

ESTUDIO DE CAUDAL ECOLÓGICO PARA EL SISTEMA DEL RÍO DULCE Y SUS HUMEDALES.

Guillermo Marraco¹; Gerardo Hillman¹; Daniel Cabido^{1,2}; Mariana Pagot¹; Cecilia Pozzi¹; Gonzalo Plencovich¹; Romina Juncos^{1,2}; Andrés Rodríguez¹, Héctor Daniel Farías³.

¹ Instituto Superior de Investigación y Servicios en Recursos Hídricos,
Laboratorio de Hidráulica, U.N.C.

² Agencia Córdoba Ambiente S.E.

³ Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Av. Filloy s/n. Ciudad Universitaria. Cba., Rep. Argentina. Telefax: 0351-4334446.

E-mail: marraco@arnet.com.ar

RESUMEN

Este trabajo, es parte del análisis para la determinación del caudal ecológico, para el río Dulce, y los correspondientes hidrogramas ecológicos para los Bañados de Río Dulce.

Se relevaron diferentes metodologías utilizadas mundialmente (Tennant, IFIM, Perímetro mojado, R.C. Cruz, entre otras), analizando las principales variables requeridas en cada una y su aplicación en el sistema.

Con el objeto de adaptar el método del Perímetro Mojado, a los humedales del río Dulce, se analizó el efecto de los caudales desbordados (superando la máxima capacidad de conducción del cauce estimada en 90 m³/s). Se presentan modelos sencillos, – regresiones lineales–, que vinculan el área inundada en

los humedales del río Dulce, con los volúmenes de agua desbordados, y otras variables relevantes que afectan al funcionamiento del sistema.

Siguiendo el trabajo de R. C. Cruz (2005), se aplicó una metodología de filtrado, sobre la serie de caudales, a los efectos de identificar las componentes del ruido presentes, distinguiéndolas de las ecológicamente significativas. En base a ellos se propuso un criterio de distribución temporal de caudales, hasta que se disponga de estudios de campo más avanzados.

Palabras claves: Bañados, Río Dulce, caudales e hidrogramas ecológicos, filtro Wiener.

Introducción

A fin de estudiar el caudal ecológico, en el río Dulce y sus Bañados, se relevaron diferentes procedimientos para su determinación. En este trabajo se presentan dos análisis, efectuados en base a las distintas metodologías relevadas. Uno de estos es parte de la extensión del método del “perímetro mojado” a humedales, y la otra se basa en la propuesta de R. C. Cruz en su trabajo “Prescrição de vazão ecológica: Aspectos conceituais e técnicos para bacias com carência de dados” (2005).

Se investigó, por medio de modelos relativamente sencillos, la relación causa–efecto entre diversas fuentes de agua que alimentan los humedales, y el área global que inundan.

Asimismo se estudió el registro de caudales, en la estación “El Sauce”, relevados con anterioridad a la construcción de la represa de Río Hondo, a fin de identificar las necesidades naturales de agua en el ecosistema afectado extrayendo del registro los componentes impredecibles.

Metodologías para el cálculo de caudal ecológico en ríos

En la literatura internacional se refiere el término “caudal ecológico”, como “environmental flow” –caudal ambiental–, que es más amplio, e incorpora factores sociales y económicos.

Existen no menos de 200 diferentes métodos que abordan el estudio de “caudales ecológicos”. Tharme (1999) propone categorizar las diferentes metodologías en cuatro grupos:

- Métodos llamados “holísticos”, que intentan analizar e individualizar los aspectos ambientales fundamentales – los componentes vitales– del régimen de flujo en estado natural, e intentan preservarlos en un régimen artificial. Se evaluaron las propuestas denominadas: Panel de Expertos y DRIFT.
- Métodos que se basan fundamentalmente en el relevamiento de aspectos biológicos concretos y buscan adecuar a éstos la administración del caudal. Suelen requerir el soporte de software de simulación, por lo que también se conocen como métodos de simulación. Se evaluaron las propuestas denominadas: EFDSS e IFIM.
- Métodos estadísticos o hidrológicos.
- Métodos que relacionan caudal con parámetros físicos del hábitat (en contraposición a parámetros biológicos).

Las metodologías holísticas y de simulación, serán consideradas en detalle en una futura etapa de trabajo, aquí se presentan las metodologías estadísticas o hidrológicas.

Breve descripción de los métodos considerados

Método de Tennant

El método de Tennant es un método simple y se limita a establecer, como caudal ecológico, un porcentaje del caudal medio anual. Generalmente, **ese porcentaje está vinculado a estudios estadísticos realizados en Estados Unidos**. Se justifica en base a la experiencia ganada, al administrar ciertos ríos, en los que habitan peces salmónidos. En consecuencia, sólo puede ser aplicado en cauces similares a los mencionados, y en los que habiten especies similares.

Dado que no existen estadísticas, ni estudios previos, en ríos regionales similares al Dulce se consideró que el método de Tennant no es, a la fecha, aplicable en esta cuenca.

Esta metodología puede ser útil en el futuro, a fin de transferir la experiencia del río Dulce a cuencas vecinas.

Método del perímetro mojado

Este método considera, que el caudal ecológico óptimo, es el que maximiza la cantidad de perímetro mojado, en relación al monto de agua erogado, buscando optimizar económicamente el consumo de agua. Se consideró que la extensión natural de esta metodología, a los Bañados del río Dulce, consiste en relacionar los caudales desbordados, con el área inundada y su evolución a lo largo del tiempo. En consecuencia se hizo un análisis sencillo, intentando vincular los caudales desbordados, con las áreas inundadas estimadas en base a imágenes satelitales. No se estudió la eficiencia de aplicación del agua, sino sólo la relación caudales–área inundada.

Método de R. C. Cruz. Análisis de Fourier.

Este método poco difundido (Cruz, 2005) ofrece, entre las metodologías hidrológicas, un fundamento biológico que se basa en la teoría, muy razonable, de que los ecosistemas evolucionan adaptándose –sólo– a los componentes predecibles de medioambiente (Futuyama, 1992).

En consecuencia, la implementación del caudal ecológico debe basarse sólo en los componentes predecibles de los registros de caudal.

Esta metodología fue considerada de gran interés y utilidad, siendo simple y de bajo costo. En este trabajo no se aplicó la metodología de filtrado propuesta por Cruz, sino otra más sencilla, compuesta por dos etapas sucesivas de filtrado; la primera es de baja precisión, y la segunda consiste en la aplicación de la metodología de filtrado Wiener (Press, 1988).

Aplicación

Con miras a la aplicación de la metodología de “perímetro mojado”, se decidió evaluar la relación entre área inundada y caudales desbordados, la cual se presenta en primer lugar.

Luego se presenta una adaptación de la metodología de R. C. Cruz, que utiliza otros métodos de filtrado.

Análisis del área mojada

Este análisis es una derivación de la metodología del perímetro mojado a humedales, aunque se investiga el área inundada y su variación temporal. El objetivo fue predecir el área inundada, dado un caudal de aporte, utilizando un modelo hidrológico sencillo, e identificar las variables relevantes, a fin de establecer si es suficiente implementar un modelo simplificado, o bien establecer qué variables deberían considerarse en un modelo de mayor complejidad.

Esta predicción sería útil para estimar los efectos que tuvieron los caudales relevados con anterioridad a la intervención humana en la cuenca, así como para estimar la eficiencia en la aplicación del agua en diferentes hidrogramas.

Los datos disponibles incluyeron registros de caudales vertidos por la represa de Río Hondo durante el período 1997–2003, así como los datos pluviométricos de la cuenca intermedia del río Dulce y valores de área inundada en fechas específicas obtenidas en base a imágenes satelitales.

Las variables consideradas fueron: caudal erogado por la represa de Río Hondo, precipitación, evapotranspiración y área inundada medida con imágenes satelitales.

Se plantearon dos tipos de modelos numéricos que relacionaron las distintas variables, con el área o la variación de área inundada, calculándola paso a paso mediante integración numérica. A fin de estimar la calidad del ajuste de estos modelos, se adoptó como criterio cuantitativo la minimización del error medio cuadrático total entre la predicción del modelo y las observaciones relevadas en las fechas específicas, en las que se dispone de imágenes satelitales o en las que el área inundada fue interpolada.

Tipos de modelos

En todos los modelos, de evolución en tiempo discreto, se adoptó, para cada intervalo temporal, una relación lineal entre área inundada, y distintas combinaciones de las variables presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables consideradas en los modelos

Variable	Alternativas consideradas
Caudal Q	<ul style="list-style-type: none">• Caudal diario erogado en Río Hondo• Promedio mensual• Distintos umbrales de desborde.• Retardo de n días (entre 10 y 30)• Tránsito de caudal a lo largo del río.• Serie de embalses lineales idénticos.• Serie de etapas idénticas de tipo Muskhingham.• Promedio de n días previos (Curva suavizada)• Disminución por sustracciones de agua para riego.
Precipitación P	<ul style="list-style-type: none">• Lluvia promedio en la cuenca intermedia (Estaciones pluviométricas ponderadas en proporción al área de polígonos de Thiessen).• Promedio con retardo de n días (entre 10 y 30).• Directa sobre los humedales• Promedio de n días previos (Curva suavizada)• En ningún caso se consideró la precipitación efectiva, ni se generaron hidrogramas sintéticos de drenaje de la cuenca.
Área inundada A	<ul style="list-style-type: none">• Área al inicio de cada paso de cálculo• Área media en cada paso de cálculo.• Derivada de área inundada.
Evapotranspiración E	<ul style="list-style-type: none">• Evapotranspiración mensual esperada. (sin consideraciones climáticas como existencia real de asoleamiento)

Estos modelos tuvieron por objeto determinar los parámetros de calibración, a fin de *calcular el área mojada*, causada por las variables de aporte, *por medio de una integración numérica*. En cada intervalo Δt , se calculó el área final en función de los valores de las variables en el lapso de cálculo o en el intervalo previo. Como regla general, en cada paso de cálculo (n-ésimo) se estimó el área A_{n+1} utilizando una relación de este tipo: (las descripciones de las variables se muestran en la Tabla 1)

$$A_{n+1} = a_0 \cdot A_n + a_1 \cdot A_{n-1} + a_2 \cdot Q_n + a_3 \cdot P_n + a_4 \cdot E_n \quad \text{Ecuación I}$$

En consecuencia, para ajustar cada modelo, se dedujeron los valores de las constantes, que minimizan la suma de los errores medios cuadráticos. Estas constantes fueron las que figuran en la ecuación I (a_i), o bien otras que modifican las funciones de entrada, como por ejemplo, el umbral a partir del cual se desborda el caudal Q_n , o la cantidad de días de retraso entre la ocurrencia de una lluvia y su efecto en el área inundada.

La minimización del error se hizo de dos maneras diferentes:

a) Se postularon valores para las constantes, se calcularon con estas las áreas resultantes, sus errores medios cuadráticos, y se utilizó la herramienta “Solver” de Microsoft Excel para hallar los valores que minimizan la suma de errores medios cuadráticos.

b) Se postuló una curva de área inundada continua en el tiempo, obtenida mediante interpolación entre las fechas correspondientes a las imágenes satelitales. Las constantes a_i presentes en la ecuación I se estimaron mediante regresión lineal múltiple entre el área en cada paso de cálculo y las variables de las que depende.

Mientras que la segunda alternativa computa previamente los valores de las constantes, y luego integra numéricamente las áreas resultantes, la primera repite ambos pasos iterativamente, hasta alcanzar una minimización de los errores.

Modelos iterativos que sólo consideran el caudal

Estos modelos adoptaron al caudal como única variable de ingreso, con diferentes consideraciones como distinto tiempo de tránsito desde la represa de Río Hondo hasta los humedales, sustracción de caudal para riego, diferentes caudales de desborde, redistribución de picos por tránsito, y suavizado de la curva (promediando caudales correspondientes a n días previos).

Además, en base a observaciones de la serie temporal de áreas inundadas, se asumió que, abstrayendo los efectos del ingreso de agua, el área inundada varía exponencialmente, o sea que, en ausencia de efectos externos, su valor es siempre proporcional al valor inmediatamente anterior; ello equivale a adoptar una respuesta de impulso unitario igual a una curva exponencial decreciente y calcular su convolución con el caudal. En la Figura 1 se muestran algunos de los resultados obtenidos.

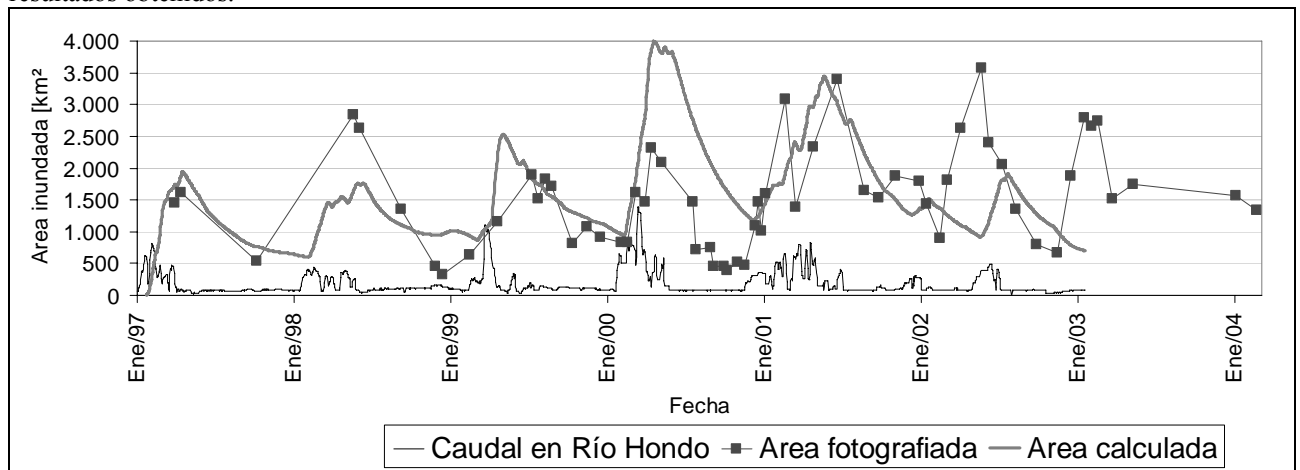


Figura 1: Uno de los modelos iterativos.

La Figura 1 corresponde a un modelo en el que el caudal liberado en la represa de Río Hondo se utiliza como variable de entrada, sin más modificación que un retardo de 20 días (obviando los efectos del tránsito a lo largo del cauce), y la extracción de agua para riego. La línea gruesa representa las áreas inundadas -según modelo numérico- a lo largo del tiempo. Los puntos rectangulares corresponden a las áreas medidas con imágenes satelitales. La línea delgada inferior corresponde a los caudales erogados en Río Hondo.

En este modelo, se postularon valores iniciales de los parámetros de retraso del caudal, porcentaje de reducción de área, y caudal mínimo de desborde. Con ellos se calcularon los volúmenes de agua desbordados para cada paso de cálculo, cuya proporción con el cambio de área que generan, se obtuvo mediante una regresión lineal entre esas variables – Figura 2.

Una vez integrada paso a paso la función de área predicha (que se muestra en trazo grueso –Figura 1–), se utilizó la función Solver para encontrar los parámetros que minimizan la suma de errores cuadráticos estimados en cada una de

las fechas en las que se tomaron imágenes satelitales.

Se tuvieron en cuenta diversas variantes, como la adimensionalización mediante parámetros que incluían área, variación de área, cociente de áreas consecutivas, discretización temporal (Δt), caudal, caudal de desborde y tiempo de tránsito. Sin embargo, no se obtuvo una mejora significativa que justificase elevar la complejidad del modelo. Aparentemente esto se debe a que al haber pocas variables consideradas, y ser algunas de ellas constantes (Δt), la adimensionalización, con la restricción de la adopción de modelos lineales, sólo provocaba cambios de escala.

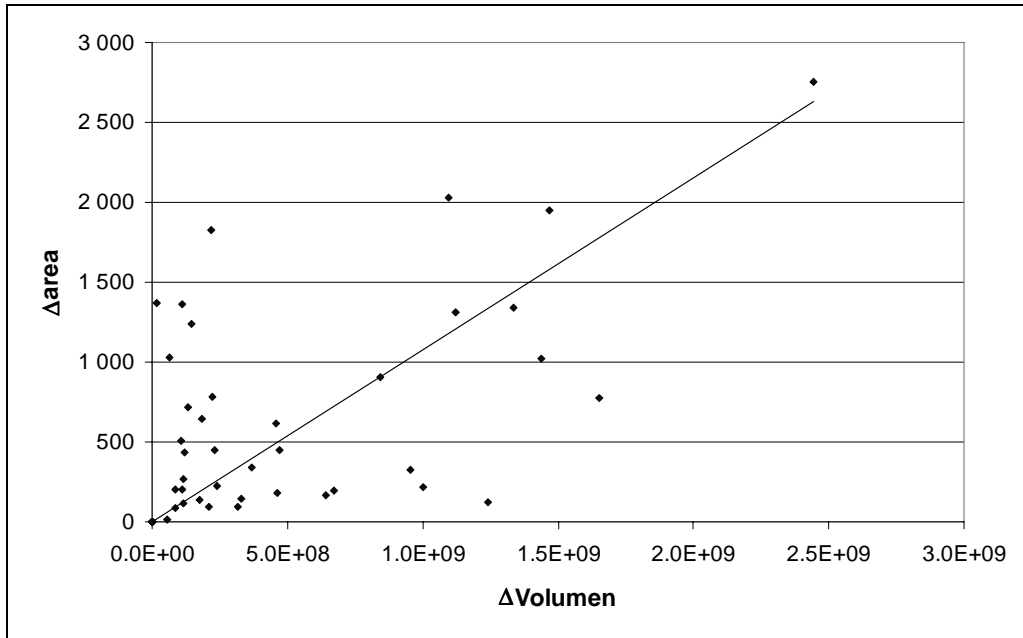


Figura 2: Regresión lineal entre cambio de área y volumen desbordado entre las fechas correspondientes a cada fotografía satelital.

En la ecuación I –Pág. 4–, el coeficiente que multiplica al área, al ser siempre positivo, y menor que uno, induce a una reducción exponencial, de área en el tiempo. Su efecto en la regresión, es el de incrementar los efectos del volumen desbordado en cada paso de cálculo, a fin de compensar la pérdida exponencial de área; en otras palabras, aumenta la pendiente de la recta graficada en la Figura 2. La introducción del área inundada inmediatamente anterior $-A_{n-1}$ en la ecuación I redujo el error notablemente (entre un 10 a 30%), en comparación con modelos que no incluían esa variable, por lo que se admitió como válida esta variación exponencial.

En cada paso de cálculo ($\Delta t = 1$ día), el área se reduce a un valor entre un 98 y 99% de la anterior. Sin embargo, la relación entre volúmenes erogados y variación de área nunca ajustó bien, lo que finalmente motivó el descarte de estos modelos. Como puede verse en la Figura 2, la relación difícilmente puede considerarse lineal.

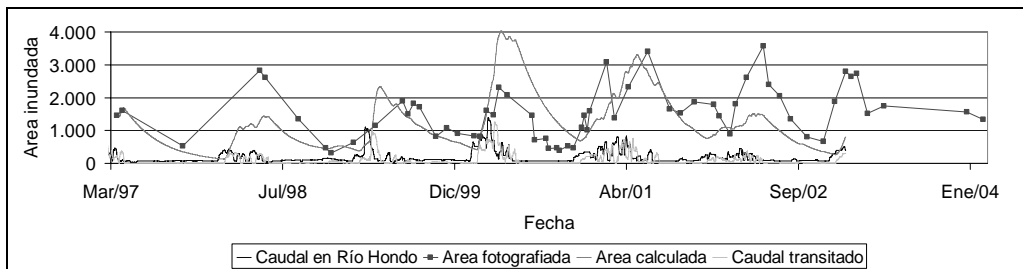


Figura 3: Modelo con incorporación de tránsito modelado como una serie de embalses lineales idénticos.

La Figura 3 corresponde a la incorporación de un tránsito simple, consistente en una serie de embalses lineales idénticos, en los que los parámetros a precisar fueron la constante de embalse lineal $k = (V_{\text{volumen en tramo de río}})/Q$, y el número n de embalses sucesivos. Al emplear un $\Delta t=1$ día, con Solver se halló que el error total se minimizaba con 19

embalses, lo cual equivale a un retraso de 19 díasⁱ, que era lo esperado. Por otra parte, se obtuvo un mayor paralelismo entre las curvas de área decreciente. Sin embargo, puede observarse que no hay mucha diferencia con la anterior. En consecuencia, se descartó, como modelo de tránsito, la adopción de series de embalses lineales idénticos.

También se utilizó (Figura 4) un modelo de tránsito consistente en una serie de tramos Muskingham idénticos. Si bien ese modelo es más apropiado para canales artificiales que para cauces naturalesⁱⁱ, se esperaba obtener un sistema equivalente para el tránsito entre la sección de la represa y el área de desborde hacia los bañados.

Se esperaba asimismo que el tránsito redistribuyera los picos de caudal, y modificara su magnitud. Si en presencia de caudales mayores, las ondas de creciente tuvieron un tránsito más lento, se hubiera mejorado el ajuste entre las curvas. Sin embargo, el efecto obtenido fue la difusión y suavizado de los caudales. Esto no mejoró significativamente el error medio cuadrático total.

Aunque el suavizado tuvo un efecto positivo al estabilizar la integración numérica, no fue mejor al que se obtuvo adoptando un promedio móvil.

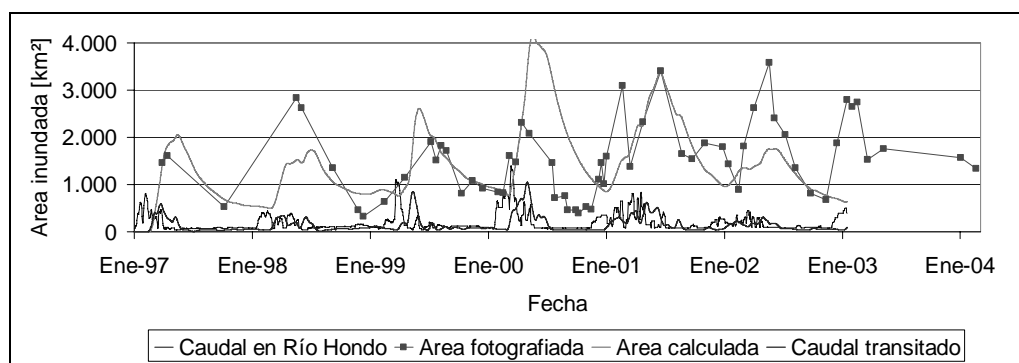


Figura 4. Modelo que incorpora tránsito por medio de una serie de tramos (Muskingham).

Conclusiones

- La adopción de diferentes modelos siempre alcanzó la minimización del error medio cuadrático cuando los caudales erogados en Río Hondo se retardaban entre 18 y 20 días, de acuerdo, e independientemente del retardo estimado en el Informe IV (UNC, 2001).
- Es claro que, si bien existe una fuerte vinculación entre caudal desbordado y áreas relevadas, no es posible –con éste modelo– explicar completamente el área inundada en función sólo del caudal que aporta el río Dulce. Existen variaciones de menor magnitud, e influencia localizada en el tiempo, que no se correlacionan con los efectos del caudal.
- Es claro que las áreas inundadas extremas pueden haber sucedido en períodos comprendidos entre las fechas de obtención de las imágenes satelitales, como predecían algunos modelos (a título ilustrativo, puede verse el tercer pico, en la Figura 4, que no coincide con una fecha fotografiada). La cobertura de nubes, y el período de revisita de los satélites, provocan largos intervalos entre fotografías; debido a la rápida reducción de área inundada cuando alcanza valores altos, es muy probable que las imágenes satelitales no reproduzcan los valores extremos. La probabilidad de ocurrencia simultánea de ambos eventos es baja.
- La adopción de modelos de tránsito simples, como una única serie de embalses lineales, o tramos idénticos de canales modelados según Muskingham, no tiene un efecto importante en la reducción del error medio cuadrático. Ello se debe en parte a que estos modelos no redistribuyen significativamente, en el tiempo, los picos de caudales. Quizás la adopción de modelos de tránsito más complejos, o que tengan en cuenta las características hidráulicas reales del río, y su variación espacial, brinde una mejor aproximación. Esto no fue verificado por falta de datos sobre las características, topográficas e hidráulicas, del cauce.
- La consideración de la reducción de caudal por sustracciones de riego de acuerdo a la relación hallada por Plencovich (informado personalmente) reduce el error medio cuadrático total alrededor de un 10% cuando se lo combina con un caudal de desborde cercano a 40 m³/s, que en promedio, se corresponde con el volumen extraído para riego. Si bien ello sugiere que cerca de la mitad del caudal umbral de desborde, de 90 m³/s en realidad no llega a los bañados por ser extraídos previamente; por razones geométricas, las secciones del río relevadas no pueden desbordar con menores caudales. Es de esperar que, posiblemente, el río alimente los bañados por vía subterránea cuando su caudal supere algún umbral; pero esto no es fácil de determinar actualmente, por lo que se decidió ignorar este hecho admitiendo un incremento de error en la estimación. Esto atiende, además, a que hay otras fuentes de error mucho más relevantes.

ⁱ Ello se debe a que los caudales corresponden a los liberados en la represa de Río Hondo, mientras que en los bañados influyen aquellos que han transitado a lo largo del río Dulce, para lo cual emplean entre 7 a 20 días.

ⁱⁱ Ya que al ser cada paso idéntico al anterior, se implica que la sección transversal, pendiente, y demás parámetros hidráulicos son uniformes a lo largo del canal.

Consideración de la precipitación en la cuenca

La lluvia en la cuenca (río debajo de la represa de Río Hondo) se divide en dos grupos:

La precipitación que alimenta la cuenca indirectamente, llegando a los bañados por escurrimiento superficial y a través del río Dulce. Se ignoró el escurrimiento subterráneo.

Su efecto es difícil de estimar dado que no se dispone de datos topográficos, ni de uso y cobertura de suelo. Sin embargo se buscó establecer una correlación general, a fin de decidir si es justificable estudiarla en mayor detalle.

El segundo grupo consiste en la lluvia directa sobre los bañados. Esta se consideró en dos maneras: como precipitación absoluta, o como su producto por el área inundada; atendiendo a que en este caso no se esperarían pérdidas directas por infiltración, se esperaba una mejor correlación que con la precipitación absoluta.

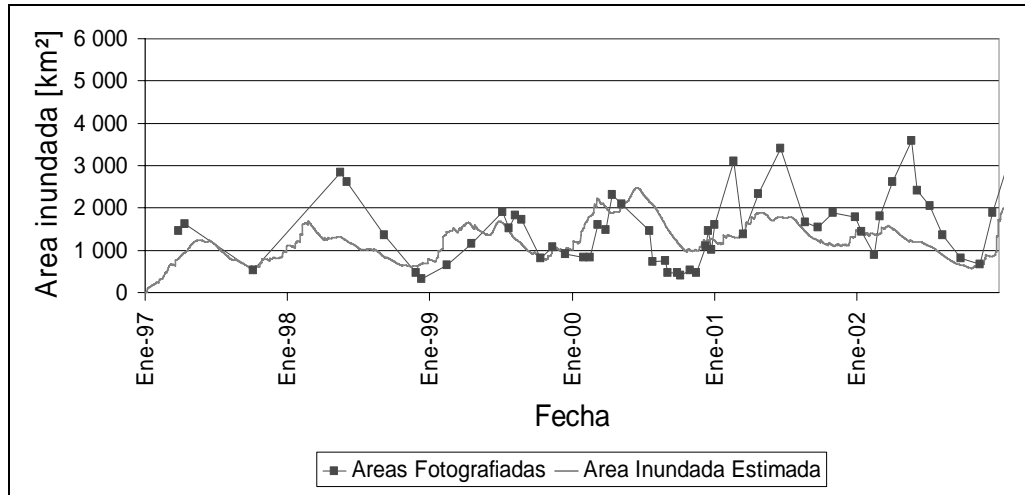


Figura 5: modelo que incorpora datos de lluvia.

Se dispone de abundancia de datos de precipitación; los cuales fueron analizados en cuanto a su consistencia y calidad. El período de registros diarios de lluvia en la cuenca abarca desde 1974 hasta 2003, en más de 20 estaciones.

La Figura 5 muestra el resultado obtenido tras considerar la precipitación en la cuenca, ponderada según el área de polígonos de Thiessen correspondientes a cada estación pluviométrica (sólo se consideraron 10 estaciones).

Se observa una mejora en el ajuste entre área predicha y medida, en cuanto a la magnitud, si bien, cualitativamente el mismo sigue siendo pobre ($R^2 = 0,36$).

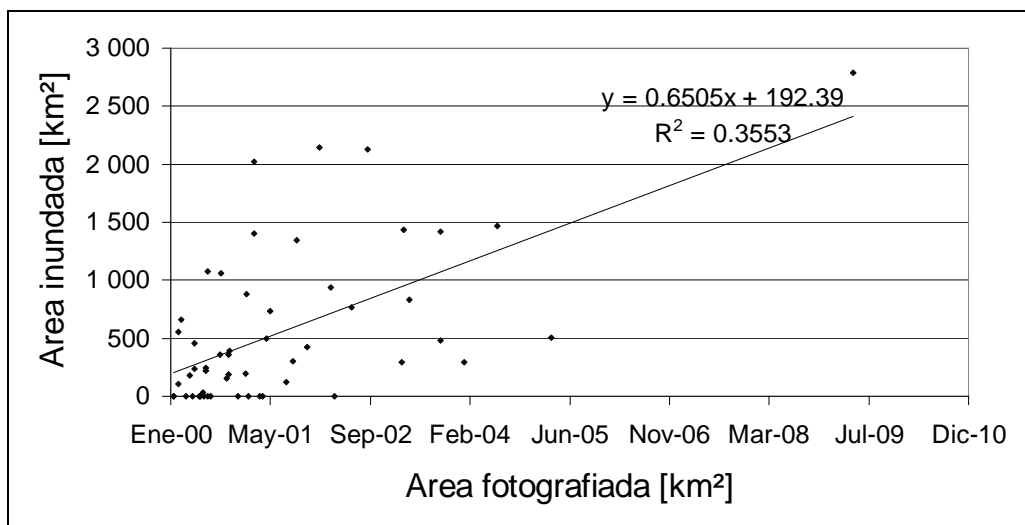


Figura 6: Área calculada mediante integración numérica, graficada en función del área fotografiada.

En la Figura 6 se observa la relación entre variación de área predicha por el modelo de la Figura 5, y variación de área observada. Como puede verse, el ajuste es dudoso.

Debido a que, al incrementar el número de variables cada uno de estos modelos aumentaba excesivamente el tiempo de cómputo, dificultando el avance del proceso, y a causa del pobre ajuste logrado por estos modelos, se adoptó otra metodología, que se describe en la sección siguiente.

Modelos no iterativos

Estos modelos consistieron en calcular previamente los parámetros a_i que se indican en la ecuación I (presentada en página 4):

$$A_{n+1} = a_0 \cdot A_n + a_1 \cdot A_{n-1} + a_2 \cdot Q_n + a_3 \cdot P_n + a_4 \cdot E_n$$

Luego de estimados estos parámetros se calculó el área predicha y se evaluó su ajuste con los datos observados.

Para ello fue preciso conocer previamente de los valores A_n y A_{n+1} , a fin de estimar las incógnitas a_i por medio de regresiones lineales múltiples.

Dado que sólo se conocen los valores de A en fechas específicas fue necesario incorporar alguna hipótesis a fin de determinar los valores A_i restantes. Se asumió que las áreas intermedias corresponden a las que se obtienen mediante interpolación lineal entre áreas conocidas. Con ello se admite la eliminación de valores extremos que puedan haberse presentado entre las fechas correspondientes a las áreas fotografiadas, así como la presunción de la existencia de grandes áreas inundadas en épocas en las que probablemente se presentaron sequías (ejemplo: verano 97-98).

Ello se ve agravado por la corta permanencia de los valores extremos, debido a la naturaleza exponencial de la variación del área.

De todos modos puede aspirarse a obtener una versión suavizada de la curva real, a partir de la cual pueden obtenerse mejores relaciones mediante refinamientos futuros.

Modelos analizados

El modelo más simple fue la regresión lineal correspondiente a la relación entre área inundada, caudales desbordados (acumulados), y precipitación en la cuenca, en mm, considerada como un promedio ponderado, en proporción al área de los polígonos de Thiessen correspondientes a cada estación (no se estimaron los caudales correspondientes a esa precipitación. La separación entre puntos fue mensual).

Ello resultó en un R^2 mayor que los obtenidos en modelos anterioresⁱⁱⁱ, pero aún insuficiente para predecir aceptablemente las áreas inundadas mediante integración numérica, debido a la acumulación de errores en cada paso de cálculo.

Por ello se agregó otra variable, la precipitación en la estación de Taco Pozo, que por estar mucho más cerca de los humedales, se trató independientemente como lluvia directa sobre los bañados.

Se utilizó la precipitación en mm, y la precipitación multiplicada por el área de bañados, resultando la primera en una mejor aproximación ($R^2 = 0,65$).

ⁱⁱⁱ R^2 correspondiente a la regresión lineal de primer orden que vincula área inundada predicha vs. área observada.

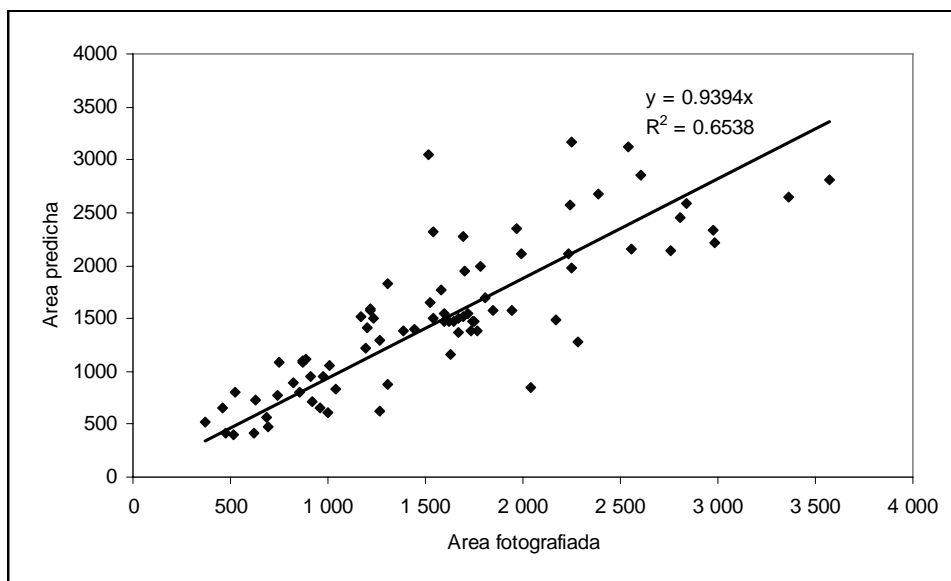


Figura 7: Relación Área fotografiada–Área estimada numéricamente (en un solo paso de cálculo)

La incorporación de área en el período anterior resultó ser la variable más relevante, derivando en una notable mejoría en la relación Área observada–Área calculada.

En la Figura 7 se observa la serie de puntos correspondientes al área inundada observada graficados contra el área calculada en base a esa regresión (no mediante integración numérica).

Se obtuvo la regresión $Y=0,94.X$, con $R^2=0,65$. A pesar de que la relación ajusta claramente mediante una recta, los errores resultaron excesivos como para estimar las áreas mediante integración numérica, la cual se muestra en la Figura 8.

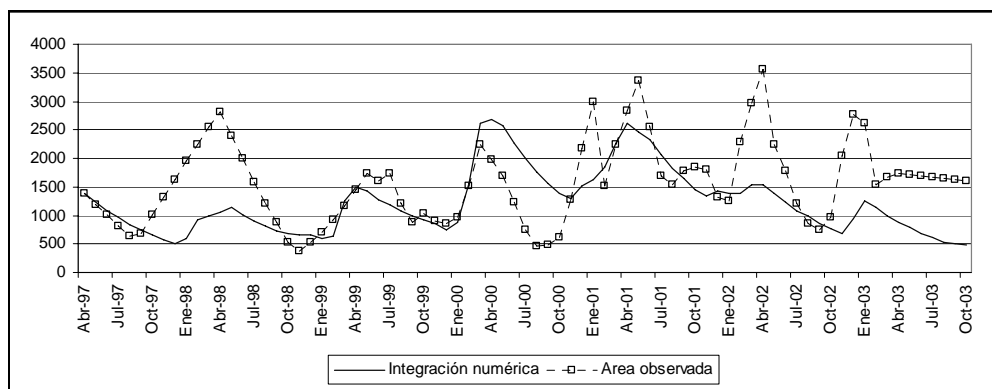


Figura 8: Resultado de una de las integraciones numéricas.

Se decidió adoptar curvas diferentes para los tramos ascendientes y decrecientes de la curva, atendiendo al hecho de que son de naturaleza opuesta, y causados por fenómenos que posiblemente se presentan en los extremos contrarios de los bañados.

Tras probar varias alternativas se adoptó un modelo final, descrito más adelante, con un $R^2=0,98$ para la curva de ascenso, y $R^2=0,79$ para la de descenso (Figura 9).

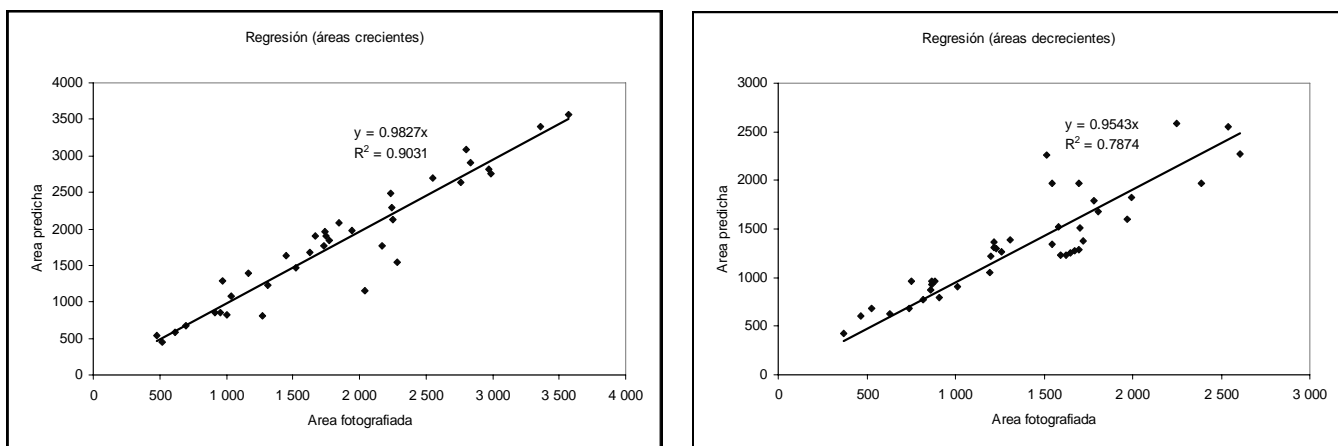


Figura 9: Comparación entre valores observados (e interpolados) y valores calculados mediante regresión lineal.

Modelo final

Se adoptaron dos curvas; una correspondiente a los períodos de incremento de área inundada, y otra a los de decrecimiento.

La curva con mejor ajuste fue la que vinculó el área en un instante de tiempo, con el caudal total vertido durante el período correspondiente al mes inmediato anterior, (considerando un retraso de 19 días entre su vertido en la represa de Río Hondo, y su arribo a los bañados), así como el área calculada en el paso previo, y su derivada (implícitamente considerada al utilizar dos valores de área previos), y la precipitación registrada en la estación más cercana a los bañados, ubicada en la localidad de Taco Pozo (aproximadamente 60 km al sur de Paso de los Oscares).

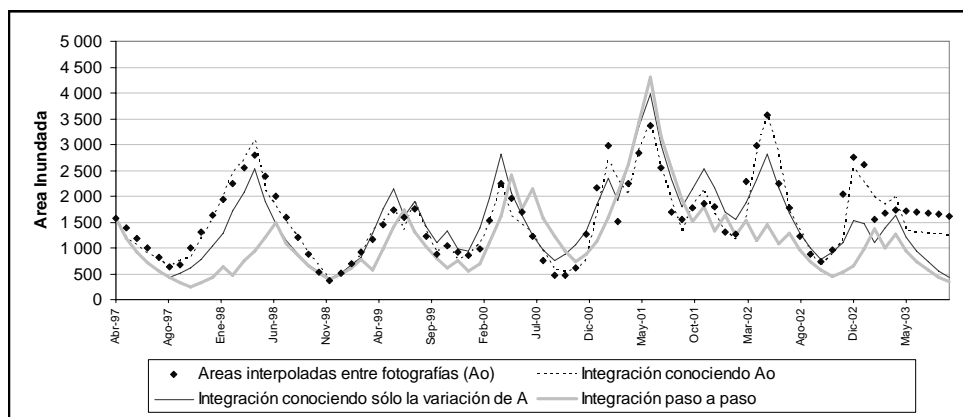


Figura 10. Modelo seleccionado por ser el de mejor ajuste.

En la Figura 10 se muestra, en línea de puntos, las áreas interpoladas entre imágenes satelitales. Se muestra el área predicha aplicando las regresiones mostradas en la Figura 9. Esta curva se ajusta bien debido a que al inicio de cada paso de cálculo se utiliza el área “observada” y no la calculada en el paso anterior.

La línea continua, en trazo fino, utiliza el área calculada en el paso anterior, pero la decisión entre adoptar la curva de crecimiento o la de decrecimiento se toma en base a la observada (interpolada en línea de puntos).

Por último, en línea gris gruesa, se muestra la integración numérica paso a paso. El criterio de decisión, para adoptar la curva de crecimiento o decrecimiento se tomó en base a una regla heurística: Si la curva de crecimiento predice un decrecimiento, se la descarta. Lo mismo se hace con la de decrecimiento; si no predice una reducción de área se la descarta. Si ambas son factibles, se calcula su promedio, y éste se utiliza para decidir si la curva debe crecer o decrecer.

Conclusiones sobre el modelo final de áreas de bañados

Esta curva, siendo la que mejor ajusta a los datos, no es suficientemente exacta como para estimar, a largo plazo, la serie histórica de áreas inundadas, ya que presenta errores –generalmente por defecto– del 50%.

Sin embargo, se observa que el área inundada real fue igual o superior, y acotada aproximadamente, al doble de lo predicho, por lo que posiblemente podría considerarse, que la curva representa un límite inferior al área inundada real.

Fuentes de error:

La principal fuente de error posiblemente se encuentre en los valores de caudal utilizados, ya que corresponden a los caudales en la represa de Río Hondo, y no a los que, efectivamente ingresan a los bañados. Estos últimos se ven afectados por el tránsito a lo largo del cauce, la presencia de azudes como Los Quiroga, la extracción de agua para riego, el aporte freático y de pequeños tributarios, etc. En estudios futuros, se utilizarán datos de caudal relevados más cerca de los humedales, y se intentará determinar la vinculación entre los caudales vertidos en Río Hondo, y los que efectivamente ingresan a los humedales.

Asimismo, las precipitaciones no fueron convertidas en hidrogramas, por carencia de datos topográficos e hidrológicos.

Asumiendo que las variables consideradas sean las necesarias y suficientes, y el modelo numérico apropiado, las restantes fuentes de error son provocadas por un paso de cálculo (Δt) excesivo, que de todos modos no puede ser reducido mucho debido a que entonces se presenta inestabilidad numérica causada por la variación brusca en el ingreso de información.

Un paso posible a seguir para minimizar la estabilidad numérica podría ser utilizar un suavizado de los registros de caudal y precipitación. Esto no se ha implementado en esta etapa del trabajo.

Otra fuente de error, fue la adopción de una regla heurística, para decidir entre la aplicación de la curva creciente o decreciente. Esta regla no posee una justificación teórica, más allá de la validación empírica observada.

También se observó que la predicción ajustó mejor, cuando se presentaron caudales y/o precipitaciones extremas y permanentes, esto es, cuando la variación del área inundada, es dominada por el ingreso de agua.

Ello sugiere, que debe enfatizarse el estudio de la variación de área inundada, en presencia de aportes de agua de importancia media, baja o intermitente, así como la evolución propia del área inundada en el tiempo.

Aunque esta curva tiene poco valor predictivo, señala que los caudales erogados en Río Hondo, en conjunción con la precipitación directa sobre los bañados, y la evolución de área causada por variables internas constituyen las principales variables que afectan el desarrollo en el tiempo del área inundada.

Quizás un modelo bidimensional debería tener en cuenta además la precipitación sobre la cuenca de aporte comprendida entre la represa y el ingreso a los bañados. Pero sería razonable esperar que el añadido de mayor detalle implicado por el estudio bidimensional del sistema brinde suficiente aproximación como para resultar de utilidad al proyecto.

Método de R. C. Cruz.

Metodología

El método de R. C. Cruz (Cruz, 2005) asume la hipótesis, de que la vegetación ribereña se ha adaptado, evolutivamente, a las características previsibles del régimen hidrológico, anterior a la intervención humana (Futuyama, 1992).

En consecuencia, para preservar las propiedades ecológicamente significativas, del ambiente en estado natural, deben conservarse los componentes previsibles –o periódicos^{iv}– de las variables que lo afectan.

El método analiza la serie hidrológica de caudales, y extrae (filtra) de ella los elementos no predecibles. De este modo identifica los aspectos del hidrograma que tienen relevancia ecológica.

Los componentes aleatorios, del flujo del agua que ingresa al área de estudio, pueden producir modificaciones transitorias en la distribución de especies, causando desequilibrios que el ecosistema disipa paulatinamente, hasta retornar a su estado “natural”.

En este trabajo se ha asumido la simplificación de que esos componentes son asimilables a ruido, y se han utilizado técnicas, de remoción de ruido en señales, para sustraerlos de la serie de caudales. Además se ha presupuesto que “predecible” es análogo a “periódico”.

Ambas suposiciones facilitan el tratamiento numérico de los datos, pero también limitan la precisión de los resultados.

Con el objeto de individualizar las componentes aleatorias, y sustraerlas de la serie de datos, se efectuó un análisis de Fourier, del registro de caudales, relevados en la estación “el Sauce” (1925-1968).

A fin de identificar el ruido, fue necesario adoptar una serie de hipótesis acerca de su naturaleza. Entre éstas se analizó la hipótesis de ruido blanco, ruido rojo, filtro pasabajos, filtrado Wiener, y la puesta a prueba de la hipótesis nula de que las componentes de la serie histórica de caudales presentan similares intensidades de frecuencias que una serie sintética representativa^v.

La mayoría de esas hipótesis acerca de la naturaleza del ruido condujeron a resultados que exhibían caudales negativos, por lo que fueron descartadas.

A continuación se presentarán los resultados alcanzados mediante la sucesiva aplicación de una hipótesis de ruido similar a “ruido rojo”, mejorada mediante el filtrado Wiener (Press, 1988).

^{iv} Se asume la simplificación de que “previsible” es equivalente a “periódico”. En un sentido más estricto la previsibilidad debería derivarse de la probabilidad o certidumbre de ocurrencia de un suceso, asociada a determinadas condiciones iniciales.

^v Se adoptó un modelo DIANA para calcular series sintéticas.

Análisis de la serie histórica de caudales (1925-1968)

Se dispuso de registros mensuales de caudal, relevados con anterioridad a la construcción de la represa, correspondientes al intervalo Septiembre de 1925–Octubre de 1967.

Esos registros fueron tomados en la estación “el Sauce” (Santiago del Estero), cerca de donde hoy se encuentra la represa de Río Hondo. Los resultados presentados aquí, corresponden a los caudales que se presentan en esa zona, independientemente de las intervenciones humanas introducidas río abajo. Además se asume que los datos registrados representan el estado prístino o natural del sistema, o sea que las alteraciones humanas río arriba no eran significativas antes de la construcción de la represa.

Filtrado de ruido

Se calculó la transformada rápida de Fourier de la serie de registros mensuales de caudal (Figura 13).

En la Figura 11 se muestra la transformada, en sus componentes reales e imaginarias. Para que pueda apreciarse la escala, se acotó el gráfico a un valor máximo de 10000.

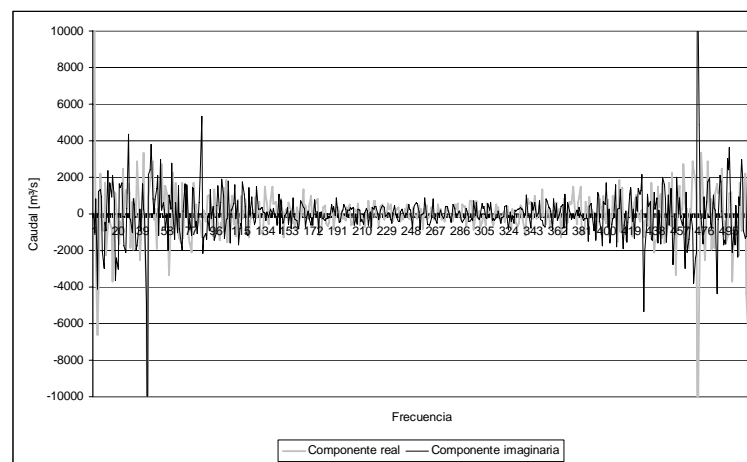


Figura 11: Transformada rápida de Fourier sobre caudales (1925-1968)

A fin de filtrar el ruido, se adoptó la hipótesis de que la mayoría de las componentes de alta frecuencia (que se observan en el centro de la figura) consisten mayormente en valores aleatorios. Con el objeto de estimar su amplitud se calculó el módulo cuadrado de cada uno de esos valores, y se los ordenó de menor a mayor (Figura 12).

Como puede apreciarse, se observa un quiebre de la curva correspondiente aproximadamente al percentil 70%, de la energía de la señal.

Asumiendo que todas las componentes pequeñas se componen exclusivamente de ruido, se trazó una línea de puntos tangente a ellos.

Si las componentes de ruido predominan en los valores pequeños, y siguen una distribución lineal, la amplitud de la componente de ruido presente en la señal, está dada por esa recta tangente. Substrayéndola de la serie se obtiene la línea en trazo grueso, que correspondería a la señal filtrada.

Así cada una de las componentes presentes en el gráfico de la página 13 fue reducida, en función del cuadrado de su magnitud (energía), como indica la Figura 12. Con ello se obtuvo una transformada filtrada, cuya transformación inversa produce una aproximación a la serie sin ruido.

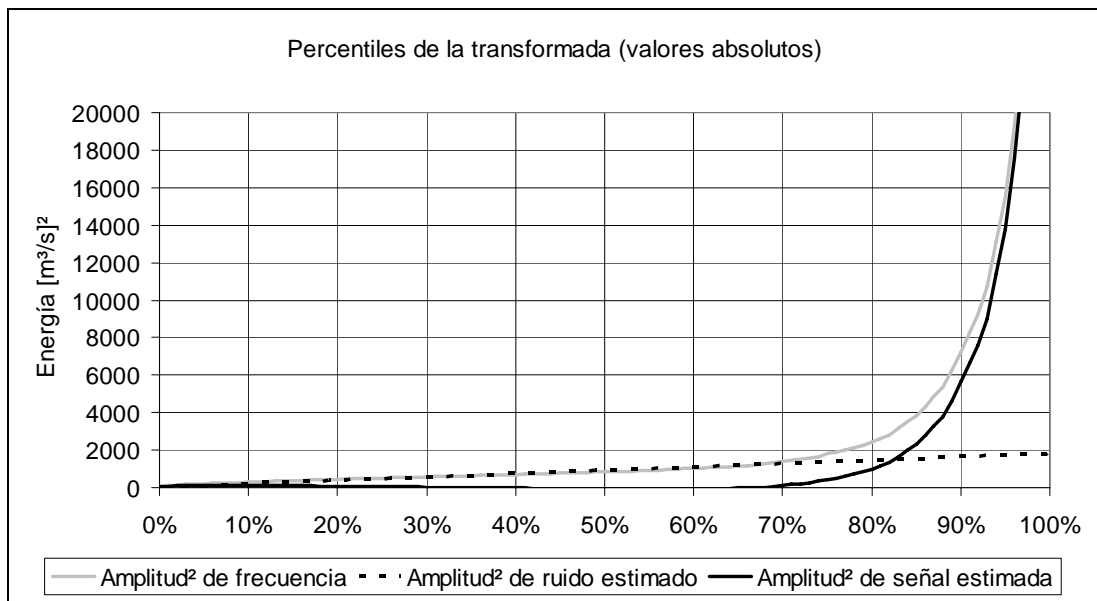


Figura 12: Transformada de Fourier ordenada por amplitud² (energía).

Dado que, como se observa en la Figura 11, la mayoría de las componentes de baja amplitud corresponden a frecuencias altas, y se sustrajo mayores valores a las frecuencias bajas (por corresponder a amplitudes superiores), el filtrado inicial resulta similar al tipo “ruido rojo”.

Naturalmente, existe mucha arbitrariedad en la adopción de este criterio. No puede asegurarse que las componentes más pequeñas consistan exclusivamente en ruido, ni puede asegurarse que su distribución sea lineal, tal como se ha supuesto.

Sin embargo la conjetura presentada se consideró razonable, en el sentido en que el resultado obtenido en trazo grueso debe encontrarse más cercano a la serie buscada que el original. En consecuencia, admitiendo que el ruido posee una correlación baja o nula con respecto a las componentes predecibles se utilizó el filtro Wiener (Press, 1988) para minimizar las distorsiones introducidas, reduciendo el error final a uno de segundo orden.

En la Figura 13 se presenta la serie original, y la filtrada tras la aplicación de ambos procedimientos sucesivos.

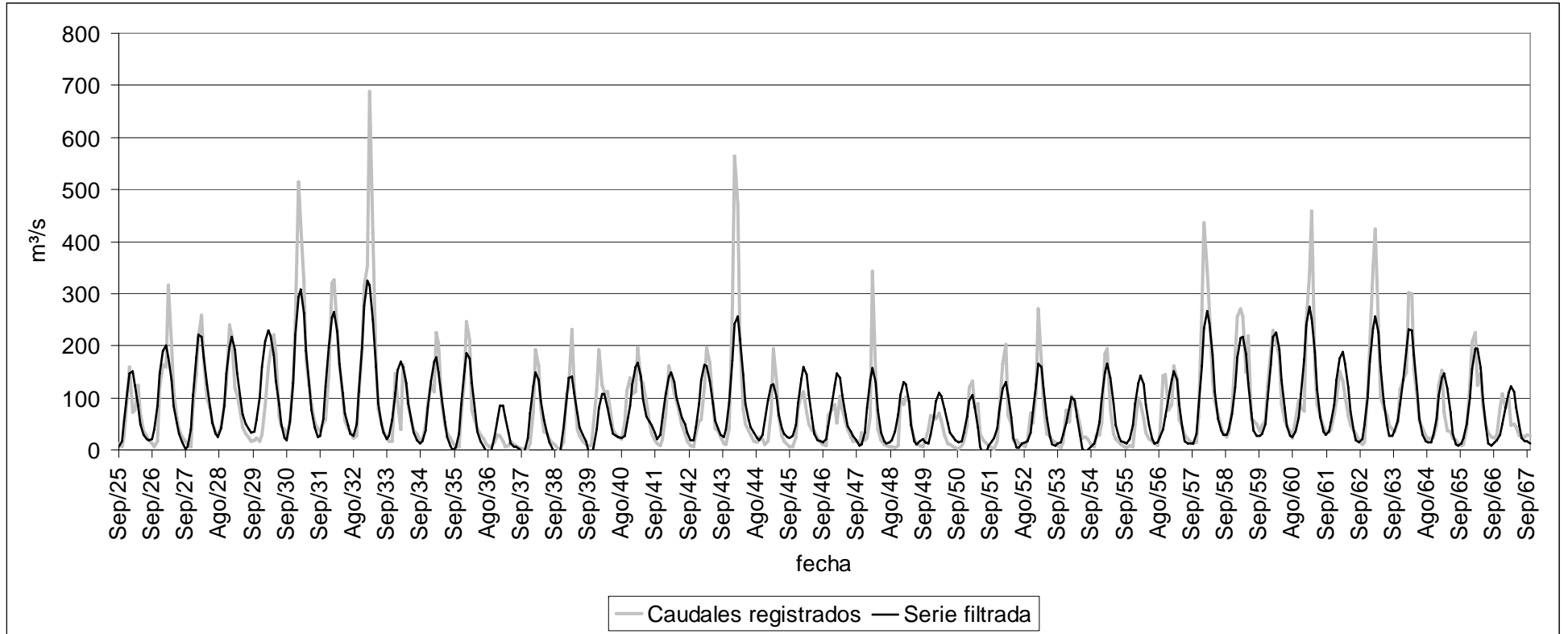


Figura 13: Caudales registrados en la estación El Sauce (1925-1968)

Análisis de los resultados

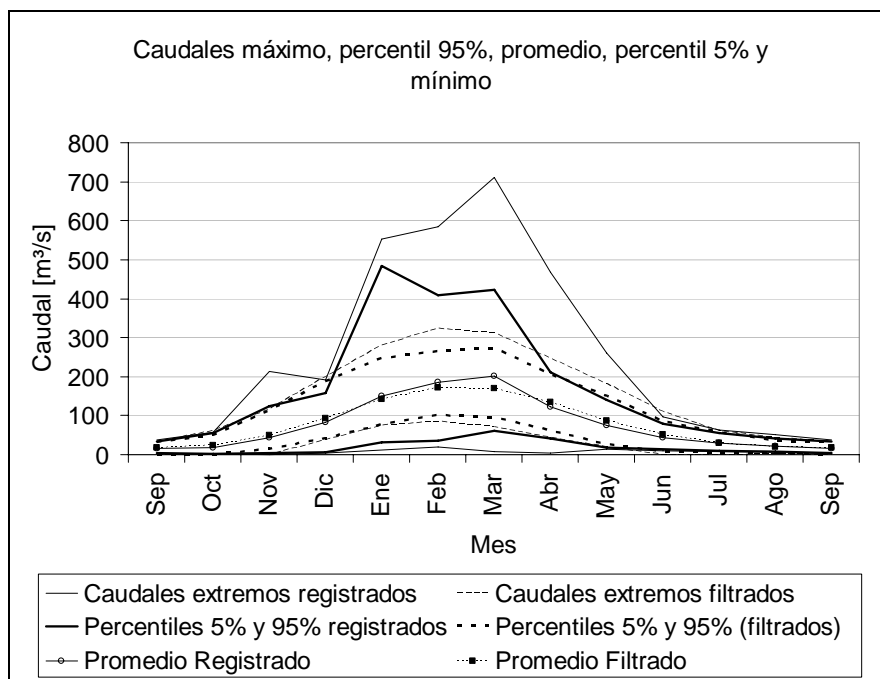


Figura 14: Caudales mensuales.

En la Figura 14 se grafican, en base a los resultados obtenidos, y para cada mes, los caudales naturales en líneas continuas, y en línea de puntos los caudales filtrados. Las líneas delgadas corresponden a caudales máximos y mínimos, mientras que las líneas de mayor grosor indican los caudales superados el 5% y 95% de las veces.

Los caudales promedio se indican con marcadores; con línea continua los naturales, y línea de trazos los filtrados.

Los percentiles 95% se refieren, para cada mes, al caudal que iguala o supera a los registrados el 95% de las veces. (Dicho de otra manera, sólo el 5% de las veces acontecieron caudales mayores a los indicados por la línea gruesa superior).

En la parte inferior, también en líneas gruesas, se grafican los percentiles 5%. Son los caudales que fueron inferiores a los registrados el 95% de los años.

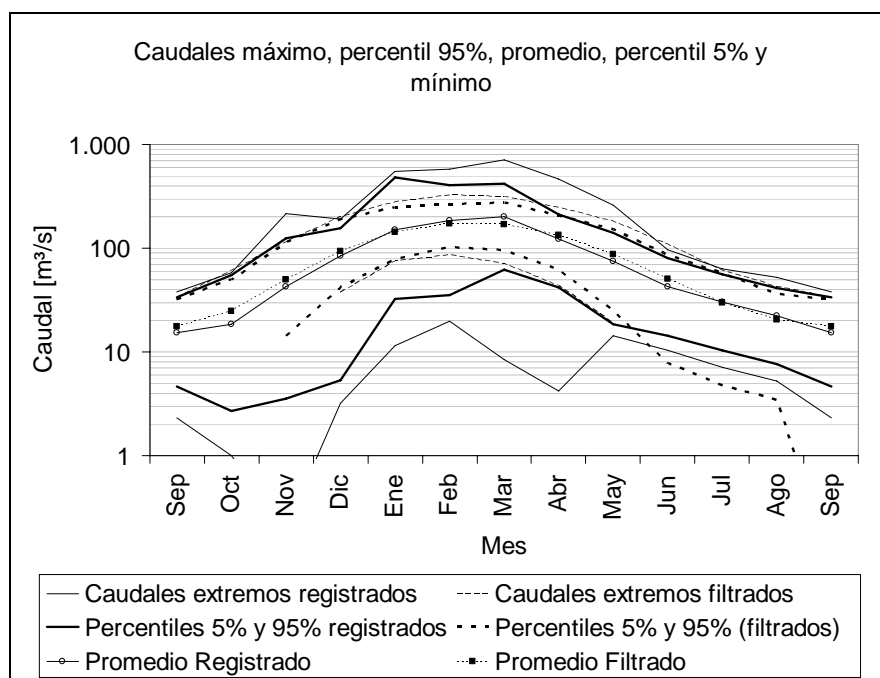


Figura 15: Caudales mensuales. Escala logarítmica.

El mismo gráfico se reproduce en la Figura 15, pero en escala logarítmica.

En ésta escala, se evidencia un paralelismo notable entre las diferentes curvas.

Conclusiones sobre los caudales ecológicos estimados

No se tiene en cuenta, en los siguientes párrafos, las modificaciones que sufre el caudal, aguas debajo de la represa de Río Hondo, debido a otras intervenciones humanas, como la extracción de agua para riego, la presencia de embalses como Los Quiroga, el vertido de contaminantes, etc.

En consecuencia, a fines de adoptar decisiones sobre la determinación, de los caudales a verter por necesidad ecológica, debe incorporarse al estudio el efecto de las restantes obras y alteraciones humanas que ha sufrido la cuenca con posterioridad a la construcción del embalse de Río Hondo.

Excepto entre enero y marzo, el percentil 95% coincide tanto para el caudal natural como para el filtrado. Durante todo el año, el caudal medio tampoco difiere significativamente entre ambas curvas (registrada y filtrada).

Teniendo en cuenta que el caudal máximo filtrado, no difiere significativamente de su percentil 95%, puede aseverarse que, sólo es superado, excepto entre abril y diciembre, con un período de retorno de 20 años.

El efecto del filtrado adoptado es relevante, para caudales extremos, sólo desde enero hasta marzo, y para los valores promedio, sólo durante marzo (la diferencia es de un 20%).

Por otra parte, el percentil 5% del caudal filtrado, siendo prácticamente coincidente con el mínimo mensual (del caudal filtrado), difiere notablemente con respecto a los valores relevados en campo. Es entonces razonable adjudicar los bajos valores medidos a la presencia de factores aleatorios, y no sería deseable admitir valores de caudal, que se encuentren por debajo del percentil 5% del caudal filtrado.

La representación en escala logarítmica muestra un paralelismo notable entre la mayoría de las curvas. Ello sugiere que pueden tratarse en forma simplificada mediante el estudio de la curva promedio, asumiendo –en escala logarítmica– una desviación estándar estacionaria (que no depende de la época del año), siempre que se haga una excepción con el estudio de los caudales mínimos durante el estiaje.

También en escala logarítmica, entre abril y septiembre –Figura 15–, se observa una pendiente recta, sensiblemente paralela entre la mayoría de las curvas, señalando la existencia de una ley muy sencilla de variación exponencial en el tiempo, como es de esperar.

Considerando que actualmente se vierten, durante la época seca, valores mínimos cercanos a los 70 m³/s, el caudal promedio máximo (inferior 200 m³/s), sería probablemente fácil de alcanzar por medio de una redistribución temporal, pero no puede recomendarse el caudal promedio como caudal ecológico, dado que durante la mitad de las ocasiones se vertería un caudal inferior al que posiblemente espera la biota del sistema, y al cual se ha adaptado evolutivamente.

En contrapartida, no sería recomendable verter caudales mayores a 265 m³/s –esto es, caudales mensuales promedio–. No es probable que el ecosistema esté adaptado para necesitar de estos, durante un mes completo, incluso con períodos de retorno de 20 años o superiores. Sin embargo, ello se refiere a caudales mensuales promedio, los cuales pueden incluir caudales pico de corta duración y mucha mayor intensidad.

Es importante recalcar que las curvas extremas mostradas no son hidrogramas esperados, Por ejemplo, las curvas de caudal máximo son las envolventes de los hidrogramas, y las de percentil 95% se encuentran cercanas a la envolvente del conjunto de hidrogramas que se presenta con período de retorno de 20 años.

Recomendación preliminar para la adopción de un régimen de caudal ecológico para el sistema del Río Dulce

Dada la carencia de información biológica, se considera razonable asumir que el percentil 95%, correspondiente a la serie filtrada (en línea de puntos gruesa), iguala o supera al caudal para el cual se ha adaptado la biota vinculada al río Dulce, con anterioridad a la intervención humana.

En consecuencia, no es necesario verter caudales superiores al percentil 95%.

Normalmente será necesario adoptar caudales inferiores; deben respetarse los períodos de retorno de su distribución natural filtrada, como se expone en la Tabla 2 (Pág. 20).

Aún cuando la tabla mencionada indique valores menores, y hasta tanto se disponga de estudios biológicos *in situ*, no deberían erogarse caudales inferiores al 10% del módulo (8 m³/s), valor adoptado arbitrariamente, en base a las recomendaciones del método de Tennant.

Ese caudal sólo podrá adoptarse en septiembre y agosto, (cada 7 años), octubre y julio, (cada 10 años).

Es importante tener presente las siguientes consideraciones:

Si se presentara un año extraordinariamente seco, entre noviembre y mayo, debería procurarse no verter caudales inferiores al percentil 5% de la serie filtrada, cuyos valores se presentan en la Tabla 2. Pero esto no debe hacerse, con un período de recurrencia superior al que se presenta en la serie filtrada, en este caso, de 20 años.

Estos valores no corresponden al caudal ecológico, si se mantienen durante varios años, ya que los Bañados del Río Dulce sólo son alimentados, cuando los caudales superan los 90 m³/s. En consecuencia, el hidrograma correspondiente al percentil 5% constituye un evento catastrófico para los humedales.

Dado que no se han tenido en cuenta las alteraciones aguas abajo de la represa, los hidrogramas reales a implementar deben ser aquellos que, teniendo en cuenta las intervenciones humanas, resulten en hidrogramas similares luego de considerar el tránsito hasta el ingreso en los humedales, con calidades de agua similares a las naturales.

A la fecha se desconoce si ello es posible, dadas las alteraciones en los patrones de erosión y sedimentación, vertido de contaminantes agrícolas, industriales, y de aguas servidas, extracciones de aguas para riego, etc.

Es posible acotar el caudal ecológico entre límites más estrictos. Ello depende de estudios biológicos de campo que deben implementarse en el futuro. En consecuencia estos resultados numéricos deben considerarse una aproximación por exceso.

Los valores calculados dependen del criterio de filtrado de la serie, que debería ser validado mediante la correlación de sus efectos con observaciones biológicas *in situ*. En particular, sería interesante establecer la correlación, entre frecuencia de inundación, para distintos niveles de filtrado del hidrograma de los últimos 10 años, y la distribución espacial inducida en comunidades vegetales.

El procedimiento expuesto, descarta la ocurrencia de no menos de 10 caudales extremos en 43 años, los cuales no reproduce la serie filtrada. Esos caudales pueden tener importancia biológica, aún cuando no sean predecibles; por ejemplo, pueden desencadenar la recolonización de comunidades vegetales adaptadas a inundaciones extremas, u otros procesos de sucesión. Se asume que, si no se derivan volúmenes importantes de agua fuera del sistema, la ocurrencia de caudales extremos superiores a los recomendados, se verá forzada por causas naturales.

En la Tabla 2, se proponen caudales promedio mensuales, pero no se los restringe a esos valores; como no se dispone de registros diarios de caudales anteriores a la intervención humana, los caudales máximos –diarios– correspondientes a cada mes deben ser estimados. Esos caudales, mayores que la media mensual, pueden ser los únicos que alimentan las planicies de inundación de mayor altitud, y no son reemplazables por valores promedio, aún cuando se invierta el mismo volumen total de agua.

Muchas especies animales, en época seca, requieren de flujos inferiores a un caudal dado. Un importante ejemplo de ello, son los caudales que desencadenan el desove de ciertos peces. La imposición artificial de caudales que superen, la media histórica en estado natural, puede ser perjudicial en época seca, y no debiera mantenerse durante muchos años.

Por ello, erogar caudales superiores a los correspondientes, para cada período de retorno, no es recomendable, en época seca, (entre noviembre y mayo). Lo opuesto sucede durante la época húmeda (desde junio a octubre), en donde sería deseable bañar la mayor área posible.

Por lo dicho, los valores de la Tabla 2, deben ser considerados caudales máximos en época seca, y mínimos en época

húmeda.

Estadísticamente, el hidrograma esperado el 95% de las veces^{vi} es menor al que se recomienda aquí.

Matemáticamente, ello se debe a que la probabilidad de que todos los meses se presente un caudal superior o igual al 95%, es el producto entre las 12 probabilidades^{vii}: $(1-0.95)^{12} \cong 0$.

De este modo, el percentil 95% presentado se encuentra cercano a la envolvente de los hidrogramas esperados con esa probabilidad.

En consecuencia, existe un gran margen de mejoría, en lo concerniente a la determinación del hidrograma ecológico ideal. Ello depende tanto de la profundización de los trabajos de escritorio, como del estudio de las necesidades específicas, de las plantas y animales que habitan el área.

Además sería deseable establecer, las alternativas posibles, en el caso de que se presenten diferentes escenarios, como variación en la demanda de generación hidroeléctrica, y la probabilidad de que se presenten lluvias o sequías que modifiquen la oferta o la demanda de agua, así como la derivación de caudales para riego, consumo humano, y desarrollo económico.

^{vi} O sea el hidrograma esperado que iguala o supera al 95% de los hidrogramas esperados.

^{vii} Ese cálculo sería válido si las probabilidades fueran mutuamente independientes cada mes. No lo son.

Tabla de percentiles del caudal filtrado

Tabla 2. Percentiles del caudal filtrado en m³/s

Percentil →	Período de retorno (de caudales inferiores al indicado)										2,0	Período de retorno (de caudales superiores al indicado)									
	20,0	10,0	6,7	5,0	4,0	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0		2,2	2,5	2,9	3,3	4,0	5,0	6,7	10,0	20,0	∞
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	
Septiembre	0,1	2	6	12	13	14	15	15	16	17	18	21	23	24	26	27	27	30	32	34	
Octubre	0,0	10	14	15	15	16	17	19	21	21	23	24	30	31	32	36	42	46	50	61	
Noviembre	14	17	24	26	29	30	33	40	46	47	51	56	58	61	63	66	70	95	113	116	
Diciembre	42	45	47	52	58	62	68	77	83	86	92	96	108	111	116	127	135	152	187	200	
Enero	77	83	85	92	104	109	111	117	123	132	141	146	157	163	173	190	193	207	246	280	
Febrero	102	107	118	127	134	140	143	147	150	159	165	176	184	202	210	218	238	251	264	324	
Marzo	95	107	117	122	137	139	142	145	152	157	161	166	170	192	213	225	231	244	272	311	
Abril	62	77	83	101	104	108	112	115	119	121	125	129	141	158	167	187	194	203	206	247	
Mayo	25	37	49	63	65	66	68	73	79	81	83	89	103	109	110	131	137	139	150	182	
Junio	8	15	26	29	31	36	42	42	44	46	48	56	64	69	72	75	81	84	86	110	
Julio	5	10	13	15	18	18	20	23	26	29	31	33	41	43	45	47	48	49	57	61	
Agosto	3	5	9	10	11	13	16	17	17	18	22	26	27	28	28	31	32	34	36	43	

Tabla 3. Logaritmo (base 10) de caudales filtrados en m³/s. Descripción estadística.

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Promedio	-	1,39	1,66	1,94	2,14	2,23	2,22	2,11	1,92	1,66	1,43	1,25
Desviación estándar	-	0,22	0,25	0,20	0,16	0,14	0,14	0,16	0,21	0,28	0,29	0,29

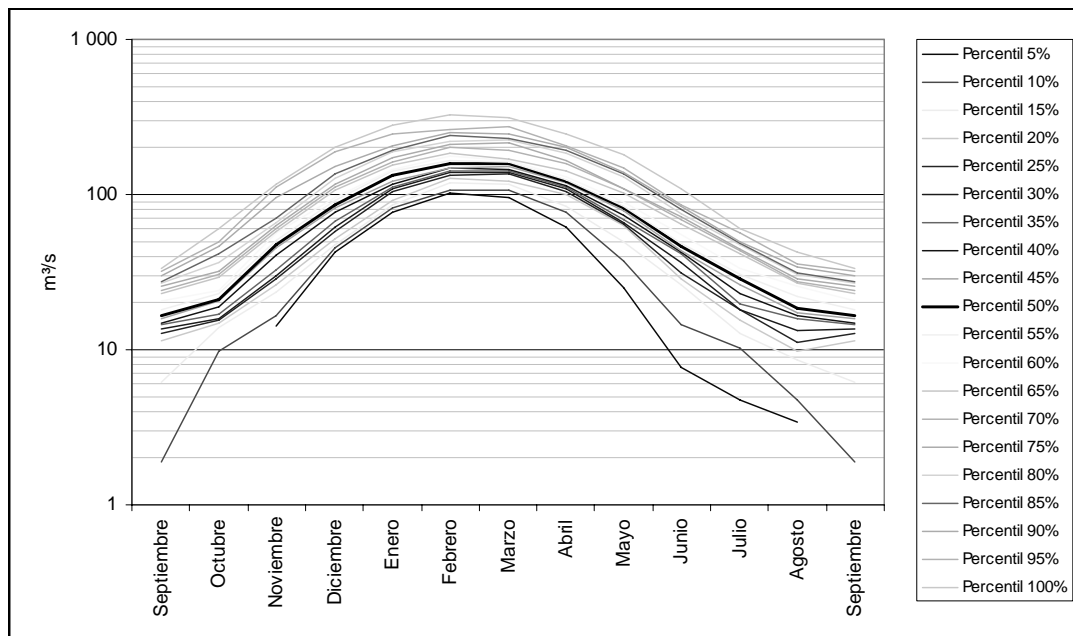


Figura 16. Percentiles de caudales filtrados (escala logarítmica).

En la Figura 16 se grafican los datos de la tabla 2 (página 20), en escala logarítmica. En esta escala, puede apreciarse que casi toda la información contenida en la tabla 2, puede sintetizarse como una única curva promedio, con un ajuste simple en función del percentil que se desee estimar.

En la

tabla 3 se describen estadísticamente las mismas cifras. Ello sirve a fines de calcular numéricamente los datos de la tabla 2 mediante distribuciones normales, pero debe tenerse en cuenta que, en este caso, la distribución normal no se ajusta correctamente, para percentiles inferiores al 15%, ni para Septiembre, lo cual es evidente en la figura de la página 21. Además los percentiles corresponden a datos observados, mientras que la distribución normal es una estimación estadística de ellos.

Posiblemente la heterogeneidad en septiembre se debe a que la transición, de bajante a creciente, se produce a mediados del mes; por lo que presenta características heterogéneas, al comprender dos etapas cualitativamente diferentes (decrecimiento y creciente). Para los percentiles superiores, que se deben a la existencia previa de un año más lluvioso, los altos caudales enmascaran la creciente subsiguiente, por lo que no se observa esta diferencia entre las curvas.

Comparación con la situación posterior a la construcción de la represa.

Se ha observado una tendencia histórica, de aumento en las precipitaciones y caudales, en ésta cuenca, y cuencas vecinas, con posterioridad a la construcción de la represa de Río Hondo (Figura 17). En consecuencia, es de esperar que los caudales disponibles, sean superiores a los necesarios para garantizar las necesidades ecológicas, correspondientes a los períodos de retorno de la serie filtrada.

Con posterioridad a la construcción de la represa, se disponen de datos diarios de caudales erogados.

Dado que estos datos, no poseen una distribución temporal natural, sino que se derivan de la operación de la represa, (a fin de satisfacer las necesidades humanas), no se los puede comparar directamente con los anteriores.

La emisión de esos caudales, hacia el cauce del río, constituye una señal, que modificada por su tránsito a lo largo del río, puede adquirir “ruido”. Este ruido es todo lo que se puede esperar remover mediante un procedimiento como el filtrado Wiener. El filtrado tiene por objeto determinar la fracción del régimen de flujo que es predecible, y en consecuencia ha causado adaptación evolutiva a lo largo de miles –cuando no millones– de años.

No puede esperarse que en 30 ó 40 años se produzca una adaptación evolutiva, (aunque sí que se hayan visto favorecidas algunas especies en relación a otras).

A consecuencia de lo expresado, la comparación se ha efectuado entre la situación anterior a la construcción de la presa, –filtrada a fin de determinar los hidrogramas a los que se ha adaptado la biota–, y los caudales emitidos por la presa.

Si la represa de Río hondo se comportara como un embalse lineal, sería razonable esperar que los caudales extremos (máximos y mínimos) se vieran moderados, produciéndose un “suavizado” del hidrograma; Esto es, los caudales en época seca serían superiores a los naturales, y los de época húmeda serían inferiores.

Sin embargo, dado que la represa genera energía, y su demanda alcanza valores extremos de corta duración, libera

caudales máximos, breves, pero superiores a los naturales.

Distribución diaria de caudales

El estudio de la serie 1968–2005 de caudales diarios, permite establecer una hipótesis concerniente a la distribución diaria de los caudales recomendados (ver página 18).

Como los últimos son promedios mensuales, no contienen información valiosa acerca de su distribución a lo largo de cada mes.

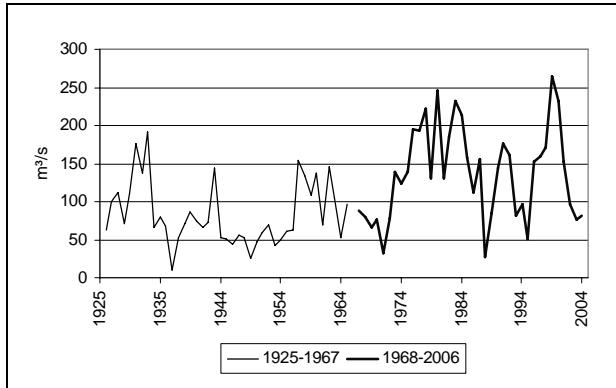


Figura 17: Evolución de los caudales mensuales antes y después de la construcción de la represa

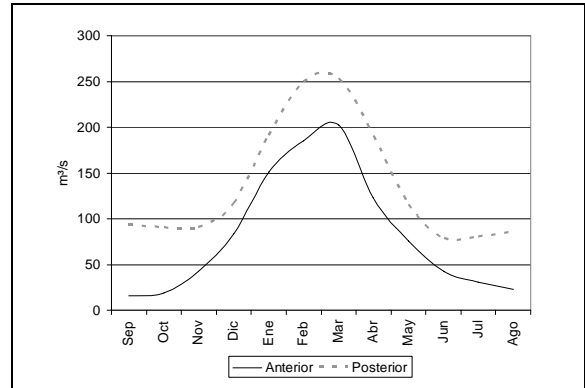


Figura 18: Caudales medios mensuales antes y después de la construcción de la represa.

Dado que los caudales extremos, de corta duración, y la variabilidad intrínseca del régimen de flujo tienen, en general, importancia biológica, sería deseable indicar además del promedio mensual, su distribución diaria.

Con ese objeto, se analizó la serie de caudales de ingreso en la represa de Río Hondo, estimados mediante las ecuaciones de conservación de masa en el embalse, como la suma de aumento de volumen almacenado, (expresado en caudal diario), más el caudal liberado por la represa. Se ignoraron otras variables como la precipitación y la evaporación en el vaso.

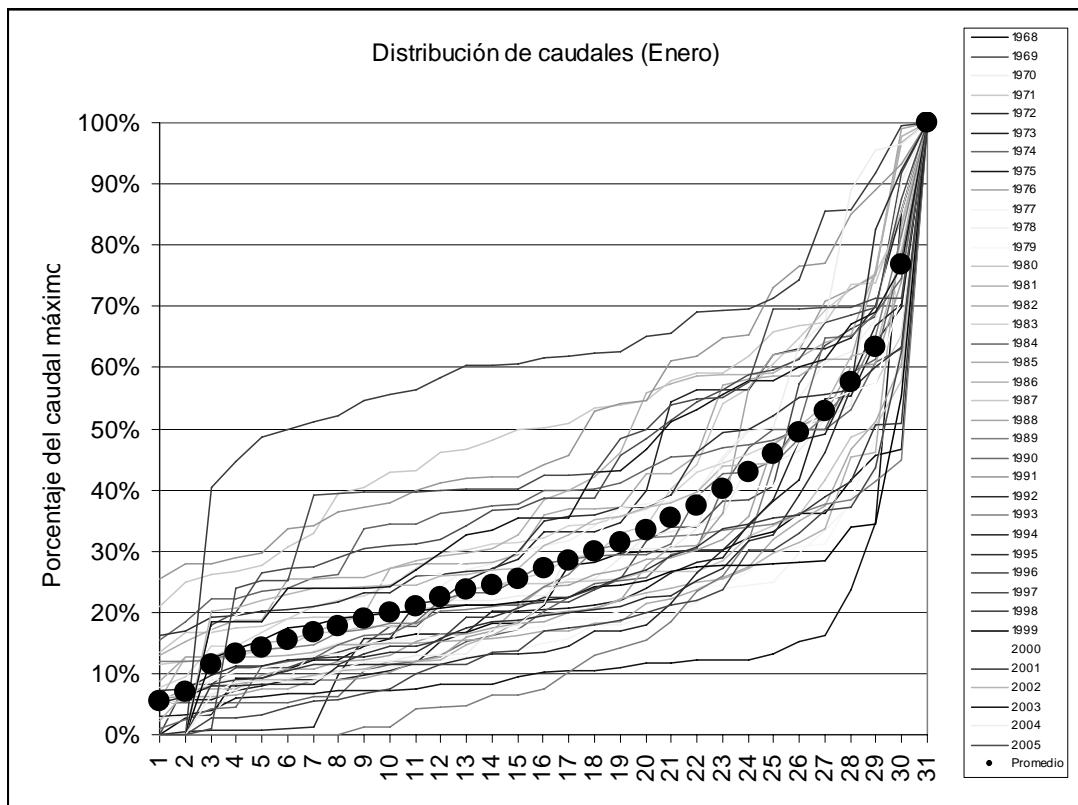


Figura 19: Distribución diaria de caudales en el río Dulce (mes de enero)

A fin de distribuir los caudales recomendados a lo largo de cada mes, se expresaron los datos como porcentaje del

máximo caudal mensual. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 19. En líneas delgadas se grafican, para cada año, los datos ordenados de menor a mayor, y en líneas de puntos, su valor promedio. Es evidente que generalmente en enero se produce uno ó dos valores extremos cuya intensidad duplica^{viii} la de los valores medios. Téngase presente que los flujos de agua no ingresan en el orden en que se muestran en ese gráfico.

Ello derivó en una distribución de percentiles, para cada mes, que se presenta en la Figura 20, y que se aconseja reproducir.

El gráfico ha sido dividido en zonas. La primera (corresponde aproximadamente a 3 días) posee algunos valores bajos, inferiores a los que se obtendría extrapolando la zona central. Sólo es significativa para las cuatro curvas superiores.

La segunda zona corresponde aproximadamente a una recta, que en todas las curvas –Figura 20– presenta similar pendiente ($\frac{dy}{dx} \cong 0,45$), y representa a la mayoría de los valores, por lo que su promedio corresponde aproximadamente a los caudales medios.

La tercera zona, al final de la recta, se inicia con un quiebre, a partir del cual la línea comienza a crecer significativamente. Esta zona dura tres días para las curvas superiores, y siete días para las restantes. Sin embargo puede considerarse, sin mucho error, como de tres días de duración.

La última zona corresponde al caudal extremo mensual, que se presenta en todas las curvas.

A continuación se describen los grupos de curvas observados, para lo cual es muy conveniente compararlas con el gráfico de la Figura 14 en página 16:

Desde Mayo hasta Agosto alimentan al embalse de Río Hondo hidrogramas de un mismo tipo. Ellos poseen valores más homogéneos que el resto (obsérvese que la mayoría de estos valores se encuentra más cercana a 1 que en el resto de las curvas). Estos meses corresponden al período en donde comienza a decrecer el caudal.

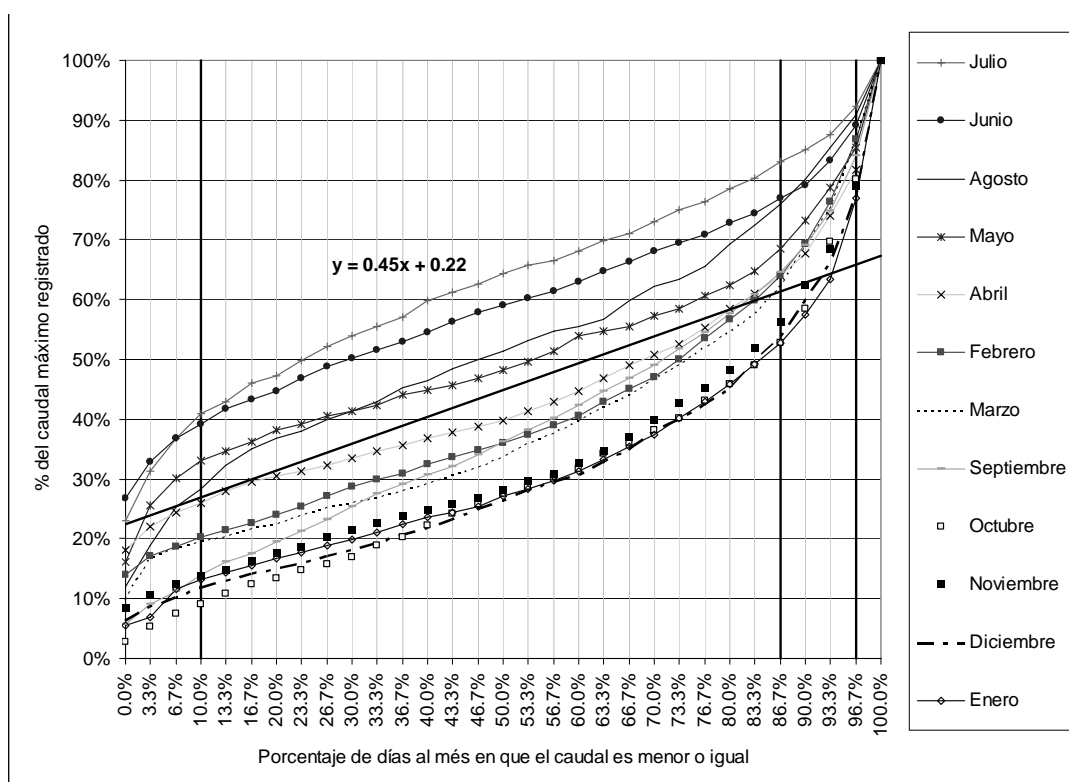


Figura 20: Percentiles de caudales mensuales.

Otro grupo importante de curvas es el que corresponde a febrero, marzo y abril, que pertenecen al período de máximas crecientes. En ellos se observa que el tramo recto se prolonga sin variaciones hasta los valores mínimos (la zona de tres días de valores bajos de caudal ya no es significativa). Los valores extremos son más diferenciados que durante mayo a julio, pero no tanto como en el período restante.

^{viii} En el gráfico de la Figura 19 el valor extremo siempre es 1, y la mayoría de los restantes se encuentra por debajo de 0,5 ó 50%.

Este último, comprendido entre octubre y enero, posee una distribución casi coincidente entre todas las líneas (con excepción de Septiembre).

Este grupo corresponde al período de crecimiento del caudal, y es el que exhibe mayor diferencia entre sus caudales medios y los extremos.

Septiembre y abril presentan un comportamiento atípico, que puede atribuirse a su ubicación temporal intermedia entre otros grupos, constituyendo un intervalo de transición entre ellos.

Dado que la operación de la represa posee muchos condicionantes económicos, sería razonable simplificar una recomendación de hidrograma ecológico.

A fin de simplificar la interpretación del gráfico de la Figura 20, y teniendo en cuenta que quizás la información ecológica más importante que contiene son los caudales máximos en relación a los caudales medios, –ya que ellos determinan cuáles son las máximas cotas inundadas al menos una vez– puede dividirse el gráfico en cuatro zonas:

Caudales bajos. Se producen durante tres días al mes (no necesariamente consecutivos) entre agosto y julio, con la excepción de septiembre.

Caudales altos. También se producen durante tres días al mes.

Caudales extremos. Son los valores más importantes. Se producen una vez al mes, y son los que inundan las cotas máximas en torno al río.

Caudales moderadamente altos. Son mayores que los promedio. Se producen durante 4 días al mes, entre octubre y marzo.

Esta información, simplificada se presenta en la Figura 21 y la Tabla 4. En la Tabla 5 se muestra un ejemplo de aplicación.

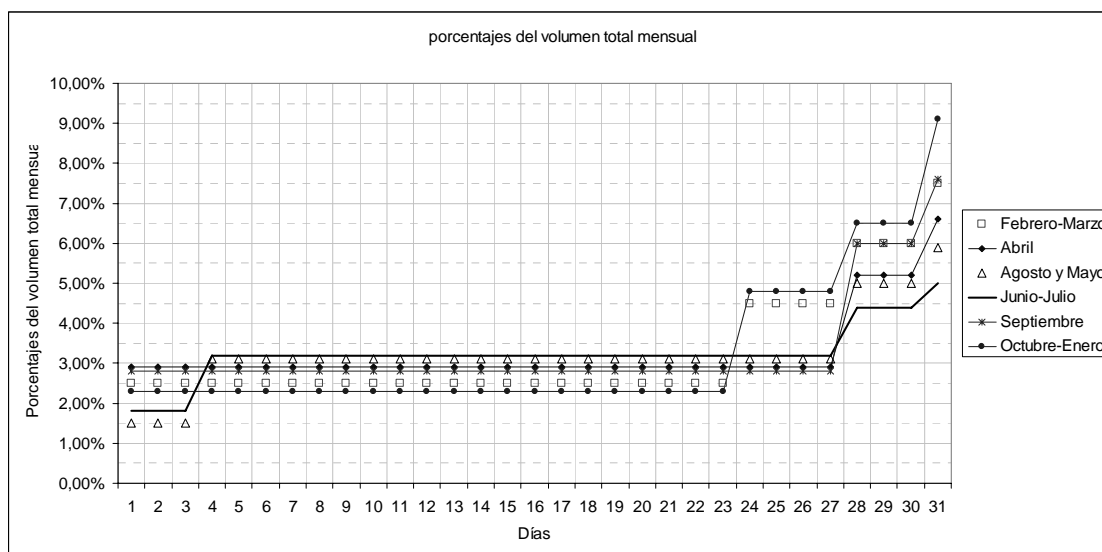


Figura 21: Distribución porcentual de volúmenes a lo largo de cada mes.

Tabla 4: Distribución porcentual de volúmenes a lo largo de cada mes

Duración	Febrero-Marzo	Abril	Agosto y Mayo	Junio-Julio	Septiembre	Octubre-Enero
3 días	–	–	1,50%	1,80%	–	–
Días restantes	2,50%	2,90%	3,10%	3,20%	2,80%	2,30%
4 días	4,50%	–	–	–	–	4,80%
3 días	6,00%	5,20%	5,00%	4,40%	6,00%	6,50%
1 día	7,50%	6,60%	5,90%	5,00%	7,60%	9,10%

Tabla 5. Distribución diaria de caudales (ejemplo).

		Distribución de caudales (m ³ /s)				
		1 día	3 días altos	4 días moderados	Días restantes	3 días bajos
Caudal medio mensual	Mes	(Q Máximo)	(Q Promedio)	(Q Promedio)	(Q Promedio)	(Q Promedio)
12	Septiembre	28	22	-	10	-
10	Octubre	28	20	15	7	-
47	Noviembre	133	95	70	34	-
86	Diciembre	243	173	128	61	-
132	Enero	372	266	196	94	-
159	Febrero	370	296	222	123	-
157	Marzo	365	292	219	122	-
121	Abril	248	195	-	109	-
81	Mayo	148	126	-	78	38
38	Junio	59	52	-	38	21
27	Julio	42	37	-	27	15
20	Agosto	37	31	-	19	9

Bibliografía

- Arthington, Angela H.; Zalucki, J.M.** (Diciembre 1998) *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods*. Occasional Paper 27/98. LWRDC (Land and Water Resources Research and Development Corporation). ISSN 132-0992. ISBN 0 642 26746 4. Australia. Páginas: 141.
http://www.lwa.gov.au/downloads/publications_pdf/PR980309.pdf
- Bechara José A.; Alabarce, María Nieves; Ruiz Díaz, Federico J.** (Abril 2005). *Elaboración Y Validación De Un Modelo De Hábitat Para El Crecimiento Del Dorado (Salminus Brasiliensis) En Los Esteros Del Iberá*. Informe final de la primera etapa del proyecto. Instituto De Ictiología Del Nordeste. Facultad De Ciencias Veterinarias. Universidad Nacional Del Nordeste. Corrientes, Argentina. Páginas: 50.
http://www.ecosibera.org/Informes/INICNE-UNNE/inf_final_habi_dorado_05.pdf
- Bovee K. D.; Lamb, B. L.; Bartholow, J. M.; Stalnaker, C. B.; Taylor, J.; Henriksen, J.** (1998). *Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report. Ed. USGS/BRD-1998-0004. EEUU. Páginas: viii+131 pp.
<http://www.fort.usgs.gov/products/Publications/3910/3910.pdf>
- Brown Catherine; King, Jacqueline.** (Marzo 2003). Banco Mundial. *Water Resources and Environment. Technical Note C.1. Environmental Flows: Concepts and Methods*. Cape Town, Sudáfrica. Páginas: 28.
<http://www.iucn.org/places/medoffice/cdflow/conten/5/pdf/5-3-International-Guid/World-Bank-ENG/Environmental-Flows/NoteC1Environme.pdf>
- Brown, Catherine; King, Jacqueline.** (2003). *Method DRIFT: allocations in an international river. The Lesotho Highlands. Environmental flow assessments for rivers. A summary of the drift process*. Information report N° 01/00. Southern waters. Ed World Conservation Union - IUCM. Sudáfrica. Páginas: 27.
<http://www.southernwaters.co.za/downloads/drift.pdf>
- Cabral Cruz, Rafael.** (2005). *Prescrição De Vazão Ecológica: Aspectos Conceituais E Técnicos Para Bacias Com Carência De Dados*. Tese De Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ecologia UFRGS. Porto Alegre. Páginas: 173.
http://hidroprojetos.ctlab.ufsm.br/gerhi/downloads/tese_rafa.pdf
- Clairain, E. J. Jr.** (2002). *Hydrogeomorphic approach to assessing wetland functions: Guidelines for developing regional guidebooks; Chapter 1, Introduction and Overview of the Hydrogeomorphic Approach*. ERDC/EL TR-02-3, U.S. Army Engineer Research and Development Center. EEUU. Páginas: 39. Vicksburg, MS.
<http://el.erd.c.usace.army.mil/wetlands/pdfs/trel02-3.pdf>
- Davis Jenny; Dr Horwitz, Pierre; Dr Norris, Richard; Dr Chessman, Bruce; McGuire, Megan; Sommer, Bea; Dr Trayler, Kerry.** *Wetland Bioassessment Manual (Macroinvertebrates)*. Australia. Páginas: 30.
<http://www.science.murdoch.edu.au/centres/aer/publications/WetBioassManual.pdf>
- Davis, JA.; Froend, RH.; Hamilton, DP.; Horwitz, P.; McComb, AJ.; Oldham, CE.** (Noviembre 2001). *Environmental Water Requirements to Maintain Wetlands of National and International Importance (2001)*, Environmental Flows Initiative Technical Report Number 1, Commonwealth of Australia, Canberra. ISBN: 0642547688 Commonwealth of Australia,
<http://www.deh.gov.au/water/rivers/nrhp/wetlands/pubs/wetlands.pdf>
- Díez Hernández, Juan Manuel; Martínez de Azagra, Andrés.** (2004). *Directrices Para La Modelación Hidráulica De Caudales Ambientales Mediante La Metodología IFIM*. Madrid, España. Páginas: 11.
http://www.us.es/ciberico/archivos_word/265b.doc
- Espinoza, C. Carlos; Vargas, Ximena; Pardo P., M. Mónica** (1999). *Metodología Incremental Para La Asignación De Caudales Mínimos Aconsejables, IFIM*. Páginas: 7. Chile.
<http://www.unesco.org/phi/libros/VIJornadas/B27.pdf>

- FUTUYAMA, D.J.** (1992). *Biología Evolutiva. 2 ed.*, Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 631 p.
Referenciado en R. C. Cruz, (2005).
<http://www.lk.iwmi.org/ehdb/EFM/visitors/viewallMethodology.asp?currentpage=1>
- King, Jackie; Tharme, Rebecca; Brown, Cate.** (Septiembre 1999). *Definition and Implementation of Instream Flows*. Southern Waters, University of Cape Town, South Africa.
Páginas: 87. Prepared for Thematic Review II.1. 'Thematic Report, Definition & Implementation of Instream Flows, Final Report'; "Dams and Development: A New Framework for Decision-Making" Ed. World Commission on Dams.
<http://dams.org/docs/kbase/contrib/env238.pdf>
- Lafayette D. Luz; Loucks, Daniel P.** (2003). 'Developing Habitat Suitability Criteria for Water Management: A Case Study'. Intl. J. River Basin Management Vol. 1, No. 4 (2003), pp. 283–295. Ed. IAHR (International Association of Hydraulic Engineering and Research) & INBO. España. Páginas: 13.
<http://www.jrbm.net/pages/archives/jrbm4/p0026.pdf>
- McCarthy, James H.** (Enero 2003). *Wetted Perimeter Assessment. Shoal Harbour River*. Shoal Harbour, Clarenville Newfoundland. Canadá. Páginas: 14.
http://www.env.gov.nl.ca/env/Env/EA_2001/pdf_files/1059_-_WettedPerimeterAssessment.pdf
- MENDIONDO, E. M. ; NEIFF, J. J. ; DEPETTRIS, C. A.** (2000). 'Interpretación de humedales por el abordaje METAS-REVIVIR'. In: XV Cong. Arg.del Agua, 2000, Termas Río Hondo, Sgo. Estero. Actas. Santiago del Estero : Ed. UNSE, Páginas: 12
<http://libnet.unse.edu.ar/Rhid/R/R01020.pdf>
- Menghi, M. ; M Herrera.** (1995). "Major vegetational trends related to relief and hydrology in Mar Chiquita wetlands". Coenosis 10. Páginas 1-10. Goritzia, Italy.
(Nota: Actualmente la publicación se denomina "Community Ecology")
- Neiff, Juan José.** (1990). "Ideas para la interpretación ecológica del Paraná". *Interciencia* 15 (6):
Páginas 424-441.
<http://www.neiff.com.ar/downloads/20.pdf>
- Neiff, Juan José.** (1999). 'El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica'. Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CECOAL). Corrientes, Argentina. Páginas: 50.
<http://www.neiff.com.ar/downloads/5.rtf>
- Persinger, Jason W.** (2003). *Developing Habitat Suitability Criteria For Individual Species And Habitat Guilds In The Shenandoah River Basin*. Ed. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Páginas: 231. Virginia, EEUU.
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04072003-160721/unrestricted/Persinger-Final-Thesis.pdf>
- Press, W. H.; Teulkosky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P.** (1988). *Numerical recipes in c. The art of scientific computing*. Cambridge University Press. Cambridge.. Pág. 547-549.
<http://www.library.cornell.edu/nr/bookcpdf.html>
- Pyrce, R.S.** (Agosto 2004). *Hydrological Low Flow Indices and their Uses. Considering Baseflow as a Low Flow or Instream Flow*. WSC Report No.04-2004. Watershed Science Centre, Peterborough, Ontario, Canadá. Páginas: 33.
<http://www.trentu.ca/wsc/PDFfiles/LowFlowOntRpt2004.pdf>
- Richter, Brian D.; Warner, Andrew T.; Meyer, Judy L.; Lutz, Kim.** (2002). 'A Collaborative and Adaptive Process for Developing Environmental Flow Recommendations'. River Research and Applications, Volume 22, Issue 3, Pages 297 - 318. John Wiley & Sons, Ltd.
http://www.freshwaters.org/pub/pdf/prescribing_flow_regimes.pdf
- Rodriguez, A.; Pagot, M.; Hillman, G.; Caamaño Nelli, G.** (2001). *Pronóstico Hidrológico de Inundaciones en la Región de Mar Chiquita. Informe IV. Análisis y Propuesta de Caudales e Hidrogramas Ecológicos para los Bañados del Río Dulce*. Laboratorio de Hidráulica. FCEFYN. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. Páginas 154.
La dirección web del Laboratorio de Hidráulica es:
<http://www.efn.uncor.edu/labhidraul.html>

- The Nature Conservancy.** (2006). *Indicators of Hydrologic Alteration Version 7. User's Manual*. Páginas: 74.
<http://www.nature.org/initiatives/freshwater/files/ihav7.pdf>
- Thiesing, M.A.** (2004). *'An evaluation of wetland assessment techniques and their applications to decision making'*. US Environmental Protection Agency, Region II. EEUU. Páginas:10.
<http://www.deh.gov.au/ssd/publications/ssr/pubs/techniques-ssr161.pdf>
- USGS.** (2001). *PHABSIM For Windows. User's Manual And Exercises*. Open File Report 01-340. Midcontinent Ecological Science Center. Ed. U.S. Geological Survey. EEUU. Páginas: 299.
<http://www.fort.usgs.gov/products/Publications/15000/15000.pdf>
- Valdovinos Zarges, Claudio.** (2000). *La Metodología Ifim.Unidad de Sistemas Acuáticos – Centro EULA – Universidad de Concepción*. Chile. Páginas: 7.
<http://www.eula.cl/contenido/Ifim.pdf>
- WRIA.** (Octubre 2006). *'Habitat Suitability Criteria Workshop. Chapter 4. Habitat Suitability Curves'*. WRIA 1 Watershed Management Project. EEUU. Páginas: 17.
<http://www.wria1project.wsu.edu/documents/HSCWorkshopReport.pdf>
- Young, W. J.; Cuddy, S.F.; Marston, F.M.; Farley, T.F.N.** (Abril 1999). *Environmental Flows Decision Support System – Volume 1*. CSIRO Land and Water, technical report N° 11/99. Páginas: 86.
<http://www.clw.csiro.au/publications/technical99/tr11-99vol-1.pdf>