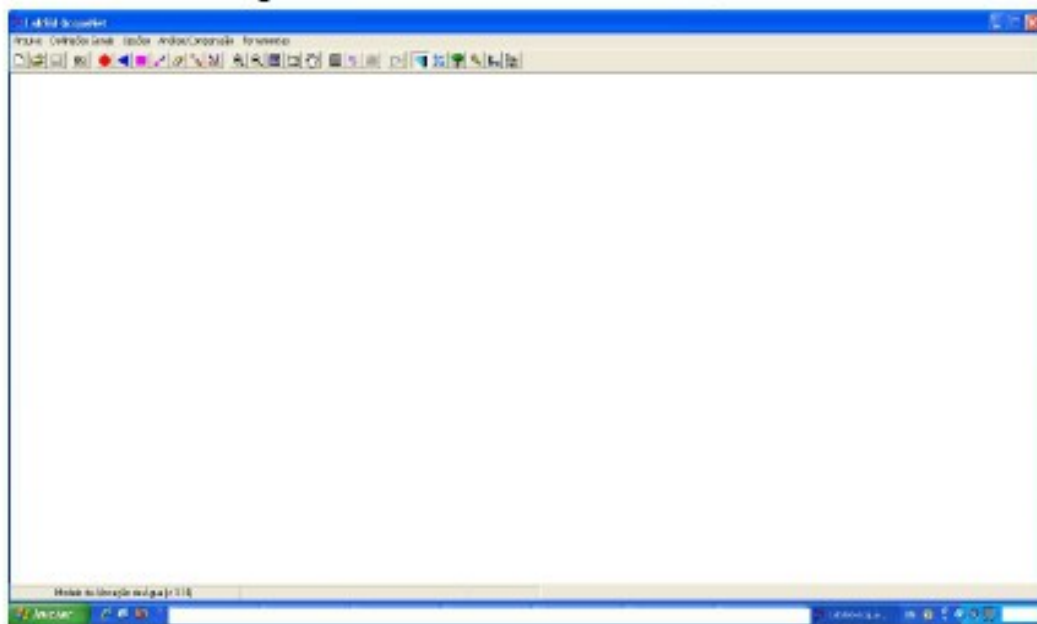
6.1 Herramienta computacional AQUANET

El Laboratorio de Sistema de Soporte para Decisiones de la USP desarrolló la Plataforma AQUANET, que está constituida por un simulador/optimizador de sistemas de embalses utilizando programación lineal con algoritmo de red de flujo para optimizar la asignación bajo sistema de prioridades y costos optimizados. Con esta plataforma, el usuario puede montar redes con un gran número de embalses, demandas y tramos de

canales (del orden de varios miles), representando el problema en estudio de forma bien detallada, además de posibilitar la comparación de escenarios.

La interfaz gráfica del modelo AQUANET es presentada por la Figura 16.

Figura 16 – Interfaz del modelo AQUANET



Fuente: ANA/BANCO MUNDIAL/PROAGUA NACIONAL/COGERH, 2010.

Porto et al. (2003)⁶ apud Carvalho et al. (2009) presentaron el modelo de planeamiento AQUANET, originado a partir de un modelo de red de flujo denominado Modsim (LABADIE, 1998) y del ModsimLS (ROBERTO & PORTO, 2001), una versión actualizada del primero. El modelo tiene como principal característica la incorporación automática de una serie de funciones, comunes en cuencas hidrográficas, sin la necesidad de que el usuario tenga que programarlas. El modelo permite realizar

6

Porto, R. L. L.; Roberto, A. N.; Schardong, A.; Mélo Júnior, A.V. Sistema de soporte para decisiones para análisis de sistemas de recursos hídricos. In: Silva, R. C. V. Métodos numéricos en recursos hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap.2, p.93-240.

actividades de asignación de agua, evaluación de la calidad de agua, determinación de asignación de agua para riego y, también, puede servir en el proceso de selección de alternativas con base en un análisis económico.

Los modelos de red de flujo en realidad mixturan características de los modelos de simulación y optimización y pueden incorporar las características estocásticas de los caudales de entrada (PORTO & AZEVEDO, 1997). Así, la mayor parte de las configuraciones y estructuras operacionales de las cuencas hidrográficas puede ser representada por medio de la especificación de datos de entrada apropiados (ROBERTO & PORTO, 1999⁷ apud CARVALHO et al., 2009).

Este SSD posee una interfaz de comunicación con el usuario amigable; la operación de los embalses es realizada mediante el uso del concepto de volumen meta al cual se atribuye una prioridad, y las pérdidas por evaporación de los embalses son tenidas en cuenta por medio de un proceso interactivo (CARVALHO et al., 2009).

Asimismo, de acuerdo con Carvalho et al., 2009, actualmente, el sistema adopta el intervalo de análisis mensual y, además de ser un instrumento de gestión, también puede ser usado para el planeamiento, para el análisis del impacto de propuestas alternativas para la implantación de proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos, y también puede ser útil en el proceso de selección inicial de alternativas con base en el análisis económico, en un nivel simplificado, por medio de la inclusión directa de datos de costos y beneficios, en lugar de la especificación relativa de prioridades.

7

Roberto, A. N.; Porto, R. L. L. Asignación del agua entre múltiples usos en una Cuenca Hidrográfica. In: Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13, 1999, Belo Horizonte. Anales... Belo Horizonte: ABRH, 1999. CD Rom.

La estructura de red utilizada en este modelo puede ser entendida como un conjunto de puntos, llamados nudos (embalses, puntos de retirada de agua o confluencia de ríos) y un conjunto de curvas, llamados ramos (o arcos, o ligaciones) que conectan un cierto número de pares de nudos (ANA/BANCO MUNDIAL/PROAGUA NACIONAL/COGERH, 2010).

Cada ramo es caracterizado por tres parámetros, siendo ellos los límites superior e inferior del flujo que pasa por el arco, o sea, las capacidades máxima y mínima de un canal, y un “costo” por unidad de flujo que transita por el arco. Este costo no significa, obligatoriamente, un valor financiero, pudiendo representar preferencias establecidas por el usuario. Las capacidades máxima y mínima de cada ramo pueden ser fijas para todo el período de simulación o pueden variar a través del tiempo (ANA/BANCO MUNDIAL/PROAGUA NACIONAL/COGERH, 2010).

En líneas generales, el modelo AQUANET funciona de la siguiente manera, en conformidad con su manual:

- Durante la utilización del AQUANET, todas las acciones realizadas por el usuario son inmediatamente almacenadas en un banco de datos temporario, que existe solamente durante la utilización del modelo;
- Al iniciar el modelo, el usuario puede comenzar un nuevo proyecto o abrir un proyecto previamente grabado;
- Si fuere iniciado un nuevo proyecto, un nuevo banco de datos temporario será creado;
- cuando el usuario abre un proyecto existente, el AQUANET crea inmediatamente una copia de este proyecto, que pasa a ser el banco de datos temporario;
- En el banco de datos temporario son almacenadas todas las informaciones suministradas por el usuario (trazado y datos de entrada).

La utilización de un banco de datos temporario durante el funcionamiento del modelo presenta las siguientes ventajas:

- No es necesario asignar memoria para guardar valores en variables, ya que los mismos estarán automáticamente almacenados en el banco de datos;
- Al abrir un proyecto sólo una pequeña parte del banco es leída. Todos los datos y resultados sólo serán leídos (directamente del banco) cuando fuere necesario;
- Un proyecto sólo será alterado cuando el usuario lo guarda. En este instante será creada una copia del banco de datos temporario con el nombre y en el lugar suministrado por el usuario;
- Observándose los puntos anteriores se percibe que ocurre un gran aumento de desempeño del modelo con la utilización del banco de datos temporario, ya que las operaciones de entrada/edición de datos, lectura y guardado tratan con un número relativamente pequeño de variables.

Además, de acuerdo con su manual, el AQUANET puede efectuar los cálculos de manera secuencial a través del tiempo (Simulación Continua) o estadísticamente (Planeamiento Táctico). En la Simulación Continua, el valor más importante es el número total de años de simulación (llamado aquí NT). El usuario debe suministrar series de caudales afluentes mensuales con duración igual a NT. El modelo efectuará los cálculos continuamente, para todos los años existentes. Al final del cálculo, los resultados serán suministrados mensualmente para todos los años.

En el Planeamiento Táctico el usuario debe proporcionar, además del número total de años de simulación (NT), el número de años del horizonte de simulación (NH). El horizonte de simulación es el número de años durante los cuales se pretende estudiar el comportamiento del sistema en análisis.

7 CALIDAD DEL AGUA: CAUDALES DE DILUCIÓN Y DECAÍDA DE CONTAMINANTES

El agua es un insumo de fundamental importancia para la vida, configurando elementos insustituibles en diversas actividades humanas, además de producir un equilibrio en el medio ambiente.

Aunque la humanidad dependa de este recurso para su supervivencia y para el desarrollo económico, la sociedad acaba siempre contaminando y degradando nuestros recursos hídricos, no dándole el debido valor merecido.

Actualmente Brasil posee una situación privilegiada en relación a su disponibilidad hídrica, aunque cerca de 70% del agua dulce del país se encuentra en la región amazónica, que es habitada por menos del 5% de la población. Además de ello, el problema de escasez hídrica en Brasil es consecuencia de los desordenados procesos de urbanización, industrialización y expansión agrícola, que cuando combinados con un crecimiento exagerado de las demandas localizadas y de la degradación de la calidad del agua, se agrava más aún, dado que a partir de este momento comienza a perjudicar la calidad de vida de la población.

Se sabe que los recursos hídricos tienen capacidad de diluir los desagües cloacales y los residuos, mediante procesos físicos, químicos y biológicos que producen su autodepuración. No obstante ello, esta capacidad es limitada en cantidad y calidad de los recursos hídricos existentes.

7.1 Autodepuración

De acuerdo con Braga (2002), el fenómeno de la autodepuración es un proceso natural de recuperación de un cuerpo de agua que fue contaminado por vertidos de materia orgánica biodegradable y es realizado por medio de procesos físicos (dilución, sedimentación), químicos (oxidación) y biológicos.

Según Mota (1998), este fenómeno se encuentra asociado a la capacidad del medio acuático de retornar a su equilibrio luego de las alteraciones inducidas por los vertidos afluentes. De acuerdo con Von Sperling (2007) no existe una depuración absoluta. Aunque la estabilización sea completa, el oxígeno consumido sea totalmente recuperado y el ecosistema alcance nuevamente su equilibrio, siempre se producirá la formación de ciertos productos y subproductos de la descomposición que no serán degradados y que podrán ocasionar otros daños al medio acuático.

El proceso de estabilización de la materia orgánica es realizado por microorganismos que actúan como agentes de descomposición (las bacterias) presentes en los cuerpos de agua. Las bacterias tienen la función de degradar la materia orgánica que es vertida al río, y esto se hace a través de procesos químicos, consumiendo el oxígeno disuelto (OD). Al hacer esto, las bacterias acaban por competir con otras especies, por ejemplo, los peces, dado que ellas no necesitan mucho oxígeno para sobrevivir. Reduciendo el oxígeno disuelto que se presenta en el medio acuático, comienza a ocurrir un nuevo fenómeno, el de sucesión biológica, donde organismos que necesitan más oxígeno comienzan a morir, y los que dependen de menos, comienzan a proliferar. Luego que ocurre la total degradación de la materia orgánica y el OD comienza a aumentar otra vez, el curso de agua tiende a recuperarse naturalmente, hasta establecer el equilibrio con las comunidades locales (Zorzal, 2009).

Para identificar si el oxígeno disuelto en el agua es el adecuado, dentro de los estándares de calidad establecidos y si existe contaminación, nosotros medimos la

DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno). La DBO es uno de los principales parámetros utilizados para evaluar el efecto producido por el impacto de desagües domésticos o industriales sobre los cursos de agua.

La autodepuración en ríos es un proceso que se desarrolla a través del tiempo y que ocurre longitudinalmente, donde a través de análisis físico-químicos logramos identificar las zonas de autodepuración. Braga (2002) las divide en cuatro: zona de degradación, zona de descomposición activa, zona de recuperación y zona de agua limpia. De acuerdo con Benassi (2002), a continuación se presenta la definición de cada una de estas zonas en el proceso de autodepuración.

Zona de degradación: Es el lugar donde se produce el vertido de la fuente contaminante. El agua se torna turbia, ocurriendo la deposición de partículas en el fondo. Existe en esta zona una alta concentración de materia orgánica, siendo la descomposición lenta debido a la adaptación de los microorganismos. El número de especies disminuye sensiblemente, pero el contenido de oxígeno aún es suficiente para permitir una diversidad de especies. La cantidad de coliformes es elevada; también son encontrados protozoarios y hongos, entre otros. La presencia de algas, por su parte, es rara debido a la dificultad de penetración de la luz.

Zona de descomposición activa: En este punto el ecosistema tiende a organizarse, con microorganismos aeróbicos y anaeróbicos que desempeñan activamente la descomposición de la materia orgánica introducida, provocando: la caída del contenido de oxígeno disuelto (alcanzando su menor concentración), aumento de la DBO y con esto la inducción del predominio de organismos anaeróbicos. El número de bacterias patogénicas disminuye rápidamente, dado que estas no resisten la nueva condición ambiental. Se da en esta fase el desprendimiento de gases de sedimentos, provocando mal olor. El nitrógeno es encontrado en cantidad abundante, aún en la forma orgánica,

pero predominantemente en la forma de amoníaco que puede iniciar su oxidación en nitratos. El número de protozoarios se eleva; se produce la presencia de macroorganismos y larvas de insectos (sucesión ecológica); y la macrofauna aún es limitada.

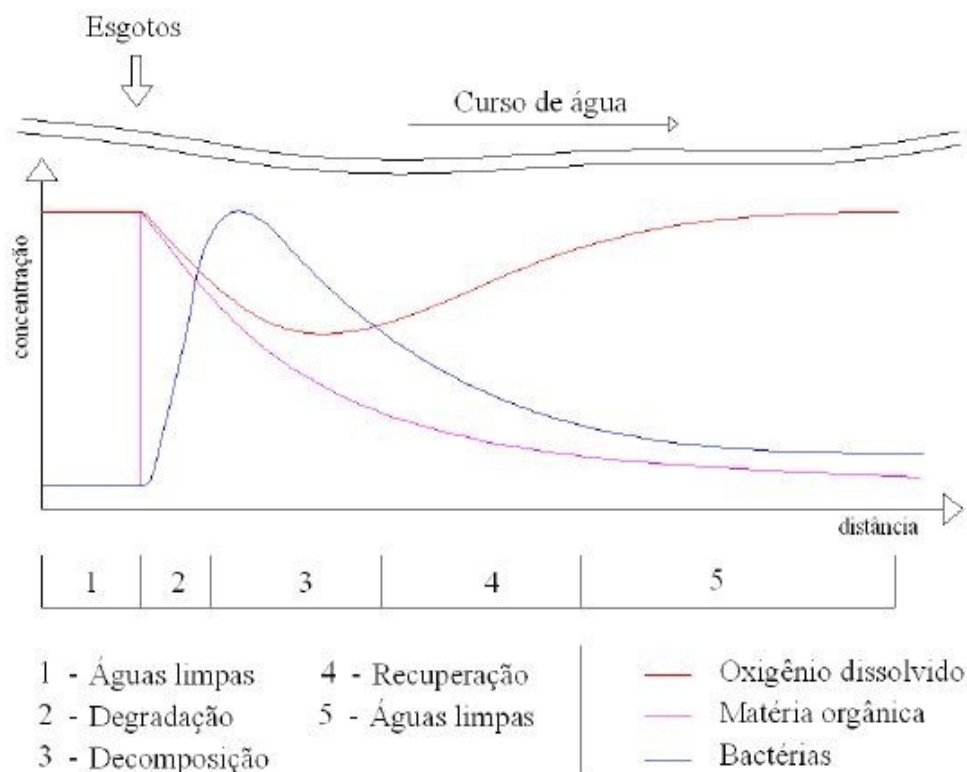
Zona de recuperación: Tras la fase de intenso consumo de oxígeno por los microorganismos y de degradación, la materia orgánica ya se presenta estabilizada. Comienzan a surgir los organismos autotróficos, favorecidos debido a la presencia de nitritos, nitratos y fosfatos, los cuales constituyen nutrientes para las algas. Ocurre el aumento de la transparencia del agua, lo que favorece los procesos de fotosíntesis. Estos organismos autotróficos comienzan entonces a participar de la reoxigenación del agua, mejorando las características de esta. Las algas azules son los primeros organismos en aparecer, después los flagelados, las algas verdes y, finalmente, las diatomáceas. El material depositado en el fondo tiene una granulometría más gruesa y no presenta mal olor.

Zona de aguas limpias: El cuerpo de agua vuelve a las condiciones normales, por lo menos en relación a la concentración de oxígeno disuelto y materia orgánica. Debido a la mineralización ocurrida en las zonas anteriores, las aguas son ricas en nutrientes y la producción de algas es mayor. Existe un reestablecimiento de la cadena alimentaria. La diversidad de especies es grande. El ecosistema se encuentra estable, las aguas alcanzan en esta zona las condiciones existentes antes del vertido de los desagües cloacales, por lo menos en lo que se refiere al contenido de oxígeno disuelto, a la DBO y a los valores de coliformes. Predominan las formas más oxidadas y estables de compuestos minerales: nitratos y fosfatos, entre otros.

La figura 17 presenta estas zonas delimitadas con base en la trayectoria de tres principales parámetros (materia orgánica, bacterias que actúan como agentes de descomposición y oxígeno disuelto).

Von Sperling (1995), también realizó consideraciones sobre estas zonas de autodepuración, citando, además, que en las primeras existe la predominancia exclusiva de organismos heterotróficos, esto es, la respiración supera la producción fotosintética ($P/R < 1$), debido al vertido de efluentes que contienen gran aporte de materia orgánica. Este planteo se torna interesante cuando consideramos la teoría del “Continuo Fluvial”.

Figura 17 - Perfil de las zonas de autodepuración a lo largo del trecho de un río.



Fuente: Zorzal, 2009 apud Von Sperling (2007)

Según Benassi (2002), los ecosistemas poseen cierta estabilidad de resistencia ante el estrés causado por actividades antrópicas y una capacidad de recuperarse a través de procesos ecológicos como el de autodepuración. Las zonas de autodepuración demuestran cómo los ecosistemas reaccionan frente al vertido de residuos orgánicos

en un cuerpo de agua. El monitoreo puede mostrar un desequilibrio en el sistema, cuando el vertido supera la capacidad de soporte del medio. Este monitoreo, que puede ser realizado con la aplicación de modelos de calidad del agua, puede suministrar pronósticos en el tiempo.

Benassi (2002), afirma que el concepto de capacidad de autodepuración presenta la misma relatividad que el concepto de contaminación. Un cuerpo de agua puede ser considerado como depurado desde el punto de vista ecológico, aunque no esté totalmente purificado en términos higiénicos, presentando por ejemplo organismos patógenos. Así, la capacidad de autodepuración está íntimamente relacionada con los usos preponderantes a que se destina cada trecho de un curso de agua.

7.2 Caudal de dilución

El caudal de dilución está vinculado a aspectos cualitativos y cuantitativos del efluente a la hora que el emprendedor realiza el vertido en un río. Para eso existe una Política Nacional de Gestión de Recursos Hídricos, la Ley N° 9.433/97, que trata de la concesión del vertido de efluentes y la concesión de caudal de dilución.

En su artículo 12 trata sobre los usos sujetos a la concesión por parte del poder público en Brasil, que son:

- I – derivación o captación de porción del agua existente en un cuerpo de agua para consumo final, inclusive abastecimiento público, o insumo de proceso productivo;
- II – extracción de agua de acuífero subterráneo para consumo final o insumo de proceso productivo;
- III – vertido en cuerpo hídrico de desagües cloacales y demás residuos líquidos o gaseosos, tratados o no, con el fin de su dilución, transporte o disposición final.

En esta misma Ley, la concesión cualitativa está establecida, por tanto, en los términos de una concesión para el vertido de efluentes (inciso III). El Proyecto de ley Federal N°

1616 (en trámite desde 1999 en el Congreso Nacional) rige la gestión administrativa y la organización institucional del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos y contiene un capítulo que trata acerca de la “sistemática de concesión del derecho de uso de recursos hídricos”. Es en este capítulo que está descrito y especificado cómo se obtiene la concesión para dilución de residuos en cuerpos hídricos.

El PL dispone que:

“Para fines de vertido de efluentes, el caudal de dilución será determinado de forma compatible con la carga contaminante, pudiendo variar a través del plazo de duración de la concesión, en función de la concentración máxima de cada indicador de contaminación establecida por el Comité de Cuenca Hidrográfica o, a falta de este, por el poder concesionario”.

Y que:

“los caudales de dilución serán calculados separadamente, en función de la naturaleza del agente contaminante”.

La propuesta de concesión en términos de caudal de dilución fue establecida también en la Resolución N° 16/2001 del CNRH que en su artículo 15 especifica que:

“La concesión de derecho de uso del agua para el vertido de efluentes será dada en cantidad de agua necesaria para la dilución de la carga contaminante, que puede variar durante el plazo de validez de la concesión, con base en los estándares de calidad del agua correspondientes a la clase de encuadre del respectivo cuerpo receptor y/o en criterios específicos definidos en el correspondiente plan de recursos hídricos o por los órganos competentes”.

La diferencia entre los dos abordajes reside en la forma de cuantificación de la concesión de vertidos de residuos en cuerpos hídricos, donde en el PL N° 1616 y en la Resolución CNRH N° 16/2001 se da en términos del cálculo del caudal de dilución necesario para atender al límite de concentración de cada parámetro establecido por la

clase de encuadre, la cual es definida por la Resolución del Consejo Nacional de Medio Ambiente CONAMA N° 430/2011.

Para saber más sobre las condiciones y los parámetros del vertido de efluentes en cuerpos hídricos consultar la Resolución N° 430/2011.