

## CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDAL NATURAL PARA LA ASIGNACIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO VERDE, OAXACA, MÉXICO.

### NATURAL FLOW REGIME FOR WATER ALLOCATION IN THE RÍO VERDE BASIN IN OAXACA STATE, MEXICO.

Sergio Rodríguez Torres\* y María Antonieta Gómez Balandra\*\*

#### Resumen

A nivel nacional e internacional actualmente se reconoce la necesidad de mantener los ríos saludables con regímenes naturales de caudal, ya que estos se asocian a un gran número de procesos y servicios eco-sistémicos que ofrecen los ríos. El objetivo de este trabajo fue el de integrar elementos físicos e hidrológicos de la cuenca del Río Verde, Oaxaca para identificar los umbrales de variabilidad natural, que puedan asignarse de manera mensual y estacional a las corrientes de la cuenca como caudal ecológico, bajo esquemas de aprovechamiento o presión por el agua para conservar la funcionalidad y conectividad de los ecosistemas acuáticos y ribereños. La cuenca del Río Verde en el suroeste de México, abarca una superficie de 18,366 km<sup>2</sup>, con una longitud de 240 km y 5<sup>o</sup>. Orden en la corriente principal, con pendientes de 0.5 a 2.6% en los arroyos y afluentes. Se aplicó la metodología hidrológica de TNC (IHA-RVN) para establecer los umbrales de variabilidad en 12 estaciones hidrométricas, con periodos de registro de 15 a 45 años. El caudal medio anual en estas estaciones es de 0.89 a 161.5 m<sup>3</sup>/s con un escurrimiento medio anual total de la cuenca de 5,782 Mm<sup>3</sup>. Los análisis intra-anual e histórico inter-anual definieron los umbrales mensual y estacional con sus valores máximos y mínimos, identificando la variabilidad para diferentes períodos de interés para los ecosistemas (1, 7, 30 y 90 días). Para definir una estrategia de caudal ecológico ya sea para la extracción o cuando se cause alteración del régimen por derivaciones o generación hidroeléctrica, es importante identificar las características físicas de las corrientes y los patrones históricos del régimen de caudal para tratar de reproducir la variabilidad estacional en términos de su magnitud, duración, temporada y tasa de cambio; además de considerar la frecuencia de cada tipo de año (seco, medio y húmedo). En este trabajo se aplicaron también los métodos generales de la norma de Caudal Ecológico NMX-AA-159-SCFI-2012 para obtener los porcentajes de referencia como volúmenes anualizados para orientar la planeación del aprovechamiento y usos del agua en la cuenca del Río Verde, Oaxaca.

**Palabras clave:** Caudal Ecológico, Régimen Natural, Norma Mexicana, Río Verde, Oaxaca.

#### Abstract

At national and international level it is recognized the urgent need to maintain healthy rivers with natural flow regimes since these are associated to large number of natural processes and eco-systemic services offered by rivers. The main objective of this study was to integrate physical features and hydrological patterns in the Rio Verde, Oaxaca, México to identify thresholds of natural flow variability that can be allocated monthly and seasonally to the basin streams under water extractions or pressure schemes to maintain functionality and connectivity of aquatic and riparian ecosystems. The Rio Verde basin in southwest Mexico has an area of 18,366 km<sup>2</sup>, 240 km and 5<sup>o</sup> order in the main channel with slopes among 0.5 to 2.6% in creeks and tributary streams. The hydrological methodology IHA-RVN developed by TNC, was applied to establish flows variability thresholds in 12 hydrometric gauges, using data records from 15 to 45 years. The mean annual flows at hydrometric gauges are among 0.89 a 161.5 m<sup>3</sup>/s and mean annual volume in the total basin 5,782 Mm<sup>3</sup>. Both, intra-annual and historical inter-annual analysis defined the monthly and seasonal minimum and maximum thresholds, identifying the variability for different time periods of interest for ecosystems (1, 7, 30 and 90 days). To define an environmental flow strategy either for large extractions or when a derivation o hydropower generation cause flow alteration, it is important to identify the river physical features and historical pattern to try to reproduce flows' seasonal variability in terms of magnitude, duration, timing and rate of change as well as the frequency for each kind of hydrological year (dry, medium and rainy). General methods of the Mexican standard for Environmental Flows NMX-AA-159-SCFI-2012 were applied to obtain reference values as annual volumes for the environment to guide the planning stage of potential use and water allocation in the Rio Verde basin in the Oaxaca state.

**Key Words:** Flow, Natural Regime, Mexican Standard for Environmental Flows

\* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ingeniería Ambiental, Campus Morelos. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México. Tel.: +52 (777) 329 3600. Ext. 317. E-mail: sergiorodriguez@outlook.com

\*\* Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México. Tel.: +52 (777) 329 3600. Ext. 317.

Recibido: 25/05/2013  
Aceptado: 20/06/2013

## INTRODUCCIÓN

El régimen natural de variabilidad de un río representa la cantidad y duración de los flujos de agua necesaria para mantener la estructura, función y capacidad de recuperación de los ecosistemas de agua dulce, que en muchos casos son los medios de subsistencia de las comunidades humanas que dependen de ecosistemas saludables (Poff et al., 2010) (Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, 2003) (TNC, 2011) (Brisbane, 2007). Mantener el régimen hidrológico natural en ríos, humedales y zonas costeras, ayuda a que los ecosistemas permanezcan conectados y se conserven los beneficios para las personas (www.efflownet.org, 2012).

A nivel mundial, los problemas de disponibilidad de agua de buena calidad, han aumentado a medida que las ciudades, industrias, la agricultura y generadores de energía, compiten por fuentes limitadas de abastecimiento de agua dulce y se han agotado las fuentes de agua subterránea. Al mismo tiempo, existe una creciente conciencia de la necesidad de mantener el régimen de caudales en ríos, que se relacionan con la variabilidad hidrológica estacional de lagos, llanuras de inundación, estuarios y acuíferos a largo plazo para sustentar la biodiversidad y los beneficios que se derivan de ecosistemas sanos, inter-conectados y funcionales. (Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, 2003).

Actualmente se llevan a cabo estudios a nivel regional para determinar el régimen hidrológico y reconocer las necesidades de caudal ambiental o ecológico, en casos en los que no se pueden realizar estudios detallados para todos los tipos de ríos de una región. Se puede hacer uso de conocimientos sobre las relaciones entre caudal y ecología, que se han adquirido a través de décadas de estudios de ríos específicos y comunidades biológicas, aplicando dichos conocimientos a zonas geográficas tan grandes como un estado, una provincia, una subcuenca o una cuenca hidrológica y de este modo diseñar estándares y estrategias de manejo. (ELOHA, 2010), (Veza, Parasiewicz, Rosso, & Comoglio, 2011), (Snelder T. H., T. Detry, N. Lamouroux, S. T. Larned, E. Sauquet & Catalogne, 2013). En este trabajo, se caracterizó el régimen natural del caudal en doce estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del Río Verde en el estado de Oaxaca y se establecieron los umbrales de variación que permitirían conservar la funcionalidad del río desde la parte alta a la desembocadura. Estos umbrales son importantes bajo esquemas de distribución, asignación o competencia por el agua y se utilizan para proponer los límites en los que debe variar el caudal ecológico (siempre bajo un régimen).

Un método hidrológico representa la base que reconoce al régimen de caudales como la variable maestra (Richter, Baumgartner, Wigington, y Braun, 1997) (Tharme, 2003) (Ahmadi-Nedushan et al., 2006) (Wood, Hannah, & Sadler, 2007)

Los umbrales resultantes se espera sean una guía para la gestión del agua, sin embargo debido al desarrollo hidráuli-

co potencial de la cuenca y a su importancia ecológica, puede requerirse la aplicación de métodos complementarios como los de preferencia de hábitat y holísticos que consideren los usos actuales y potenciales, así como la presencia de especies de valor ecológico y económico como los langostinos y peces, además de las negociaciones con los diferentes actores, incluyendo poblaciones locales y desarrolladores de infraestructura hidráulica (Tharme, 2003) (Gordon, McMahon, & Finlayson, 2004)

Como señala la normatividad recientemente emitida para México (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012) el objetivo principal es reconocer la variabilidad estacional e histórica del régimen y tomarlo como un marco de referencia que ayude al manejo y conservación de los ecosistemas acuáticos. Su aplicación inicia con la identificación del objetivo ambiental de la cuenca por su importancia ecológica y presión de uso. A este objetivo se asocian valores o volúmenes de referencia como porcentajes del caudal o volumen medio anual (CMA). En este trabajo se incluyen estos resultados por la aplicación del método Tennant modificado por Garcia et al. 1999) y del método de la WWF (WWF y Fundación Río Arronte, 2011) ambos sugeridos en la norma señalada.

## ANTECEDENTES

### Disponibilidad de agua en el área de estudio

La cuenca del Río Verde pertenece a la región hidrológica número 20 Costa Chica de Guerrero, cuenta con una superficie de aproximadamente 18,365 km<sup>2</sup> y un volumen medio anual de escurrimiento de 5,784 Mm<sup>3</sup>. Se considera la cuenca más importante de esta región desde el punto de vista hidrográfico (CONAGUA, 2011) (Gómez-Martínez, 2009) (figura 1). Por la dinámica socioeconómica de la costa de Guerrero y Oaxaca es una de las zonas más activas, su crecimiento se concentra en municipios con distintos niveles de demanda agua, así como de contaminación, como son el municipio Oaxaca de Juárez (270,000 habitantes) al Noreste y el de Villa de Tututepec de Melchor Ocampo (45,000 habitantes) en la desembocadura, donde además se localiza el Distrito de Riego número 110.

Esta situación repercute cantidad y calidad del agua disponible en la región y hace necesario contar con criterios que guíen su manejo adecuado. Conforme con la "Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000", que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales", la Conagua ha publicado (DOF-19/06/2007) la disponibilidad de las subcuencas hidrológicas que integran al río Verde como se muestra en la tabla 1 y figura 2.

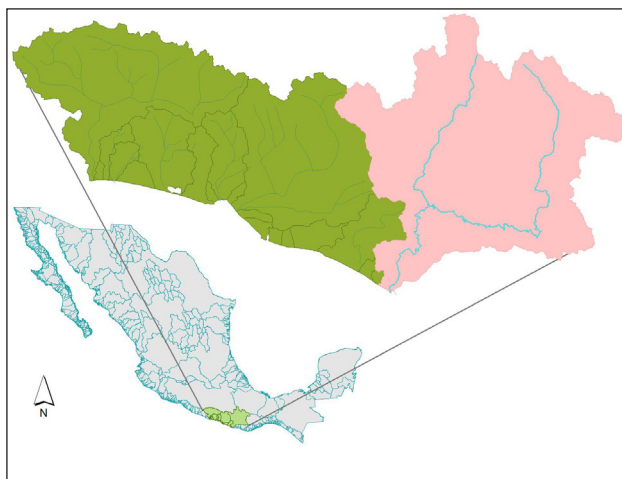


Figura 1. Localización de la Cuenca del Río Verde

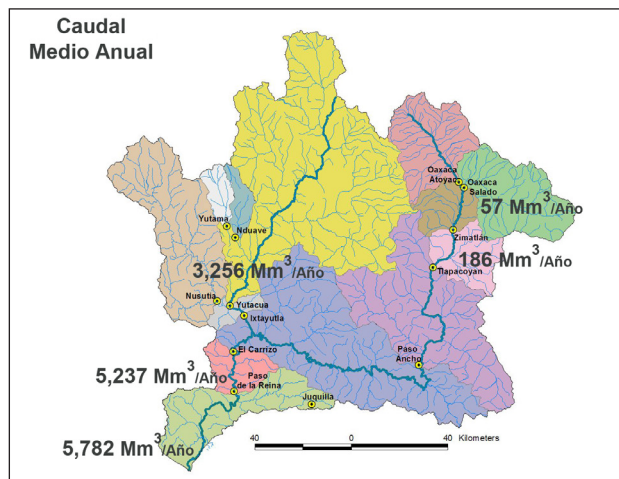


Figura 2. Disponibilidad de agua superficial en la Cuenca del Río Verde, Oax.

Tabla 1. Disponibilidad de las cuencas que conforman la cuenca del Río Verde

Subcuenca	Disponibilidad (Mm <sup>3</sup> /año)	Descripción del tramo o subcuenca
Río Atoyac-Salado.	57.55	Desde el nacimiento del Río Salado hasta el sitio donde se ubica la estación hidrométrica Oaxaca.
Río Atoyac-Tlapacoyan	186.09	Desde el nacimiento del Río Atoyac y donde se ubica la estación hidrométrica Oaxaca, hasta el sitio donde se localiza la estación hidrométrica Tlapacoyan.
Río Sordo-Yolotepec.	3,256.44	Desde el nacimiento de los Ríos Sordo en la zona de la mixteca oaxaqueña y Yolotepec, hasta el sitio donde se localiza la estación hidrométrica Ixtayutla.
Río Atoyac-Paso de la Reina	5,237.54	Desde las estaciones hidrométricas Tlapacoyan e Ixtayutla hasta la estación hidrométrica Paso de la Reina.
Río Verde	5,784.41	Desde la estación hidrométrica Paso de la Reina hasta la desembocadura del Río Verde o Atoyac en el Océano Pacífico.

Esta disponibilidad se asocia a la presión de uso en las cuencas (como porcentaje asignado) también publicada por Conagua y conjuntamente con la importancia ecológica dada por la presencia de Áreas Naturales Protegidas, humedales de importancia in-

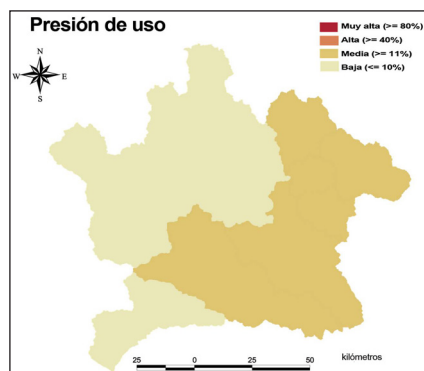
ternacional (Sitios Ramsar), sitios prioritarios para la conservación (CONABIO-CONANP, 2010) y grado de alteración eco-hidrológica, clasifica a las cuencas, subcuencas o tramos con distintos objetivos ambientales (A, B, C o D) (Tabla 2).

Tabla 2. Criterios para Determinar los objetivos ambientales, NMX-AA-159-SCFI-2012.

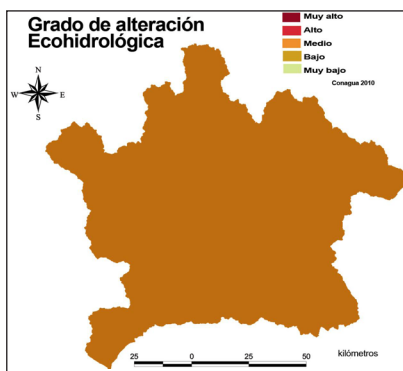
Importancia Ecológica	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D
	Presión de uso	Baja	Media	Alta	Muy alta

Para la cuenca en estudio estos criterios y clasificación aplican como se observa en las figuras 3, 4, y 5. A partir del objetivo ambiental se determina el porcentaje del volumen anual y el régimen de caudales

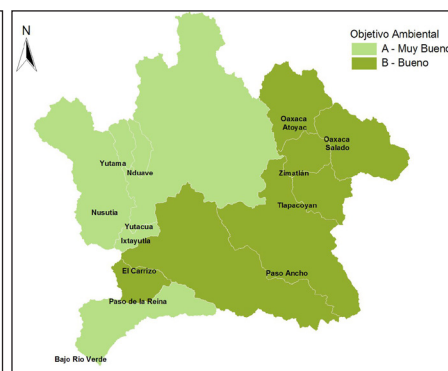
a asignarse. El objetivo ambiental para cada cuenca o tramo se incluye en la norma de la misma forma como se publica su disponibilidad.



**Figura 3.** Presión de uso (Volumen asignado)



**Figura 4.** Alteración Eco-hidrológica



**Figura 5.** Objetivos ambientales

## METODOLOGÍA

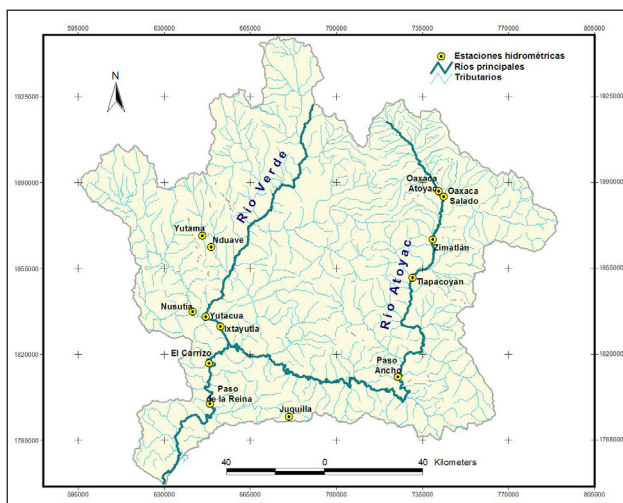
### Información hidrométrica

Con el fin de realizar el análisis de la información hidrométrica, se identificaron las estaciones contenidas en el BANDAS (Banco Nacional de Aguas Superficiales) operadas por la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) y también se obtuvo la información de las estaciones operadas por la CFE (Comisión Federal de Electricidad). El total de estaciones

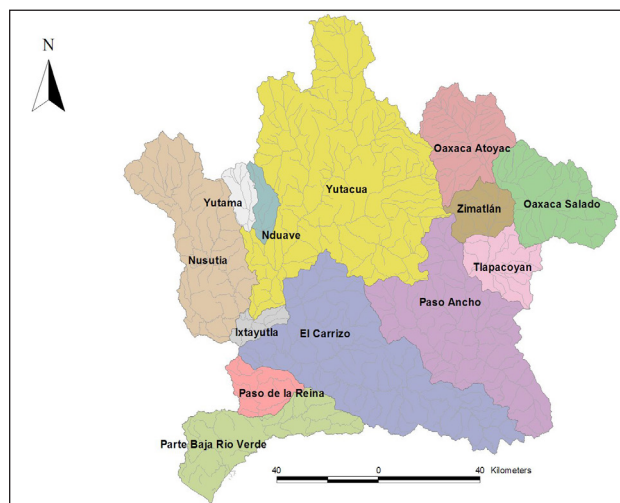
fue de trece, que se distribuyen en la cuenca como se muestra en la tabla 2 y figura 6 y 7. Para el análisis se eliminó la estación de Río Juquila por contar con menos de un año de registros. Además para evitar la interpolación de datos para algunas estaciones se tomaron solo los años completos tanto al inicio como al final del período de registros.

**Tabla 3.** Relación de estaciones hidrométricas en la cuenca del Río Verde

Nombre	Corriente	Cuenca	Operador	Longitud	Latitud	Años de Registro
Oaxaca Atoyac	Río Atoyac	Río Verde	CONAGUA	-96° 43' 45"	17° 02' 45"	1972-1991
Oaxaca Salado	Río Salado	Río Atoyac	CONAGUA	-96° 42' 35"	17° 01' 40"	1972-1991
Zimatlán	Río Atoyac	Río Verde	CONAGUA	-96° 45' 10"	16° 52' 15"	1972-2001
Tlapacoyán	Río Atoyac	Río Atoyac	CONAGUA	-96° 50' 00"	16° 43' 50"	1972-2002
Paso ancho	Río Atoyac	Río Atoyac	CFE	-96° 53' 27"	16° 22' 00"	1957-2006
Yutama	Río Yutama	Río Yolotepec	CFE	-97° 38' 00"	16° 53' 30"	1960-1969
Nduave	Río la esmera	Río Yolotepec	CFE	-97° 36' 00"	16° 02' 55"	1954-1969
Yutacua	Río verde	Río Verde	CFE	-97° 37' 30"	16° 36' 21"	1969-2005
Nusutia	Río Putla	Río Yolotepec	CFE	-97° 40' 05"	16° 36' 03"	1969-2005
Ixtayutla	Río Yolotepec	Río Verde	CONAGUA	-97° 34' 00"	16° 33' 30"	1961-1991
El Carrizo	Río verde	Río verde	CFE	-97° 36' 55"	16° 25' 28"	1969-2006
Paso de la reina	Río Atoyac	Río Verde	CONAGUA	-97°36' 30"	16°.27'50"	1960-2005
Juquila	Río Juquila	Río Atoyac	CFE	-97° 18' 30"	16° 13' 30"	1961-1962



**Figura 6.** Hidrología Localización de estaciones hidrométricas



**Figura 7.** Determinación de subcuencas o áreas de captación de acuerdo con la localización de las E.H.

La división por subcuencas o áreas de captación se determinó por la ubicación de las estaciones hidrométricas, después de esta división, se midieron áreas, longitudes, pendientes, órdenes de las corrientes. A cada una de las subcuencas o áreas de captación obtenidas, se le asignó un nombre de acuerdo con las estaciones hidrométricas o el río o corriente a la que pertenecen.

**Metodología IHA - RVA (Indicators of Hydrological Alteration - Regime Variability Approach)**

El software IHA-RVA V 7.1 fue desarrollado por TNC -The Nature Conservancy (2009) y se ha consolidado al aplicarse en un gran número de casos alrededor del mundo (ConserveOnline, 2011). Este método hidrológico recomienda contar con 20 años de registros o más para obtener el régimen de variación natural del caudal, tanto estacional o (intra-anual) como el comportamiento histórico del régimen de caudal del río (inter-anual). El software realiza también un análisis de regresión y tendencias mensuales.

En este trabajo se analizan 33 parámetros hidrológicos, que se obtienen de los registros de los caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas. Dichos parámetros se clasifican en cinco grupos: 1) caudales medios mensuales; 2) los máximos y mínimos para distintos periodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días). 3) fechas o momento en que ocurren los extremos mínimos y máximos; 4) duración y conteo de pulsos altos y bajos y 5) tasa de cambio, como el número de veces que el hidrograma cambia a una condición de incremento a decremento y viceversa.

Para el régimen de variabilidad natural, se utilizaron los parámetros del grupo 1, 2 y 3, porque son los que definen los umbrales de variabilidad y cuando se presentan en el río para diferentes periodos de interés (estacionales y extremos) y que pueden interpretarse para la asignación de caudales ecológicos bajo

esquemas de uso o presión por el agua, conforme con los objetivos ambientales.

Esta información representa la base para que conjuntamente con métodos más avanzados se puedan asociar los caudales a las características de los cauces, la disponibilidad de hábitat y su preferencia por las especies, así como realizar hipótesis de los impactos que sobre éstos generarían las extracciones o modificaciones por operación de infraestructura hidráulica.

Para cada indicador se realizó un análisis no paramétrico (Avilés-Garay, 2003), estimando las medianas y su dispersión percentiles a lo largo de la serie. Los umbrales de variabilidad natural reconocidos por (Richter et al., 1997) (Postel & Richter, 2003) (TNC -The nature Conservancy-, 2009), están entre los percentiles 25 a 75. A percentiles menores o mayores se entiende que se van ubicando condiciones de sequía o avenidas cada vez más extremas.

Por lo que las modificaciones a este intervalo de variación natural sirven para reconocer el tratamiento de año seco o húmedo que se daría a la corriente y para recomendar caudales ecológicos estacionales, mensuales o de época de interés para las comunidades biológicas, en lugar de un caudal mínimo a lo largo de todo el año y de todos los años. Este régimen variable contribuye a la salud de las poblaciones y al mantenimiento del ecosistema fluvial. Por medio de este análisis se asocia un significado al intervalo de variabilidad de los parámetros hidrológicos en términos de los procesos relacionados con la dinámica del cauce y los requerimientos de los ecosistemas acuáticos y rivereños, así como el alcance e importancia de las inundaciones. (Richter et al., 1998)

**RESULTADOS**

En la tabla 3, se muestran las principales características de cada una de los tramos de las corrientes y de las subcuencas señaladas.

**Tabla 4. Áreas de las subcuencas, Longitud del tramo del río, pendientes y orden de las corrientes.**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud km	Pendiente %	Orden (Strahler)
Oaxaca Atoyac	1026.54	48.27	0.500	4
Oaxaca Salado	1198.68	63.55	0.172	3
Zimatlán	433.50	36.72	0.785	4
Tlapacoyán	600.79	34.41	0.489	4
Paso Ancho	2513.65	93.14	0.546	4
Yutama	216.27	28.92	2.382	3
Nduave	204.15	34.09	1.654	2
Yutacua	5153.96	156.81	1.076	5
Nusutia	1982.35	102.48	0.741	3
Ixtayutla	182.36	19.96	2.580	5
El Carrizo	3246.73	181.55	1.33	5
Paso de la Reina	420.78	42.41	1.442	5
Bajo Río Verde	1186.36	69.52	0.086	5

Se analizaron los datos de 12 estaciones hidrométricas. Se calculó el caudal medio anual (CMA) para cada estación hidrométrica y se obtuvieron los valores máximos y mínimos ocurridos históricamente (Tabla 4)

**Tabla 5. Caudal medio anual y valores extremos para cada estación**

CLAVE	ESTACION	Caudal Medio Anual (m <sup>3</sup> /s)	Mínimo (m <sup>3</sup> /s)	Máximo (m <sup>3</sup> /s)
20005	Oaxaca Atoyac	1.30	0	265.30
20027	Oaxaca Salado	0.89	0	196.55
20040	Yutama	1.02	0.15	85.00
20034	Nduave	1.81	0.05	54.70
20026	Tlapacoyán	5.37	0	289.52
20036	Paso ancho	11.88	0.07	829.00
20023	Zimatlán	4.45	0	497.62
20042	Yutacua	25.95	1.90	527.00
20041	Nusutia	62.69	4.70	1178.00
20021	Ixtayutla	92.39	1.49	1362.93
20043	El Carrizo	132.74	10.60	3429.00
20017	Paso de la Reina	161.50	7.60	4891.69

#### Variación intra-anual diaria

Se calcularon los promedios diarios de cada estación, que muestran el comportamiento de cada día y algunos picos de caudal que ocurren dentro de cada mes o estación el año. En la figura 8 se observa

como contribuye cada estación al caudal de la cuenca y entre que días se inician las estaciones de lluvias y estiaje. La regularidad observada evidencia una cuenca poco modificada.

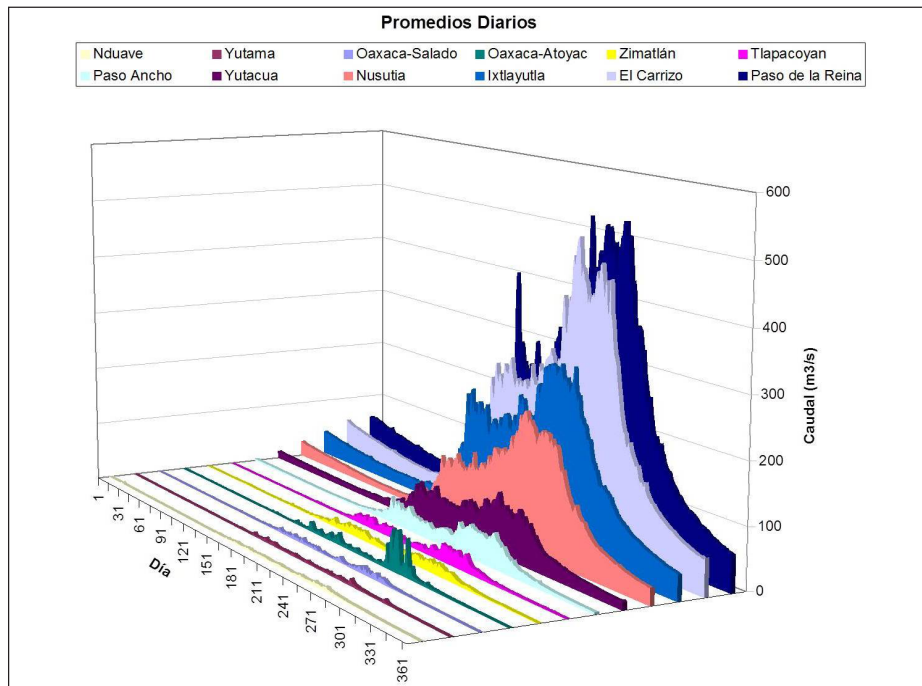
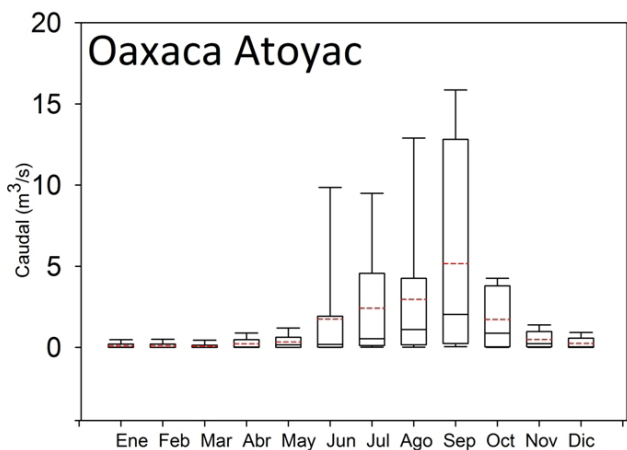
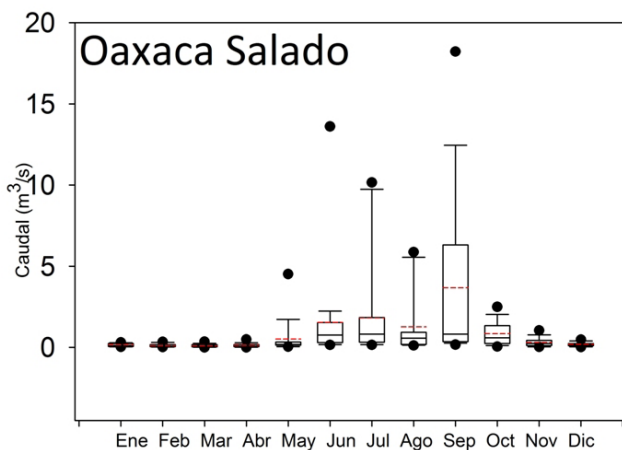
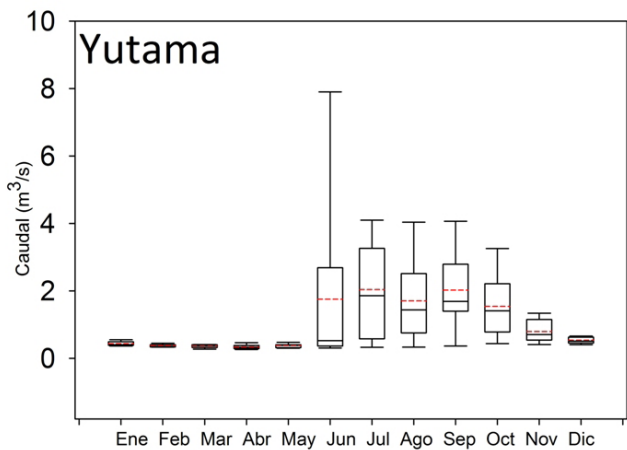
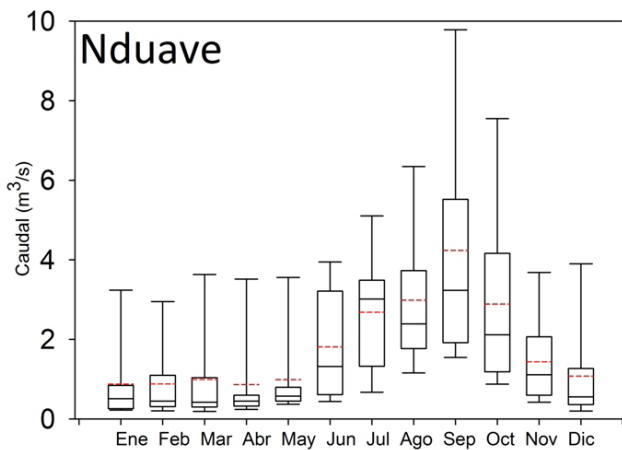


Figura 8. Distribución de caudales promedios diarios y su agregación.

**Variación intra-anual mensual**

A partir del análisis de las medias, medianas y percentiles mensuales en cada estación, se puede comparar su variabilidad y como se aplicarían los criterios para determinar un régimen de caudal natural y alterado. La línea negra dentro de la caja es

la mediana y la roja punteada representa la media. Los límites del diagrama de caja corresponden al percentil 25 el inferior al 75 el superior y los límites de los bigotes a los percentiles 10 y 90 respectivamente. Los puntos negros representan los percentiles 5 y 95 (Figura 9).



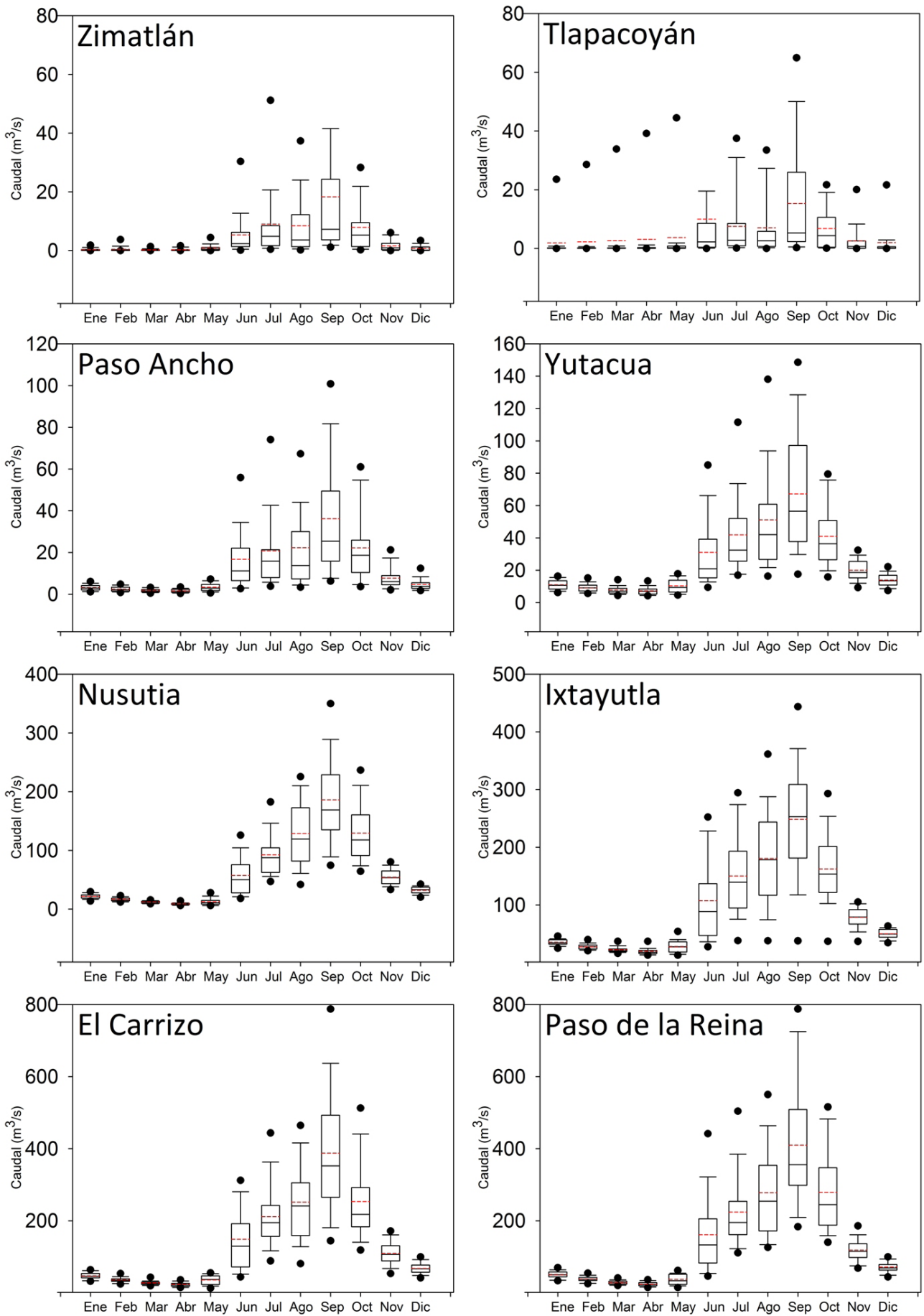


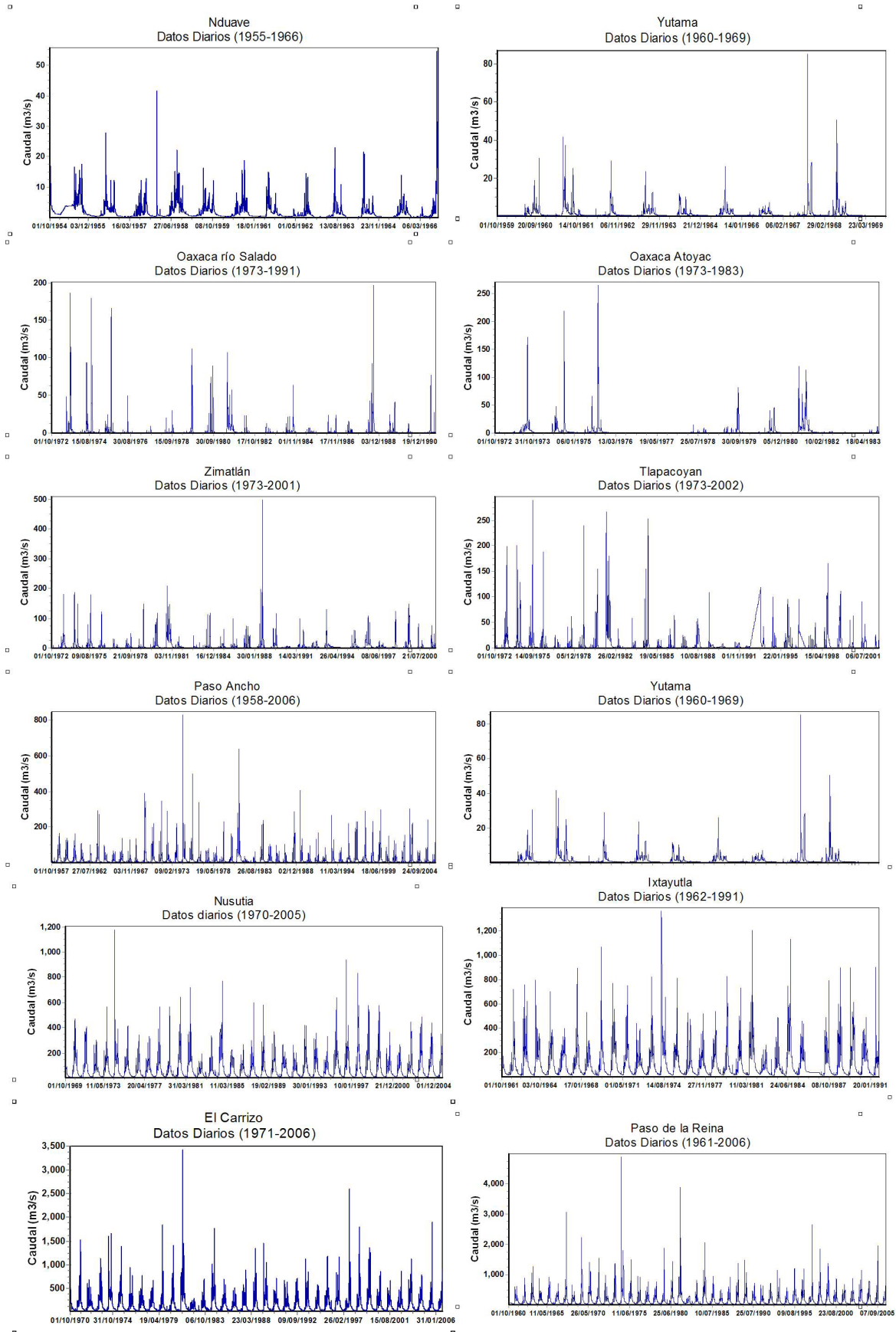
Figura 9. Variabilidad de los caudales mensuales en las estaciones hidrométricas



**Variación inter-anual**

Esta variación se refiere al comportamiento histórico del río que refleja la alternancia entre años secos, promedio y lluviosos, en algunos casos comportán-

dose de manera cíclica o por períodos largos, que se pueden observar en los gráficos obtenidos del software IHA V. 7.1 (Figura 10)



**Figura 10.** Variación inter anual para todas las estaciones hidrométricas

**Magnitud y duración de los caudales**

El grupo 2 de parámetros hidrológicos calculados por IHA-RVN corresponde a la magnitud y duración

de los caudales para diferentes periodos (1, 3, 30 y 90 días máximos y mínimos), así como los días de caudal cero para las corrientes intermitentes (tabla 5)

**Tabla 6. Medianas en m³/s y coeficientes de dispersión para diferentes periodos.**

Grupo 2	Nduave		Yutama		Oxaca Salado		Oxaca Atoyac		Zimatlán		Tlapacoyan	
	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.
Mín. 1-día	0.23	1.07	0.24	0.61	0.02	1.22	0	0	0	0	0.01	7.56
Mín. 3-días	0.27	0.8	0.26	0.36	0.02	1.1	0	0	0	0	0.01	7.37
Mín. 7-días	0.31	0.74	0.28	0.3	0.03	1.16	0	0	0	0	0.01	7.12
Mín. 30-días	0.37	0.56	0.31	0.3	0.04	1.07	0	0	0	18.34	0.03	2.79
Mín. 90-días	0.43	1.17	0.37	0.3	0.09	0.96	0.01	9.29	0.05	5.08	0.07	2.06
Máx. 1-día	20.18	1.22	24.95	1.34	49.18	1.82	47.87	2.98	108.1	0.75	94.91	1.4
Máx. 3-días	14.5	0.64	18.26	1.02	43.91	1.7	41.38	2.44	95.97	0.8	70.68	1.53
Máx. 7-días	11.37	0.41	13.38	0.64	29.26	1.62	27.33	2.92	68.08	0.94	54.31	1.72
Máx. 30-días	6.15	0.62	6.09	0.73	9.17	2.25	10.83	2.52	35.74	0.99	26.35	1.9
Máx. 90-días	3.62	0.85	3.35	0.55	4.45	1.99	5.76	2.24	17.34	0.91	14.72	1.62
Caudal cero	0	0	0	0	0	0	52	2.54	35	3.16	0	0
Grupo 2	Paso Ancho		Yutacua		Nusutia		Ixtayutla		El Carrizo		Paso de la Reina	
	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.	Mediana	C.D.
Mín. 1-día	0.95	1	5.58	0.45	7.27	0.22	14.13	0.36	16.3	0.22	15.74	0.45
Mín. 3-días	1.01	0.89	5.7	0.45	7.43	0.21	14.79	0.33	16.58	0.24	16.29	0.52
Mín. 7-días	1.07	0.85	6.03	0.43	7.63	0.21	15.25	0.31	17.14	0.24	17.48	0.43
Mín. 30-días	1.27	0.89	6.63	0.4	8.52	0.26	16.43	0.29	21.43	0.29	25.06	0.29
Mín. 90-días	1.86	0.59	7.82	0.45	11.13	0.23	20.5	0.29	28.29	0.25	32.86	0.34
Máx. 1-día	181	0.89	263.1	0.58	431.5	0.51	754.7	0.52	1021	0.71	956.9	0.85
Máx. 3-días	144.5	0.85	200	0.64	383.3	0.45	582.6	0.52	849.5	0.74	825	0.93
Máx. 7-días	115.7	0.8	160.6	0.65	328	0.52	484.4	0.53	706.9	0.64	676.7	0.75
Máx. 30-días	55	1.11	97.4	0.83	219.3	0.45	320	0.4	444.6	0.64	505.1	0.74
Máx. 90-días	30.42	0.96	59.01	0.52	150.9	0.47	218.8	0.4	341.4	0.51	375.7	0.48
Caudal cero	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Umbrales para determinar el caudal ecológico**

Bajo un esquema de manejo de los caudales, el umbral para la variabilidad natural se ubica dentro de los percentiles 25 a 75, ya sea mensual o estacionalmente (Richter et al., 1997) (Poff et al., 2010), lo que en una distribución normal y análisis paramétrico correspondería a mantenerse dentro de un intervalo de más/menos una desviación estándar. Para definir los

umbrales de extracción o modificación del régimen y los caudales ecológicos resultantes, debe reconocerse la variabilidad histórica para identificar cómo y por cuánto tiempo se estaría dando al río una condición de año seco hacia el percentil 10 o 5, promedio ubicado en la mediana, o lluvioso hacia el percentil 90 o 95 (Figura 11 y 12).

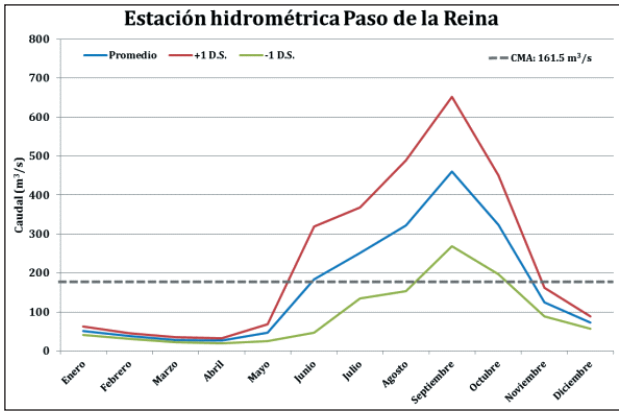


Figura 11. Umbrales del análisis paramétrico

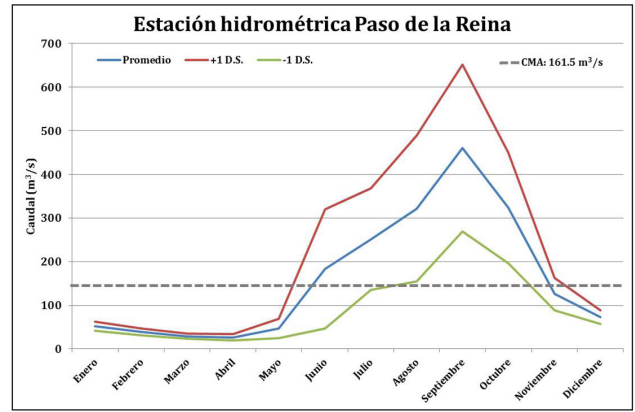


Figura 12. Umbrales del análisis no-paramétrico

En el esquema de manejo para suavizar las variaciones aleatorias y resaltar la componente cíclica de los años secos, promedio y húmedos con respecto al promedio anual, también es recomendable realizar un análisis de promedio móvil, por ejemplo de

5 años para la planeación de asignaciones de volumen u operación de presas (Figura 13). Por otro lado un análisis de descomposición de series de tiempo puede mostrar la tendencia histórica y la magnitud esperada de los valores con respecto a los registros (Figura 14).

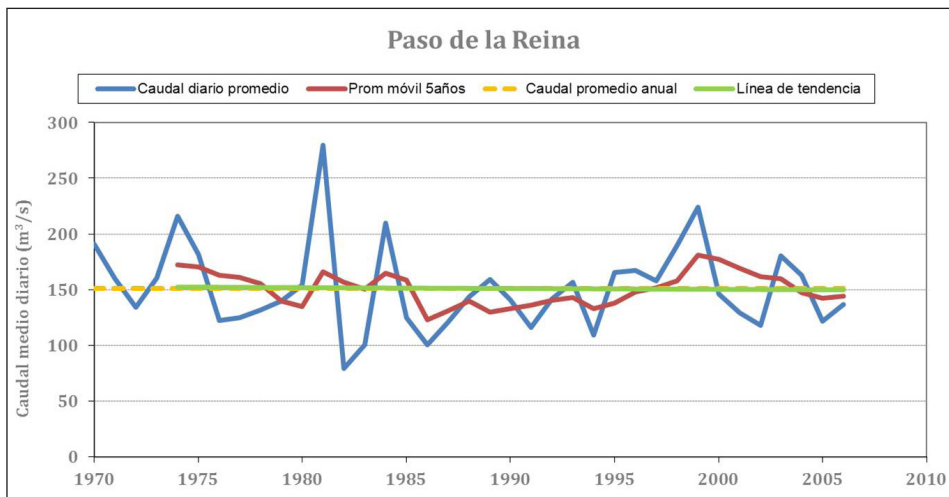


Figura 13. Promedio móvil 5 años Paso de la Reina

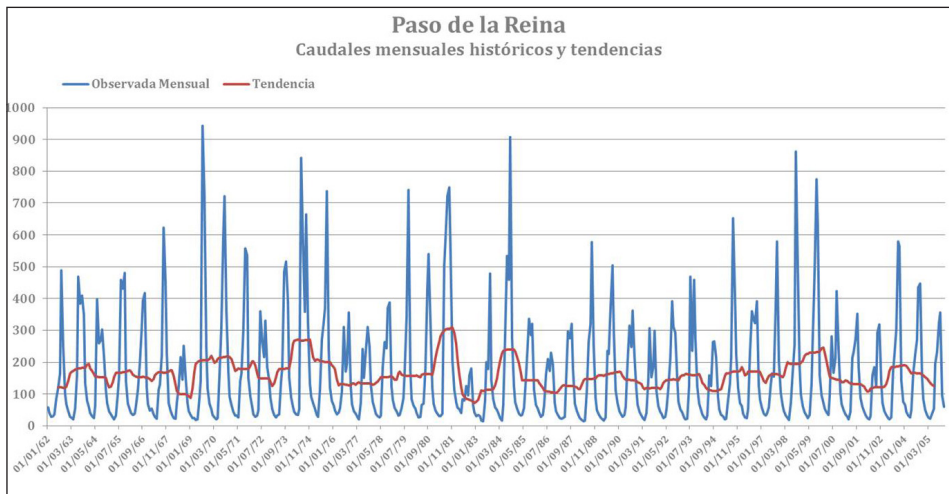


Figura 14. Serie de tiempo mensual y tendencia

### Valores de referencia de la NMX de caudal ecológico

Conforme con los objetivos ambientales correspondientes a cada cuenca y los porcentajes de caudal medio anual recomendados por los métodos de Tennant modificado por (García et al., 1999) y el de WWF de la NMX. Se obtuvieron los siguientes valores guía iniciales para tener en cuenta en la planeación del aprovechamiento del agua en la cuenca (Tabla 6). Para autorización de grandes extracciones o alteraciones importantes, se recomienda la aplicación de métodos más detallados que señala la misma NMX.

Para la cuenca del Río verde se analizó información sobre la importancia ambiental y los recursos por proteger como es el inventario de especies en la parte baja de la cuenca (60 km antes de su confluencia), realizado por la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, para un estudio de la Comisión Federal de Electricidad (inédito), en el que se identificaron 18 especies de peces y 12 especies de langostinos, que representan especies de importancia ecológica y económica para la cuenca y comunidades locales.

Tabla 7. Valores de Referencia para Caudal Medio Anual y Volúmenes de Escurrimiento Medio Anual.

Sitio/Estación	Obj. Amb.	CMA (m³/s)	EMA (Mm³/año)	Tennant (Modif. Por García, et al., 1999)				WWF		
				Estiaje		Avenidas		%EMA (Mm³/año)		
				%CMA(m³/s)	Q <sub>mi</sub> (%)*	%CMA(m³/s)	Q <sub>mi</sub> (%)*	Corrientes Temporales		
Oaxaca Atoyac	B	1.30	145.6	0.26	80	0.52	40	21.8 - 27.7		
Oaxaca Salado	B	0.89	60.7	0.18	80	0.36	40	9.1 - 11.5		
Zimatlán	B	4.45	175.8	0.89	80	1.78	40	26.4 - 33.4		
Tlapacoyán	B	5.37	185.9	1.07	80	2.15	40	27.9 - 35.3		
									Corrientes Perennes	
Paso ancho	B	11.88	497.6	2.38	80	4.75	40	124.4 - 146.1		
El Carrizo	B	132.74	4,775.0	26.55	80	53.10	40	1,193.7 - 1,632.6		
Yutama	A	1.02	49.0	0.31	100	0.61	50	>=	19.6	
Nduave	A	1.81	64.5	0.54	100	1.09	50	>=	25.8	
Yutacua	A	25.95	989.5	7.79	100	15.57	50	>=	395.8	
Nusutia	A	62.69	2,214.9	18.81	100	37.61	50	>=	886.0	
Ixtayutla	A	92.39	3,342.5	27.72	100	55.43	50	>=	1,337.0	
Paso de la Reina	A	161.50	5,232.5	48.45	100	96.90	50	>=	2,093.0	
CMA = Caudal Medio Anual m³/s				EMA = Escurrimiento Medio Anual Mm³/año						
Tennant Modificado. Estiaje: %CMA A:30 B:20 - %Q <sub>mi</sub> A:100 B:80   Avenidas: %CMA A:60 B:40 - %Q <sub>mi</sub> A:50 B:40 (*mensual)										
WWF. Corrientes Perennes: %EMA A: >= 40 B:25-39   Corrientes Temporales: %EMA A:>=20 B:15-19										

Por otra parte, a través de un análisis de prioridades y vacíos de la conservación, dentro de la cuenca del Río Verde se han identificado sitios de importancia

terrestre y acuática clasificados en tres categorías de prioridad: media, alta y extrema (CONABIO - CONANP, 2010), Figura 15 y 16.

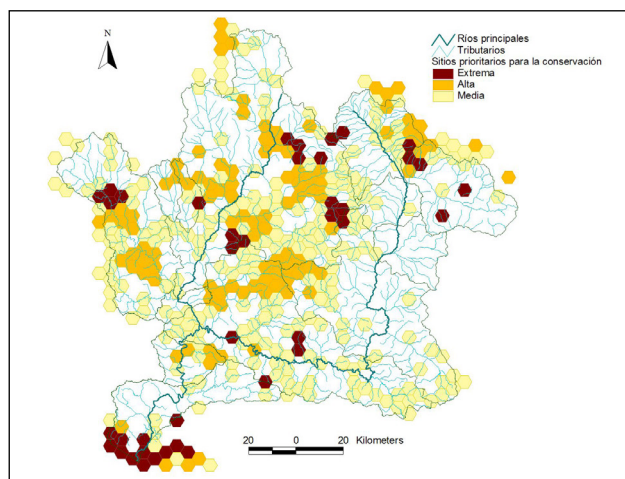


Figura 15. Sitios prioritarios terrestres

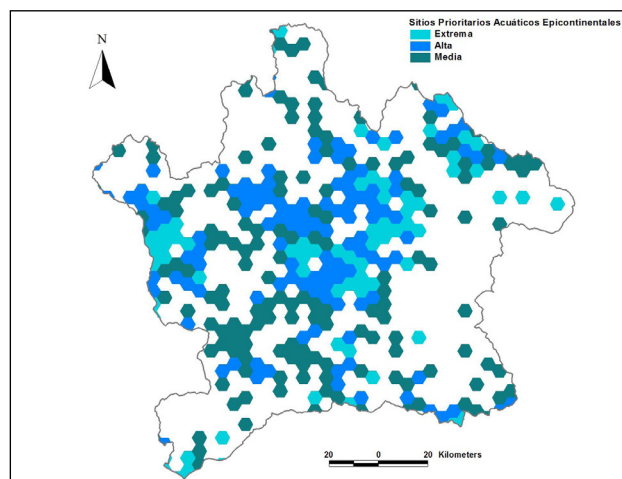


Figura 16. Sitios prioritarios acuáticos epicontinentales

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Conforme con las características de los dos afluentes principales, los arroyos y ríos formadores del Atoyac al noreste de la cuenca alcanzan un mayor orden, presentan pendientes menores y también menor área de captación, por lo que la concentración de escurrimientos es más lenta y la disponibilidad menor. Mientras que los afluentes de la parte noroeste de la cuenca a partir de la estación Yutama a Ixtayutla, presentan menor orden, mayor pendiente y superficie de captación, por lo que las corrientes concentran un mayor volumen de escurrimiento de forma más rápida, con menor infiltración y mayor disponibilidad hasta que se integran en la corriente principal de orden 5.

A diferencia de los afluentes del Atoyac, la contribución de los afluentes del río Verde es determinante en el régimen de variabilidad anual de la cuenca, señalando una marcada temporada de lluvias y estiaje con períodos ascendentes y descendentes de los mismos en la variabilidad intra-anual. Mensualmente la variabilidad de los caudales es mayor en la época de lluvias por lo que la cuenca conforme con Seelbach, et al. (Seelbach, Wiley, Baker, & Wehrly, 2006) en la parte noreste puede clasificarse como "determinada por el agua subterránea, el caudal base y altos picos de escurrimiento". Hacia el noroeste las corrientes están determinadas por la precipitación, con bajo caudal base y altos picos de escurrimiento.

Históricamente los años lluviosos pueden seguirse a través de la agregación de las estaciones de la cuenca, mientras que la influencia de huracanes y lluvias extremas se identifica principalmente hasta la estación El Carrizo. Su alternancia resulta importante en el diseño de una estrategia de caudal por el nivel de estrés que causan en las comunidades biológicas.

Como el coeficiente de dispersión que representa la diferencia entre los percentiles 75 y 25 divididos entre el percentil 50 refleja la variabilidad de los datos en los distintos períodos de registro, observándose que en la parte noroeste de la cuenca con corrientes temporales y datos de caudal cero, la variabilidad en los períodos de 30 y 90 días mínimo puede ser muy amplia y afectada por valores bajos pero superiores a cero. Mientras que en las corrientes del noroeste de la cuenca las variaciones son menores y están determinadas por los valores menores a la mediana. La variabilidad en general es mayor en los períodos de caudales máximos.

Para definir una estrategia de caudal ecológico en cada estación hidrométrica es más conveniente utilizar un análisis no paramétrico que reconoce el comportamiento histórico de un río, sobre todo como es el caso de Paso de la Reina para reproducir distintos caudales que se requieren en la época de lluvias por el tipo de año que se pretenda reproducir por el aprovechamiento o extracción, ya sea que se trate al río por varios años secos, promedio o con cierta alternancia natural que se ha presentado.

Los valores o porcentajes de referencia obtenidos del caudal o escurrimiento medio anual según el método conforme a la NMX, orientan en la etapa de planeación del aprovechamiento del agua en la cuenca, sobre todo el porcentaje de extracción que se debería autorizar para proteger la condición ecológica del río. Otros métodos sugeridos en la misma NMX se relacionan con la distribución estacional y mensual del volumen, así como los umbrales de alteración mensual para reproducir ciertas condiciones de estiaje o avenidas para los procesos naturales de los ríos y sus comunidades. Para infraestructura de desvío o generación que implique alteraciones diarias u horarias se deberán aplicar métodos más detallados.

Asimismo, los objetivos ambientales que se han asignado a la cuenca representan una iniciativa gubernamental para su conservación y pueden servir de base para la negociación y formulación de escenarios para su aprovechamiento local o regional.

## REFERENCIAS

- Ahmadi-Nedushan, B., St-Hilaire, A., Bérubé, M., Robichaud, É., Thiémonge, N., & Bobée, B. (2006). A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment. *River Research and Applications*, 22(5), 503–523. doi:10.1002/rra.918
- Avilés-Garay, E. J. (2003). Estadísticas: Contrastes paramétricos y no paramétricos. Puerto Rico.
- Brisbane. (2007). Declaración de Brisbane.
- CONABIO, & CONANP. (2010). Sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad.
- CONAGUA. (2011). Estadísticas del agua en México, edición 2011. (SEMARNAT, Ed.) (p. 185). México: SEMARNAT.
- ConserveOnline. (2011). The Indicators of Hydrologic Alteration. <http://conserveonline.org/workspaces/iha>
- DOF-19/06/2007. (n.d.). DOF - Acuerdo de Disponibilidad media anual de las aguas superficiales. 19/06/077.
- Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, J. (2003). Elementos esenciales de los caudales ambientales. (p. 125). San José, C.R: UICN-ORMA.
- ELOHA. (2010). Límites Ecológicos de las Alteraciones Hidrológicas. *Ecological Applications* (pp. 1–4).
- García, R. E., González, R., Martínez, P., Athalía, J., & Paz-Soldán, G. (1999). Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudales de reserva ecológicos en México (Colección ., p. 190). México: CNA-IMTA-SEMARNAP.
- Gómez-Martínez, J. F. (2009). Estudio Hidrológico e hidrometeorológico de la cuenca del Sistema Ambiental Regional del proyecto de aprovechamiento hidráulico Paso de la Reina, Oax . (pp. 1–254). México.

- Gordon, N. D., McMahon, T. A., & Finlayson, B. L. (2004). *Stream Hydrology An Introduction for Ecologists* Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
- NMX-AA-159-SCFI-2012 Norma Mexicana. Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal ecológico en cuencas hidrológicas. México, D.F., 20 de septiembre de 2012. (2012).
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., et al. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147–170.
- Postel, S., & Richter, B. (2003). *Rivers for life: managing water for people and nature*. Washington, DC.: Island Press.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., & Powell, J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(4), 329–340.
- Richter, Brian D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., & Braun, D. P. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37.
- Seelbach, P. W., Wiley, M. J., Baker, M. E., & Wehrly, K. E. (2006). Landscape-based identification and classification of ecological river segments: concepts, approach, and application across Michigan's Lower Peninsula. In E. R. Hughes, L. Wang, and P.W. Seelbach (Ed.), *Landscape influences on stream habitats and biological communities*. (Symposium ., pp. 25–48). American Fisheries Society.
- Snelder T. H., T. Datry, N. Lamouroux, S. T. Larned, E. Sauquet, H. P., & Catalogne, and C. (2013). Regionalization of patterns of flow intermittence from gauging station records. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 10, 1511–1551.
- Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5-6), 397–441.
- TNC. (2011). *Agua Dulce - Manteniendo el caudal ambiental en los ríos*. 2011. <http://espanol.tnc.org/habitats/aguadulce/fluorios.html>
- TNC (The Nature Conservancy). (2009). *Manual de usuario de Indicadores de alteración hidrológica, Versión 7.1*. Nature.
- Veza, P., Parasiewicz, P., Rosso, M., & Comoglio, C. (2011). Defining minimum environmental flows at regional scale: application of mesoscale habitat models and catchments classification. *River Research and Applications*.
- Wood, P. J., Hannah, D. M., & Sadler, J. P. (2007). *Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future*. Earth (1st ed., p. 466). Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- WWF, & Fundación Río Arronte. (2011). *Guía para la determinación de caudal ecológico en México Sistematización de experiencias de la Alianza WWF – Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P.* (p. 98). Mexico, D.F.
- [www.eflownet.org](http://www.eflownet.org). (2012). *Global Environmental Flows Network*. <http://www.eflownet.org>

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de Maestría en Ingeniería Ambiental durante la cual se desarrolló este tema.

A la Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental del IMTA y a la Dra. Ma del Pilar Saldaña Fabela.