

Con el apoyo de la Alianza



F U N D A C I Ó N  
GONZALO RÍO ARRONTE, I.A.P.

# Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos

---

## Aproximaciones hidrológicas

Preparado por Sergio A. Salinas Rodríguez (ssalinas@wwfmex.org)

Alianza WWF– Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P.

20/08/2011

A partir del 2004, la Alianza entre el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y la Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. ha venido trabajando en el desarrollo de nuevos modelos para la gestión sostenible del agua, poniendo al centro del análisis la determinación de caudal ecológico en tres cuencas modelo: 1) Río Conchos en Chihuahua; 2) Copalita-Zimatán-Huatulco en Oaxaca; y 3) San Pedro Mezquital en Zacatecas, Durango y Nayarit. La experiencia generada a través de este tiempo, rica en participación por parte de los tres órdenes de gobierno, la academia y comunidades rurales, entre otros, ha servido de base para el Anteproyecto de Norma Mexicana para la determinación del régimen de caudal ecológico en cuencas hidrológicas. La presente “Guía rápida” supone una herramienta para la determinación de caudales ecológicos mediante el uso de aproximaciones hidrológicas, sus procedimientos y criterios a considerar, y con la finalidad del fortalecimiento de capacidades por medio de Talleres para la aplicación del Anteproyecto mencionado.

Con el apoyo de la Alianza



FUNDACION  
GONZALO RÍO ARRONTE, I.A.P.



**CONAGUA**  
Comisión Nacional del Agua



## **EJEMPLO. ESTIMACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO MEDIANTE LAS METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS EN CORRIENTES O CUERPOS DE AGUA DE PROPIEDAD NACIONAL A NIVEL DE CUENCA HIDROLÓGICA**

### **Antecedentes**

Con la finalidad de ilustrar los procedimientos aquí propuestos, se utiliza la información hidrométrica aforada por la estación con clave 11014, ubicada en la cuenca del río Acaponeta, Nayarit, y obtenida a partir del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

#### 1. Objetivo ambiental

A efecto de ilustrar la presente aproximación hidrológica y considerando los criterios establecidos en el Anteproyecto de Norma Mexicana para la determinación del régimen de caudal ecológico en cuencas hidrológicas, a continuación se muestran la importancia ecológica y presión de uso del agua para obtener el estado de conservación deseado para la cuenca del río Acaponeta.

##### A. Importancia ecológica

En recientes estudios a escala nacional, se ha encontrado lo siguiente sobre la cuenca del río Acaponeta:

- Es una de las 18 cuencas a nivel nacional de prioridad de conservación extrema conforme a Aguilar V., M. Kolb, P. Koleff y T. Urkiza Hass. 2011. Las cuencas de México y su biodiversidad: Una visión integral de las prioridades de conservación". Capítulo 29 en "Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización". 142-153 pp.
- Reserva potencial de agua con finalidad ambiental con categoría Alta en CONAGUA. 2011. Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México. SEMARNAT. 87 pp.

Por lo anterior, la importancia ecológica será considerada con categoría Muy alta.

##### B. Presión de uso del agua

Conforme a la información hidrológica del estudio de disponibilidad (NOM-011-CNA-2000) publicada en el Diario Oficial de la Federación, la situación de esta cuenca se presenta en la Tabla 1.



Tabla 1. Valores de los términos que intervienen en el cálculo de la disponibilidad superficial ( $Hm^3/año$ )

Cuenca	Río Acajoneta 1	Río Acajoneta 2
Descripción	Desde el nacimiento del río Acajoneta hasta donde se localiza la EH Acajoneta	Desde la EH Acajoneta hasta su desembocadura en el Océano Pacífico
Cp	1,358.9	79.1
Ar	0.0	1,336.5
Uc	22.4	3.6
R	0.0	0.0
Im	0.0	0.0
Ex	0.0	0.0
Ev	0.0	0.0
Dv = Av	0.0	0.0
Ab	1,336.5	1,412.0
Rxy	3.4	0.0
Ab - Rxy	1,333.1	1,412.0
D	1,333.1	1,412.0
Dxx		
Dxy		
<b>CLASIFICACIÓN</b>	Disponibilidad	Disponibilidad
<b>SIMBOLOGIA</b>		
Cp.- Volumen medio anual de escurrimiento natural; Ar.- Volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba; Uc.- Volumen anual de extracción de agua superficial; R.- Volumen anual de retornos; R.- Volumen anual de retornos; Im.- Volumen anual de importaciones; Ex.- Volumen anual de exportaciones; Ev.- Volumen anual de evaporación en embalses; Dv = Av.- Volumen anual de variación de almacenamiento en embalses; Ab.- Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo; Rxy.- Volumen anual actual comprometido aguas abajo; D.- Disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca hidrológica; y EH.- Estación hidrométrica		

A partir de lo anterior, se determina la presión de uso como la relación en porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca o acuífero. El nivel de la presión de uso se establecerá de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Presión de uso

Presión de uso	Muy Alta	Alta	Media	Baja
	≥ 80 %	≥ 40 %	≥ 11 %	≤ 10 %

Para este ejemplo del río Acajoneta, la estación hidrométrica se encuentra ubicada en la sección "Río Acajoneta 1" descrita en la Tabla 1, por lo que al realizar el cálculo de la presión de uso (1.9%), esta cuenca se considera con la categoría Baja.



FUNDACIÓN  
GONZALO RÍO ARRONTE, I.A.P.

Con el apoyo de la Alianza



CONAGUA  
Comisión Nacional del Agua

### C. Estado de conservación deseado

Finalmente, el estado de conservación deseado representa el objetivo ambiental asignado para la cuenca, el cual se obtiene conforme a las reglas de decisión mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Matriz de objetivos ambientales

Importancia ecológica	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	B	C
	Media	A	B	C	C
	Baja	A	B	C	D
		Baja	Media	Alta	Muy Alta
		Presión de uso			

Donde, A = Representa un objetivo ambiental cuyo estado o nivel de conservación deseado es Muy bueno; B = Bueno; C = Moderado; y D = Deficiente.

Partiendo de lo anterior, el ejemplo del río Acaponeta será considerado con un objetivo ambiental clase "A".



## APROXIMACIÓN HIDROLÓGICA “DE GRAN VISIÓN”. ALIANZA WWF –FUNDACIÓN GONZALO RÍO ARRONTE, I.A.P.

Dependiendo de las características en aquellas corrientes o cuerpos de agua de propiedad nacional a nivel de cuenca hidrológica donde se pretenda conservar su régimen hidrológico natural, se deberá reservar un régimen y volumen anual de agua para uso ambiental o para la conservación ecológica conforme a la Ley de Aguas Nacionales.

### Elementos de los caudales ecológicos a determinar:

- Régimen anual de caudales con finalidad ambiental
- Volumen anual de agua a reservar con finalidad ambiental

### Procedimiento a seguir:

El procedimiento para determinar el volumen de reserva con finalidad ambiental es el siguiente:

1. Determinar el objetivo ambiental para la cuenca.
2. Según el objetivo ambiental y la naturaleza de la corriente (permanente o intermitente), considerar el intervalo de porcentajes del Ecurrimiento Medio Anual (EMA) como valores de referencia para caudal ecológico según aparece en la Tabla 1.

*Tabla 1. Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales*

OBJETIVO AMBIENTAL	ESTADO DE CONSERVACION	CAUDAL ECOLÓGICO (% EMA)	
		CORRIENTES PERENNES	CORRIENTES TEMPORALES
A	Muy bueno	≥40	≥20
B	Bueno	25-39	15-19
C	Moderado	15-24	10-14
D	Deficiente	5-14	5-9

3. Asignar un porcentaje de reserva dentro del intervalo definido por el objetivo ambiental. El ajuste al interior del intervalo definido por el objetivo ambiental deberá realizarse de mayor a menor (p.e. Objetivo ambiental “B”: 40, 39, 38,..... 26), considerando en todo momento el interés de conservación de las cuencas (con especial observancia en las Áreas Naturales Protegidas y la conservación de especies amenazadas), los posibles conflictos con el resto de usos del agua o las condiciones particulares de la masa de agua (como la contaminación o alteración morfológica).
4. Considerando los antecedentes expuestos, así como el procedimiento a seguir, a partir del Caudal Medio Mensual para la serie sujeta al análisis, se elige el caudal ecológico (Tabla 2 y Figura 1 – Hoja de cálculo **Qecol\_MetH1ValRef** en Excel de apoyo).



Tabla 2. Caudal ecológico (Qecol) mensual y régimen anual para el ejemplo del río Acaponeta (corriente permanente - unidades en m<sup>3</sup>/seg)

Caudal Medio Mensual = CMM		Escurrimiento Medio Anual = EMA = 42.43								
Intervalos de valores de referencia para régimen de caudal ecológico en corrientes permanentes										
Mes	CMM	DEFICIENTE		MODERADO		BUENO		MUY BUENO		Qecol elegido
		5%	14%	15%	24%	25%	39%	40%	80%	
ENE	24.81	1.24	3.47	3.72	5.95	6.20	9.68	9.92	19.85	<b>14.89</b>
FEB	9.50	0.48	1.33	1.43	2.28	2.38	3.71	3.80	7.60	<b>5.70</b>
MAR	6.08	0.30	0.85	0.91	1.46	1.52	2.37	2.43	4.86	<b>3.65</b>
ABR	3.27	0.16	0.46	0.49	0.79	0.82	1.28	1.31	2.62	<b>1.96</b>
MAY	1.81	0.09	0.25	0.27	0.44	0.45	0.71	0.73	1.45	<b>1.09</b>
JUN	11.46	0.57	1.60	1.72	2.75	2.87	4.47	4.59	9.17	<b>6.88</b>
JUL	82.19	4.11	11.51	12.33	19.73	20.55	32.05	32.88	65.75	<b>49.31</b>
AGO	126.60	6.33	17.72	18.99	30.38	31.65	49.37	50.64	101.28	<b>75.96</b>
SEP	154.68	7.73	21.65	23.20	37.12	38.67	60.32	61.87	123.74	<b>92.81</b>
OCT	57.88	2.89	8.10	8.68	13.89	14.47	22.57	23.15	46.30	<b>34.73</b>
NOV	17.37	0.87	2.43	2.61	4.17	4.34	6.77	6.95	13.90	<b>10.42</b>
DIC	11.29	0.56	1.58	1.69	2.71	2.82	4.40	4.52	9.03	<b>6.78</b>
<b>Promedio</b>	<b>42.25</b>	<b>2.11</b>	<b>5.91</b>	<b>6.34</b>	<b>10.14</b>	<b>10.56</b>	<b>16.48</b>	<b>16.90</b>	<b>33.80</b>	<b>25.35</b>

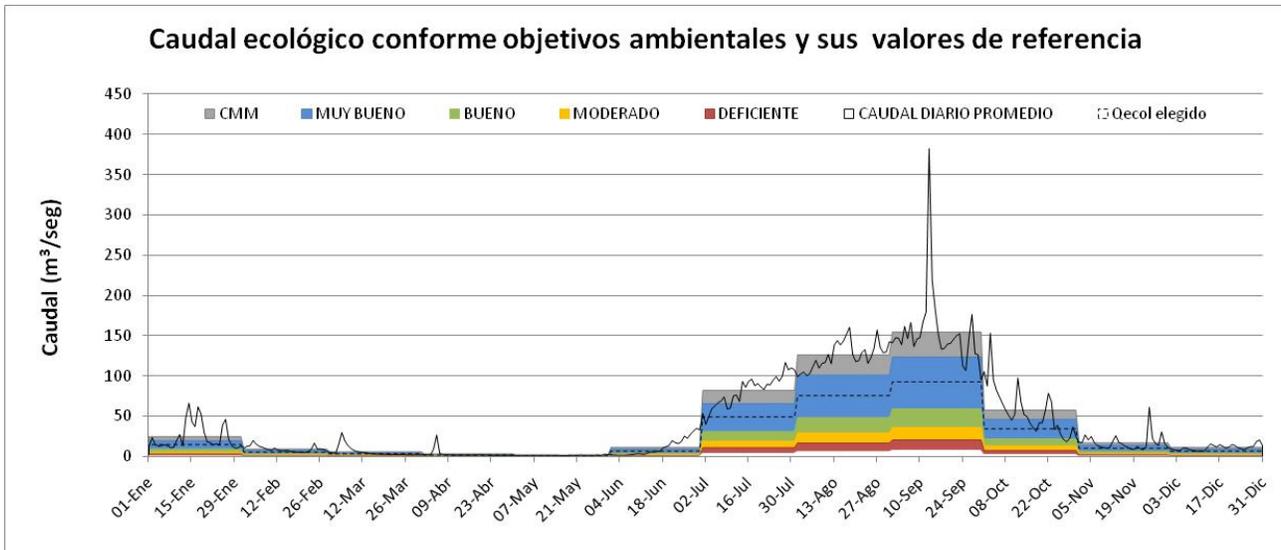


Figura 1. Régimen de caudal ecológico para el ejemplo del río Acaponeta (corriente permanente - unidades en m<sup>3</sup>/seg)



## ANÁLISIS DE LA SERIE HIDROLÓGICA HISTÓRICA Y ACTUAL. ¿NATURAL O ALTERADA? ALIANZA WWF –FUNDACIÓN GONZALO RÍO ARRONTE, I.A.P.

Consiste en determinar el régimen de volúmenes circulantes de agua de manera mensual y anual, del estado natural y actual, y el grado de afectación de este último sobre el primero. El objetivo es determinar si existe o no afectación significativa al régimen hidrológico natural debido a la presencia de infraestructura hidráulica o hidroeléctrica.

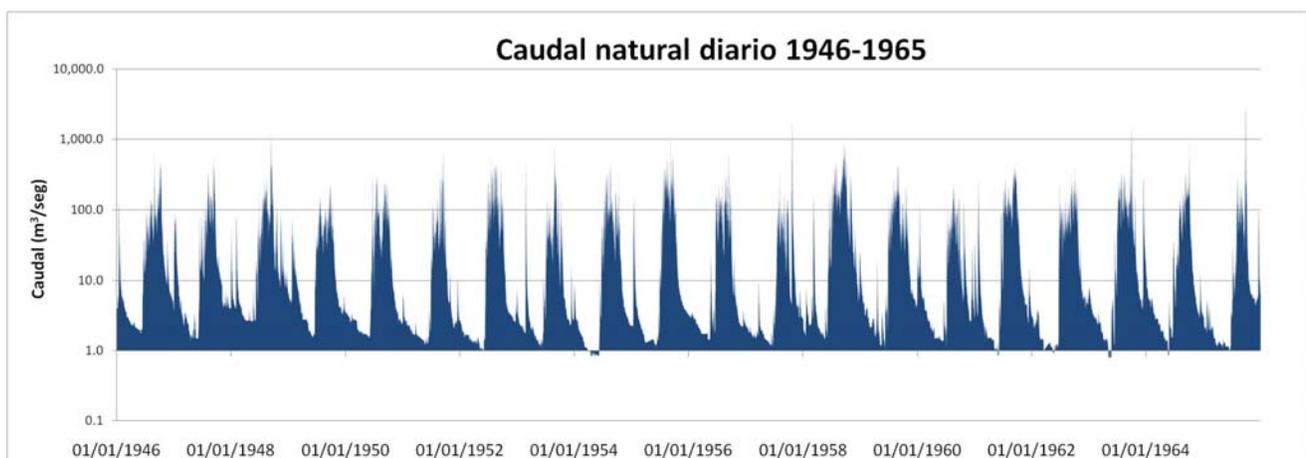
Este análisis es necesario en todos aquellos tramos donde existan obras hidráulicas (p.e. grandes presas o derivadoras) o tomas de agua (p.e. bombeo de pozos) para determinar si éstas afectan significativamente al régimen hidrológico natural de caudales y a los ecosistemas acuáticos asociados, por lo que será necesaria la identificación del grado de alteración que existe en el régimen hidrológico actual (RHA) con relación al natural (RHN).

### El abordaje de este análisis requiere:

- Determinar los regímenes de volúmenes circulantes mensuales y anuales de agua, en estado natural y actual, y si existe alteración en el RHA

La información hidrológica requerida consiste en una serie a escala diaria o mensual y con al menos 20 años completos de cada tipo de régimen hidrológico (natural y actual o presumiblemente alterado). En tamaños menores de la serie, es necesario analizar la representatividad de la misma de años hidrológicos bajo condiciones húmedas, medias y secas.

Para ejemplificar este análisis, se tomó la serie de cálculo de la estación hidrométrica en Acaponeta, Nayarit, cuenca del río Acaponeta, donde los años de 1946-1965 fueron utilizados para caracterizar el régimen hidrológico natural (RHN), y el periodo de 1983-2002 de la serie fue analizado como el régimen hidrológico actual (RHA) (Figura 2).



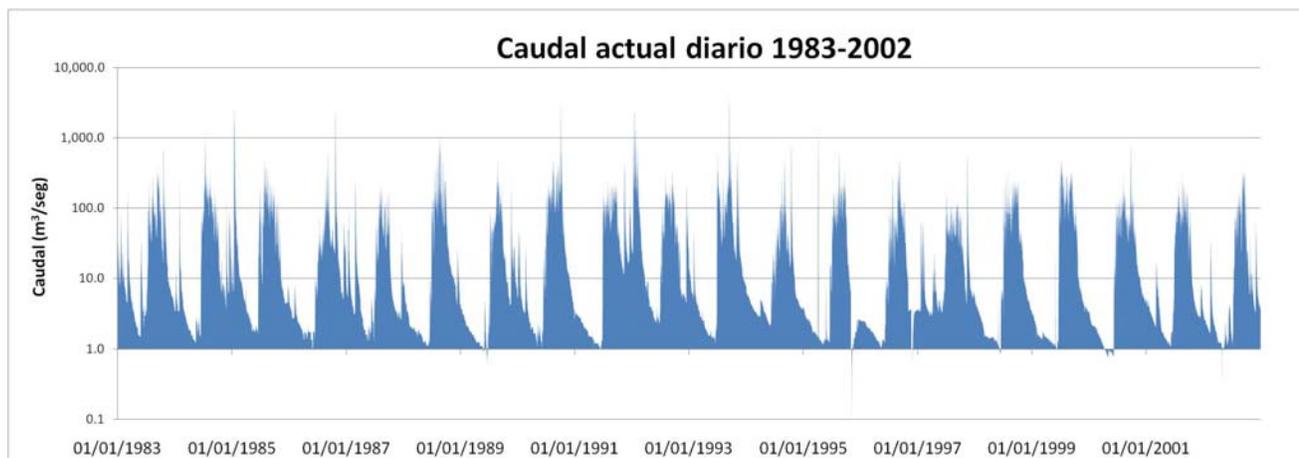


Figura 2. Representación gráfica de los regímenes diarios hidrológicos natural y actual en escala logarítmica

**El procedimiento a seguir se detalla a continuación:**

- 1) A partir de la estación hidrométrica más representativa de la zona de estudio, determinar el régimen de caudales ordinarios (máximos y mínimos) según el procedimiento que se detalla a continuación:
  - i. Para el ejemplo en el río Acaponeta, ordenar a partir de la información hidrológica de la serie diaria, los caudales medios mensuales, separando las series en RHN y en régimen presumiblemente alterado (RHA).
  - ii. Organizar los caudales mensuales en años naturales para ambas series (Tabla 3 – Hoja de cálculo **Ind\_AltHidro** en el Excel de apoyo).

Tabla 3. Caudales medios mensuales de las series de análisis

Régimen hidrológico natural (RHN)													
m <sup>3</sup> /seg	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio
1946	17.60	4.72	2.86	2.35	2.04	10.73	46.83	100.28	104.16	125.37	13.95	5.79	36.39
1947	32.33	4.21	2.84	1.77	1.93	19.85	41.79	135.22	131.04	14.37	5.31	4.58	32.94
1948	8.94	14.58	3.35	2.83	3.17	23.28	83.38	121.24	203.32	31.23	22.71	9.58	43.97
1949	15.77	14.21	5.02	2.78	1.98	9.72	65.72	56.64	88.00	37.40	5.48	3.92	25.55
1950	3.16	2.84	2.30	1.80	1.68	31.07	103.30	59.45	123.88	37.52	4.85	2.69	31.21
1951	3.23	2.15	1.83	1.58	1.38	2.45	43.02	74.47	144.52	10.97	3.07	3.63	24.36
1952	2.07	1.68	1.40	1.38	1.09	40.50	151.89	199.74	96.89	20.64	3.37	3.33	43.66
1953	2.71	32.29	4.55	1.88	1.33	3.25	52.48	102.01	99.19	26.52	3.37	4.00	27.80
1954	3.22	1.68	1.13	0.93	0.88	13.98	113.09	122.07	66.65	50.76	4.59	2.59	31.80
1955	20.19	3.14	1.75	1.35	1.40	2.33	85.29	231.01	226.81	42.03	5.45	3.65	52.03
1956	3.17	2.63	1.94	1.75	4.00	36.90	97.48	106.61	126.79	9.38	3.00	2.50	33.01



1957	2.02	1.67	2.70	1.84	1.39	1.73	35.94	67.24	63.84	120.13	8.83	3.73	25.92
1958	3.01	2.97	20.52	2.02	2.01	30.38	195.59	162.58	363.89	136.50	58.66	12.55	82.56
1959	6.70	3.34	2.43	3.37	1.78	7.56	78.65	178.58	86.48	64.61	13.36	5.39	37.69
1960	20.15	4.62	2.56	1.76	1.51	2.07	35.40	95.38	56.84	22.35	6.63	6.40	21.31
1961	31.91	5.16	1.79	1.49	1.10	17.38	124.98	113.99	239.38	37.12	5.62	4.71	48.72
1962	2.59	2.49	1.25	1.22	1.06	25.59	65.12	76.75	132.63	94.50	9.74	5.35	34.86
1963	4.65	2.76	2.29	1.44	1.76	15.05	153.04	135.84	206.27	63.35	7.90	40.29	52.89
1964	6.33	4.05	2.62	1.78	1.75	8.46	25.34	92.67	163.91	77.41	5.12	4.46	32.83
1965	2.73	2.36	1.44	1.27	1.23	1.61	14.76	111.88	282.32	36.25	5.59	15.97	39.78
<b>Promedio</b>	<b>9.62</b>	<b>5.68</b>	<b>3.33</b>	<b>1.83</b>	<b>1.72</b>	<b>15.19</b>	<b>80.65</b>	<b>117.18</b>	<b>150.34</b>	<b>52.92</b>	<b>9.83</b>	<b>7.26</b>	<b>37.96</b>
<b>Régimen hidrológico actual (RHA)</b>													
<b>m<sup>3</sup>/seg</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>Promedio</b>
1983	19.45	9.12	21.17	3.14	4.71	4.96	51.12	93.35	145.94	107.44	23.60	5.39	40.78
1984	12.79	12.33	2.52	1.63	1.79	27.97	233.91	137.05	74.00	18.56	16.33	21.79	46.72
1985	325.77	16.76	6.16	3.03	1.93	34.18	100.36	158.85	124.08	49.02	12.47	5.14	69.81
1986	3.40	3.73	2.03	1.60	1.53	4.69	27.90	90.27	103.84	214.39	21.74	18.94	41.17
1987	16.90	23.77	17.43	2.57	1.62	2.64	34.30	88.22	69.75	18.73	3.42	9.08	24.04
1988	5.20	2.23	1.82	1.68	1.25	5.75	119.16	288.69	157.37	28.94	10.18	8.34	52.55
1989	3.18	2.07	1.63	1.28	1.06	1.76	35.58	137.68	102.95	14.83	23.67	13.50	28.27
1990	13.66	6.97	2.75	1.74	1.60	11.27	120.52	186.31	208.98	306.07	14.62	5.34	73.32
1991	3.07	2.45	1.85	1.48	1.21	9.12	108.33	104.27	138.39	30.41	69.17	39.72	42.45
1992	460.77	163.60	14.31	6.13	3.16	2.94	50.98	148.19	136.10	39.19	8.19	37.44	89.25
1993	10.34	6.80	2.99	2.02	1.57	18.63	149.14	100.49	504.38	43.00	97.72	10.23	78.94
1994	5.42	3.79	3.06	4.16	2.65	9.40	29.05	87.84	89.40	77.91	6.84	3.98	26.96
1995	3.03	2.29	1.67	66.04	1.73	5.47	78.19	156.74	152.91	21.62	0.92	2.25	41.07
1996	2.48	2.09	1.74	1.36	1.20	6.32	66.59	82.52	143.02	38.06	2.47	3.24	29.26
1997	12.82	13.88	3.30	8.44	4.14	13.28	60.36	57.19	70.10	24.61	59.64	6.08	27.82
1998	3.81	2.39	1.49	1.44	1.31	3.41	89.50	103.00	154.05	61.21	9.55	4.22	36.28
1999	2.55	1.53	1.53	1.36	1.18	53.78	206.33	160.47	158.84	37.40	5.56	3.62	52.84
2000	2.41	1.90	1.34	0.92	0.90	34.52	81.35	103.42	126.42	50.80	10.84	5.36	35.02
2001	3.97	2.51	6.21	1.70	1.27	5.25	88.86	104.45	87.80	23.75	3.66	4.19	27.80
2002	2.37	6.57	1.99	1.18	1.33	2.29	29.42	84.94	170.45	16.31	6.05	10.56	27.79
<b>Promedio</b>	<b>45.67</b>	<b>14.34</b>	<b>4.85</b>	<b>5.65</b>	<b>1.86</b>	<b>12.88</b>	<b>88.05</b>	<b>123.70</b>	<b>145.94</b>	<b>61.11</b>	<b>20.33</b>	<b>10.92</b>	<b>44.61</b>

- iii. Calcular para cada mes del año en la serie de RHN el régimen de caudales máximos y mínimos ordinarios según los percentiles 90 y 10, tanto mensuales como anuales (Tabla 4).



Tabla 4. Caudales máximos y mínimos ordinarios del régimen hidrológico natural

m <sup>3</sup> /seg	Percentil 10	Percentil 90
ENE	2.54	21.36
FEB	1.68	14.25
MAR	1.39	4.60
ABR	1.27	2.78
MAY	1.09	2.15
JUN	2.04	31.65
JUL	34.39	152.01
AGO	66.46	180.70
SEP	66.37	243.68
OCT	14.03	120.66
NOV	3.34	14.83
DIC	2.68	12.89
<b>Aportación media (suma)</b>	<b>197.26</b>	<b>801.56</b>
<b>Caudal medio anual (promedio)</b>	<b>16.44</b>	<b>66.80</b>

2) Verificar si los caudales circulantes actualmente (RHA) a manera mensual y anual se encuentran contenidos en el régimen de caudal ordinario máximo (P90) y mínimo (P10) sugeridos por el RHN (Tabla 5, Figuras 3, 4 y 5), en donde:

- Si el régimen actual (RHA) cumple en magnitud mensual y anual más de un 50% con relación al RHN, se considerará hidrológicamente no alterado.
- Si el cumplimiento del régimen actual (RHA) es <50% en su magnitud mensual o anual con relación al RHN, se considerará significativamente alterado.

Tabla 5. Régimen de caudales ordinarios mínimos y máximos acorde al RHN (P10-P90) VS RHA para el río Acaponeta

Parámetro	P10	P50	P90	Q medio actual (m <sup>3</sup> /s)	No. meses que cumple	Total meses	Porcentaje de cumplimiento	Clase
Enero	2.54	3.94	21.36	45.67	15	20	75	
Febrero	1.68	3.05	14.25	14.34	15	20	75	
Marzo	1.39	2.37	4.60	4.85	14	20	70	
Abril	1.27	1.77	2.78	5.65	12	20	60	
Mayo	1.09	1.60	2.15	1.86	15	20	75	
Junio	2.04	12.35	31.65	12.88	17	20	85	
Julio	34.39	72.18	152.01	88.05	14	20	70	
Agosto	66.46	109.24	180.70	123.70	17	20	85	
Septiembre	66.37	128.92	243.68	145.94	19	20	95	
Octubre	14.03	37.46	120.66	61.11	18	20	90	
Noviembre	3.34	5.54	14.83	20.33	11	20	55	
Diciembre	2.68	4.52	12.89	10.92	14	20	70	



Parámetro	P10	P50	P90	Q medio actual (m3/s)	No. meses que cumple	Total meses	Porcentaje de cumplimiento	Clase
Total mensual					181	240	75	NO ALTERADA

Parámetro	P10	P50	P90	Aportación media actual (m3/s)	No. años que cumple	Total años	Porcentaje de cumplimiento	Clase
Anual	197.26	382.94	801.56	535.29	16	20	80	NO ALTERADA

Nota: 1946-1965 Régimen Hidrológico Natural; 1983-2002 Régimen Hidrológico Actual

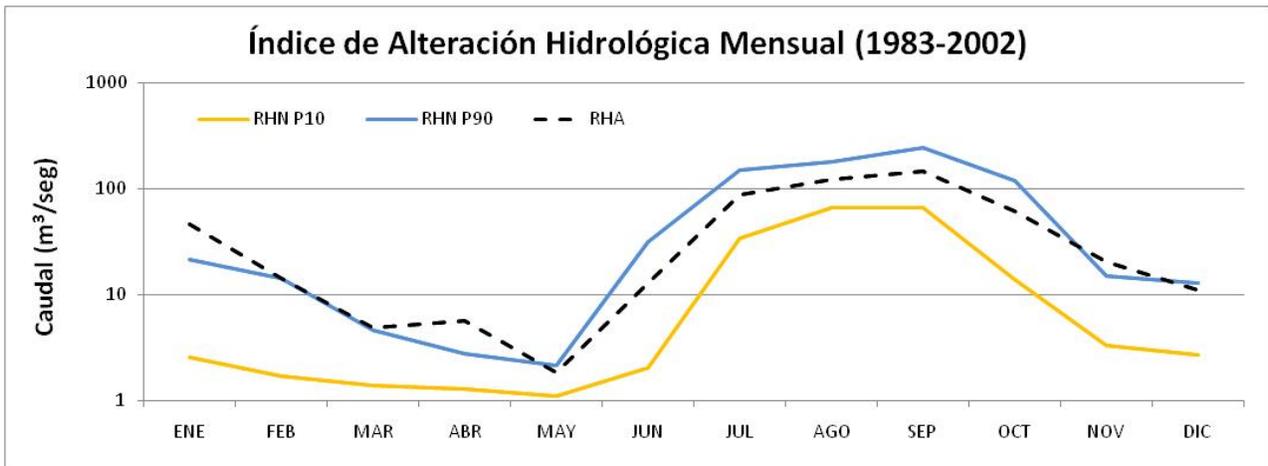


Figura 3. RHN VS RHA. Serie de aportación media mensual en escala logarítmica

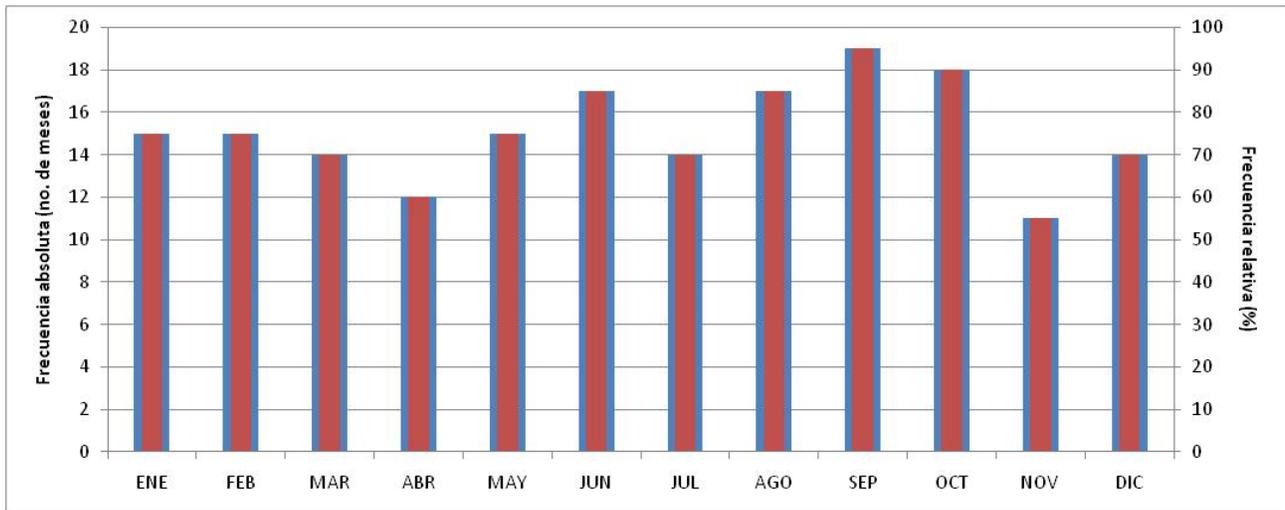


Figura 4. Meses y proporción del RHA que se encuentran dentro del intervalo dado por el RHN

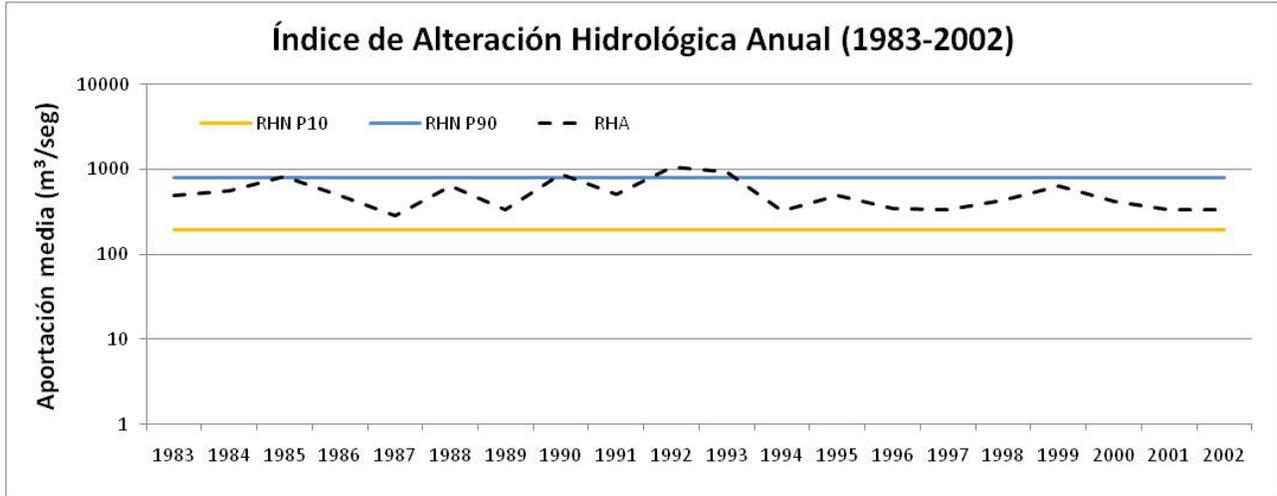


Figura 5. RHN VS RHA. Serie de aportación anual en escala logarítmica



## APROXIMACIÓN HIDROLÓGICA “DETALLADA”. ALIANZA WWF –FUNDACIÓN GONZALO RÍO ARRONTE, I.A.P.

Dependiendo de las características de la infraestructura hidráulica que exista en el área de estudio, la alteración hidrológica podrá afectar a diferentes componentes del régimen. En aquellos casos donde una presa presente un gran volumen de almacenamiento frente a los aportes del río, la modificación podrá afectar a los caudales mínimos de estiaje, a los caudales de la época de lluvias y al régimen de avenidas. Por el contrario, si se trata solamente de una presa derivadora, se verán afectados los caudales mínimos, pero no las avenidas.

La finalidad de esta aproximación es conservar, o bien, recuperar o reconstruir el régimen hidrológico actual a partir del régimen hidrológico natural, para lo cual será necesaria la determinación hidrológicamente detallada de un régimen de caudales ecológicos.

En cualquier caso, una propuesta completa de régimen de caudales ecológicos –en el supuesto de una alteración potencial de todos o parte de los componentes del régimen hidrológico, o bien, de la conservación de los mismos– deberá contener al menos los siguientes elementos:

1. Régimen de caudales ordinarios estacionales para las condiciones hidrológicas húmedas, medias, secas y muy secas.
2. Régimen de avenidas, considerando al menos tres categorías de avenidas (intraanuales, interanuales de baja magnitud e interanuales de media magnitud) con sus correspondientes atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio.
3. Volumen anual de reserva con finalidad ambiental.

### **PARTE I. Cálculo del régimen de caudales ordinarios estacionales (usando como apoyo la base de datos en Excel)**

Para calcular el régimen de caudales ordinarios estacionales, proceder siguiendo los pasos que se muestran a continuación.

1. Sobre la serie de datos hidrológicos disponible, identificar el periodo de la misma que presente un comportamiento hidrológico natural. No se trata de identificar el periodo con condiciones prístinas de la cuenca, sino aquel periodo donde las acciones humanas que modifican el régimen hidrológico, no afecten significativamente a las comunidades biológicas. En el ejemplo del río Acajoneta y tomando como referencia que los resultados del índice de alteración hidrológica muestran que el RHA no se encuentra alterado, para este análisis se ha considerado la serie completa (Mayo del 1945 a Diciembre de 2002).
2. Organizar la serie de caudales medios mensuales en años hidrológicos (Tabla 6). En caso de partir de una serie hidrológica en caudales diarios, agregar la misma en valores medios mensuales (Hoja de cálculo **Qecol\_MetH2\_Coe** en el Excel de apoyo).



Tabla 6. Caudales medios mensuales. (Aportación media anual histórica – EMA histórico = 1,338 Hm<sup>3</sup>/año – 42 m<sup>3</sup>/seg)

m <sup>3</sup> /seg	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
1945					2.4	2.3	74.9	153.3	107.3	108.1	7.8	5.2	57.7
1946	17.6	4.7	2.9	2.3	2.0	10.7	46.8	100.3	104.2	125.4	14.0	5.8	36.4
1947	32.3	4.2	2.8	1.8	1.9	19.8	41.8	135.2	131.0	14.4	5.3	4.6	32.9
1948	8.9	14.6	3.4	2.8	3.2	23.3	83.4	121.2	203.3	31.2	22.7	9.6	44.0
1949	15.8	14.2	5.0	2.8	2.0	9.7	65.7	56.6	88.0	37.4	5.5	3.9	25.6
1950	3.2	2.8	2.3	1.8	1.7	31.1	103.3	59.5	123.9	37.5	4.8	2.7	31.2
1951	3.2	2.2	1.8	1.6	1.4	2.5	43.0	74.5	144.5	11.0	3.1	3.6	24.4
1952	2.1	1.7	1.4	1.4	1.1	40.5	151.9	199.7	96.9	20.6	3.4	3.3	43.7
1953	2.7	32.3	4.6	1.9	1.3	3.3	52.5	102.0	99.2	26.5	3.4	4.0	27.8
1954	3.2	1.7	1.1	0.9	0.9	14.0	113.1	122.1	66.6	50.8	4.6	2.6	31.8
1955	20.2	3.1	1.7	1.4	1.4	2.3	85.3	231.0	226.8	42.0	5.5	3.6	52.0
1956	3.2	2.6	1.9	1.7	4.0	36.9	97.5	106.6	126.8	9.4	3.0	2.5	33.0
1957	2.0	1.7	2.7	1.8	1.4	1.7	35.9	67.2	63.8	120.1	8.8	3.7	25.9
1958	3.0	3.0	20.5	2.0	2.0	30.4	195.6	162.6	363.9	136.5	58.7	12.6	82.6
1959	6.7	3.3	2.4	3.4	1.8	7.6	78.7	178.6	86.5	64.6	13.4	5.4	37.7
1960	20.1	4.6	2.6	1.8	1.5	2.1	35.4	95.4	56.8	22.3	6.6	6.4	21.3
1961	31.9	5.2	1.8	1.5	1.1	17.4	125.0	114.0	239.4	37.1	5.6	4.7	48.7
1962	2.6	2.5	1.3	1.2	1.1	25.6	65.1	76.7	132.6	94.5	9.7	5.3	34.9
1963	4.7	2.8	2.3	1.4	1.8	15.1	153.0	135.8	206.3	63.4	7.9	40.3	52.9
1964	6.3	4.1	2.6	1.8	1.7	8.5	25.3	92.7	163.9	77.4	5.1	4.5	32.8
1965	2.7	2.4	1.4	1.3	1.2	1.6	14.8	111.9	282.3	36.2	5.6	16.0	39.8
1966	7.6	10.7	3.7	3.3	2.8	13.3	65.4	228.6	185.4	35.4	6.2	9.9	47.7
1967	9.3	4.2	3.0	1.7	1.8	5.6	64.4	239.8	206.2	25.1	7.1	17.9	48.8
1968	5.5	20.4	130.9	4.8	2.2	3.4	77.7	125.5	543.7	55.7	19.7	43.6	86.1
1969	44.4	9.2	3.0	1.7	1.4	1.7	102.1	107.8	128.9	169.5	10.3	53.7	52.8
1970	47.0	18.4	6.4	2.6	1.9	13.5	105.8	195.1	243.1	44.7	5.2	3.3	57.2
1971	2.7	2.0	1.6	1.7	1.7	16.2	82.1	109.0	191.3	48.4	5.5	3.4	38.8
1972	5.9	2.4	1.8	1.3	1.2	3.6	24.7	48.4	95.6	28.3	168.1	41.5	35.2
1973	34.4	18.9	6.0	2.9	2.2	4.6	90.6	262.4	246.0	42.8	8.5	4.7	60.3
1974	4.0	3.3	2.5	1.6	3.7	5.1	69.1	91.1	112.5	39.6	4.8	42.1	31.6
1975	13.1	4.3	2.6	1.8	1.5	1.9	178.1	214.1	130.9	52.9	7.9	3.9	51.1
1976	2.8	2.2	1.7	1.4	1.1	9.2	138.2	82.8	79.9	15.9	81.2	32.8	37.4
1977	46.5	5.8	3.4	2.6	2.1	8.0	50.6	149.1	87.7	35.2	5.3	3.0	33.3
1978	2.6	5.2	2.3	1.6	1.2	3.6	68.8	71.4	186.7	52.5	8.4	4.5	34.1
1979	64.6	19.9	4.2	2.4	1.7	2.0	47.1	120.9	124.6	7.4	3.1	3.0	33.4
1980	2.9	4.1	2.1	1.6	1.5	2.8	38.2	128.1	106.2	34.2	9.7	4.6	28.0



m <sup>3</sup> /seg	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
1981	7.5	5.2	3.8	2.1	1.6	3.3	57.6	98.9	134.9	140.3	22.7	7.2	40.4
1982	7.5	5.2	3.8	2.1	1.6	3.3	57.6	98.9	134.9	140.3	22.7	7.2	40.4
1983	19.4	9.1	21.2	3.1	4.7	5.0	51.1	93.3	145.9	107.4	23.6	5.4	40.8
1984	12.8	12.3	2.5	1.6	1.8	28.0	233.9	137.0	74.0	18.6	16.3	21.8	46.7
1985	325.8	16.8	6.2	3.0	1.9	34.2	100.4	158.9	124.1	49.0	12.5	5.1	69.8
1986	3.4	3.7	2.0	1.6	1.5	4.7	27.9	90.3	103.8	214.4	21.7	18.9	41.2
1987	16.9	23.8	17.4	2.6	1.6	2.6	34.3	88.2	69.8	18.7	3.4	9.1	24.0
1988	5.2	2.2	1.8	1.7	1.3	5.7	119.2	288.7	157.4	28.9	10.2	8.3	52.5
1989	3.2	2.1	1.6	1.3	1.1	1.8	35.6	137.7	103.0	14.8	23.7	13.5	28.3
1990	13.7	7.0	2.8	1.7	1.6	11.3	120.5	186.3	209.0	306.1	14.6	5.3	73.3
1991	3.1	2.4	1.8	1.5	1.2	9.1	108.3	104.3	138.4	30.4	69.2	39.7	42.5
1992	460.8	163.6	14.3	6.1	3.2	2.9	51.0	148.2	136.1	39.2	8.2	37.4	89.2
1993	10.3	6.8	3.0	2.0	1.6	18.6	149.1	100.5	504.4	43.0	97.7	10.2	78.9
1994	5.4	3.8	3.1	4.2	2.7	9.4	29.0	87.8	89.4	77.9	6.8	4.0	27.0
1995	3.0	2.3	1.7	66.0	1.7	5.5	78.2	156.7	152.9	21.6	0.9	2.3	41.1
1996	2.5	2.1	1.7	1.4	1.2	6.3	66.6	82.5	143.0	38.1	2.5	3.2	29.3
1997	12.8	13.9	3.3	8.4	4.1	13.3	60.4	57.2	70.1	24.6	59.6	6.1	27.8
1998	3.8	2.4	1.5	1.4	1.3	3.4	89.5	103.0	154.1	61.2	9.6	4.2	36.3
1999	2.5	1.5	1.5	1.4	1.2	53.8	206.3	160.5	158.8	37.4	5.6	3.6	52.8
2000	2.4	1.9	1.3	0.9	0.9	34.5	81.4	103.4	126.4	50.8	10.8	5.4	35.0
2001	4.0	2.5	6.2	1.7	1.3	5.3	88.9	104.4	87.8	23.8	3.7	4.2	27.8
2002	2.4	6.6	2.0	1.2	1.3	2.3	29.4	84.9	170.4	16.3	6.0	10.6	27.8
PROMEDIO	24.8	9.5	6.1	3.3	1.8	11.5	82.2	126.6	154.7	57.9	17.4	11.3	42.2

3. Sobre las series mensuales ya ordenadas, calcular los percentiles 0, 10, 25 y 75 para cada mes (Tabla 7).

Tabla 7. Series mensuales conforme a los percentiles 0, 10, 25 y 75

PERCENTIL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	2.0	1.5	1.1	0.9	0.9	1.6	14.8	48.4	56.8	7.4	0.9	2.3
10	2.6	2.1	1.5	1.3	1.1	2.1	32.8	73.6	78.1	16.2	3.4	3.2
25	3.0	2.4	1.8	1.5	1.3	3.3	47.9	91.5	100.1	25.4	5.3	3.9
75	15.8	9.1	3.7	2.6	2.0	14.8	103.0	152.3	181.7	62.8	14.5	10.5

4. Asociar el tipo de régimen de caudales ordinarios estacionales (húmedo, medio, seco y muy seco) a los percentiles 75, 25, 10 y 0 respectivamente (Tabla 8 y Figura 6).



Tabla 8. Regímenes hidrológicos para cada percentil representativo de distintas condiciones hidrológicas

TIPO DE AÑO	PERCENTIL	CAUDALES (m <sup>3</sup> /seg)											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MUY SECO	0	2.0	1.5	1.1	0.9	0.9	1.6	14.8	48.4	56.8	7.4	0.9	2.3
SECO	10	2.6	2.1	1.5	1.3	1.1	2.1	32.8	73.6	78.1	16.2	3.4	3.2
MEDIO	25	3.0	2.4	1.8	1.5	1.3	3.3	47.9	91.5	100.1	25.4	5.3	3.9
HÚMEDO	75	15.8	9.1	3.7	2.6	2.0	14.8	103.0	152.3	181.7	62.8	14.5	10.5

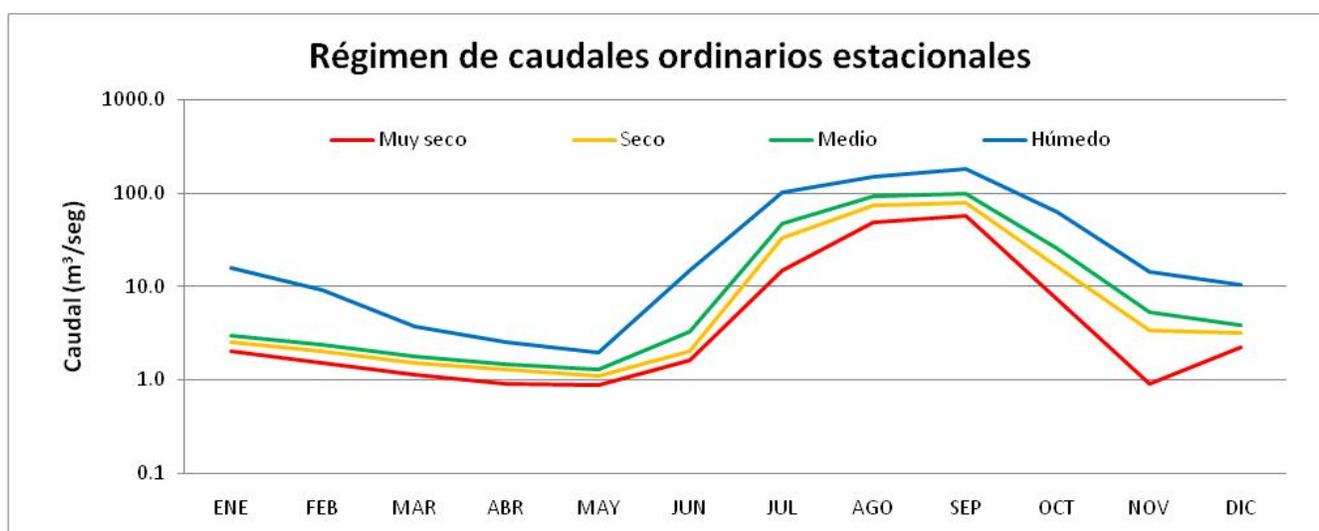


Figura 6. Representación gráfica de los regímenes hidrológicos para cada percentil representativo de distintas condiciones hidrológicas

5. Según la clase del objetivo ambiental definida para el río, en la implementación del régimen de necesidades hídricas se tendrá en cuenta las frecuencias de ocurrencia que se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Criterios para la integración de los caudales ordinarios a partir de las frecuencias de ocurrencia de distintas condiciones hidrológicas para los objetivos ambientales

OBJETIVO AMBIENTAL	FRECUENCIAS DE OCURRENCIA DE LOS REGÍMENES DE CAUDALES ORDINARIOS ESTACIONALES			
	MUY SECO	SECO	MEDIO	HUMEDO
A	0.2	0.3	0.4	0.1
B	0.4	0.4	0.2	0.0
C	0.6	0.4	0.0	0.0
D	1.0	0.0	0.0	0.0



6. Una vez obtenidos los caudales ordinarios estacionales y definidos su frecuencia de ocurrencia conforme al objetivo ambiental o nivel de conservación deseado para la cuenca de análisis, el volumen anual a reservar con finalidad ambiental de éstos será definido a partir del volumen anual de cada uno multiplicado por sus correspondientes frecuencias de ocurrencia. Este volumen se determina mediante la siguiente expresión:

$$V_{t_{Coe}} = (f_{CoeH} \times V_{CoeH}) + (f_{CoeM} \times V_{CoeM}) + (f_{CoeS} \times V_{CoeS}) + (f_{CoeMS} \times V_{CoeMS})$$

En donde:  $V_{t_{Coe}}$  = Volumen total del caudal ordinario estacional;  $f_{Coe}$  = frecuencia de ocurrencia de un régimen "i";  $V_{Coe}$  = Volumen del régimen de caudales ordinarios estacionales "i", siendo "i" las condiciones húmedas, medias, secas y muy secas.

Siendo así y considerando que en el ejemplo expuesto el objetivo ambiental seleccionado es clase "A", entonces el régimen de caudales ordinarios estacionales para años bajo condiciones hidrológicas húmedas, medias, secas y muy secas, su volumen anual de reserva con finalidad ambiental se muestra en la Tabla 10:

Tabla 10. Regímenes de caudales ordinarios estacionales y su volumen anual conforme la frecuencia de ocurrencia dada para un objetivo ambiental clase "A" en el río Acaponeta

TIPO DE AÑO	MUY SECOS		SECOS		MEDIOS		HUMEDOS	
PERCENTIL	P0		P10		P25		P75	
UNIDAD	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes
ENERO	2.0	5.4	2.6	6.9	3.0	8.1	15.8	42.2
FEBRERO	1.5	3.7	2.1	5.0	2.4	5.8	9.1	22.1
MARZO	1.1	3.0	1.5	4.1	1.8	4.8	3.7	9.9
ABRIL	0.9	2.4	1.3	3.4	1.5	3.8	2.6	6.7
MAYO	0.9	2.4	1.1	3.0	1.3	3.4	2.0	5.3
JUNIO	1.6	4.2	2.1	5.3	3.3	8.4	14.8	38.3
JULIO	14.8	39.5	32.8	88.0	47.9	128.4	103.0	275.9
AGOSTO	48.4	129.6	73.6	197.0	91.5	245.1	152.3	407.8
SEPTIEMBRE	56.8	147.3	78.1	202.5	100.1	259.5	181.7	470.9
OCTUBRE	7.4	19.9	16.2	43.3	25.4	68.1	62.8	168.2
NOVIEMBRE	0.9	2.4	3.4	8.7	5.3	13.7	14.5	37.5
DICIEMBRE	2.3	6.0	3.2	8.5	3.9	10.4	10.5	28.1
Volumen del régimen de caudal base ( $V_{Coe}$ - Hm <sup>3</sup> /año) para cada condición	365.8		575.6		759.7		1,512.9	
% Esc. medio anual	27.3		43.0		56.8		113.1	
Frecuencia de ocurrencia ( $f_{Coe}$ )	0.2		0.3		0.4		0.1	
<b>Volumen para efecto del balance de disponibilidad (<math>V_{t_{Coe}}</math> - Hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>701</b>				<b>Porcentaje del escurrimiento medio anual</b>		<b>52</b>	



## **PARTE II. Cálculo del régimen de avenidas (usando como apoyo la base de datos en Excel)**

Con este análisis se trata de identificar aquellas avenidas que activan procesos clave (p.e. ecológicos, hidrológicos y geomorfológicos), necesarios para mantener a largo plazo los ecosistemas. El régimen de avenidas queda configurado por el amplio espectro de avenidas que ocurre en un río a lo largo del tiempo. En el estudio de los caudales ecológicos se considera necesario identificar al menos tres tipos o categorías de avenidas y caracterizarlas mediante sus correspondientes atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio.

La aproximación que se presenta a continuación analiza el régimen de avenidas en condiciones naturales y adopta una propuesta de avenidas que más se asemeja al patrón natural según objetivos ambientales. Los dos pasos para calcular este régimen de avenidas son la tipificación y caracterización de avenidas (a partir de su magnitud, frecuencia, duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio) y la adopción de una propuesta de avenidas para el caso en cuestión.

### 1. Tipificación y caracterización de avenidas

Para separar los tipos de avenidas se utiliza inicialmente el criterio de la magnitud (caudal máximo de la avenida) y su probabilidad de ocurrencia a lo largo del tiempo (frecuencia). La caracterización de las avenidas consiste en describir la duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio correspondientes a cada tipo de avenida.

Los pasos son los siguientes:

- Sobre la serie diaria de datos hidrológicos disponible, identificar el periodo de la misma que presente un comportamiento hidrológico donde no se encuentre afectado significativamente el régimen de avenidas. En el ejemplo del río Acaponeta se considera el periodo completo de años naturales, es decir, Enero 1946 – Diciembre 2002 (Hoja de cálculo **InfoHistórica** en el Excel de apoyo).
- Para cada año natural, identificar su caudal máximo diario. De esta forma se obtiene una serie de caudales máximos anuales (57 años en el ejemplo del río Acaponeta – Figura 7 - Hojas de cálculo **InfoHistórica** – celdas A370:BF370 y **Mag-Frec\_Qecol\_Meth2\_Ra**).



Figura 7. Caudal máximo por cada año de la serie utilizada



c) Determinar la magnitud de las avenidas asociadas los siguientes periodos de retorno (Hoja de cálculo **Mag-Frec\_Qecol\_MetH2\_Ra**):

- Avenida con periodo de retorno de 1 año (categoría I)
- Avenida con periodo de retorno de 1.5 años (categoría II)
- Avenida con periodo de retorno de 5 años (categoría III)

Para identificar la magnitud de las avenidas tipo, se toman los caudales máximos anuales de la serie histórica y realizar un ajuste utilizando diferentes distribuciones estadísticas<sup>1</sup> (p.e. Gumbel Tipo I, Log Pearson Tipo III, Log Normal), mediante la obtención del promedio de la magnitud de las avenidas para los periodos de retorno considerados. La Figura 8 y Tabla 11 muestran este ajuste conforme las diferentes distribuciones sobre la serie de datos históricos.

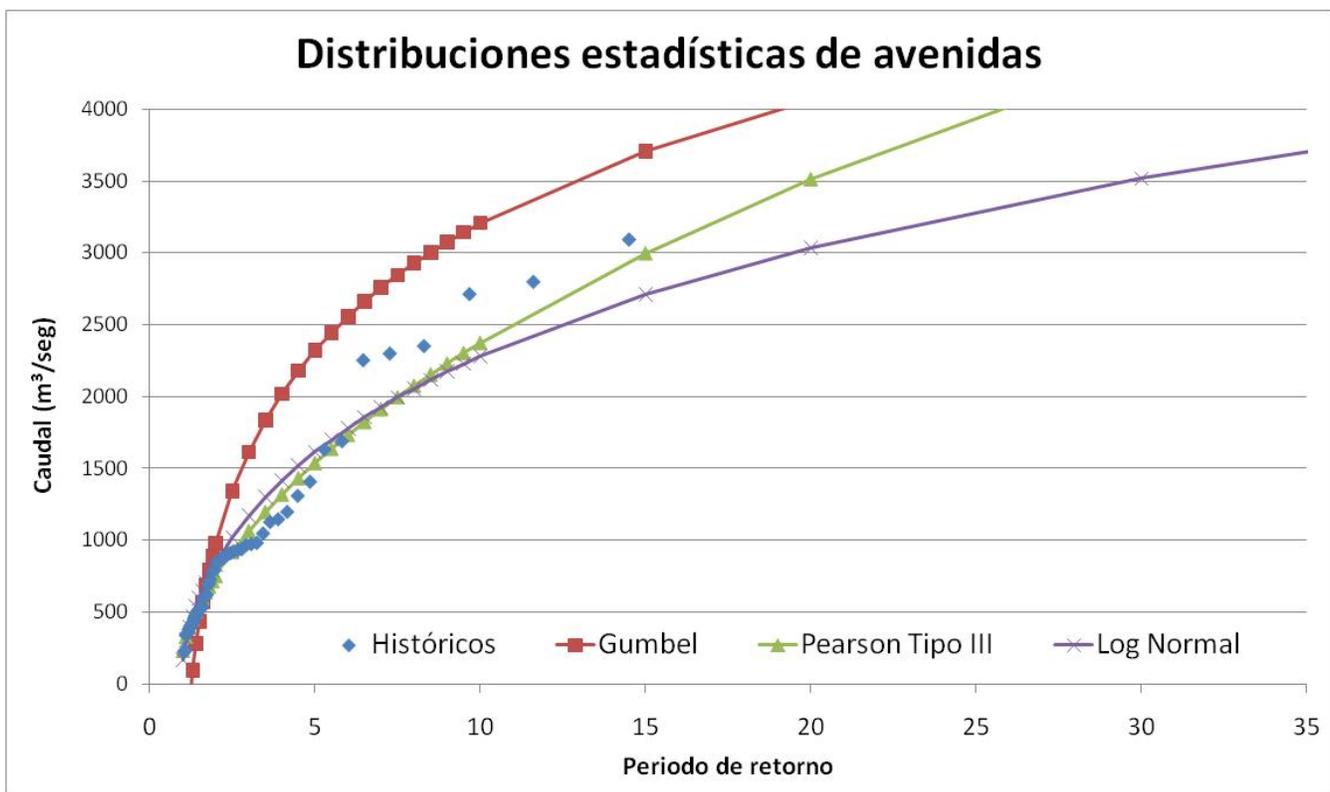


Figura 8. Distribuciones estadísticas para identificar la magnitud de las avenidas tipo a distintos periodos de retorno

<sup>1</sup> Entre las distribuciones estadísticas para valores hidrológicos extremos, han sido ampliamente aceptadas las de Gumbel Tipo I y Log Pearson Tipo III. No obstante, para mayor detalle favor de referirse a: 1) Gumbel, E.J.. The return period of flood flows, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 12, No. 2. Pp 163-190. June 1941; 2) Frechet, M.A. Sur la loi de probabilité de l'écart maximum ("On the probability law of maximum values"). *Annales de la société Polonaise de Mathématique*, Vol. 6 pp 93-116, Krakow, Poland, 1927; y 3) Weibull, W. A statistical theory of the strength of materials, *Ingeniors Vetenskaps Akademien* (The Royal Swedish Institute for Engineering Research), proceedings No. 51, pp 5-45, 1939.



Tabla 11. Ajuste y valor seleccionado para cada avenida tipo

m <sup>3</sup> /seg	HISTORICOS	DISTRIBUCION ESTADISTICA			PROMEDIO	VALOR SELECCIONADO	
		GUMBEL	LOG III	LOG NORMAL			
PERIODO DE RETORNO	1.0	224.0		234.0	168.4	208.8	200.0
	1.5	523.8	433.4	555.7	596.2	527.3	525.0
	2.0	846.4	978.4	755.1	833.9	853.4	
	5.0	1,632.4	2,319.7	1,538.1	1,613.8	1,776.0	1,775.0
	10.0	2,713.5	3,207.8	2,372.7	2,279.8	2,643.4	
	20.0	4,145.6	4,059.6	3,509.9	3,032.3	3,686.8	

La avenida anual (categoría I) se sitúa en un valor de 200 m<sup>3</sup>/seg, la avenida con periodo de retorno de 1.5 años (categoría II) en 525 m<sup>3</sup>/seg, y 1,775 m<sup>3</sup>/seg la avenida con periodo de retorno de 5 años (categoría III).

- d) A partir de los umbrales identificados (200 m<sup>3</sup>/seg, 525 m<sup>3</sup>/seg, y 1,775 m<sup>3</sup>/seg), se identifican los valores sobre umbral (uno por cada categoría) en la serie completa (1945 - 2002) de caudales diarios. Con el propósito de visualizar este punto gráficamente, en la Figura 9 de muestra lo anterior solo para los años 1945-1948.

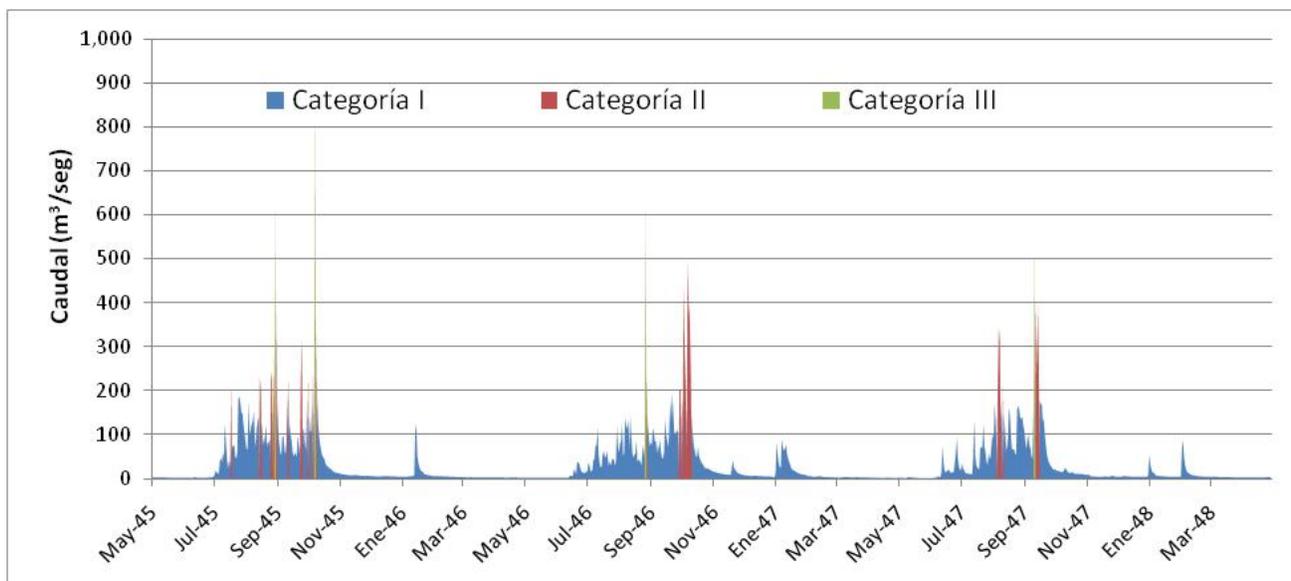


Figura 9. Caudales diarios identificados entre los umbrales de cada categoría en los años 1945-1948

- e) Para conocer la **duración** de las avenidas para cada categoría (Hoja de cálculo **Dur-Mom\_Qecol\_Meth2\_Ra** en el Excel de apoyo), contabilizar el número de días seguidos con valor por encima de sus correspondientes umbrales (los días seguidos constituyen eventos), tal y como se muestra en la Tabla 12.



Tabla 12. Duración y número de eventos consecutivos para cada categoría de avenida

DÍAS CONSECUTIVOS	CATEGORIA I		CATEGORIA II		CATEGORIA III	
	Nº Eventos	%	Nº Eventos	%	Nº Eventos	%
1 día	34	18.68	22	44.90	3	33.33
2 días	33	18.13	15	30.61	6	66.67
3 días	25	13.74	5	10.20	0	0.00
4 días	18	9.89	2	4.08	0	0.00
5 días	15	8.24	3	6.12	0	0.00
6 días	12	6.59	1	2.04	0	0.00
7 días	7	3.85	0	0.00	0	0.00
> 7 días	38	20.88	1	2.04	0	0.00
<b>Total</b>	<b>182</b>	<b>100.00</b>	<b>49</b>	<b>100.00</b>	<b>9</b>	<b>100.00</b>

- f) Para conocer el **momento de ocurrencia** (Hoja de cálculo *Dur-Mom\_Qecol\_Meth2\_Ra* en el Excel de apoyo), contabilizar para cada categoría, como se muestra en la Tabla 13, los meses en los que se producen. Cuando los tres tipos de avenida se presenten en el calendario de forma similar, se podrá considerar una nueva columna que aglutine por meses todos los eventos de avenida (categoría I + categoría II + categoría III).

Tabla 13. Momento de ocurrencia de cada categoría de avenida

MES	CATEGORIA I		CATEGORIA II		CATEGORIA III		TODAS LAS CATEGORIAS	
	Nº Eventos	%	Nº Eventos	%	Nº Eventos	%	Nº Eventos	%
ENE	32	3.54	14	13.46	4	26.67	50	4.88
FEB	11	1.22	2	1.92	0	0.00	13	1.27
MAR	5	0.55	3	2.88	0	0.00	8	0.78
ABR	2	0.22	1	0.96	0	0.00	3	0.29
MAY	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
JUN	9	0.99	0	0.00	0	0.00	9	0.88
JUL	128	14.14	7	6.73	0	0.00	135	13.18
AGO	261	28.84	21	20.19	0	0.00	282	27.54
SEP	356	39.34	32	30.77	6	40.00	394	38.48
OCT	69	7.62	20	19.23	4	26.67	93	9.08
NOV	19	2.10	4	3.85	1	6.67	24	2.34
DIC	13	1.44	0	0.00	0	0.00	13	1.27
<b>Total</b>	<b>905</b>	<b>100.00</b>	<b>104</b>	<b>100.00</b>	<b>15</b>	<b>100.00</b>	<b>1024</b>	<b>100.00</b>

- g) Para determinar la **tasa de cambio** de los caudales diarios en los eventos de avenidas (Hoja de cálculo *Tcambio\_Qecol\_Meth2\_Ra* en el Excel de apoyo), sobre la serie de caudales



diarios (Mayo 1945 – Diciembre 2002) separar inicialmente los días de avenida (caudal mayor de 200 m<sup>3</sup>/seg) del resto de días. Sobre esta nueva serie (incluye sólo los caudales de avenida) calcular las tasas de cambio entre días consecutivos (Figura 10) mediante la ecuación:

$$Tc = \left( \frac{Q_i - Q_{i+1}}{Q_i} \right) \times 100$$

En donde Tc: Tasa de cambio (%); Q<sub>i</sub>: Caudal medio en un día “i”; Q<sub>i+1</sub>: Caudal medio del día siguiente. En esta serie aparecen tasas de incrementos positivos (curva de ascenso en los eventos de avenida) y negativos (curva de descenso).

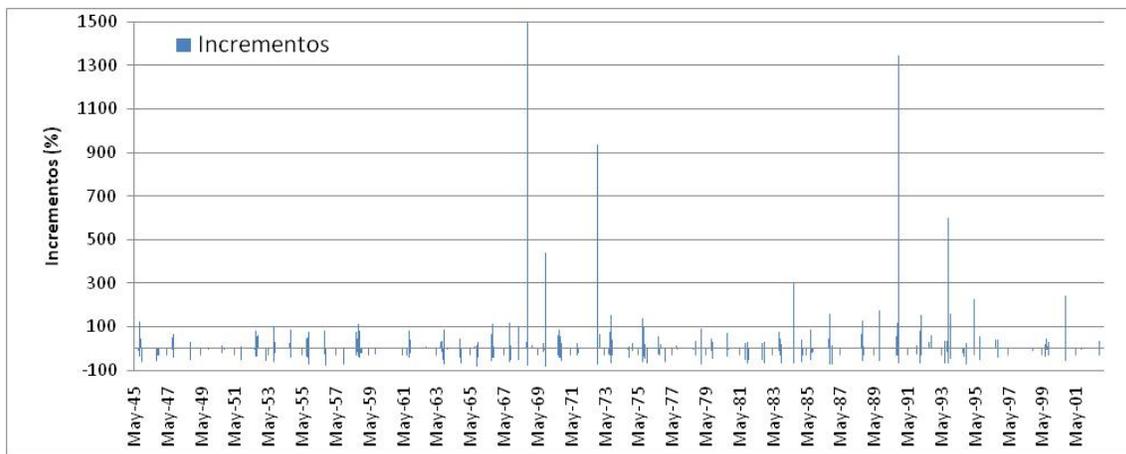


Figura 10. Tasa de cambio de los caudales diarios por evento de avenidas (1945-2002)

## 2. Adopción de una propuesta de régimen de avenidas

La adopción de una propuesta de avenidas consiste en identificar el tipo y características de las avenidas que formarán parte de la propuesta global de caudales ecológicos.

Los criterios son los siguientes:

- I. La **magnitud representativa** de los tres tipos de avenidas es aquella que ha servido para identificarlas, es decir, la avenida categoría I se sitúa en un valor de unos 200 m<sup>3</sup>/seg, la avenida de categoría II son unos 525 m<sup>3</sup>/seg, y 1,775 m<sup>3</sup>/seg la avenida de categoría III.
- II. Para adoptar una **duración representativa** de cada tipo de avenida, se han agrupado los eventos que suman aproximadamente el 75% de los casos. Entre 1-6 días se presenta el 75.27 % de los casos en las avenidas categoría I, y entre 1-2 días el 75.51 % de los casos tanto en las avenidas categoría II, como en aquellas avenidas categoría III (100.00 %).
- III. Para adoptar el **momento de ocurrencia representativo** de las avenidas, en este ejemplo se agrupan los meses que sumaban aproximadamente el 90% de los días en los que tuvo lugar



una avenida. Entre los meses de Junio y Octubre suman el 89.16 % de los días donde se registró un evento de avenida.

- IV. Para adoptar una **tasa de cambio representativa** de los eventos de avenida, seleccionar para los incrementos positivos el percentil 90 (tasa de ascenso sólo superada en el 10% de las ocasiones) y para los incrementos negativos el percentil 10 (que al ser negativo también implica que la tasa de descenso sólo es superada en el 10% de las ocasiones). En el ejemplo del río Aconeta (Figura 11), la tasa de ascenso en las avenidas se sitúa aproximadamente en el 103 %, mientras que la tasa de descenso de las avenidas se sitúa en torno al 60 %.

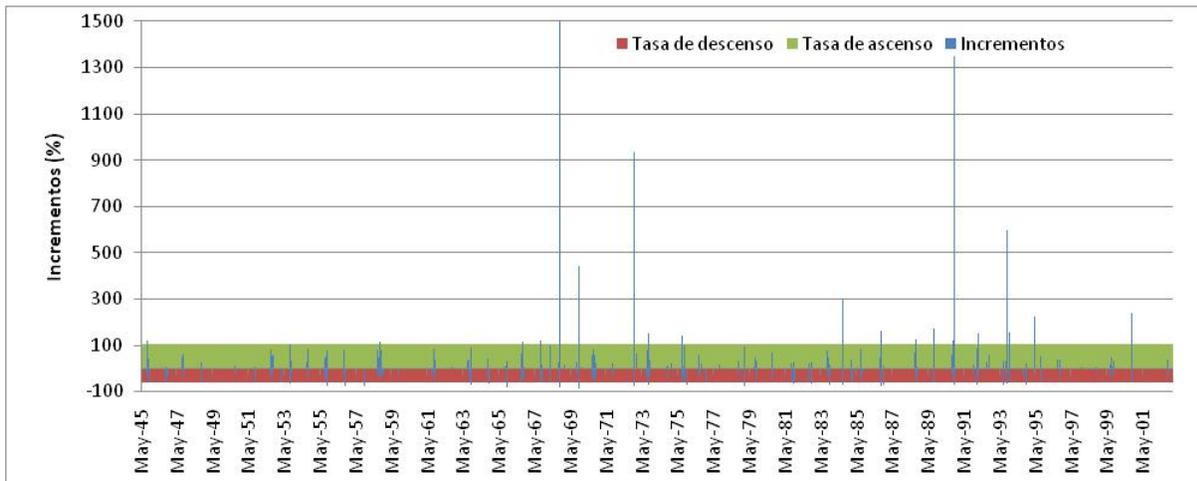


Figura 11. Tasas de cambio ascendente y descendente de los caudales diarios por eventos de avenidas (1945-2002)

- V. La **frecuencia de ocurrencia** de las avenidas sirve como criterio de adopción para ajustar la propuesta de régimen de avenidas a los objetivos ambientales. Tomando como referencia la ocurrencia de avenidas tipo para un periodo hipotético de 10 años, la frecuencia de cada tipo de avenidas en función de los objetivos ambiental se muestra en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14. Criterios de integración de las avenidas tipo a partir de sus frecuencias de ocurrencia según objetivos ambientales

OBJETIVO AMBIENTAL	REGIMEN DE AVENIDAS		
	CATEGORÍA I	CATEGORÍA II	CATEGORÍA III
A	10	6	2
B	5	3	2
C	3	2	1
D	2	1	1

Una vez obtenido el régimen de avenidas para estas condiciones y tras definir el objetivo ambiental para alcanzar un estado de conservación deseado para la cuenca de análisis, se calcula el régimen



de avenidas a partir del volumen anual de cada tipo de avenida multiplicado por sus respectivas frecuencias de ocurrencia utilizando la siguiente expresión:

$$Vt_{Ra} = (f_{aI} \times d_{aI} \times V_{aI}) + (f_{aII} \times d_{aII} \times V_{aII}) + (f_{aIII} \times d_{aIII} \times V_{aIII})$$

En donde:  $Vt_{Ra}$  = Volumen total del régimen de avenidas;  $f_{ai}$  = frecuencia de ocurrencia de una avenida "i";  $d_{ai}$  = duración de una avenida "i";  $V_{ai}$  = Volumen de una avenida "i", siendo "i" las avenidas tipo I, II y III.

Siendo así y considerando que para este ejemplo el objetivo ambiental seleccionado es clase "A", el régimen de avenidas tomando en cuenta las tres categorías señaladas con sus respectivos atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio, se muestra en la Tabla 15:

Tabla 15. Régimen de avenidas y el volumen anual que representa conforme a un objetivo ambiental clase "A" en el río Acaponeta

Atributo del régimen hidrológico		Categoría I	Categoría II	Categoría III
Magnitud	m <sup>3</sup> /seg	200	525	1,775
	Hm <sup>3</sup> al día ( $V_a$ )	17	45	153
Frecuencia de ocurrencia ( $f_a$ )		10	6	2
Duración (número de días - $d_a$ )		6	2	2
Momento de ocurrencia		Jun-Oct		
Tasa de cambio (%)	Ascenso	103		
	Descenso	60		
$Vt_{Ra}$ a 10 años		2,195		
$Vt_{Ra}$ al año		<b>219 Hm<sup>3</sup></b>		



**PARTE III. Resumen del régimen y volumen anual de caudal ecológico mediante esta aproximación hidrológica para un objetivo de ambiental clase “A”(Tablas 16, 17 y Cuadro 1) en el río Acaponeta.**

*Tabla 16. Volumen anual a partir del régimen de caudales ordinarios estacionales para años con condiciones hidrológicas húmedas, medias, secas y muy secas.*

TIPO DE AÑO	MUY SECOS		SECOS		MEDIOS		HUMEDOS	
PERCENTIL	P0		P10		P25		P75	
UNIDAD	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes	m <sup>3</sup> /seg	Hm <sup>3</sup> /mes
Volumen del régimen de caudal base ( $V_{Coe}$ - Hm <sup>3</sup> /año) para cada condición	365.8		575.6		759.7		1,512.9	
% Esc. medio anual	27.3		43.0		56.8		113.1	
Frecuencia de ocurrencia ( $f_{Coe}$ )	0.2		0.3		0.4		0.1	
<b>Volumen para efecto del balance de disponibilidad (<math>V_{t_{Coe}}</math> - Hm<sup>3</sup>/año)</b>	<b>701</b>				<b>Porcentaje del escurrimiento medio anual</b>		<b>52</b>	

*Tabla 17. Régimen de avenidas para tres categorías (intraanuales, interanuales de baja magnitud e interanuales de media magnitud) con sus correspondientes atributos de magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia y tasa de cambio.*

Atributo del régimen hidrológico		Categoría I	Categoría II	Categoría III
Magnitud	m <sup>3</sup> /seg	200	525	1,775
	Hm <sup>3</sup> al día ( $V_a$ )	17	45	153
Frecuencia de ocurrencia ( $F_a$ )		10	6	2
Duración (número de días - $D_a$ )		6	2	2
Momento de ocurrencia		Jun-Oct		
Tasa de cambio (%)	Ascenso	103		
	Descenso	60		
$V_{t_{Ra}}$ a 10 años		2,195		
$V_{t_{Ra}}$ al año		<b>219 Hm<sup>3</sup></b>		

*Cuadro 1. Volumen final de reserva ( $V_{fr}$ ) o caudal ecológico a efecto de integración al balance de disponibilidad de la cuenca:*

$$V_{fr} = 701 + 219 = 920 \text{ Hm}^3$$

$$V_{fr} = 920 \text{ Hm}^3 \text{ al año (68 \% del EMA)}$$