

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN LA  
CUENCA AMAZÓNICA PARA EL PERIODO 1974 -2012”**

**Presentada por:**

**DIANA MARÍA GUERRERO PÉREZ**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE**

**MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

**Lima - Perú**

**2015**

*“La actividad intelectual no es predominantemente cuestión de talento o inteligencia sino de persistencia, de tenacidad, de perseverancia, de constante disposición y dedicación a no dejarse arrollar por un sentido común consustanciado con la naturalidad de lo cotidiano”*  
**Citado por José Iván Ortiz, 2005**

## **DEDICATORIA**

*A esas personas que han hecho de mi vida un camino lleno de grandes cosas, que siempre estuvieron y están listas para brindarme toda su ayuda, ahora debo regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado. Con todo mi cariño este trabajo se la dedico a mi familia por tanto apoyo y espera y a mis amigos de siempre por ser parte de éste proceso.*

## AGRADECIMIENTOS

*Este trabajo de investigación realizado en la Universidad Nacional Agraria La Molina es un esfuerzo en el que directa o indirectamente han participado distintas personas opinando, corrigiendo y aportando de alguna manera a la culminación del mismo, éste trabajo me ha permitido aprovechar la competencia y la experiencia de muchas personas a las que deseo agradecer.*

*En primer lugar, mis agradecimientos sinceros al Dr. Waldo Lavado Casimiro patrocinador de ésta investigación, por haber confiado en mí, por su guía, esfuerzo y dedicación, especial agradecimiento merece el interés mostrado por mi trabajo y las sugerencias recibidas del Dr. Jhan Carlo Espinoza Villar, quien estuvo presente durante todo el proceso; sus conocimientos y orientaciones, persistencia, paciencia y motivación han sido sin duda, los pilares fundamentales para mi formación.*

*Quisiera también hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros de maestría Brenda, Omar, Gill, Roy, Jesús, Kennedy, Jennifer, Teófila, Eduardo, Carlos A. por todo el acompañamiento y su amistad han sido desde que los conocí, mucho más que solo compañeros de estudio, todos sus aportes en éste proceso fueron sin duda, de gran ayuda.*

*Gracias a Daniela, Johanna, Luis Enrique y Bibiana, por que estar lejos de casa, siempre nos unió.*

*Y finalmente, pero no menos importante, agradezco a toda la gente de fuera, Ángela, Mónica, Lorena, Andrea, Anita, Carlos J., Edwin, John, por apoyarme siempre y hacer parte de todo éste proceso.*

*A todos ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud.*



# INDÍCE GENERAL

	<b>Pág.</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Alteración hidrológica .....	1
1.2 Eventos extremos.....	1
1.3 Objetivos.....	2
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Antecedentes.....	4
2.2 El régimen hidrológico y su influencia en el ecosistema .....	5
2.2.1 Métodos hidrológicos. ....	5
2.2.2 Métodos hidráulicos .....	6
2.2.3. Métodos de simulación de hábitat. ....	7
2.2.4 Métodos holísticos.....	8
2.3 Componentes del régimen hidrológico.....	8
2.4 Metodología de los índices de alteración hidrológica (IHA) .....	9
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Localización.....</b>	<b>14</b>
3.1.1 Características generales de la zona. ....	14
3.1.2 Ubicación.....	14
<b>3.2 Datos utilizados.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 Metodología.....</b>	<b>16</b>
3.3.1 Análisis exploratorio de datos (AED). ....	16
3.3.2 Determinación del año hidrológico. ....	17
3.3.3. Cálculo de las variables hidrológicas (Datos en IHA). ....	17
3.3.4. Cálculo de caudal mínimo, medio y máximo.....	20
3.3.5 Cálculo de la variabilidad interanual (iVC) y estacional (sVC).....	20
3.3.6 Determinación de cambios y rupturas en las series de caudales. ....	20
3.3.7 Análisis de tendencias. ....	21
3.3.8 Componentes del caudal.....	21
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>22</b>
4.1 Caracterización geográfica de las estaciones utilizadas. ....	22

4.2	Análisis exploratorio de datos (AED).	22
4.2.1	Diagramas de caja.	22
4.3.	Caracterización de los caudales de la Cuenca Amazónica	23
4.4	Análisis de la variabilidad temporal de caudales en la Cuenca Amazónica.	24
4.4.1	Caracterización del régimen de caudales.	24
4.4.2	Variabilidad estacional e interanual	26
4.5	Evolución de los caudales para periodo 1974 – 2012.	30
4.6	Determinación de rupturas en las series.	33
4.7	Tendencias en las series.	33
4.8	Determinación de las variables hidrológicas y la tendencia en los índices de alteración hidrológica (IHA)	38
4.8.1	Índices 3, 7, 30 y 90 días mínimos (condiciones extremas anuales).	39
4.8.2	Índices 3, 7, 30 y 90 días máximos (condiciones extremas anuales).	42
4.8.3	Índice de caudal base.	46
4.8.4	Fecha juliana de caudal mínimo y máximo anual de 1 día.	47
4.8.5	Número y duración de pulsos bajos por año.	49
4.8.6	Número y duración de pulsos altos por año.	51
4.8.7	Tasas de ascenso y descenso en el hidrograma.	54
4.9	Cálculo del régimen hidrológico a partir de las métricas IHA	56
4.10.	Alteración hidrológica en la Amazonía Peruana (Tamshiyacu - TAM).	62
4.10.1.	Índices de Alteración Hidrológica (IHA) en la Amazonía Peruana (TAM)	65
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>69</b>
<b>VI.</b>	<b>PERSPECTIVAS</b>	<b>71</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>82</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Pag.</b>
Cuadro 1: Parámetros hidrológicos del software IHA.....	11
Cuadro 2: Estaciones en la Cuenca Amazónica .....	16
Cuadro 3: Variables IHA seleccionadas para análisis de la alteración hidrológica en la Cuenca Amazónica. ....	18
Cuadro 4: Resultados obtenidos en la comparación entre los periodos 1974 – 2004 (Espinoza <i>et al.</i> , 2009a) y 1974 – 2012 para Qmin, Qmed y Qmax. Los cambios significativos mayores a 5% se presentan con color azul (positivos) y los menores a -5% en color rojo (negativos) .....	27
Cuadro 5: Cálculo de los coeficientes de variabilidad interanual (iVC) y estacional (sVC) de Qmin, Qmed y Qmax. ....	28
Cuadro 6: Comparación del índice de tendencia lineal en las series para los periodos 1974 – 1989, 1990 - 2000, 2001 – 2012 y 1974 - 2012. En rojo tendencia negativa y en azul positiva. ....	32
Cuadro 7: Test de rupturas para las estaciones evaluadas, B: Buishand, P: Pettitt, P/AC: Año de cambio para P, L&H: Lee y Heghinian, L&H/AC: Año de Cambio para L&H, H: Segmentación de Hubert, H/AC: Año de cambio para H. En amarillo, las estaciones que presentaron rupturas en los cuatro test. ....	34
Cuadro 8: Rupturas detectadas en las series de caudales de las estaciones ALT, PVE y SAI en el Qmin y FVA en el Qmed. ....	35
Cuadro 9: Índices de tendencia (relación lineal) calculados para Qmin, Qmed y Qmax, la Amplitud (Amp) es la diferencia entre las pendientes de Qmax y Qmin sobre la diferencia del promedio entre Qmax y Qmin. En rojo la tendencia negativa y en azul la positiva.....	36
Cuadro 10: Coeficiente de correlación de Mann-Kendall modificado (MKm) para Qmin, Qmed y Qmax al 90%, 95% y 99%, la tendencia negativa se presenta en escala de rojos (rojo para 99%) y la positiva en escala de azules (azul oscuro para 99%) para cada caso, en blanco las estaciones que no presentan tendencia....	38
Cuadro 11: Valores mínimos y promedio del año hidrológico de los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	41
Cuadro 12: Porcentaje de aumento o disminución de caudales en los índices de 3, 7, 30 y 90 días mínimo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	43
Cuadro 13: Valores máximos y medios anuales de los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.....	43
Cuadro 14: Porcentaje de aumento o disminución de caudales en los índices de 3, 7, 30 y 90 días máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en	

gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	45
Cuadro 15: Promedio del caudal de 7 días mínimo, caudal y cálculo de caudal base para 14 subcuencas de la Cuenca Amazónica. . La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	47
Cuadro 16: Porcentaje de anomalías del caudal medio histórico con respecto al valor mínimo de caudal para los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimo. ....	66
Cuadro 17: Porcentaje de anomalías del caudal medio histórico con respecto al valor máximo de caudal para los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo. ....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de la Cuenca Amazónica y las estaciones hidrométricas utilizadas para éste estudio. ....	15
Figura 2. Metodología de investigación a fin de cuantificar la alteración hidrológica de la cuenca amazónica.....	17
Figura 3. Gráficos de cajas para detección de datos atípicos. A. Estaciones con caudal menor a 60 000 m <sup>3</sup> /s (occidente de la cuenca). B. Estaciones con caudal mayor a 50 000 m <sup>3</sup> /s (oriente de la cuenca).....	23
Figura 4. Año hidrológico para las estaciones evaluadas. A. ITP – MAN; B. SAI – G; C. ALT – ITA; D. FVA – L. ....	25
Figura 5. Año hidrológico para las estaciones evaluadas. A. SER – CAR; B. OBI; C. RUR; D. TAM - PVE.....	26
Figura 6. Hidrogramas de las estaciones con mayor variabilidad estacional A.CAR; B. ALT; C. RUR y D. ITP, estación que presenta una baja variabilidad estacional. ....	29
Figura 7. Relación entre el coeficiente variabilidad interanual del Qmed (iVC_Qmed) y el coeficiente de variabilidad estacional (sVC) en las 14 estaciones analizadas. ....	31
Figura 8. Evolución de los caudales de Qmin, Qmed y Qmax (1974 – 2012) en las subcuencas del sur, los valores fueron estandarizados para su representación Qmin -3, Qmed 0 y Qmax 3). ....	31
Figura 9. Evolución de los caudales de Qmin, Qmed y Qmax (1974 – 2012) en las subcuencas del centro y norte, los valores fueron estandarizados para su representación Qmin -3, Qmed 0 y Qmax 3 ..... 32	32
Figura 10. Rupturas en las series de tendencias en las estaciones ALT, SAI, FVA y PVE. ....	34
Figura 11. Ruptura en la serie Qmin de la estación ALT. ....	35
Figura 12. Tendencias de caudales en la Cuenca Amazónica utilizando el test de Mann – Kendall modificado (MKm) para Qmin, Qmed y Qmax periodo 1974 – 2012 (escala de rojos para tendencias negativas y escala de azules para positivas). ....	39
Figura 13. Tendencias de caudales en la Cuenca Amazónica utilizando los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimo, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la información faltante y en gris la no tendencia.....	42
Figura 14. Tendencias de caudales en la Cuenca Amazónica utilizando los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la información faltante y en gris la no tendencia.....	45
Figura 15. Tendencia de caudal base en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la información faltante y en gris la no tendencia. ....	48

Figura 16. Tendencia del número y duración de pulsos bajos en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en blanco se muestra la información faltante y en gris no existe tendencia. ....	50
Figura 17. Fecha juliana de caudal mínimo y máximo en la Cuenca Amazónica, la línea roja marca el caudal máximo y la línea azul el caudal mínimo. ....	51
Figura 18. Índice de pulsos y duración de caudal bajo en la Cuenca Amazónica, la línea roja marca la duración y el histograma la frecuencia de los pulsos bajos. ....	52
Figura 19. Tendencia del número y duración de pulsos bajos en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en color gris no existe tendencia. ....	53
Figura 20. Estaciones que presentaron tendencia en el índice de pulsos altos en la Cuenca Amazónica, la línea roja marca la duración y el histograma la frecuencia de los pulsos. ....	54
Figura 21. Tendencia del número y duración de pulsos altos en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en color gris no existe tendencia. ....	55
Figura 22. Tendencia la tasa de ascenso y descenso del hidrograma en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en color gris no existe tendencia. ....	57
Figura 23. Tasas de ascenso y descenso en el hidrograma para las estaciones en las que se observó tendencia positiva o negativa, la tasa de ascenso se presenta en color azul y la de descenso en rojo, la línea negra es el caudal base calculado con los índices de 7 días mínimo y de caudal base. ....	58
Figura 24. Componentes del régimen hidrológico para la estación OBI, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 25 y 75 que determinan el valor de los extremos. ....	59
Figura 25. Evolución del hidrograma anual para el periodo 1974 - 2012 de la estación TAM, mostrando la baja variabilidad estacional (sVC). ....	63
Figura 26. Cambios en el hidrograma para los periodos 1974 – 1989, 1990 – 1999, 2000 – 2012 y 1974 – 2012. ....	64
Figura 27. Componentes del régimen hidrológico para TAM (1974 – 2012). ....	68

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO 1. Resultados de Análisis de Tendencias Test de Mann-Kendall y Mann-Kendall Modificado Para Qmin al 99, 95 y 90% de confianza, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.....	82
ANEXO 2. P-valor y pendiente para los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	84
ANEXO 3. P-valor y pendiente para los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	85
ANEXO 4. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución del caudal base en las 14 subcuencas de la Cuenca Amazónica. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	86
ANEXO 5. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución del índice de fecha de caudal mínimo y máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	87
ANEXO 6. Valor de P, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución de los índices de número y duración de pulsos bajos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	88
ANEXO 7. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución de los índices de número y duración de pulsos altos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	89
ANEXO 8. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución de las tasas de ascenso y descenso en el hidrograma. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia. ....	90
ANEXO 9. Curvas de duración de 14 estaciones de la Cuenca Amazónica - Periodo 1974 – 2012. ....	91
ANEXO 10. Componentes de la alteración del caudal estación ALT, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	93
ANEXO 11. Componentes de la alteración del caudal estación TAM, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	94

ANEXO 12. Componentes de la alteración del caudal estación ITP, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.....	95
ANEXO 13. Componentes de la alteración del caudal estación MAN, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.....	96
ANEXO 14. Componentes de la alteración del caudal estación SER, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.....	97
ANEXO 15. Observación de los años con caudal por debajo del percentil 10 en la estación SER periodo 1998 - 2012.....	98
ANEXO 16. Componentes de la alteración del caudal estación CAR, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.....	99
ANEXO 17. Observación de pequeñas y grandes inundaciones en la estación CAR periodo 2 004 – 2 012.....	100
ANEXO 18. Componentes de la alteración del caudal estación RUR, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.....	101
ANEXO 19. Observación de la variabilidad interanual en la estación RUR periodo 1995 – 2012.....	102
ANEXO 20. Componentes de la alteración del caudal estación PVE, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	103
ANEXO 21. Componentes de la alteración del caudal estación FVA, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	104
ANEXO 22. Componentes de la alteración del caudal estación ITA, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	105
ANEXO 23. Componentes de la alteración del caudal estación SAI, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	106
ANEXO 24. Componentes de la alteración del caudal estación G, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	107
ANEXO 25. Componentes de la alteración del caudal estación L, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos. ....	108



# **CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA AMAZÓNICA PARA EL PERIODO 1974 -2012**

## **RESUMEN**

En la presente investigación se analizó la alteración hidrológica en la Cuenca Amazónica sobre la base del análisis de la serie de caudal diario de 14 estaciones hidrométricas con un periodo de 39 años (1974 – 2012), realizando la caracterización de la variabilidad temporal y estacional de éstas series, se determinaron los valores extremos ( $Q_{min}$  y  $Q_{max}$ ) y medios ( $Q_{med}$ ) de las series para establecer la tendencia del periodo utilizando el test de Mann – Kendall modificado (MKm). Las métricas IHA se analizaron a partir de los valores del caudal mínimo y máximo (3, 7, 30 y 90 días), caudal base (mínimo de siete días/media), las fechas julianas, número y duración de eventos de caudal altos y bajos y las tasas de ascenso y descenso del hidrograma que con los componentes del análisis de caudal permitieron determinar la evolución regional de los caudales en toda la cuenca Amazónica. Como resultado se obtuvo que el  $Q_{min}$  presentó una disminución generalizada en la tendencia de las estaciones a excepción de los extremos norte, sur y oriente, el  $Q_{med}$  y  $Q_{max}$  no presentaron cambios significativos; el análisis de las métricas IHA, muestran una disminución del caudal mínimo en toda la Cuenca Amazónica con una significancia del 99%, el caudal máximo presentó un aumento para las estaciones centrales con significancia del 95%, el caudal base muestra una tendencia a la disminución a excepción de los extremos norte, sur y oriente. Los pulsos altos mostraron una tendencia positiva con una corta duración para las estaciones del sur y centrales de la cuenca Amazónica.

# **QUANTIFICATION OF HYDROLOGIC ALTERATION IN THE AMAZON BASIN FOR THE PERIOD 1974 -2012**

## **ABSTRACT**

In the present investigation hydrologic alteration in the Amazon Basin based on the analysis of the number of daily flow of 14 hydrometric stations with a period of 39 years (1974-2012) was performed, making the characterization of the temporal and seasonal variability these series, the extreme values ( $Q_{min}$  and  $Q_{max}$ ) and means ( $Q_{med}$ ) series were determined to establish the trend of the period using the Mann - Kendall modified (MKm). The IHA metrics are analyzed from the values of minimum and maximum flow (3, 7, 30 and 90 days), baseflow (minimum of seven days / media), the Julian dates, number and duration of high flow events and low and rates of rise and fall of hydrograph components that flow analysis allowed to determine the regional evolution of flows throughout the Amazon basin. The obtained results showed that the  $Q_{min}$  presented a general decrease in the trend of the stations except for the extreme north, south and east, the  $Q_{med}$  and  $Q_{max}$  no significant change; analysis IHA metrics show a decrease of the minimum flow throughout the Amazon Basin with a significance of 99%, the maximum flow showed an increase for central stations with 95% significance, baseflow shows a decreasing trend except for the extreme north, south and east. The high pulse showed a positive trend with a short duration for South and Central stations of the Amazon basin.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Alteración hidrológica

Los cambios en los regímenes de flujo y descarga de los ríos se observan en un gran número de ríos en todo el mundo como una respuesta a los cambios ambientales. Sin embargo, las características y la atribución de tales cambios no se entienden completamente (Gao *et al.*, 2012). Los regímenes hidrológicos son componentes críticos de la integridad ecológica de los sistemas fluviales (Poff *et al.*, 1997; Hart & Finelli, 1999; Lytle & Poff, 2004; Poff & Zimmerman, 2010). Por lo tanto, las comunidades acuáticas se adaptan a la variabilidad hidrológica interanual en magnitud, oportunidad y previsibilidad de los componentes del hidrograma clave, como los períodos de alto y bajo caudal (Jowett & Duncan, 1990).

Algunos trabajos anteriores, han explorado la importancia ecológica de estas y otras variables hidrológicas y ecológicas, recomendaciones de caudal ambiental y el desarrollo de diferentes métodos de análisis e investigación (Monk *et al.*, 2008).

Comprender las características de los cambios en el régimen de los caudales y el análisis de las razones de estos cambios son importantes para identificar el potencial ecológico de los regímenes de caudales para mejorar la gestión integrada de los recursos hídricos y la protección del ecosistema de éstos ríos (Poff, 2002; Lake, 2003; Boulton, 2003; Wood *et al.*, 2004).

## 1.2 Eventos extremos

La literatura ha sugerido que la variabilidad del clima podría acelerar algunos componentes del ciclo global del agua, lo que resulta en un aumento de los eventos extremos (Arnell, 1999; Trenberth & Stepaniak, 2003). Como consecuencia, los regímenes de flujo se

alterarán de manera significativa en un clima cambiante. La intensificación de las actividades humanas, incluido el cambio de uso del suelo, el consumo de agua artificial y la construcción de presas, han cambiado y alterado directamente los regímenes de caudal natural de los ríos en las últimas cinco décadas. (Gao *et al.*, 2012).

La Cuenca Amazónica es la mayor cuenca hidrográfica del mundo, abarca alrededor de 6.2 millones de km<sup>2</sup> y también su caudal medio es el más grande (209 000 m<sup>3</sup>/s) (Molinier & Guyot, 1996). Recientemente, se han documentado los eventos extremos ocurridos en la cuenca, como sequías (2005 y 2010) (Zeng *et al.*, 2008; Marengo *et al.*, 2008; Espinoza *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2011) e inundaciones (2006, 2009 y 2012) (Marengo *et al.*, 2011; Espinoza *et al.*, 2012, Satyamurty *et al.*, 2013, Espinoza *et al.*, 2013).

El paradigma del caudal natural es ahora un enfoque establecido en la ordenación y el estudio básico de los ecosistemas fluviales, lo que permite la evaluación de los impactos ecológicos de las desviaciones del régimen de referencia como resultado del cambio de éste, el almacenamiento, la extracción, y/o las adiciones (Poff *et al.*, 1997; Lytle & Poff, 2004; Monk, 2008). En Richter *et al.* (1996) identificaron 33 variables hidrológicas, conocidas como Índices de Alteración Hidrológica (IHA), que representan los diferentes componentes de importancia ecológica, clasificadas en cinco grupos: (i) magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales, (ii) magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales, (iii) momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales, (iv) frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos, y (v) tasa de frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas. Estas variables proporcionan un marco para comparar los regímenes de caudales alterados y evaluar el grado de perturbación de las condiciones de los mismos.

### **1.3 Objetivos**

La cuantificación de la alteración hidrológica en 14 ríos pertenecientes a la Cuenca del Amazonas (uno en Bolivia, uno en Perú y 12 en Brasil) para el periodo 1974 – 2012, es el principal objetivo de éste estudio, desarrollando los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar estadísticamente la variabilidad temporal de los regímenes hidrológicos mediante atributos estadísticos relevantes.
- Realizar el análisis hidrológico de los registros de caudales diarios, mensuales y anuales.
- Determinar las tendencias y cambios regionales en las series diarias de caudales de la cuenca amazónica.
- Analizar las métricas de los Índices de Alteración Hidrológica (IHA) para determinar el cambio en el régimen de los caudales.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Antecedentes

Se tuvieron en cuenta estudios realizados con anterioridad sobre la evolución regional de los caudales en la Cuenca Amazónica, como el realizado por Espinoza *et al.* (2009a), en el que se compilaron datos diarios de niveles de agua, la generación de curvas de calibración de aproximadamente 30 estaciones fue realizada por el programa HIBAM (Observatorio de investigación del medio ambiente de procesos geodinámicos, control hidrológico y biogeoquímico de la erosión, alteración y transporte de material en la Cuenca del Amazonas) entre 1996 y 2008, utilizando el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

En el estudio realizado, se presenta la selección de 18 estaciones hidrométricas con información de descargas medias y se concluyó que las tendencias de las series temporales obtenidas (promedio, máximo y mínimo) presentan cambios en las cuencas de ríos andinos y una tendencia al aumento en el caudal medio y máximo al noroeste de los ríos Napo y Putumayo (Espinoza *et al.*, 2009a).

También, en Espinoza *et al.* (2009a) se describe que la variabilidad de las descargas concuerda con la variabilidad de las lluvias, en particular, el incremento de la precipitación en Manacapuru (al Noreste de la Cuenca Amazónica, sobre el Río Solimões) y su disminución en Septiembre – Octubre – Noviembre desde el inicio de los años noventa, está de acuerdo con el incremento de la amplitud de la esorrentía en los ríos del noroeste.

En el sur, la disminución de la precipitación en diciembre – enero – febrero desde el inicio de los años ochenta, explica las disminuciones de la esorrentía máxima, mínima y anual en los ríos de alto Madeira (Brasil), Mamoré (Brasil), Beni (Bolivia) y Ucayali (Perú).

Tanto la variabilidad del caudal como la de la precipitación parecen estar más relacionadas al clima que a la actividad humana (Espinoza *et al.*, 2009a).

## **2.2 El régimen hidrológico y su influencia en el ecosistema**

La composición, estructura y función de los ecosistemas hidrológicos dependen en gran medida del régimen hidrológico, siendo éste el factor condicionante de la integridad ambiental del ecosistema. El régimen hidrológico define el flujo de agua de un cauce en un periodo de tiempo y las alteraciones del régimen hidrológico deben ser abordadas tanto en la escala espacial como temporal (Bunn & Arthington, 2002).

Este régimen natural, determina un conjunto de procesos geomorfológicos, propiedades y relaciones entre el río y el ambiente ripario (vegetación ribereña) manteniendo la diversidad y mejorando el hábitat de algunas especies (Martínez & Fernández, 2010); en algunos ríos, la alteración de este régimen ha provocado la extinción de comunidades de flora riparia nativa provocando una disminución en la biodiversidad (Arthington *et al.*, 2009).

Para la evaluación del caudal de los ríos, existen muchas metodologías que tienen la misma finalidad, pero en algunas de ellas, no se contempla un análisis completo del rango de variabilidad que puede presentar el régimen hidrológico (Bustamante *et al.*, 2007). Los métodos, se clasifican de acuerdo a las variables existentes (Magdaleno, 2004), ésta clasificación se presenta a continuación:

### **2.2.1 Métodos hidrológicos.**

En estos métodos, el caudal base se deduce a partir de datos hidrológicos tratados mediante diversos mecanismos (caudales clasificados, porcentajes del caudal medio, análisis de series temporales, entre otros) (Cachón de Mesa, 2002). Así estos métodos pueden incorporar diversas fórmulas e índices hidrológicos, variables propias de la cuenca, o consideraciones hidráulicas, biológicas y/o geomorfológicas. En todo caso, sólo requieren ciertos conocimientos hidroecológicos. Los índices utilizados se eligen a partir de una combinación de análisis estadísticos y observaciones directas en ríos de similares

condiciones hidrológicas y/o ecológicas (Magdaleno, 2005). En ésta clasificación se encuentran los métodos:

- NGPRP: Northern Great Plains Resource Program por sus siglas en inglés, fue creado en 1974, utiliza registros históricos de caudales medios mensuales y define tres grupos, en función de ciertas probabilidades de excedencia: caudales bajos, caudales normales y caudales altos. El régimen de caudales ambientales final se obtiene como la serie de caudales ecológicos para cada mes (Lozano, 2005).
- Hoppe: Basado en curvas de duración de caudales y en los requerimientos biológicos de las poblaciones piscícolas, expresados a través de las necesidades de las poblaciones de truchas de ríos en el estado de Colorado, Estados Unidos (Hoppe, 1975).
- 7Q10: El caudal ecológico es el valor correspondiente al caudal mínimo medio de siete días consecutivos, para un periodo de retorno de 10 años (Magdaleno, 2005).
- ABF: (Aquatic Base Flow), está basado en el tratamiento estadístico de series de aforos de 10 años como mínimo, debe tenerse en cuenta la posible estacionalidad de las medidas de aforo (Magdaleno, 2005).
- Q90: Éste método toma la curva de duración de caudales de toda la serie histórica y obtiene un valor único del Q90 (Magdaleno, 2004)

### **2.2.2 Métodos hidráulicos**

Estos métodos emplean los cambios ocurridos en variables hidráulicas sencillas como el perímetro mojado, velocidad máxima entre otros, medidas generalmente, en una o varias secciones, a partir de los cambios de caudal, para establecer relaciones con los factores relacionados con el hábitat de las especies objetivo que son considerados como limitantes para ellas. Estos métodos combinan trabajo analítico y experiencia sobre el terreno, requieren una modelación hidráulica e hidrológica limitada, entre los métodos conocidos están (Magdaleno, 2004):



- Montana o de Tennat: Ha sido desarrollado y puesto a punto por hidrobiólogos del estado de Montana partiendo de datos de once ríos, se basa en la hipótesis de que las condiciones de hábitat para la vida piscícola son cualitativamente muy parecidas en una corriente de agua o en otra para un mismo porcentaje del caudal medio anual, se considera el porcentaje del perímetro mojado con respecto a la anchura del lecho, la profundidad y velocidad del medio (Tennant, 1976; Lozano, 2005).
- Idaho: Fue desarrollado por Cochnauer y White (1975) para los grandes ríos de Idaho en los Estados Unidos, se basa en la supuesta pérdida de hábitat debido a la disminución del caudal, teniendo en cuenta las características requeridas por las especies seleccionadas como indicadores de hábitat (Cochnauer, 1983).
- Perímetro mojado: En este método se asume la existencia de una relación directa entre el perímetro mojado y la disponibilidad de hábitat para las especies piscícolas. Se definen secciones transversales en una o más zonas de rápidos donde se realizan por lo menos cinco mediciones de velocidad y profundidad del flujo, para que igualmente se pueda aplicar una modelación hidráulica (Agualimpia y Castro, 2006)

### **2.2.3. Métodos de simulación de hábitat.**

Se basan en el análisis de la cantidad e idoneidad de los hábitat físicos existentes y disponibles en los cauces para las especies objetivo, o para conjuntos de ellas (peces o invertebrados), bajo diferentes regímenes de caudales y sobre la base de distintos escenarios hidrológicos, hidráulicos y biológicos. Estos métodos utilizan datos de una o más variables hidráulicas, cuyos valores se recogen a lo largo de diferentes secciones en un determinado tramo. Las condiciones de hábitat disponibles, simuladas mediante programas específicos de modelado del hábitat, se relacionan con la información obtenida en torno a los intervalos de preferencia de las especies objetivo y/o comunidades existentes bajo la influencia de diferentes condiciones (Magdaleno, 2004). Entre los métodos conocidos en ésta clasificación, están:

- IFIM: (Intstream Flow Incremental Methodology) es considerada por muchos como un avance significativo en la determinación de los caudales ecológicos, ya que sintetiza los

aspectos más relevantes de los métodos de Washington y California, se analizan variables de tipo hidráulico y biológico (Aguilimpia y Castro, 2006).

- Oregon Usable Width Method: También conocido como el método del ancho utilizable (LU) o del ancho ponderado utilizable (LPU) cuyo fin fue determinar los caudales mínimos y óptimos para el paso, postura, incubación y crecimiento de especies seleccionadas, siendo aplicados para tramos de ríos salmonícolas del estado de Oregón en Estados Unidos (Magdaleno, 2004).

#### **2.2.4 Métodos holísticos.**

Son procesos o protocolos de actuación, definen los caudales ecológicos a través de una solución consensuada mediante un análisis independiente de la magnitud y distribución del caudal que requieren los componentes del sistema fluvial objetivo, ya sean éstos aspectos abióticos (geomorfología, calidad de agua, entre otros), ecológicos (comunidades naturales), perceptuales (paisaje), socioeconómicos, culturales, o un conjunto de ellos. Este proceso se puede hacer mediante aproximaciones descendentes o ascendentes, bajo el apoyo de equipos multidisciplinarios de expertos e información más o menos detallada de cada una de las áreas que se tiene en consideración al definir el régimen ambiental de caudales (Magdaleno, 2004).

#### **2.3 Componentes del régimen hidrológico.**

El régimen hidrológico considera cinco componentes para regular y controlar procesos ecológicos (Poff *et al.*, 1997), éstos componentes se basan en el paradigma del régimen de caudales naturales, el cual establece que la estructura, función y biota de un ecosistema ribereño son generadas por patrones de variación temporal en los caudales. Indica que los aspectos del régimen de caudales que poseen mayor significancia son la magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasas de cambio (Lytle & Poff, 2004), indican que éstos componentes son la clave en la conservación de la biodiversidad y la integridad ecológica de los ecosistemas ribereños.

Cada componente del régimen hidrológico es un factor clave en el ecosistema, la magnitud del caudal que corre en el cauce de los ríos determina la disponibilidad de agua superficial

en el mismo, la frecuencia del caudal condiciona la dinámica ecológica y por tanto la biodiversidad, hace referencia a la periodicidad con que ocurren ciertos valores de caudal como mínimos y máximos en cierto periodo de tiempo y es inversa a la magnitud del caudal es decir, los valores extremos del caudal ocurren con poca frecuencia (Magilligan & Nislow, 2005). La duración está asociada con la resiliencia y ciclos de vida de las diferentes especies; constituye el intervalo de tiempo que duran determinadas condiciones de caudal.

Para caracterizar el régimen de caudales, se debe contemplar los cinco (05) componentes (magnitud, frecuencia, caudal, tasa de cambio y duración), teniendo en cuenta los valores medios y extremos, así como las variaciones intra e interanuales. Poff *et al.* (1997), señalan que los diferentes niveles de caudal tienen una correlación directa con respecto a la funcionalidad biológica del ecosistema.

#### **2.4 Metodología de los índices de alteración hidrológica (IHA)**

El problema de la alteración del régimen hídrico ha sido abordado últimamente por varios autores, entre ellos se destaca el trabajo de Richter (1996) donde se establece una metodología llamada Índice de Alteración Hidrológica (IHA por sus siglas en inglés) que consta en el cálculo y análisis de 33 índices aguas abajo de los ríos. Esta metodología se ha consolidado en el medio al registrar su aplicación en cerca de 80 casos alrededor del mundo. Estas aplicaciones se clasifican en cuatro grupos principales:

- *Investigación Hidrológica:* El uso de la metodología y el software “IHA” en la evaluación de cambios en las condiciones hidrológicas, incluyendo cambios causados por actividades de manejo antrópico (embalses, diversiones acuáticas y bombeos de agua subterránea), cambio climático, cambios en el uso de la tierra, etc.
- *Investigación Ecológica:* Se usa en la evaluación de conexiones entre las condiciones hidrológicas y el tipo de respuesta ecológica. En este se incluyen estudios específicos de influencias sobre algunas especies, transporte de sedimentos y distribución de la salinidad.

- *Formulación de recomendaciones de caudales ambientales:* Este incluye trabajos donde se usó del software asociado a la metodología “IHA” que incluye parámetros base para el establecimiento de rangos de variación y monitoreo de ciertas variables ambientales.
- *Otras investigaciones:* Trabajos que no se asocian a las categorías anteriormente descritas.

Esta metodología se presenta como una caracterización estadística de la variabilidad temporal en el régimen hidrológico usando atributos ecológicos significativos estadísticamente que permite hacer un análisis comparativo de las muestras utilizadas.

Los índices que se consideran en la metodología IHA, se agrupan en cinco (05) clases, algunas de éstas consideran índices sobre los ecosistemas, principalmente riparios (Cuadro 1).

La metodología IHA permite el cálculo de parámetros para 5 tipos de componentes de los caudales ambientales: Caudales Bajos (Low Flows), Caudales Muy Bajos (Extreme Low Flows), Pulsos de Alto Caudal (High-Flow Pulses), Inundaciones Bajas (Small Floods), Grandes Inundaciones (Large Floods), esta categorización fue realizada a partir de investigaciones ecológicas que derivaron en la conclusión de que la hidrografía de los ríos puede ser dividida en un conjunto de patrones repetitivos que son ecológicamente relevantes (Richter *et al.*, 1997).

- *Caudales Bajos (Low Flows):* Esta es la condición dominante en la mayoría de los ríos. Se asocia con el nivel de flujo base característico después de presentarse un evento de lluvia. La variación estacional de los niveles asociados a este tipo de caudales impone una restricción fundamental a las comunidades acuáticas de rivera porque determina la cantidad de hábitat disponible en el año (condiciones favorables para el desarrollo de especies). Este tiene una fuerte influencia en la diversidad y número de organismos que pueden vivir en el ambiente ripario (Richter *et al.*, 1997).

Cuadro 1: Parámetros hidrológicos del software IHA

COMPONENTES DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO	#	PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	EJEMPLO DE INFLUENCIA ECOLÓGICA
Magnitud y tiempo	12	Valor medio por cada mes calendario	Disponibilidad de hábitat adecuado; influencia en variables secundarias, por ejemplo, la temperatura del agua, oxígeno
Magnitud y duración	5	promedio anual 1, 3, 7, 30 y 90 días mínimo	Duración de las condiciones de estrés (flujos altos y bajos)
	5	promedio anual 1, 3, 7, 30 y 90 días máximo	
	1	El caudal base (mínimo 7 días flujo anual / media)	
Tiempo	1	Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día	Señales para el desove los peces; compatibilidad con los ciclos vitales de los organismos
	1	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día	
Magnitud, frecuencia y duración	1	Número de pulsos bajos / año (donde un umbral de pulso es la mediana menos el 25% - Percentil 25)	La disponibilidad de hábitat inundable; influencia de la morfología de los canales como por ejemplo el transporte de carga sólida
	1	Número de pulsos altos / año (donde un umbral de pulso es la mediana más el 25% - Percentil 75)	
	1	La mediana de duración de impulsos bajos en cada año	
	1	La mediana de duración de pulsos altos en cada año	
Frecuencia y la tasa de cambio	1	Tasas de ascenso en hidrograma (cambios positivos diarios de flujo)	Sequía (nivel de caída), inundaciones (niveles crecientes) o estrés desecación para los organismos de baja movilidad
	1	Tasas de descenso en hidrograma (cambios negativos diarios en el flujo)	
	1	Número de inversiones (número de interruptores entre el flujo positivo y negativo)	

Fuente: The Nature Conservancy (2011).

- *Caudales Muy Bajos (Extreme Low Flows)*: Durante los periodos secos los ríos pueden presentar niveles demasiado bajos que generan estrés en muchas especies, pero pueden proveer condiciones necesarias para otras especies. Las características químicas del agua, temperatura y oxígeno disuelto disponible pueden convertirse en factores altamente críticos para muchos organismos, hasta el punto de crear condiciones que les causa la muerte. Por otro lado, este tipo de caudales podrían concentrar presas acuáticas para algunas especies o podrían ser necesarias para secar áreas de planicies de inundación y así facilitar que ciertas especies de plantas se regeneren (Richter *et al.*, 1997).

- *Pulsos de Alto Caudal (High-Flow Pulses)*: Durante las tormentas de corto periodo, el río sube sus niveles. Estos incluyen un incremento de caudales que generalmente no producen inundaciones o no rebasan las banquetas de las riveras. Estos pulsos son importantes e interrumpen los periodos de Caudales Bajos, aún más, cuando una pequeña sequía puede generar condiciones de alta temperatura del agua o bajas concentraciones de oxígeno, típicas de periodos de caudales muy bajos, que generan alimentos orgánicos que navegan por el río. Además estos caudales generan acceso a áreas de alimentación de especies aguas abajo (Richter *et al.*, 1997).
- *Inundaciones Bajas (Small Floods)*: Durante las inundaciones, los peces y otros organismos móviles son capaces de migrar aguas arriba y aguas abajo e introducirse en las planicies de inundación y los humedales inundados buscando nuevos hábitat(s) tales como canales secundarios, remansos, aguas estancadas, ciénagas, atolladeros y áreas superficialmente anegadas. Estas áreas, usualmente inaccesibles, proveen de alimento a los ecosistemas, son áreas comúnmente más calientes que el canal principal y llenas de nutrientes e insectos que incentivan el crecimiento de la fauna acuática. Estos caudales incluyen todas las crecientes que sobre pasan el nivel de desborde de las banquetas pero no incluyen los eventos más extremos que son menos frecuentes (Ritcher, *et al.*, 1997).
- *Grandes Inundaciones (Large Floods)*: Este tipo de eventos reorganizan la estructura física y biológica del río y su llanura de inundación. Pueden arrastrar muchos tipos de microorganismos que en ocasiones pueden remover especies, pero en otras, crean condiciones competitivas para algunas especies. Pueden ser importantes para la creación de hábitat(s) clave como humedales en la planicie de inundación (Ritcher, *et al.*, 1997).

La determinación de cada componente ambiental está dada por condiciones estadísticas presentadas en la serie de registros. Los Pulsos de Alto Caudal son los que están ubicados por encima del percentil 75, los eventos que se encuentran por debajo del percentil 25, están clasificados como Caudales Bajos. Las Inundaciones Bajas y Grandes están asociadas a eventos con un periodo de retorno de 2 años y 10 años respectivamente. Los

eventos clasificados como Caudales muy Bajos corresponden a eventos que no sobrepasan el percentil 10 (Richter *et al.*, 1996).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localización

##### 3.1.1 Características generales de la zona.

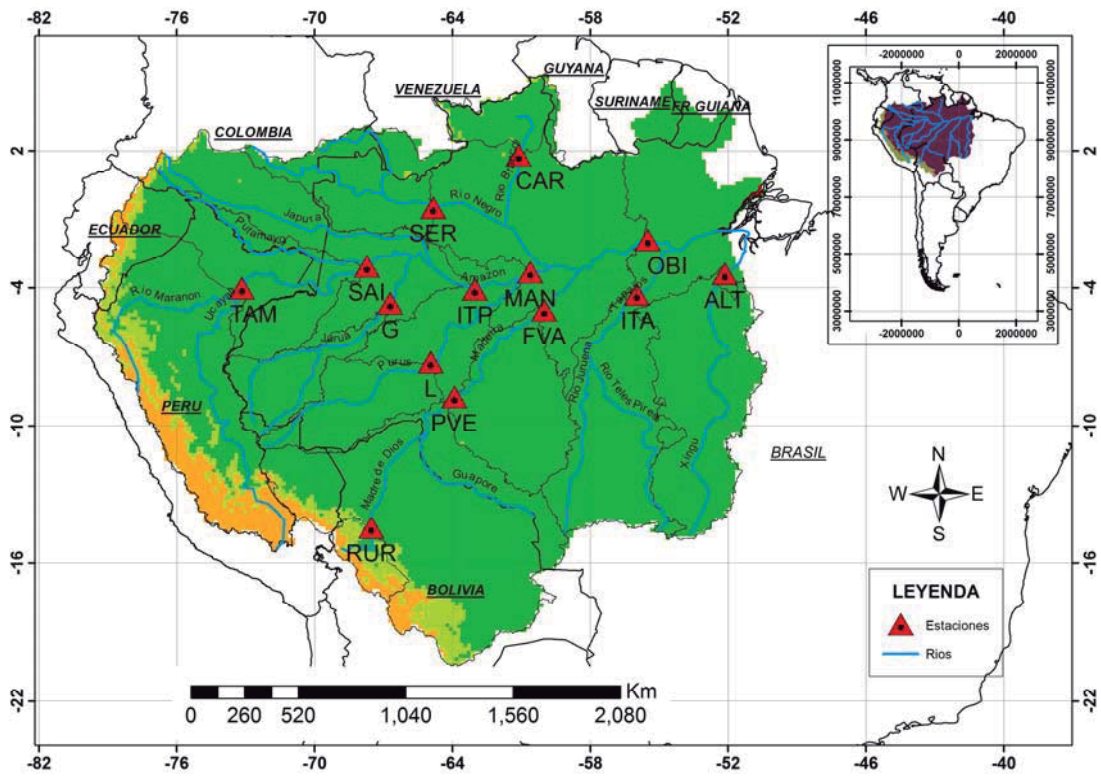
La Cuenca del Amazonas se caracteriza por una fuerte variabilidad espacial de las lluvias. Las regiones más lluviosas (más de 3 000 mm/año) se encuentran cerca del delta del Amazonas, expuestas a la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y en el noroeste de la cuenca (Amazonía colombiana, norte de la Amazonía ecuatoriana, noreste de Perú y el noroeste de Brasil) (Marengo, 2011). Las precipitaciones también son abundantes en la ubicación media de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ), establecida durante el verano austral desde el noroeste del Amazonas hasta el Atlántico Sur Subtropical.

Los regímenes de precipitaciones de la cuenca del Amazonas muestran una fuerte oposición entre el norte y el sur, con una estación lluviosa en junio, julio y agosto en el norte y diciembre, enero y febrero para el sur, debido a la alternancia del calentamiento de cada hemisferio y del sistema de la Monzón Sudamericano (Espinoza *et al.*, 2009a).

##### 3.1.2 Ubicación

La cuenca amazónica cubre cerca de 6,2 millones de km<sup>2</sup> y su caudal medio es de 209 000 m<sup>3</sup>/s, abarca terrenos de varios países de América del sur: Perú (16%), Bolivia (12%), Colombia (6%), Ecuador (2%), Venezuela, Guyana, Guiana Francesa y Surinam (1%) y Brasil (63%), este último con una extensión cercana a los 4 millones de km<sup>2</sup> (Figura 1). Así, la cuenca del Amazonas es la mayor cuenca hidrográfica en el mundo (Espinoza *et al.*, 2009a).





**Figura 1. Ubicación de la Cuenca Amazónica y las estaciones hidrométricas utilizadas para éste estudio.**

### 3.2 Datos utilizados

Teniendo en cuenta los criterios Harvey *et al.* (2012), la selección de las estaciones se realizó de la siguiente manera:

- Los sitios representan las condiciones casi naturales (modificación menor al 10% sobre las condiciones naturales).
- Ausencia de regulaciones o desviaciones significativas de aguas arriba de la estación de medición (menos de 5% del área regulada).
- Un mínimo de 20 años de datos hidrológicos.
- Registros de datos de alta precisión.

Por lo tanto, se seleccionó una serie de caudales diarios en el periodo 1974 – 2012 (39 años), información obtenida del observatorio ORE – HYBAM ([www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org)) (Cuadro 2). La ubicación de las estaciones seleccionadas se presenta en la figura 1.

Cuadro 2: Estaciones en la Cuenca Amazónica

ESTACIÓN	CÓDIGO	RIO	LATITUD (Grados)	LONGITUD (Grados)	AREA (Km <sup>2</sup> )	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Qmed (m <sup>3</sup> /s)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)
Tamshiyacu Santo	TAM	Amazonas	-4.00S	-73.16O	726,400	15,682	30,731	45,897
Antonio do Ica	SAI	Solimoes	-3.08S	-67.93O	1,158,600	28,710	55,437	77,514
Gaviao	G	Juruá	-4.84S	-66.85O	170,400	931	4,784	8,781
Lábrea	L	Purus	-7.25S	-64.80O	230,000	954	5604	11168
Serrinha	SER	Negro	-0.48S	-64.83O	291,100	7,219	16,527	27,334
Itapeua	ITP	Madeira	-4.06S	-63.03O	1,906,000	55,530	83,159	108,876
Manacapuru	MAN	Solimoes	-3.31S	-60.61O	2,242,400	58,221	102,618	138,864
Caracarai	CAR	Branco	1.82N	-61.12O	130,600	543	2,921	7,701
Rurrenabaque	RUR	Beni	-14.45S	-67.53O	116,200	522	1,888	4,854
Porto Velho	PVE	Madeira	-8.74S	-63.92O	954,400	4,525	18,875	36,924
Fazenda Vista Alegre	FVA	Madeira	-4.90S	-60.03O	1,293,600	5,639	28,305	56,785
Itaituba	ITA	Tapajos	-4.28S	-57.58O	461,100	3,712	12,079	24,115
Altamira	ALT	Xingu	-3.38S	-52.14O	469,100	1,041	8,154	21,134
Obidos	OBI	Amazonas	-1.95S	-55.51O	4,680,000	96,402	174,469	240,182

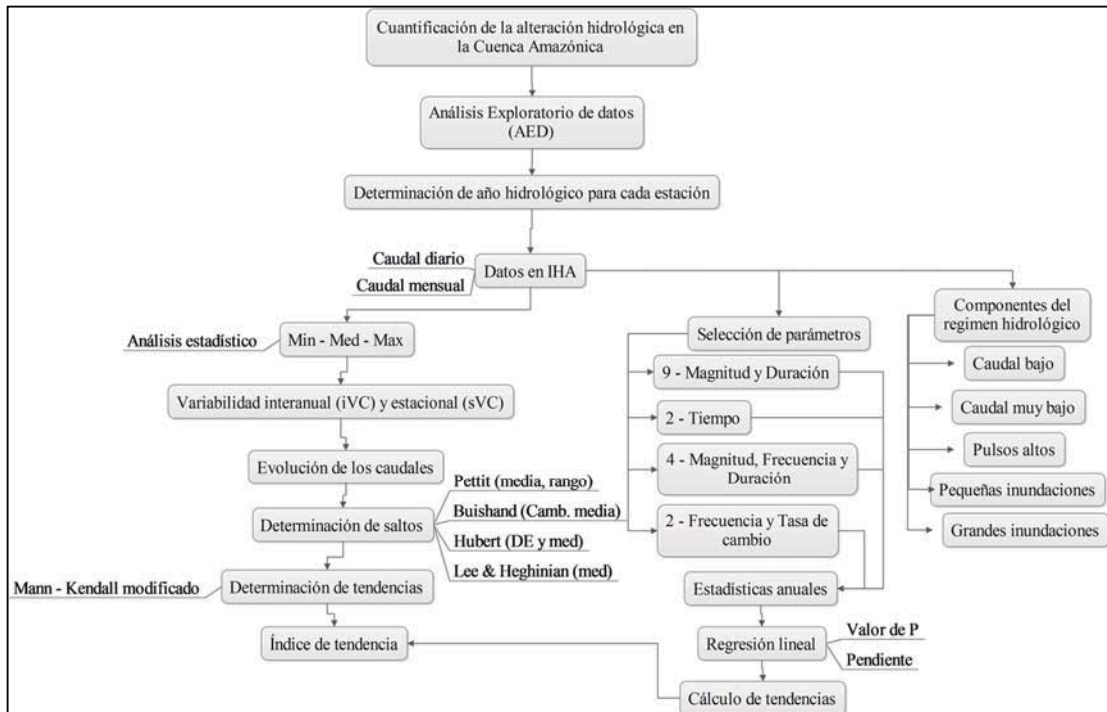
Fuente: Observatorio ORE-HYBAM.

### 3.3 Metodología

Se organizaron las series de datos diarios de caudales de todas las estaciones para cumplir con los objetivos siguiendo la estructura del trabajo de la Figura 2, este esquema consiste en realizar el análisis exploratorio de datos, caracterizar la variabilidad temporal, realizar el análisis hidrológico de los registros de caudales, determinar las tendencias y los cambios regionales y analizar las métricas de los Índices de Alteración Hidrológica (IHA) determinando los componentes del caudal ambiental para cada cuenca.

#### 3.3.1 Análisis exploratorio de datos (AED).

Se realizó un análisis general de los datos iniciales (errores e inconsistencias), mediante gráficas de cajas al 95% de confianza. Estos gráficos suministran información sobre los valores mínimos y máximos para cada estación, los cuartiles 1 y 3, la mediana, la existencia de valores atípicos (puntos fuera de la caja) y la simetría de la distribución.



**Figura 2. Metodología de investigación a fin de cuantificar la alteración hidrológica de la cuenca amazónica.**

### 3.3.2 Determinación del año hidrológico.

Se utilizó la serie hidrológica promediando los valores mensuales para todas las estaciones. El año hidrológico es el periodo de doce meses que comprende un ciclo hidrológico completo, partiendo del mes en que se observan los valores mínimos. Permite observar las variaciones en la descarga, el pico de máxima avenida, el flujo base y las variaciones estacionales de los caudales.

### 3.3.3. Cálculo de las variables hidrológicas (Datos en IHA).

Las asociaciones entre las variables hidrológicas y el área de influencia se determinaron utilizando el coeficiente de correlación de Mann – Kendall modificado (MKm) y la determinación de la mediana para cada variable.

Se analizaron 17 variables hidrológicas propuestas por Richter *et al.* (1996) en el software IHA (Índices de Alteración Hidrológica) de “The Nature Conservancy” versión 7 (The Nature Conservancy, 2011) para las 14 estaciones hidrométricas, éstas variables se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3: Variables IHA seleccionadas para análisis de la alteración hidrológica en la Cuenca Amazónica.

<b>Componentes del régimen hidrológico</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Parámetros Hidrológicos</b>
Magnitud y Duración	4	promedio anual 3, 7, 30 y 90 días mínimo
	4	promedio anual 3, 7, 30 y 90 días máximo
	1	El caudal base (mínimo 7 días flujo anual / media)
Tiempo	1	Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día
	1	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día
Magnitud, Frecuencia y Duración	1	Número de pulsos bajos / año (donde un umbral de pulso es la mediana de los 25%)
	1	Número de pulsos altos / año (donde un umbral de pulso es la mediana de los 75%)
	1	La mediana de duración de impulsos bajos en cada año
	1	La mediana de duración de pulsos altos en cada año
Frecuencia y Tasa de cambio	1	Tasas de ascenso en hidrograma (cambios positivos diarios de flujo)
	1	Tasas de descenso en hidrograma (cambios negativos diarios en el flujo)

Fuente: The Nature Conservancy, 2011.

Las variables permitieron describir los diferentes componentes del régimen hidrológico incluyendo magnitud (como la esorrentía mensual), duración (como la duración de los caudales extremos), el tiempo (como el momento de la máxima anual), frecuencia (como la frecuencia de los fenómenos extremos), y la tasa de cambio de los fenómenos hidrológicos (por ejemplo, tasas de ascenso y descenso en el hidrograma).

Las variables se calcularon utilizando la opción estadística “no paramétrica” del software IHA (percentil) debido a la forma natural sesgada de muchos registros de datos

hidrológicos, con la excepción de las variables medias móviles (1 día mínimo y 90 días máximo) porque se calcula como promedio.

El procedimiento para éste análisis fue el siguiente:

- Los datos se organizaron en unidades de metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s).
- Se creó un archivo independiente por cada estación hidrométrica.
- El año hidrológico fue definido para cuenca por el análisis general de la data, obtenido en el análisis exploratorio de datos.
- El análisis se realizó para determinar las tendencias a lo largo de un solo periodo (es posible analizar dos periodos si hubiese una cuenca regulada).
- El periodo que se determinó en todas las estaciones fue de 1974 – 2012, teniendo en cuenta que para el cálculo del año hidrológico completo de algunas estaciones se utilizaron datos del año 1973 y 2013.
- El programa permite realizar un análisis de estadísticas paramétricas y no paramétricas, en éste caso se seleccionó el segundo debido a que las estaciones seleccionadas son de naturaleza sesgada (no normal).
- También se seleccionó para el análisis, los componentes del caudal, para determinar los flujos más altos, más bajos, inundaciones, entre otros.

De los resultados que se obtienen del software IHA, se analizó lo siguiente:

- A partir de los resultados obtenidos en cuadros y gráficas, se seleccionaron los datos anuales generados para cada estación hidrométrica.
- Los cálculos se realizaron para las 33 variables y se seleccionaron las 17 anteriormente dichas (Cuadro 3).
- El análisis de regresión lineal se realizó para todos los índices (pendiente, p-valor, r<sup>2</sup>, entre otros).
- Las variables del régimen hidrológico, también se calcularon y permitieron identificar los eventos extremos en todas las estaciones.
- Se seleccionaron las estadísticas anuales y mensuales para el periodo evaluado (39 años).

- Estadísticas del periodo de análisis (medianas y coeficientes de dispersión) de los parámetros del grupo 2 (índice de caudal base, máximos y mínimos de 3, 7, 30 y 90 días), grupo 3 (fecha juliana de caudal máximo y mínimo), grupo 4 (conteo y duración de pulsos altos y bajos) y grupo 5 (tasas de subida y bajada).

#### **3.3.4. Cálculo de caudal mínimo, medio y máximo.**

Para el cálculo de las series de caudal mínimo, medio y máximo se tomaron los resultados obtenidos del software IHA, de donde se extrajeron los valores mínimos, medios y máximos para cada mes en los 39 años de la serie hidrológica.

#### **3.3.5 Cálculo de la variabilidad interanual (iVC) y estacional (sVC).**

El coeficiente de variabilidad interanual (iVC) es la relación entre la desviación estándar y el promedio de los valores de los datos anuales, se calculan para cada serie hidrológica (iVC-Qmed, iVC-Qmax e iVC-Qmin, respectivamente). El coeficiente de variación estacional (sVC) es la relación entre la desviación estándar de los valores medios mensuales (1974-2012) y el promedio de los valores medios mensuales. La amplitud estacional se calcula a partir de la relación entre la diferencia de pendiente de Qmax y Qmin y la diferencia del promedio de Qmax y Qmin, (Espinoza *et al.*, 2009).

#### **3.3.6 Determinación de cambios y rupturas en las series de caudales.**

La determinación de los cambios y rupturas en las series de caudales se evaluaron con diferentes métodos estadísticos: El Bayesiano de Buishand (Buishand, 1982), que es válido aún para distribuciones de variables diferentes a la distribución normal, se basa en cambios en la media de las series. El método de Pettitt (Pettitt, 1979) es un test no paramétrico basado en los cambios en la media y en el rango de series; se considera uno de los test más robustos para la identificación de cambios en series cronológicas (Zbigniew, 2004). El test de Lee y Heghinian (Lee & Heghinian, 1977) utiliza el promedio como indicador del cambio debido a una distribución *a posteriori* de Student. Finalmente, la segmentación de Hubert (Hubert *et al.*, 1989) que verifica si la diferencia en la desviación estándar y el promedio entre los periodos es significativa, y es apropiado para la búsqueda de múltiples

cambios en las series. Se identificará una ruptura en la serie cuando sea detectado por los cuatro test.

### 3.3.7 Análisis de tendencias.

Se utilizó la prueba no – paramétrica basada en el rango de “T” de Mann- Kendall modificado (MKm), ésta permite reducir al mínimo los problemas asociados con la diferenciación entre la variabilidad natural y tendencias de los datos (Gao *et al.*, 2012). Éste test ha sido utilizado en otras investigaciones de estudios similares (Brabets & Walvoord, 2009; Sharif *et al.*, 2010; Tian, *et al.*, 2011).

La autocorrelación presente en algunas de estas series afecta los resultados de la prueba, causando problemas en la detección y evaluación del nivel de significancia. La presencia de autocorrelación positiva tiende a aumentar la probabilidad de detección de tendencia cuando en efecto ésta no existe, mientras que la autocorrelación negativa tiende a disminuirla (Yue *et al.*, 2002). Para corregir este efecto, Yue *et al.*, (2002) presentan una técnica de pre-blanqueo (trend-free prewhitening, TFPW) que remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie. Esta última técnica fue aplicada a las series de caudal mensual debido a que pueden presentarse autocorrelaciones seriales.

Para la medida de tendencia y la evaluación de las variables seleccionadas de la metodología IHA, se utilizó un índice que se calcula de acuerdo a la ecuación (1) propuesto en Espinoza *et al.* (2009a). Donde  $b$  es la pendiente de la tendencia lineal y  $X$  es el valor medio de la serie. El índice mide el incremento o disminución de la descarga en porcentaje, considerando el valor medio de cada serie cronológica ( $Q_{min}$ ,  $Q_{med}$ ,  $Q_{max}$ ).

$$I = \left( \frac{b}{X} \right) * 100 \quad (1)$$

### 3.3.8 Componentes del caudal.

Utilizando el análisis IHA, se calcularon los 5 tipos de componentes del análisis de los caudales: caudales bajos, caudales muy bajos, pulsos de alto caudal, inundaciones bajas y grandes inundaciones (Richter *et al.*, 1997).

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Caracterización geográfica de las estaciones utilizadas.**

La información obtenida del Observatorio HYBAM, se analizó a partir de datos diarios de caudales con un periodo común desde 1 de enero de 1974 hasta el 31 de diciembre de 2012. En la Figura 1, se observa que las estaciones ITA (Río Tapajós), ALT (Río Xingu), FVA (Río arriba del Madeira) y PVE (Río abajo del Madeira) hacen parte del sur de la cuenca amazónica, G (Río Juruá) y L (Río Purus), se ubican en el Amazonas brasileño, TAM en el Amazonas peruano (convergen los ríos Ucayali, Marañón y drena las regiones andinas y tropicales ecuatorianas), SAI (Río arriba del Solimões) que drena aguas de los ríos Putumayo y Caquetá (Colombia) y de regiones del norte de Ecuador, CAR (Río Branco) en el norte de la cuenca, drenando aguas del Sur de Venezuela, ITP (sobre el curso principal del Amazonas) que drena principalmente aguas del sur, MAN (Río Solimões), SER que drena aguas del río Negro, RUR (Río Beni) ubicada en el sur de la cuenca y drena las aguas del norte de Bolivia, finalmente OBI (sobre el curso principal del Amazonas) en donde convergen las aguas de las estaciones anteriormente nombradas.

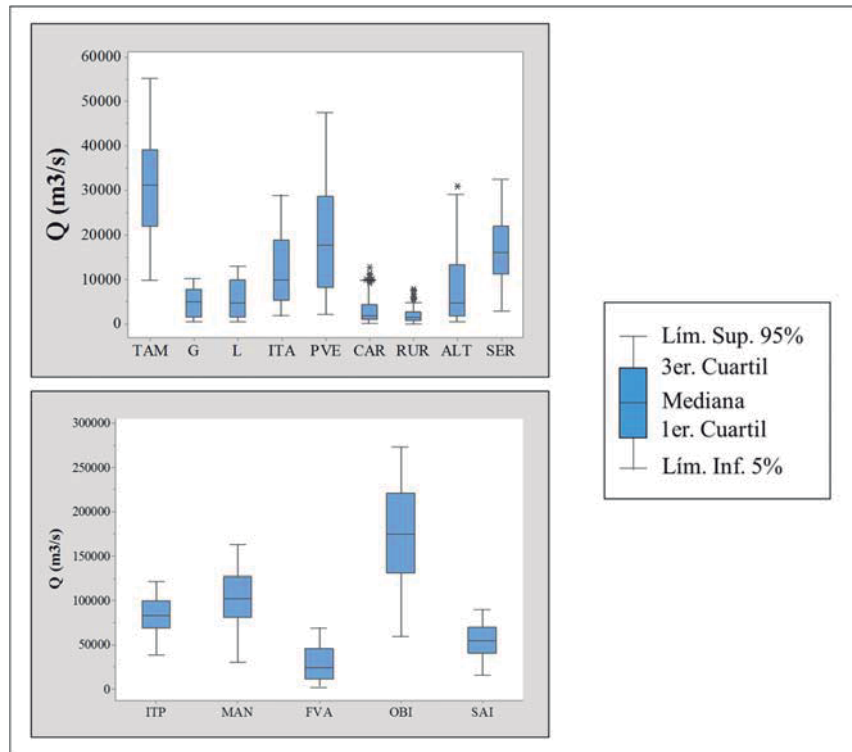
### **4.2 Análisis exploratorio de datos (AED).**

#### **4.2.1 Diagramas de caja.**

En ésta etapa se realizaron los gráficos de caja, para detectar los datos atípicos (outliers) de manera cualitativa. En la Figura 3, se muestra la distribución de los datos para cada estación, donde la mayoría de los datos analizados están dentro del intervalo de confianza del 90%, con excepción de las estaciones ALT, CAR y RUR, que presentan posibles datos atípicos, debido a que superan el rango intercuartil.



En la Figura 3, se puede observar que las estaciones no tienen una distribución simétrica con respecto a la mediana, lo que sugiere una distribución no normal; a partir del análisis anterior, las estaciones ALT, CAR y RUR presentan valores por fuera de la mediana, pero no son considerados datos atípicos debido a la variabilidad que se presenta en éstas cuencas (extremo oriental, norte y sur de la Cuenca Amazónica).



**Figura 3. Gráficos de cajas para detección de datos atípicos. A. Estaciones con caudal menor a 60 000 m<sup>3</sup>/s (occidente de la cuenca). B. Estaciones con caudal mayor a 50 000 m<sup>3</sup>/s (oriente de la cuenca)**

#### 4.3. Caracterización de los caudales de la Cuenca Amazónica

A partir de la información obtenida, se determinó el año hidrológico para cada estación y se presentan en las Figuras 4 y 5; la Cuenca Amazónica presenta diversos regímenes hidrológicos, las estaciones ALT, ITP, MAN, FVA, ITA, SAI, G y L (Figura 4) empiezan el año hidrológico en el mes de octubre terminando en septiembre, las estaciones TAM y PVE (Figura 5.D) empiezan en septiembre y terminan en agosto, SER y CAR (Figura 5.A)

inicia en febrero y termina en enero, RUR (Figura 5.C) empieza en agosto y termina en julio y finalmente OBI (Figura 5.B) que inicia en noviembre y termina en el mes octubre, ésta información se utilizará como insumo para el análisis de las métricas IHA.

En la figura 4.A, se observa que las estaciones ITP y MAN presentan un máximo en junio a agosto y mínimos septiembre a octubre, SAI y G (Figura 4.B) presenta un máximo en los meses de abril a junio y mínimo de agosto a octubre, ALT e ITA con caudal máximo entre marzo y mayo (Figura 4.C), FVA y L con un máximo en marzo y mayo (4.D). SER y CAR (Figura 5.A) muestran máximos en mayo a julio, drenan las aguas del norte de la cuenca y presentan un incremento en los meses de febrero a mayo y una disminución en los meses de septiembre a enero, TAM y PVE (Figura 5.D) presentan un máximo en los meses de marzo a mayo y mínimo de julio a octubre, RUR hace parte de las cuencas andinas en el sur, con máximos entre enero y marzo (Figura 5.C) y finalmente OBI que tiene un máximo en los meses de abril a agosto y mínimo entre octubre y enero (Figura 5.B).

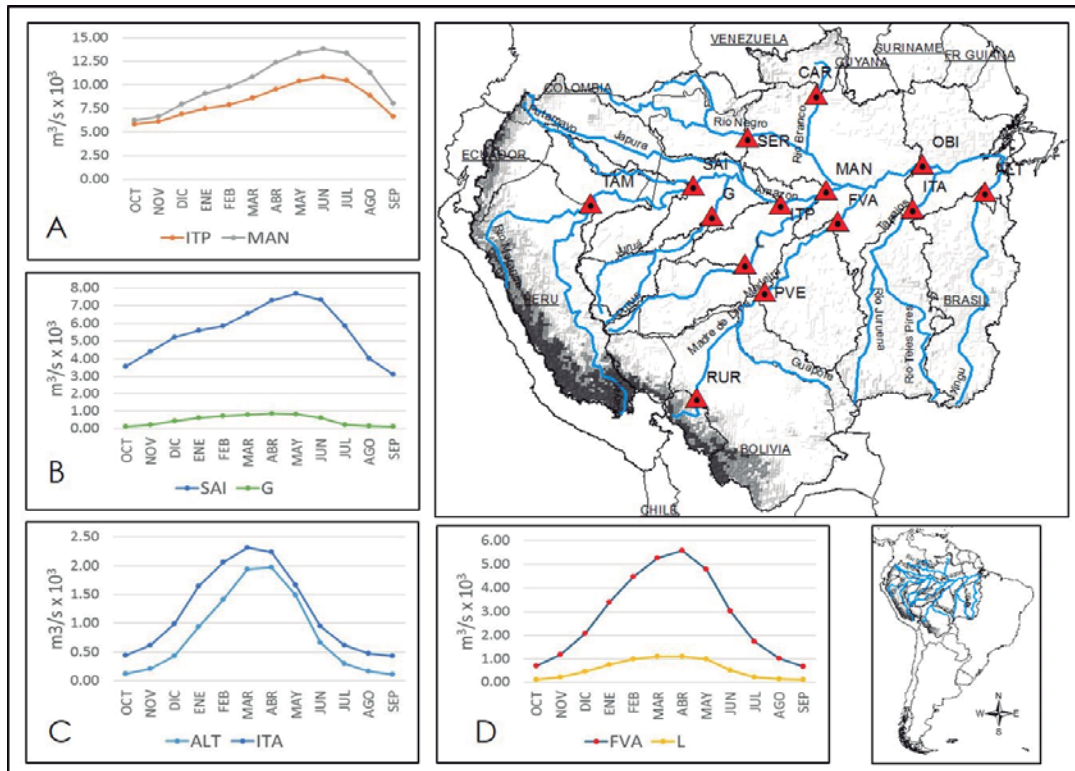
#### **4.4 Análisis de la variabilidad temporal de caudales en la Cuenca Amazónica.**

Para la elaboración de éste análisis, se tomó en cuenta los parámetros hidrológicos que caracterizan el régimen de caudales a través de las avenidas, estiaje y la magnitud de cambios que se producen dentro del régimen anual, éstas variables se obtuvieron a partir del registro histórico diario de caudales obtenidos de las 14 estaciones hidrométricas (Cuadro 2), seleccionando 39 años (1974 – 2012) de registro de ríos sin regulación.

Con los datos de caudales diarios, se calcularon todas variables que genera el programa IHA (Cuadro 1) para caracterizar el régimen, además de su variación natural en el tiempo, que reflejan las oscilaciones en los regímenes en los diferentes años hidrológicos.

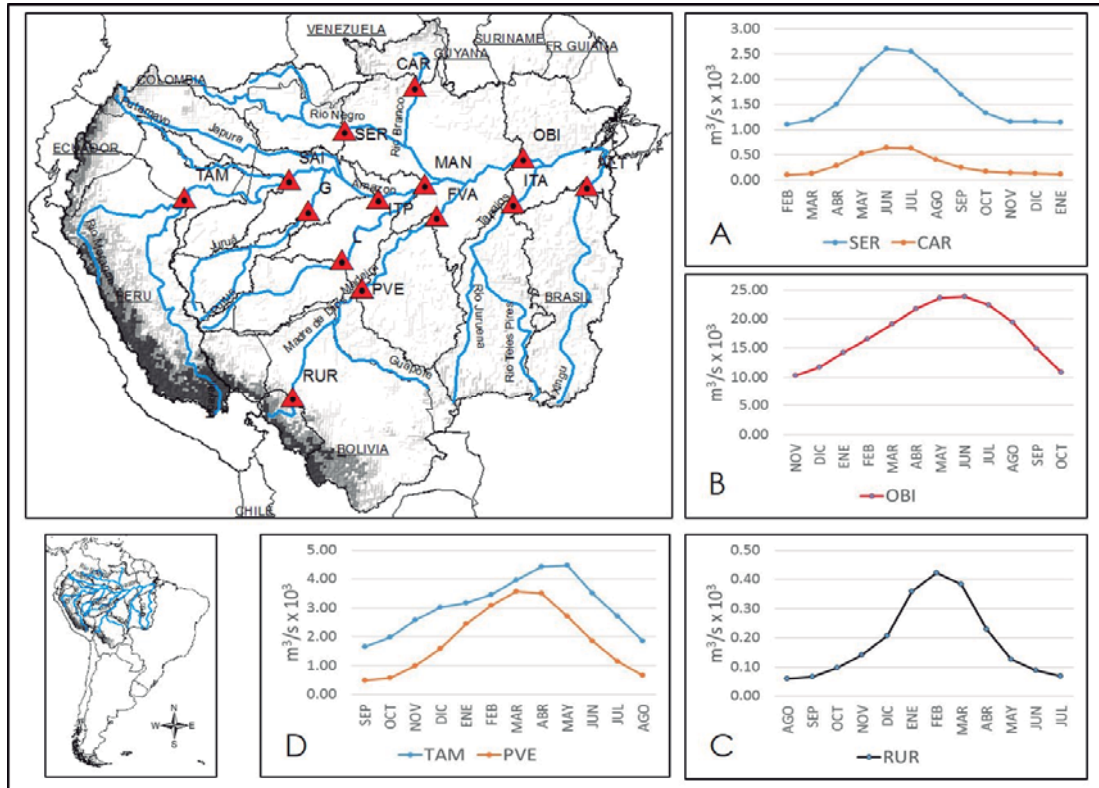
##### **4.4.1 Caracterización del régimen de caudales.**

Tomando como insumo la información obtenida del análisis con el programa IHA, se organizó la información en cuadros que permitieron una mejor referenciación de la información (Cuadro 2), los tres parámetros hidrológicos que caracterizan el régimen de caudales a través de las avenidas, momentos de estiaje y la magnitud de cambios que se produce dentro del régimen anual, se describen a continuación:



**Figura 4. Año hidrológico para las estaciones evaluadas. A. ITP – MAN; B. SAI – G; C. ALT – ITA; D. FVA – L.**

- *Caudal Mínimo ( $Q_{min}$ ):* Se utilizó la data mensual de información, se seleccionó para cada año el valor mensual más bajo, de acuerdo al año hidrológico establecido para cada cuenca.
- *Caudal Medio ( $Q_{med}$ ):* Se utilizó la data mensual de información, se seleccionó para cada año el valor mensual promedio, de acuerdo al año hidrológico establecido para cada cuenca.
- *Caudal Máximo ( $Q_{max}$ ):* Se utilizó la data mensual de información, se seleccionó para cada año el valor mensual máximo, de acuerdo al año hidrológico establecido para cada cuenca.



**Figura 5. Año hidrológico para las estaciones evaluadas. A. SER – CAR; B. OBI; C. RUR; D. TAM - PVE.**

Los resultados obtenidos en el Cuadro 2, fueron comparados con los obtenidos en Espinoza *et al.* (2009a), análisis realizado para el periodo 1974 – 2004, esta comparación se efectuó sin las estaciones ITP y RUR, debido a que no se analizaron para ese periodo, en general, se encontró que hay un aumento en  $Q_{min}$ , a excepción de L que presentó una disminución del -54.6%, aumento en el  $Q_{med}$  a diferencia de TAM, SAI y G que tienen una disminución de -3.06%, -0.65% y -2.37% respectivamente y una disminución de  $Q_{max}$  en todas las estaciones, a excepción de OBI y L que tienen un incremento de +0.08% y +0.61% respectivamente, en el Cuadro 4 se presentan los resultados obtenidos. Para determinar la significancia se establecieron umbrales utilizando el promedio más o menos la desviación estándar (límites superior e inferior).

#### 4.4.2 Variabilidad estacional e interanual

Con la serie de caudales para todas las estaciones, se calculó el coeficiente de la variabilidad interanual (iVC) que es la relación entre la desviación estándar y el promedio

de los valores anuales, el coeficiente de variación estacional (sVC) se calculó como una relación entre la desviación estándar de los valores medios mensuales y el promedio de éstos, así como lo mencionan en Espinoza *et al.*, (2009a) (Cuadro 5).

Cuadro 4: Resultados obtenidos en la comparación entre los periodos 1974 – 2004 (Espinoza *et al.*, 2009a) y 1974 – 2012 para Qmin, Qmed y Qmax. Los cambios significativos mayores a 5% se presentan con color azul (positivos) y los menores a -5% en color rojo (negativos)

Estación	1974 - 2004				2005 - 2012				Porcentaje de cambio		
	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Qmed (m <sup>3</sup> /s)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Prom (m <sup>3</sup> /s)	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Qmed (m <sup>3</sup> /s)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Prom (m <sup>3</sup> /s)	Qmin (%)	Qmed (%)	Qmax (%)
CAR	500	2900	9600	4791	780	3801	9098	4525	56	31	-5
SER	5900	16500	28500	7050	7872	17175	27160	7219	33	4	-5
TAM	16400	31700	46700	1059	12778	29016	44666	1041	-22	-8	-4
SAI	27100	55800	77550	16431	25110	55681	80970	15682	-7	0	4
ITP					47596	80084	108250	543			
MAN	58800	81000	139000	531	48080	102762	143275	522	-18	27	3
OBI	100200	150500	240000	984	84021	180827	255738	954	-16	20	7
RUR					486	1835	4940	5639			
G	900	4900	9100	57578	724	4896	8600	55530	-20	0	-6
L	2100	5500	11100	60838	835	5523	11415	58221	-60	0	3
ITA	3000	11700	24500	29639	3612	12143	24256	28710	20	4	-1
ALT	1000	7800	22300	985	969	8404	22430	931	-3	8	1
PVE	3900	18300	37900	99596	3496	17720	36720	96402	-10	-3	-3
FVA	5100	27700	58300	3737	5039	26375	53926	3712	-1	-5	-8

Fuente: Elaboración propia.

Se observa una alta variabilidad interanual en el Qmin de la estación CAR (0.47), que presenta una disminución de los caudales entre los meses de diciembre y marzo (Figura 5.A), el coeficiente de variabilidad estacional (sVC) es medio para las estaciones del sur (PVE, G, L, FVA) que está alrededor de 0.65, las estaciones CAR, RUR y ALT (extremos norte, sur y occidente respectivamente), presentan una alta variabilidad estacional, cercano a 0.86, el resto de estaciones presentan un ciclo anual menos marcado que en las regiones tropicales, los resultados obtenidos son similares a los encontrados en Espinoza *et al.*, (2009a).

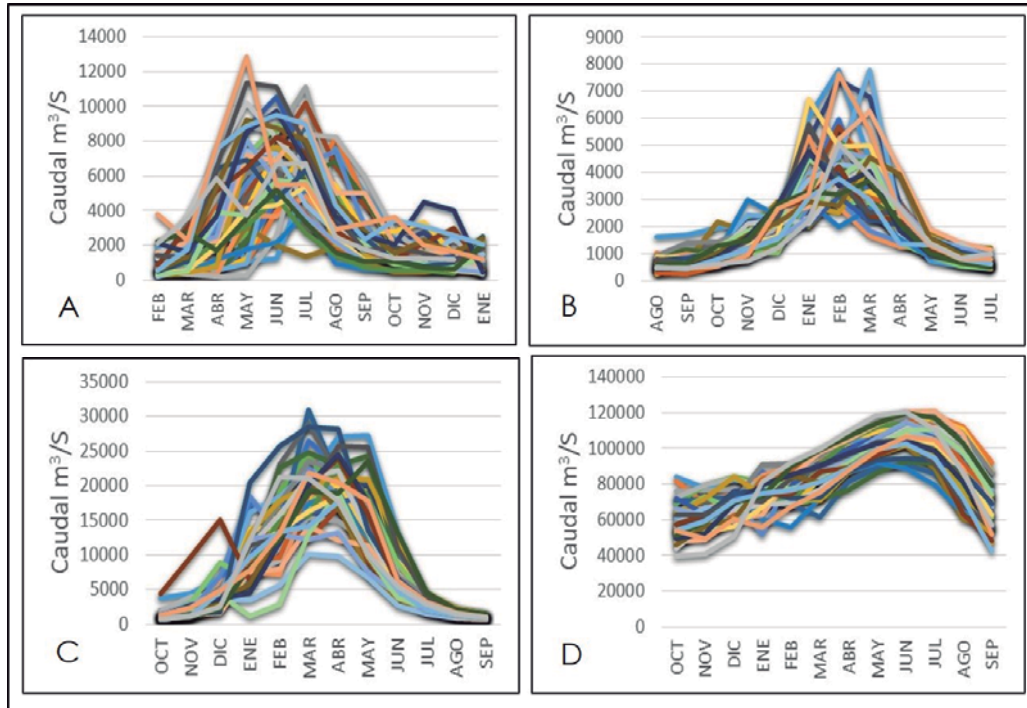
Cuadro 5: Cálculo de los coeficientes de variabilidad interanual (iVC) y estacional (sVC) de Qmin, Qmed y Qmax.

CÓDIGO	IVC Qmin	IVC Qmed	IVC Qmax	SVC
TAM	0.24	0.10	0.11	0.35
SAI	0.23	0.07	0.08	0.31
G	0.25	0.13	0.08	0.64
L	0.17	0.08	0.04	0.71
SER	0.28	0.09	0.09	0.41
ITP	0.15	0.07	0.07	0.23
MAN	0.22	0.08	0.08	0.28
CAR	0.47	0.29	0.28	0.88
RUR	0.22	0.16	0.27	0.78
PVE	0.29	0.13	0.12	0.62
FVA	0.26	0.13	0.10	0.66
ITA	0.22	0.11	0.11	0.62
ALT	0.19	0.20	0.20	0.92
OBI	0.17	0.09	0.09	0.30

Fuente: Elaboración propia.

La figura 6 presenta los hidrogramas de las estaciones CAR, RUR Y ALT que son las que muestran una mayor variabilidad estacional (Figuras 6.A, 6.B y 6.C respectivamente), las estaciones como ITP (Figura 6.D) muestran un ciclo anual menos marcado que en las regiones tropicales, como el caso de CAR y ALT, en la estación de OBI que es la última estación antes de la descarga hacia el océano atlántico, se presenta un sVC de 0.30, considerado como bajo que se debe a la influencia de las estaciones noroccidentales, como se afirma en Espinoza *et al.* (2009a), siendo acordes a la estacionalidad de las precipitaciones (Marengo *et al.*, 2008; Espinoza *et al.*, 2009a; Espinoza *et al.*, 2009b; Marengo *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2013; Satyamurty *et al.*, 2013).





**Figura 6. Hidrogramas de las estaciones con mayor variabilidad estacional A.CAR; B. ALT; C. RUR y D. ITP, estación que presenta una baja variabilidad estacional.**

La variabilidad interanual (iVC) en el Qmin presenta una baja variabilidad, cercano a 0.23, en la estación CAR (extremo norte de la cuenca) presenta una variabilidad media (0.47), en el Qmed, se presenta una variabilidad de 0.10 y en las estaciones de los extremos (ALT, CAR y RUR), se presenta una variabilidad de 0.22, con respecto al Qmax, en las estaciones centrales (ITP, MAN, PVE, FVA, ITA) se presenta una iVC cercano a 0.10, similar a las estaciones del norte (TAM, SER, SAI, G, L y OBI), las estaciones de los extremos norte y sur (CAR y RUR), presentan un iVC de 0.28 y 0.27 respectivamente. De acuerdo a la literatura, CAR, ALT y RUR están directamente influenciadas o son sensibles al ENSO y a la variabilidad del atlántico por su cercanía a éste (Aalto *et al.* 2003; Ronchail *et al.* 2005).

En la Figura 7, se muestra la relación existente entre la variabilidad interanual y estacional del Qmed, en la parte inferior izquierda de la gráfica se encuentran las estaciones ITP, SAI, MAN, OBI, TAM y SER, que presentan una débil estacionalidad y baja variabilidad estacional, hacia el centro de la gráfica, se encuentran las estaciones ITA, FVA, PVE, L y

G, que tienen una variabilidad y estacionalidad media, las Estaciones RUR y ALT (sur y sur-oriente respectivamente) muestran una estacionalidad media y variabilidad alta, CAR en el extremo norte de la Cuenca Amazónica, presenta una estacionalidad y variabilidad alta, así como se observa también en la gráfica 6.A, 6.B y 6.C.

El  $r^2$ , muestra que la variabilidad estacional explica en un 62.7% la variabilidad interanual del Qmed utilizando todas las estaciones, pero si se omite la estación CAR que presenta alta variabilidad estacional e interanual, la variabilidad estacional podría explicar la interanual en un 69.37% (Figura 7).

#### **4.5 Evolución de los caudales para periodo 1974 – 2012.**

Para el análisis de la evolución del caudal, se utilizaron los valores anuales de Qmin, Qmed y Qmax de todas las estaciones, con lo estadísticos de promedio, desviación estándar, para determinar la tendencia lineal, las gráficas se generaron normalizando la data y asignando coeficientes de -3 para Qmin, 0 para Qmed y 3 para Qmax, éste análisis se realizó utilizando el año hidrológico (se muestra en las Figuras 4 y 5). En la Figura 8, se presentan la serie de caudales de las estaciones del sur y en la Figura 9 las del centro y norte.

La determinación de los cambios en las series, se realizó utilizando una tendencia lineal, ésta se analizó en tres periodos: 1974 – 1989, 1990 – 1999 y 2000 – 2012, comparándolos con la serie completa (1974 – 2012) encontrando que para Qmin, se presentó una disminución de los caudales en todos los periodos, a diferencia de SER que aumentó, en el Qmed se observa una tendencia a la disminución en el primer periodo, en general, aumentaron para el segundo periodo (disminución para ALT, PVE, ITA y L) e igualmente para el tercer periodo (disminución para ITP, MAN, RUR y L). En el Qmax se muestra una disminución del caudal entre 1974 y 1989, pero entre 1990 y 2012, se presentó aumento en los caudales de todas las estaciones, exceptuando SER y FVA que presentó disminución en el último periodo (Cuadro 6).



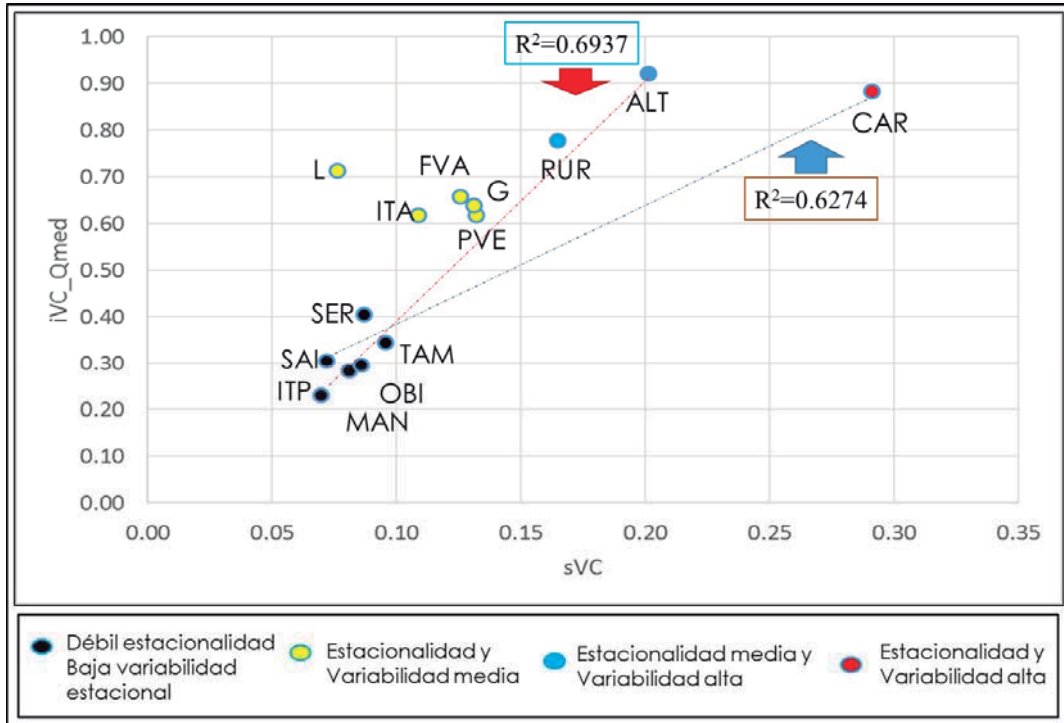


Figura 7. Relación entre el coeficiente variabilidad interanual del Qmed (iVC\_Qmed) y el coeficiente de variabilidad estacional (sVC) en las 14 estaciones analizadas.

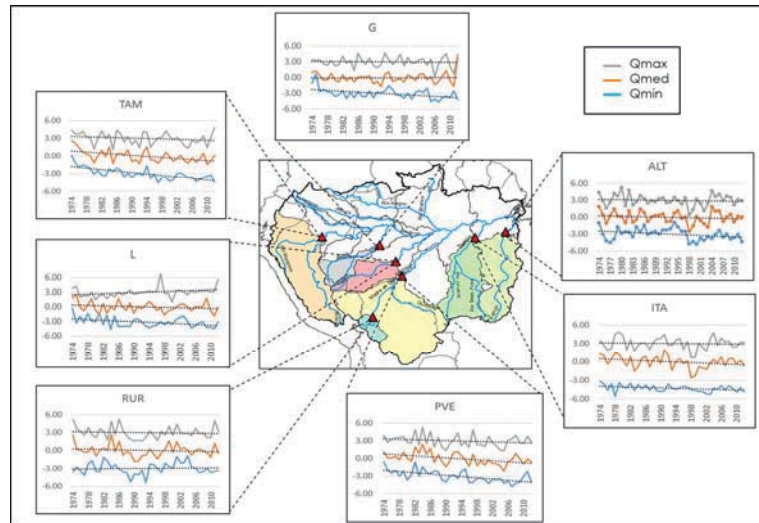
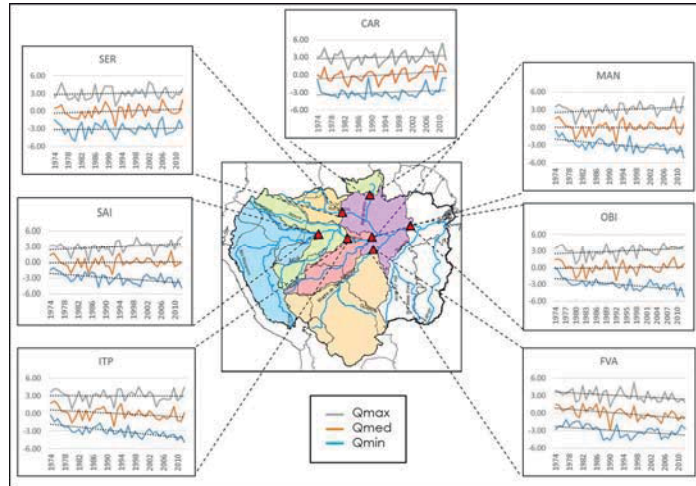


Figura 8. Evolución de los caudales de Qmin, Qmed y Qmax (1974 – 2012) en las subcuencas del sur, los valores fueron estandarizados para su representación Qmin - 3, Qmed 0 y Qmax 3).



**Figura 9. Evolución de los caudales de Qmin, Qmed y Qmax (1974 – 2012) en las subcuencas del centro y norte, los valores fueron estandarizados para su representación Qmin -3, Qmed 0 y Qmax 3**

**Cuadro 6: Comparación del índice de tendencia lineal en las series para los periodos 1974 – 1989, 1990 - 2000, 2001 – 2012 y 1974 - 2012. En rojo tendencia negativa y en azul positiva.**

AÑOS	TAM	SAI	G	L	SER	ITP	MAN	CAR	RUR	PVE	FVA	ITA	ALT	OBI
<b>QMIN</b>														
74-89	-0.14	-0.09	-0.15	-0.15	0.02	-0.10	-0.11	-0.02	-0.04	-0.06	-0.11	-0.03	0.04	-0.13
90-99	-0.09	-0.10	-0.03	-0.07	0.06	-0.06	-0.05	-0.01	0.18	-0.03	0.01	0.01	-0.20	-0.12
00-12	-0.01	-0.07	-0.06	-0.11	0.01	-0.08	-0.08	0.18	-0.17	0.03	0.02	0.04	0.04	-0.12
74-12	-0.06	-0.05	-0.04	-0.04	0.01	-0.06	-0.05	0.02	0.00	-0.06	-0.04	-0.02	-0.03	-0.05
<b>QMED</b>														
74-89	-0.09	-0.05	-0.04	-0.07	0.01	-0.06	-0.08	-0.02	-0.04	0.00	-0.03	-0.05	-0.04	-0.06
90-99	0.07	0.16	0.10	-0.05	0.08	0.04	0.09	0.07	0.27	-0.04	0.07	-0.30	-0.20	0.04
00-12	0.00	0.00	0.08	-0.03	0.04	-0.02	-0.01	0.12	-0.05	0.07	0.01	0.07	0.03	0.06
74-12	-0.05	0.00	0.00	-0.02	0.02	-0.03	0.00	0.04	-0.01	-0.04	-0.05	-0.03	-0.01	0.01
<b>QMAX</b>														
74-89	-0.05	-0.04	0.01	-0.02	0.01	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06	-0.03	-0.01	-0.01	-0.04	-0.05
90-99	0.15	0.18	0.12	0.13	-0.01	0.17	0.17	0.07	0.21	0.05	0.10	-0.32	-0.22	0.13
00-12	0.05	0.08	0.00	0.15	-0.06	0.03	0.07	0.07	0.01	0.07	-0.03	0.01	0.04	0.07
74-12	-0.02	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	0.02

Fuente: elaboración propia.

#### **4.6 Determinación de rupturas en las series.**

Fue necesario determinar si las series de caudales presentaban rupturas, para lo que se aplicaron los cuatro test que se utilizan en las series hidrológicas: Pettitt que es un test no paramétrico, Buishand que es válido para distribuciones de variables diferentes a la distribución normal, Lee y Heghinian que utiliza el promedio como indicador del cambio gracias a una distribución *a posteriori* de Student y finalmente, la segmentación de Hubert que verifica si la diferencia en la desviación estándar y el promedio entre los periodos es significativa. En el Cuadro 7 y Figura 10, se presentan los resultados obtenidos, resaltando con color las estaciones en las que fueron significativos los quiebres con los cuatro test, igualmente, se presentan los años de cambio en cada ruptura.

Los cambios encontrados con los cuatro test en ALT, PVE y SAI para  $Q_{min}$  y FVA para  $Q_{med}$ , se presentan en el Cuadro 8, donde se puede observar la diferencia entre las dos series (antes y después del cambio), igualmente se presenta el coeficiente de variación y la tendencia en porcentaje (%).

En la estación ALT ( $Q_{min}$ ), se presentó una disminución de -21%, pero se encontró que en el primer periodo hay una tendencia positiva de 0.85% y en el segundo periodo (a partir de 1997) la tendencia aumenta en 1.61%, con coeficientes de variación de 0.16 y 0.15 respectivamente, para observar mejor ésta serie, se desagregó en la Figura 12, donde podemos ver las dos series, ésta tendencia se debe a que en la estación ALT a partir del año 1998 se presentó una disminución considerable del caudal (de  $1141\text{m}^3/\text{s}$  en 1997 a  $695\text{m}^3/\text{s}$  en 1998) hasta el año 2005 y a partir de ese año, el  $Q_{min}$  empezó a incrementarse nuevamente, con un promedio de  $896\text{m}^3/\text{s}$ .

#### **4.7 Tendencias en las series**

Dos variables fueron utilizadas para estimar si existe una tendencia positiva o negativa en las series caudales, la regresión lineal se ajusta a una línea de tendencia de la serie, y la pendiente describe si la tendencia es fuerte o no. Para éste análisis se utilizó la Fórmula 1, propuesta en Espinoza *et al.*, 2009, en la que se relaciona la pendiente (b) de la recta y el caudal promedio en un periodo dado (X). Los resultados obtenidos de la tendencia en porcentaje, se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 7: Test de rupturas para las estaciones evaluadas, B: Buishand, P: Pettitt, P/AC: Año de cambio para P, L&H: Lee y Heghinian, L&H/AC: Año de Cambio para L&H, H: Segmentación de Hubert, H/AC: Año de cambio para H. En amarillo, las estaciones que presentaron rupturas en los cuatro test.

ESTACIÓN	Qmin						Qmed						Qmax					
	B	P	P/AC	L&H	L&H/AC	H H/AC	B	P	P/AC	L&H	L&H/AC	H H/AC	B	P	P/AC	L&H	L&H/AC	H H/AC
TAM	S	S	1994	S	1979	S 1978	S	S	1989	S	1976	S 1976	NS	NS		S	2011	NS
SAI	S	S	1987	S	1987	S 1987	NS	NS		S	1976	NS	S	S	1992	S	2010	S 1992
G	S	NS		S	1975	S 1975	NS	NS		S	2011	S 2011	NS	NS		S	2011	NS
L	S	S	1984	S	1975	S 1975	NS	NS		S	1975	S 1975	S	S	1988	S	2011	S 1996
SER	NS	NS		S	1975	NS	NS	NS		S	2011	NS	NS	NS		S	2011	NS
ITP	S	S	1991	S	1977	S 1976	S	NS		S	1976	S 1976	NS	NS		S	2011	NS
MAN	S	S	1991	S	1979	S 1976	NS	NS		S	1976	S 1976	S	NS		S	2011	NS
CAR	S	NS		S	2010	S 2010	S	S	2003	S	2004	S 2004	NS	NS		S	2005	NS
RUR	NS	NS		S	1993	NS	NS	NS		S	1974	S 1975	NS	NS		NS		NS
PVE	S	S	1995	S	1995	S 1995	S	S	1994	S	1986	S 1986	NS	NS		S	1986	NS
FVA	S	S	1987	S	1986	S 1986	S	S	1989	S	1989	S 1989	S	S	1997	S	1997	NS
ITA	S	NS		S	1975	NS	S	S	1992	S	1992	S 1997	NS	NS		NS		NS
ALT	S	S	1997	S	1997	S 1997	NS	NS		NS		NS	NS	NS		S	1974	NS
OBI	S	S	1991	S	1977	S 1977	NS	NS		S	1976	S 1976	S	NS		S	2005	NS

Fuente: Elaboración propia.

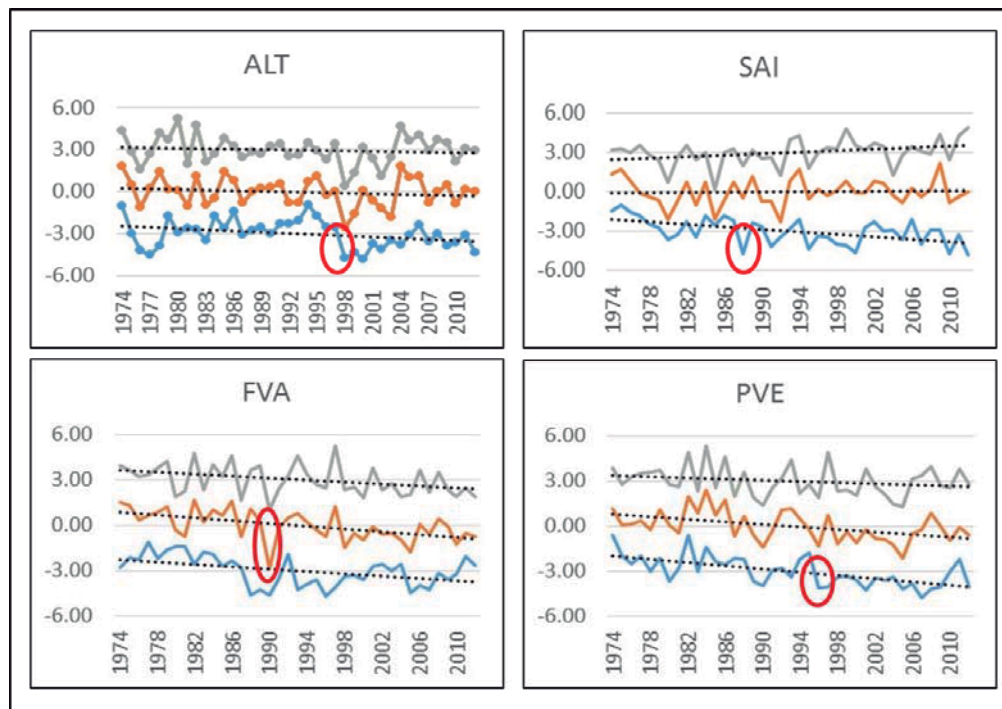


Figura 10. Rupturas en las series de tendencias en las estaciones ALT, SAI, FVA y PVE.

Cuadro 8: Rupturas detectadas en las series de caudales de las estaciones ALT, PVE y SAI en el Qmin y FVA en el Qmed.

	1974	1976	1978	1980	1982	1986	1987	1988	1989	1993	1995	1997	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012
<b>ALT Qmin</b>																				
promedio (m3/s)						1131									896 (-21%)					
coeficiente de variación						0.16									0.15					
tendencia (%)						0.85									1.61					
<b>PVE Qmin</b>																				
promedio (m3/s)						5267									3566 (-32%)					
coeficiente de variación						0.22									0.22					
tendencia (%)						-0.00003									0.62					
<b>SAI Qmin</b>																				
promedio (m3/s)						33639									25950 (-23%)					
coeficiente de variación						0.16									0.23					
tendencia (%)						-0.0003									-0.27					
<b>FVA Qmed</b>																				
promedio (m3/s)						30678									26653 (-13%)					
coeficiente de variación						0.09									0.12					
tendencia (%)						-0.39									-0.12					

Fuente: Elaboración propia.

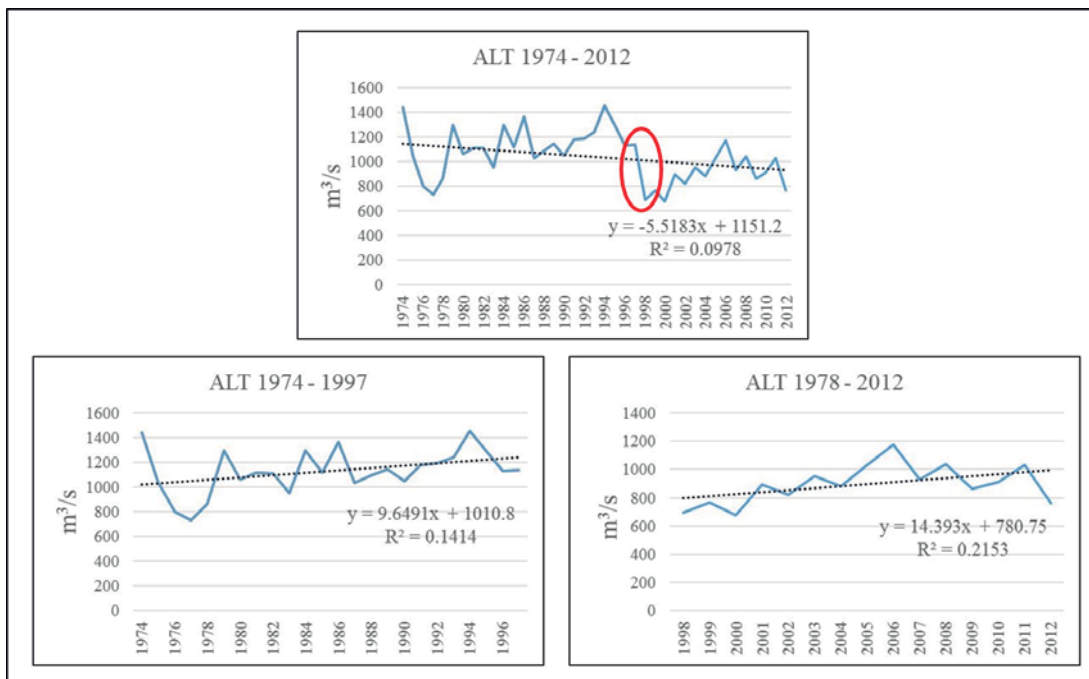


Figura 11. Ruptura en la serie Qmin de la estación ALT.

Cuadro 9: Índices de tendencia (relación lineal) calculados para Qmin, Qmed y Qmax, la Amplitud (Amp) es la diferencia entre las pendientes de Qmax y Qmin sobre la diferencia del promedio entre Qmax y Qmin. En rojo la tendencia negativa y en azul la positiva.

ESTACIÓN	INDICE DE TENDENCIA			
	Qmin	Qmed	Qmax	Amp
TAM	-1.51	-0.44	-0.2	0.47
SAI	-1.09	0.03	0.23	1.01
G	-1.03	0.03	-0.04	0.08
L	-0.83	-0.16	0.12	0.21
SER	0.18	0.17	0.11	0.08
ITP	-0.96	-0.22	-0.02	0.96
MAN	-1.21	-0.01	0.19	1.2
CAR	0.97	1.02	0.41	0.37
RUR	0.1	-0.2	-0.24	-0.28
PVE	-1.62	-0.54	-0.25	-0.06
FVA	-1.05	-0.58	-0.32	-0.24
ITA	-0.68	-0.28	-0.06	0.05
ALT	-0.53	-0.3	-0.23	-0.22
OBI	-0.92	0.05	0.22	0.98

Fuente: elaboración propia.

Con respecto al Qmin, en las estaciones del norte MAN, SAI y FVA se observa una disminución del caudal de -1.21%, -1.09% y -1.05% anual respectivamente, las estaciones ITP y OBI presentan una disminución cercana al -1%, en las estaciones del sur existe una mayor disminución en las estaciones PVE, TAM y G de -1.62%, -1.51% y -1.03% anual. En el Qmed se presenta un aumento significativo del caudal en la estación CAR de +1.02%, SAI de +0.03%, G de +0.03% y OBI de +0.05% por año, las otras estaciones, presentan disminución. En el Qmax hay disminución de caudales en las estaciones del sur (TAM, G, ITP, RUR, PVE, FVA, ITA y ALT) y un aumento en las estaciones del norte (SAI, SER, MAN, CAR y OBI).

La amplitud se calculó a partir de la relación entre la diferencia de pendiente de Qmax y Qmin y la diferencia del promedio de Qmax y Qmin, de los resultados obtenidos (Cuadro 9), se puede afirmar que en la estación MAN se presenta una amplitud de 1.20, incrementándose en 0.33 con respecto los resultados obtenidos en Espinoza *et al.* (2009a) para el periodo 1974 – 2004. En OBI la amplitud es de 0.98, debido a que el Qmin disminuye (-0.92), esto puede explicarse por la disminución del Qmin en las estaciones

TAM (-1.51), SAI (-1.09), ITP (-0.96) y MAN (-1.21) y Qmax tiene un ligero incremento (0.22), el resultado obtenido difiere ampliamente de lo obtenido en Espinoza *et al.* (2009a), en donde se observó una disminución del Qmin de -0.33% y una amplitud de 0.43.

El método anteriormente descrito funciona mejor cuando los residuos tienen una distribución normal, y es muy sensible a los valores atípicos en los datos. Por clasificación de las observaciones y la aplicación de la prueba no paramétrica de MKm, se obtiene una medida más robusta de tendencia (Gao *et al.*, 2012). Diferentes autores (Kundzewicz, 2004; Aziz & Burn, 2006) afirman que se hace necesario la aplicación de distintos métodos para corregir los datos debido a su autocorrelación o correlación serial (Preblanqueo libre de tendencia) así como para considerar la estructura de autocorrelación cruzada de los datos en algunos casos (Yue *et al.*, 2002; Svensson *et al.*, 2004).

Utilizando el p – valor calculado y la significancia al 90, 95 y 99% de confianza, se aceptó o rechazó la hipótesis nula, los resultados obtenidos del test de MKm, se presentan en el Cuadro 10 y la Figura 12, la tendencia negativa al 90% (rosa claro), 95% (rosa oscuro) y 99% (rojo), la tendencia positiva al 90% (azul claro), 95% (azul medio) y 99% (azul oscuro) de acuerdo al resumen del análisis estadístico que se muestran en el Anexo 1.

Como se observa en la Figura 12 (Qmin) y el Cuadro 10, la estación ITP presenta una tendencia a la disminución del caudal con significancia del 99%, en las estaciones de los extremos CAR, SER, RUR y ALT no se observa tendencia para Qmin, las estaciones TAM, SAI, MAN, PVE y OBI, presentan tendencia negativa al 95% y G, L e ITA, presentaron disminución al 90%, similar a estudios anteriores (Espinoza *et al.*, 2009a). Para el periodo 1974 – 2012 en las estaciones SAI, MAN y OBI se presentó una disminución del caudal que para el periodo 1974 – 2004 no se observó y se mantuvieron para TAM, PVE e ITA.

En la Figura 12 (Qmed), se observa una disminución en el caudal de TAM y FVA al 95% de confianza, en el resto de la cuenca no se presentan tendencias en el Qmed, diferencias amplias con lo encontrado en Espinoza *et al.* (2009), debido a que en el periodo 1974 – 2004 se presentó una disminución de caudal en PVE e ITA y un aumento de caudal en SAI. El incremento de la amplitud TAM de 0.47 (Cuadro 11) está asociado a una



disminución del Qmin y la disminución del Qmax, que se ve representado en la disminución del Qmed (Figura 12 – Qmed). En Qmax (Cuadro 12) se ve un incremento significativo al 95% en la estación L (Figura 12-Qmax).

Cuadro 10: Coeficiente de correlación de Mann-Kendall modificado (MKm) para Qmin, Qmed y Qmax al 90%, 95% y 99%, la tendencia negativa se presenta en escala de rojos (rojo para 99%) y la positiva en escala de azules (azul oscuro para 99%) para cada caso, en blanco las estaciones que no presentan tendencia.

ESTACIÓN	Qmin		Qmed		Qmax	
	MKm	p-Valor	MKm	p-Valor	MKm	p-Valor
TAM	-0.538	0.002	-0.333	0.043	-0.177	0.282
SAI	-0.379	0.023	-0.008	0.967	0.204	0.218
G	-0.279	0.096	-0.061	0.723	0.022	0.899
L	-0.285	0.099	-0.099	0.554	0.346	0.034
SER	0.001	1.000	0.158	0.333	0.088	0.589
ITP	-0.533	0.001	-0.271	0.105	-0.069	0.684
MAN	-0.444	0.007	-0.061	0.724	0.092	0.601
CAR	0.134	0.446	0.26	0.125	0.112	0.503
RUR	0.018	0.924	-0.077	0.651	-0.063	0.712
PVE	-0.46	0.005	-0.312	0.061	-0.151	0.353
FVA	-0.285	0.120	-0.404	0.012	-0.26	0.105
ITA	-0.277	0.091	-0.206	0.218	-0.011	0.954
ALT	-0.181	0.292	-0.107	0.517	-0.042	0.808
OBI	-0.414	0.014	0.018	0.923	0.178	0.289

positiva	99%
	95%
	90%
No tendencia	
negativa	90%
	95%
	99%

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.8 Determinación de las variables hidrológicas y la tendencia en los índices de alteración hidrológica (IHA)

La metodología IHA señala que cuando el caudal ha sufrido constantes alteraciones y no existen registros que muestren una condición de referencia anterior al impacto, es conveniente hacer un análisis de tendencia de caudal, determinados por cambios estadísticamente significativos durante el periodo (p-valor y pendiente de la serie) que podrían indicar que la hidrología ha sido alterada (Richter, 1996; USGS, 2003), teniendo en cuenta lo anterior, se realizó así el análisis para las 14 estaciones, los resultados se presentan a continuación:



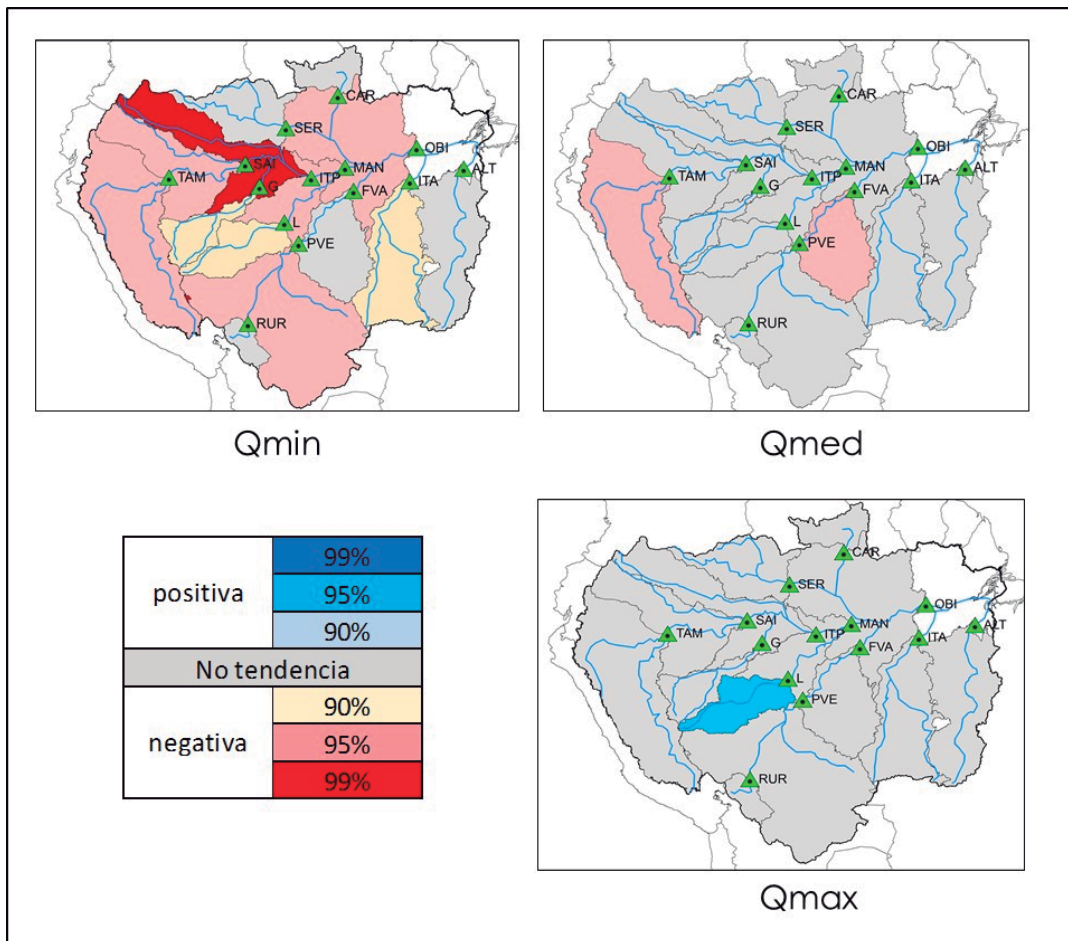


Figura 12. Tendencias de caudales en la Cuenca Amazónica utilizando el test de Mann – Kendall modificado (MKM) para Qmin, Qmed y Qmax periodo 1974 – 2012 (escala de rojos para tendencias negativas y escala de azules para positivas).

#### 4.8.1 Índices 3, 7, 30 y 90 días mínimos (condiciones extremas anuales).

Estos cuatro índices miden la magnitud de las condiciones extremas anuales de diversa duración que van desde semanales (3 y 7 días), hasta mensuales (30 días) y estacionales (90 días). Cada índice representa el valor promedio de varios días de caudales mínimos que se producen en cada año. Estos valores permiten identificar la tensión ambiental y la perturbación durante el año, siendo estas perturbaciones precursoras o activadores necesarios para la reproducción de determinadas especies, tanto animales como vegetales (arbóreas o de bosques riparios).

En el cuadro 11, se observa el valor mínimo y el año hidrológico en que se presenta, además de los valores promedio para cada índice en cada estación, se resaltan las estaciones que presentan mayor tendencia de caudal mínimo con base en el p valor – calculado y la pendiente (Anexo 2), éste análisis permite graficar las tendencias encontradas en cada estación (Cuadro 13), utilizando la Ecuación 1, nombrada anteriormente, se estableció el aumento o disminución de los caudales mínimos en porcentaje (Cuadro 12).

Como se observa en el Cuadro 11, los valores más bajos en la estación TAM, hacen parte del año hidrológico 2010 – 2011, éstos valores se presentaron en los meses de septiembre a diciembre de 2010, es por esto que los valores más bajos, se pueden comparar con estudios realizados sobre sequías extremas en el amazonas como el de Espinoza *et al.* (2011), en el que se concluyó que éstas sequías pudieron estar relacionadas a las ocurrencias sucesivas de un moderado El Niño en el verano austral, en las estaciones del norte (SAI, MAN, ITP), Xu *et al.* (2011) afirmaron que la disminución del caudal en 2010, afectó especialmente la vegetación de la región Ecuatorial (SAI) (2.3 millones km<sup>2</sup>), igualmente en Lewis *et al.* (2011), se confirma una disminución de caudales para 2010 en el norte de Bolivia y sureste de Brasil (PVE) que afectó la comunidad forestal primaria debido a incendios y muertes de especies por estrés hídrico, calculando que el impacto de ésta sequía (2010) produjo una gran contribución de Gases Efecto Invernadero (GEI) similar a la contribución anual de economías en desarrollo más grandes.

Estudios como el de Coe *et al.* (2009) y Davidson *et al.* (2012), Afirman que la disminución de los caudales en la Cuenca Amazónica puede estar relacionados a los niveles de deforestación, debido a que ésta podría reducir la precipitación regional y una tendencia a la disminución de la descarga de los ríos, pero el área deforestada o el aumento de la frontera agrícola aún no es lo suficientemente grande para que se le pueda atribuir cambios en la descarga específica de los ríos.

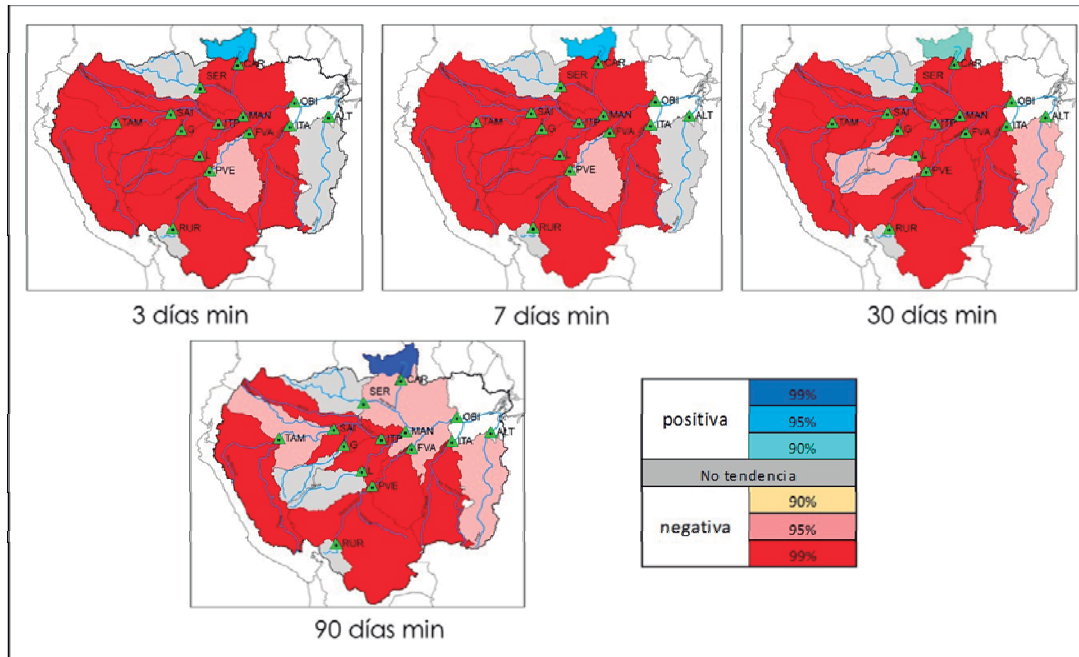
Cuadro 11: Valores mínimos y promedio del año hidrológico de los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.

Índice	3-días mínimo			7-días mínimo			30-días mínimo			90-días mínimo		
	Min	Año hidro	Prom	Min	Año hidro	Prom	Min	Año hidro	Prom	Min	Año hidro	Prom
TAM	8,363	5 sep - 5 oct (2010)	13,432	8,449	5 sep - 5 oct (2010)	13,758	9,899	5 sep - 5 oct (2010)	15,615	11,730	15 ago - 15 nov (2010)	20,291
SAI	13,930	7 oct - 15 oct (2010)	25,797	14,350	7 oct - 15 oct (2010)	26,159	16,680	2 oct - 2 nov (2010)	28,982	26,430	15 ago - 15 nov (2010)	39,130
G	524	6 al 8 oct (2005)	840	525	4 al 10 oct (2005)	849	578	20 sep - 20 oct (2005)	928	898	10 ago - 10 nov (2005)	1,473
L	607	29 ago - 1 sep (1999)	855	627	27 ago - 3 sep (1999)	869	721	13 al 15 oct (2010)	969	1,129	9 ago - 9 nov (2010)	1,521
SER	2,198	13 al 15 mar (1980)	5,836	2,306	11 al 17 mar (1980)	6,061	3,147	21 feb - 21 mar (1980)	7407	5,750	20 feb - 20 may (1985)	10,022
ITP	38,650	18 al 20 oct (2010)	52,663	38,650	16 al 22 oct (2010)	52,875	39,400	14 oct - 14 nov (2010)	55,122	44,310	16 sep - 16 dic (2010)	62,425
MAN	25,420	14 al 16 oct (2010)	53,039	26,070	12 al 18 oct (2010)	53,498	30,040	3 oct - 3 nov (2010)	57,087	42,850	6 sep - 6 dic (2010)	68,944
CAR	178	21 al 23 feb (1998)	489	181	21 feb - 2 mar (1998)	507	199	11 feb - 11 mar (1998)	631	289	25 feb - 25 mayo (1988)	1,033
RUR	230	19 al 27 ago (1987)	441	232	19 al 27 ago (1987)	462	251	27 ago - 27 sep (1991)	540	346	20 jul - 20 oct (1991)	765
PVE	2,092	11 sep - 15 oct (2005)	3,768	2,120	11 sep - 15 oct (2005)	3,862	2,220	7 sep - 7 oct (2005)	4,387	3,752	1 sep - 1 dic (1995)	6,816
FVA	2,141	9 al 11 oct (1995)	4,827	2,164	6 al 12 oct (1995)	4,945	2,888	18 sep - 18 oct (1995)	5,810	4,061	23 ago - 23 nov (1989)	10,436
ITA	1,447	18 al 20 oct (1977)	2,960	1,474	30 jul - 3 sep (1996)	3,122	2,259	20 sep - 20 oct (1977)	3,695	3,172	27 jul - 27 oct (1989)	5,043
ALT	390	19 al 21 sep (2003)	955	498	18 al 24 sep (2003)	971	708	19 sep - 19 oct (1998)	1,077	996	27 jul - 27 oct (1998)	1,837
OBI	51,160	23 oct - 23 nov (2010)	91,002	53,170	23 oct - 23 nov (2010)	91,907	61,870	23 oct - 23 nov (2010)	97,287	91,720	30 sep - 30 dic (2010)	119,857

Fuente: elaboración propia.

La estación OBI, presenta los caudales más bajos en el año hidrológico 2009 – 2010, e inicios del 2010 – 2011, Marengo *et al.* (2011), asocian la disminución de los caudales en toda la Cuenca Amazónica al calentamiento de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Atlántico tropical norte (ATN), que tendrían grandes impactos ambientales y sociales en la región. FVA presenta los caudales mínimos a principios del año hidrológico 1994 – 1995, también documentado en Marengo *et al.* (2013), quienes afirman que los niveles más bajos en ésta estación se presentaron en 1994 y 2005.

En el Anexo 2, se puede observar la significancia de los cambios determinados por la pendiente calculada en cada serie, ésta significancia se graficó en Figura 13, la tendencia negativa se presenta con rojo para el 99%, rosado para el 95% y beige para el 90%, la tendencia positiva, se utilizó azul oscuro para el 99%, azul celeste para el 95% y azul claro para el 90%, las estaciones que no tienen tendencia se graficaron con el color gris y en blanco se presentan las regiones de donde no se tiene información.



**Figura 13. Tendencias de caudales en la Cuenca Amazónica utilizando los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimo, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la información faltante y en gris la no tendencia.**

En el Cuadro 12, se puede observar que la mayor disminución de caudal se presenta en las estaciones de TAM, MAN y PVE, superando el -1.2% anual, ITP, ITA, FVA, SAI, G, L y OBI, presentan una disminución del caudal cercano al -1.0% anual en todos los índices, a pesar de que G presenta una disminución cercana a 0.8% en los índices 3, 7 y 30 días; En el análisis estacional (90 días mínimo), presenta una disminución baja, de 0.03%, la estación CAR en el extremo norte de la Cuenca, presenta un aumento de caudal cercano a 1.6% en los índices semanales y mensual, pero en el estacional, presenta un incremento del 2.34% anual, RUR en el extremo sur de la Cuenca, presenta un aumento de caudal a nivel semanal y mensual, pero una disminución en el análisis estacional de -0.34%.

#### **4.8.2 Índices 3, 7, 30 y 90 días máximos (condiciones extremas anuales).**

Estos índices son utilizados para medir la magnitud de los máximos anuales de diversa duración (semanales: 3 y 7 días, mensuales: 30 días y estacionales: 90 días). Cada índice representa en el valor promedio de varios días de caudales máximos que se producen en

cada año hidrológico. Estos valores permiten identificar la tensión ambiental y la perturbación durante el año, siendo estas perturbaciones precursoras o activadores necesarios para la reproducción de determinadas especies.

Cuadro 12: Porcentaje de aumento o disminución de caudales en los índices de 3, 7, 30 y 90 días mínimo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.

Estación	3-días mínimo	7-días mínimo	30-días mínimo	90-días mínimo
TAM	-1.45	-1.41	-1.27	-1.03
SAI	-1.04	-1.04	-0.95	-0.48
G	-0.83	-0.81	-0.66	-0.03
L	-0.77	-0.75	-0.63	-0.19
SER	0.2	0.23	0.22	0.04
ITP	-0.88	-0.88	-0.87	-0.65
MAN	-1.27	-1.26	-1.13	-0.63
CAR	1.78	1.75	1.46	2.34
RUR	0.28	0.31	0.11	-0.34
PVE	-1.44	-1.42	-1.44	-1.05
FVA	-0.93	-0.99	-1.1	-0.9
ITA	-1.06	-1.04	-0.88	-0.79
ALT	-0.37	-0.37	-0.6	-0.68
OBI	-0.95	-0.92	-0.74	-0.31

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 13: Valores máximos y medios anuales de los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia

Estac.	3-días máximo			7-días máximo			30-días máximo			90-días máximo		
	Max	Año hidro	Prom	Max	Año hidro	Prom	Max	Año hidro	Prom	Max	Año hidro	Prom
TAM	55380	19 al 21 abr (2012)	46883	55300	17 al 23 abr (2012)	46803	54870	4 abr - 4 may (2012)	46135	51160	3 mar - 3 jun (2012)	43304
SAI	90210	9 al 11 may (2012)	78444	90200	7 al 13 may (2012)	78385	89720	19 abr - 19 may (2012)	77731	87010	18 mar - 18 jun (2012)	74848
G	10510	6 al 8 may (1986)	9010	10480	5 al 11 may (1986)	8986	10010	25 abr - 25 may (1986)	8822	9776	18 abr - 18 jun (2012)	8381
L	13250	14 al 16 abr (1997)	11276	13200	12 al 18 abr (1997)	11265	12890	26 mar - 26 abr (1997)	11181	11580	3 mar - 3 jun (1997)	10761
SER	33940	2 al 4 jun (1976)	28532	33790	1 al 7 jun (1976)	28447	32640	19 may - 19 jun (1976)	27578	29520	7 jun - 7 sep (2002)	25428
ITP	122100	1 al 3 jul (1999)	109424	122100	29 jun - 5 jul (1999)	109388	121600	17 jun - 17 jul (1999)	108959	118500	25 abr - 25 jun (1999)	106005
MAN	162700	1 al 19 jun (2012)	139826	162600	1 al 19 jun (2012)	139713	162100	26 may - 26 jun (2010)	139010	157500	14 abr - 14 jun (2012)	135810
CAR	16940	8 al 10 may (2011)	9712	16620	7 al 13 may (2011)	9480	13490	22 abr - 22 may (2011)	8099	10150	10 abr - 10 may (2006)	6599
RUR	17110	26 ene - 28 feb (2011)	9087	13200	26 ene - 28 feb (2011)	7600	8765	26 ene - 26 abr (2011)	5592	6890	10 feb - 10 may (1999)	4289
PVE	49580	7 al 9 sep (1997)	39204	49110	6 al 12 sep (1997)	38952	47740	5 abr - 5 may (1984)	37467	42930	20 feb - 20 may (1984)	34392
FVA	71060	6 al 23 abr (1997)	58387	70530	6 al 27 abr (1997)	58193	69560	2 abr - 2 may (1997)	57089	64910	7 mar - 7 jun (1997)	53114
ITA	29250	4 al 6 mar (1979)	25198	29180	3 al 10 mar (1979)	25089	28760	26 ene - 26 abr (1979)	24275	26000	1 feb - 1 may (2004)	22333
ALT	32320	16 al 22 mar (1980)	23042	32280	16 al 22 mar (1980)	22903	30420	6 mar - 6 abr (1980)	21679	27160	1 feb - 1 may (2004)	18823
OBI	278700	27 may - 1 jun (2006)	242777	278300	21 may - 4 jun (2006)	242500	275700	10 may - 10 jun (2006)	240913	265800	16 abr - 16 jul (1989)	234621

Fuente: elaboración propia.

En el Cuadro 13, se observa el valor máximo y el año en que se presenta, además de los valores promedio para cada índice en cada estación, se resaltan las estaciones con mayor tendencia en el caudal máximo con base en el valor de  $p$ -calculado y la pendiente (Anexo 3), éste análisis permite graficar las tendencias encontradas en cada estación (Figura 14), utilizando la Ecuación 1, nombrada anteriormente, se estableció el aumento o disminución de los caudales máximos en porcentaje (Cuadro 14).

El Cuadro 14 presenta los valores más altos de caudal en las estaciones MAN y SAI, que hacen parte del año hidrológico 2011 – 2012, éstos valores se presentaron entre los meses de abril a julio de 2012, es por esto que los valores más altos, se pueden comparar con estudios recientes sobre inundaciones en la Cuenca Amazónica como el de Satyamurty *et al.* (2013), en el que concluyen que la actividad convectiva sobre el continente cálido y rodeado de aguas frías en el Pacífico ecuatorial y el Atlántico Sur tropical, ayudado por una mayor convergencia de la humedad, se ha incrementado, lo que resulta en mayores precipitaciones y por consecuencia, inundaciones.

Marengo *et al* (2013), afirma que tanto las sequías como las inundaciones son parte de la variabilidad natural del clima en esta región y que en los últimos diez años se han enfrentado las más intensas sequías e inundaciones en la historia reciente, las perspectivas de esta situación es que en el futuro seguirán siendo altas. En Gloor *et al.* (2013) se hace referencia al aumento de la humedad en toda la Cuenca Amazónica desde finales del siglo XX, con una fuerte tendencia simultánea hacia el aumento de la amplitud anual de la descarga de los ríos desde los años 90's, éste aumento podría tener grandes implicaciones tanto en el funcionamiento de los ecosistemas naturales como para las personas que viven a lo largo de la llanura de inundación del Amazonas.

De acuerdo al Anexo 3 y el Cuadro 14, se puede afirmar que la estación MAN, presenta una tendencia positiva para todos los índices, en promedio +0.19% anual, la estación FVA presenta una tendencia negativa para todos los índices alrededor de -0.33% anual, SAI y OBI presentan una tendencia positiva cercana al +0.23%, aunque la tendencia de OBI no es significativa. La estación L presenta un incremento significativo al 95% de confianza en todos los índices de +0.12% anual.

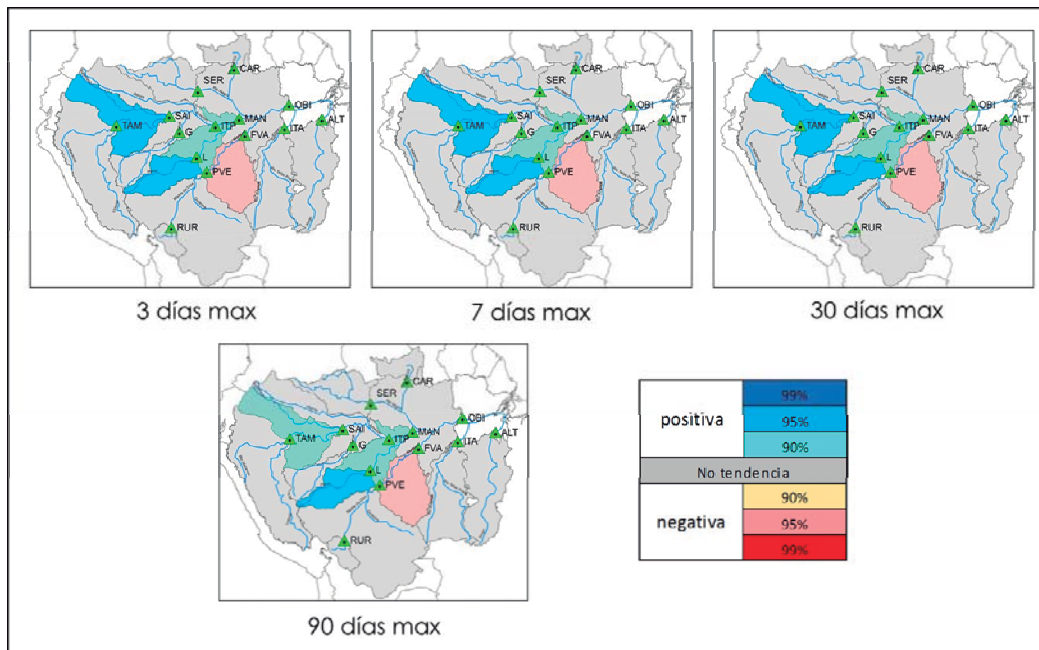


Figura 14. Tendencias de caudales en la Cuenca Amazónica utilizando los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la información faltante y en gris la no tendencia.

Cuadro 14: Porcentaje de aumento o disminución de caudales en los índices de 3, 7, 30 y 90 días máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.

Estación	3-días máximo	7-días máximo	30-días máximo	90-días máximo
TAM	-0.19	-0.19	-0.2	-0.22
SAI	0.24	0.24	0.23	0.24
G	-0.05	-0.05	-0.04	0.03
L	0.12	0.12	0.12	0.12
SER	0.12	0.12	0.13	0.14
ITP	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03
MAN	0.19	0.19	0.18	0.19
CAR	0.19	0.21	0.45	0.57
RUR	0.17	0.03	-0.07	-0.11
PVE	-0.15	-0.16	-0.23	-0.23
FVA	-0.33	-0.33	-0.32	-0.33
ITA	-0.01	-0.01	-0.04	-0.08
ALT	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21
OBI	0.21	0.21	0.21	0.21

Fuente: elaboración propia.



En el Amazonas, la vulnerabilidad está relacionada con la dependencia de la población agrícola al ciclo de lluvias para el logro de buenas cosechas dado el ciclo agrícola local. La mayoría de los habitantes tradicionales de la Amazonía dependen estrechamente de la extracción de los recursos naturales que están directamente asociados con el ciclo hidrológico anual y por lo tanto son altamente vulnerables a las anomalías climáticas e hidrológicas (Pinho *et al.*, 2014).

#### **4.8.3 Índice de caudal base.**

El caudal base se calculó utilizando el flujo anual de 7 días mínimo dividido por el caudal medio anual para cada serie hidrológica, es el caudal mínimo necesario para que se conserve la estructura y función del ecosistema acuático afectado, para éste análisis es necesario tener información de largos períodos de tiempo (Poof, 2002). Este caudal no puede ser fijo a lo largo del año, sino que varía siguiendo el patrón del régimen del caudal natural (Alcázar, 2007). Este índice se muestra en el Cuadro 15.

Utilizando el valor de  $p$ -calculado y la pendiente (Anexo 4), se determinó si las estaciones tienen tendencia sobre el caudal base, el incremento o disminución de ésta, se calculó utilizando la Ecuación 1, planteada en Espinoza *et al.*, 2009. En la Figura 15 se graficaron las tendencias.

Todas las estaciones presentaron una tendencia negativa para el caudal base, a diferencia de las estaciones de los extremos norte, sur (CAR y RUR respectivamente) y extremo noroccidental (SER) que no presentaron tendencia, TAM, SAI, MAN, PVE y OBI, presentaron disminución del caudal base cercano al -1% anual y G, L, ITP e ITA de -0.6% aproximadamente (Anexo 4).

La reducción de caudal base y el incremento de los períodos secos pueden afectar gravemente a las comunidades existentes ya adaptadas al clima hasta el punto de alterar su composición y abundancia. Mientras que la capacidad de recuperación de las comunidades ante estas sequías estacionales es conocida, la prolongación de las sequías tiene efectos



menos predecibles, muy distintos según cada caso, y puede condicionar la supervivencia de una gran proporción de la biota presente en la actualidad (Lake, 2003).

Cuadro 15: Promedio del caudal de 7 días mínimo, caudal y cálculo de caudal base para 14 subcuencas de la Cuenca Amazónica. . La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.

Estación	Promedio		
	7 días min (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal base (%)
TAM	13757	30638	0.450
SAI	26159	55433	0.470
G	849	4772	0.180
L	869	5585	0.160
SER	6060	16512	0.360
ITP	52875	82991	0.640
MAN	53498	102369	0.520
CAR	506	2917	0.170
RUR	462	1878	0.230
PVE	3861	18800	0.200
FVA	4944	28203	0.180
ITA	3122	12065	0.260
ALT	971	8143	0.120
OBI	91907	174237	0.530

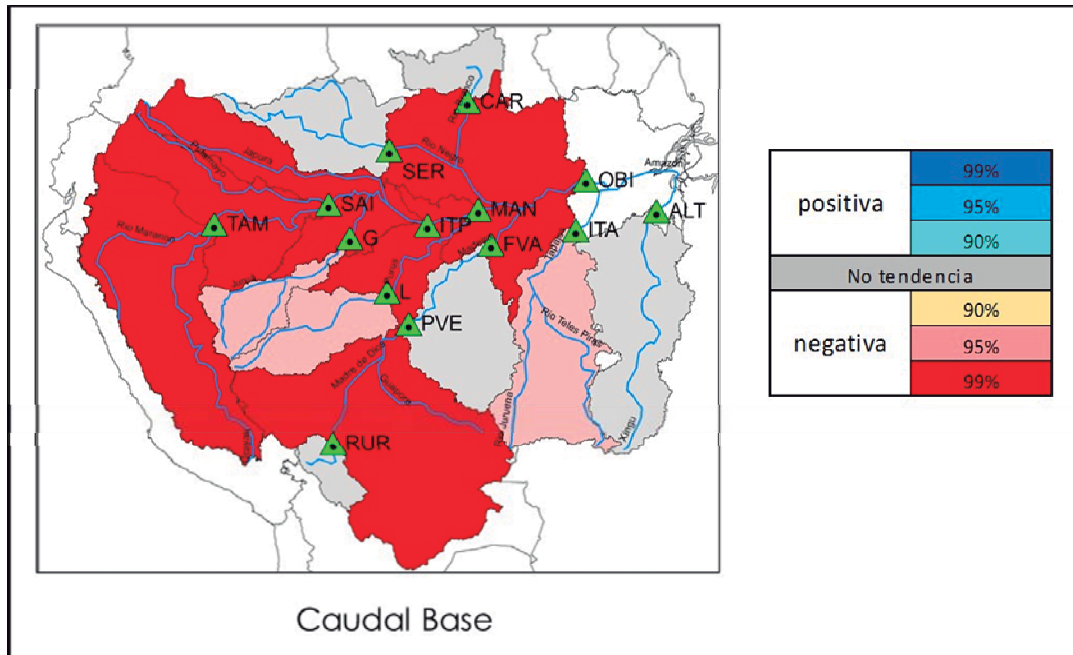
Fuente: elaboración propia.

Éste índice de caudal base puede utilizarse para determinar el nivel de conservación de los hábitats en los ríos, los rápidos, los rápidos pedregosos, los estanques, las áreas de las márgenes en donde hay juncos y raíces de árboles, los remansos, los saltos de agua y las corrientes donde habitan plantas y animales diversos. Es muy importante que estos caudales de base varíen de estación en estación para permitir que las nuevas especies florezcan y se reproduzcan (O'keeffe & Le Quensne, 2010).

#### 4.8.4 Fecha juliana de caudal mínimo y máximo anual de 1 día.

Los valores máximos y mínimos promedio por año, se calcularon para todas las estaciones y se determinó su tendencia de acuerdo al p-valor y la pendiente (Anexo 5), las estaciones que presentaron tendencia se graficaron para determinar las fechas en las que se presentan

éstos extremos (Figura 16), si en algún caso se presentan múltiples días en el año hidrológico con el mismo valor de caudal, se registra la fecha más temprana.



**Figura 15. Tendencia de caudal base en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la información faltante y en gris la no tendencia.**

En el Anexo 5, se observa que ninguna estación presenta tendencia para el caudal mínimo, pero CAR y G presentan tendencia negativa al 99% y 90% de confianza y OBI presenta una tendencia positiva al 95% de confianza.

Todas las estaciones se graficaron para determinar en qué meses se presentó el caudal mínimo y máximo, en la Figura 17 las estaciones que tienen el asterisco rojo, son las que presentaron tendencia (G, CAR y OBI). En la estación CAR (extremo norte), los caudales mínimos se presentan entre los meses de Enero y Abril, para el año hidrológico 2010 - 2011 se presentó el mínimo en el mes de diciembre documentado por Pinho *et al.*, 2014 y para 2012 en el mes de octubre, la tendencia para ésta estación se presenta en el caudal máximo entre los meses de abril y septiembre.

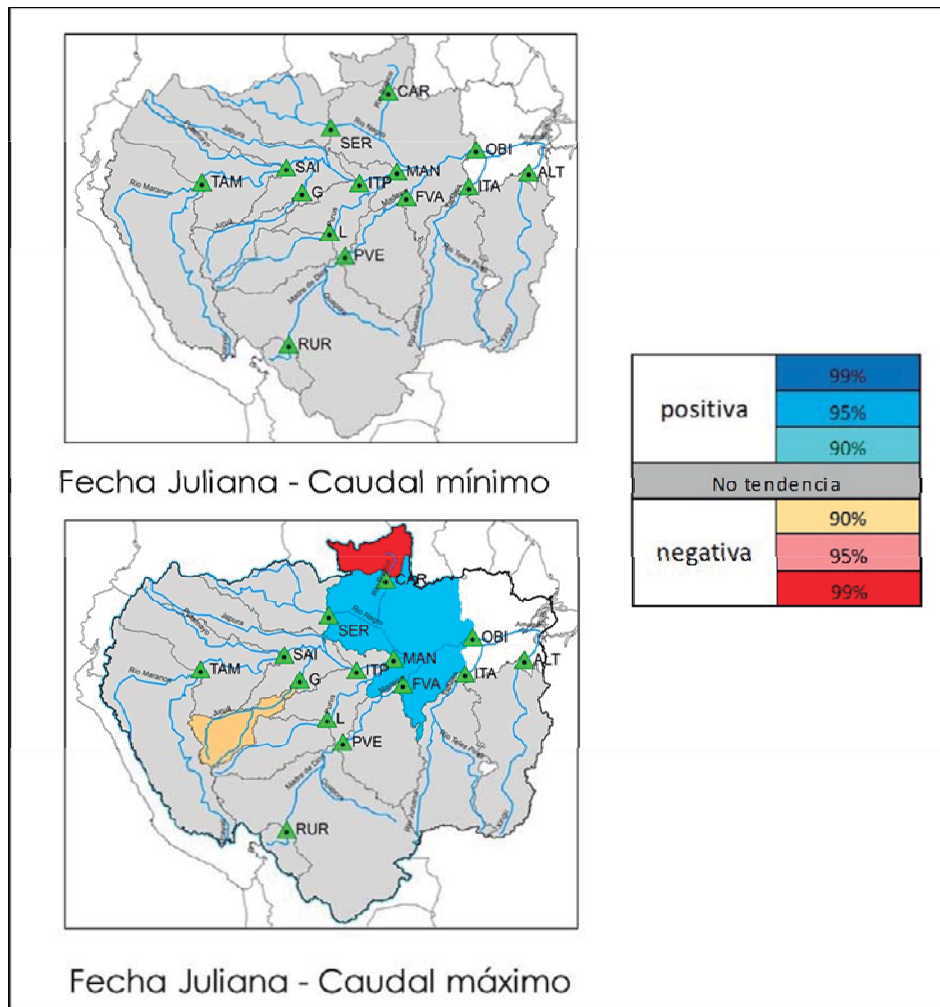
En la estación G (Figura 17) se observa que el caudal mínimo, se presenta entre los meses de septiembre y octubre y el máximo entre marzo y abril, pero se presentaron picos para junio en 1978 y 1998, el caudal máximo disminuye en -0.45% por año (Anexo 5). La estación OBI presenta el caudal mínimo entre octubre y noviembre y el máximo entre mayo y julio, en el año 2009, se presentó el caudal máximo en el mes de Agosto como parte de la inundación documentada para ese año por Marengo *et al.* (2012), que relacionó éste aumento de caudales a un inicio prematuro de la temporada de lluvias en el norte y en el noroeste de la Amazonía, debido a la combinación de varios factores meteorológicos como la migración anómala hacia el sur de la ITCZ (zona de convergencia intertropical) durante mayo a junio de 2009.

#### **4.8.5 Número y duración de pulsos bajos por año.**

El número de pulsos bajos por año se calcularon asumiendo los valores estándar de software IHA, el umbral de pulso de caudal bajo es la mediana menos el 25% (percentil 25), los periodos de días que se encuentran en el mismo tipo de pulso se cuentan como distintos eventos de pulso y los compartidos por dos años hidrológicos se cuentan solamente en el año hidrológico que empiezan y la duración de éstos eventos incluye la parte que ocurren en el año hidrológico siguiente.

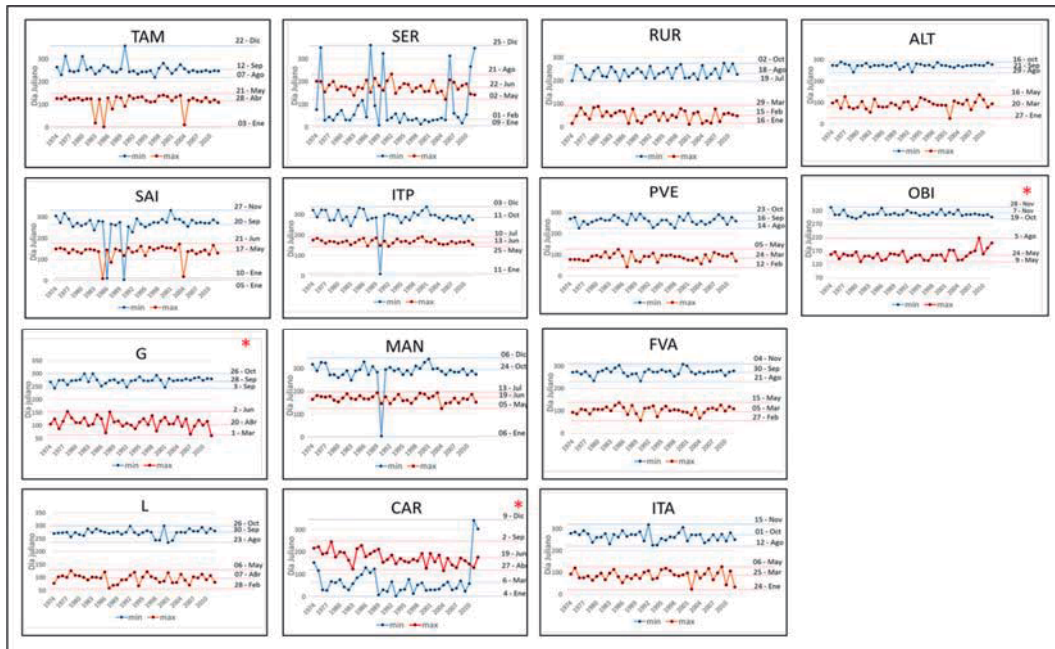
En el Anexo 6, se observa que en el índice de número de pulsos bajos, las estaciones CAR e ITA presentan una tendencia negativa de -2.52% y -1.5% respectivamente, esto debido a que se presentaron un mayor número de pulsos bajos (mayor a dos por año) en el periodo evaluado (Figura 18). Igualmente, en el Anexo 6, se puede ver que las estaciones ITP y MAN tienen una tendencia positiva de +2.69% y +1.37% respectivamente.

La figura 18 muestra que la estación CAR tiene en promedio tres (3) pulsos por año con duración corta (aprox. 15 días), los años hidrológicos que presentaron un solo pulso, tuvieron una mayor duración (80 días aprox.), en ITA se observa en promedio dos (2) pulsos por año, los años en los que se presentó un solo pulso, tuvieron mayor duración (más de 95 días por pulso), en el año hidrológico 2009 – 2010 se presentaron 8 pulsos que como se describió anteriormente se analizarían en el año que inician y no se contabilizan en el año siguiente, estos pulsos tuvieron una duración promedio de 4.5 días.



**Figura 16. Tendencia del número y duración de pulsos bajos en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en blanco se muestra la información faltante y en gris no existe tendencia.**

Las estaciones ITP y MAN presentaron en promedio un (1) pulso por año que en algunos casos presentaron duraciones altas, las dos estaciones mostraron que entre los años 2005 y 2010 se incrementó la duración de los pulsos siendo 2005 y 2010 años de sequías documentas por autores como Coe *et al.* (2009), Espinoza *et al.* (2010), Marengo *et al.* (2011), Davidson *et al.* (2012) y otros. En la Figura 19, se graficó la tendencia obtenida para cada estación de acuerdo al Anexo 6.

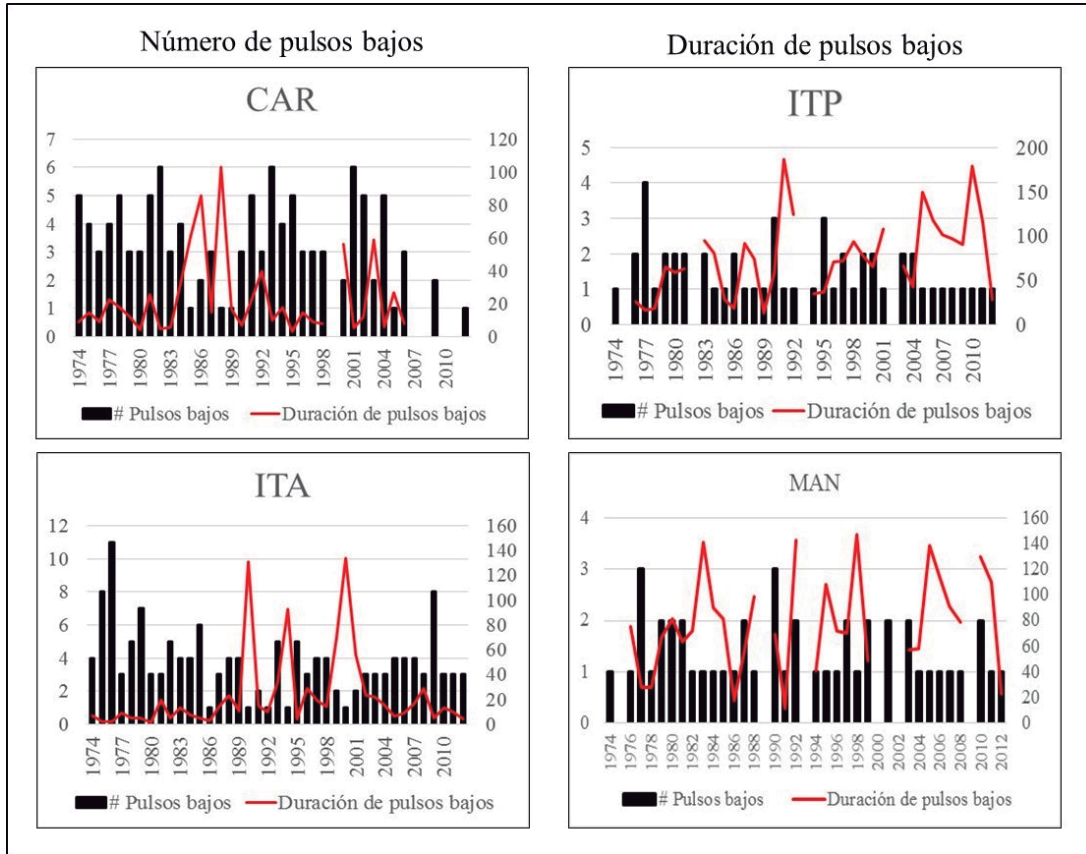


**Figura 17. Fecha juliana de caudal mínimo y máximo en la Cuenca Amazónica, la línea roja marca el caudal máximo y la línea azul el caudal mínimo.**

#### 4.8.6 Número y duración de pulsos altos por año.

El número de pulsos altos por año se calcularon asumiendo los valores estándar de software IHA, el umbral de pulso de caudal alto es la mediana más el 25% (percentil 75), los periodos de días que se encuentran en el mismo tipo de pulso se cuentan como distintos eventos de pulso y los compartidos por dos años hidrológicos se cuentan solamente en el año hidrológico que empiezan y la duración de éstos eventos incluye la parte que ocurren en el año hidrológico siguiente.

En el Anexo 7, se observa que en el índice de número de pulsos altos, las estaciones MAN, RUR y PEV presentan una tendencia positiva cercana al 1% por año, TAM tiene una tendencia negativa de -1.7%, las estaciones FVA y PVE presentan una tendencia negativa para el índice de duración de pulsos altos de -2.1% y -1% respectivamente, en G, se presentó una tendencia positiva de -1.43% por año.

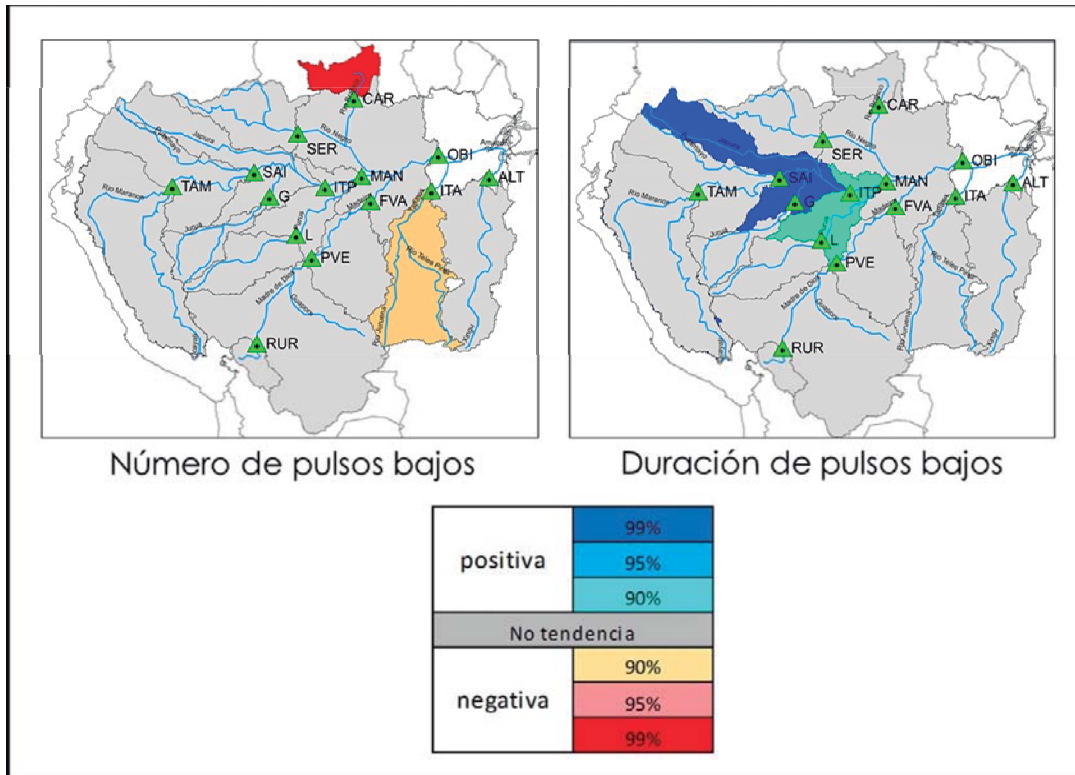


**Figura 18. Índice de pulsos y duración de caudal bajo en la Cuenca Amazónica, la línea roja marca la duración y el histograma la frecuencia de los pulsos bajos.**

En la Figura 20, se presentan las gráficas de las estaciones que presentaron tendencia positiva o negativa en el índice de número pulsos altos, TAM (tendencia negativa) muestra que la frecuencia de los pulsos es de uno (1) en casi todos los años, éstos pulsos presentan una duración entre 70 y 159 días, las frecuencias altas (tres pulsos) tienen una duración corta entre 3 y 15 días, en 2006, 2009 y 2012 [inundaciones documentas por Espinoza *et al.* (2009 y 2013); Satyamurty *et al.* (2013); Marengo *et al.* (2012 y 2013)] se observa que la duración del pulso en cada año fue superior a los 100 días en cada uno.

La estación MAN en general presenta un (1) pulso por año, pero con duraciones entre 70 y 160 días, en el año 2009, se presentó la mayor duración con 173 días, RUR es la estación que presenta el mayor número de pulsos altos por año (promedio de 10) con duraciones entre 1 y 12 días, 1991 y 2012 presentaron la mayor cantidad de pulsos (18 cada uno).

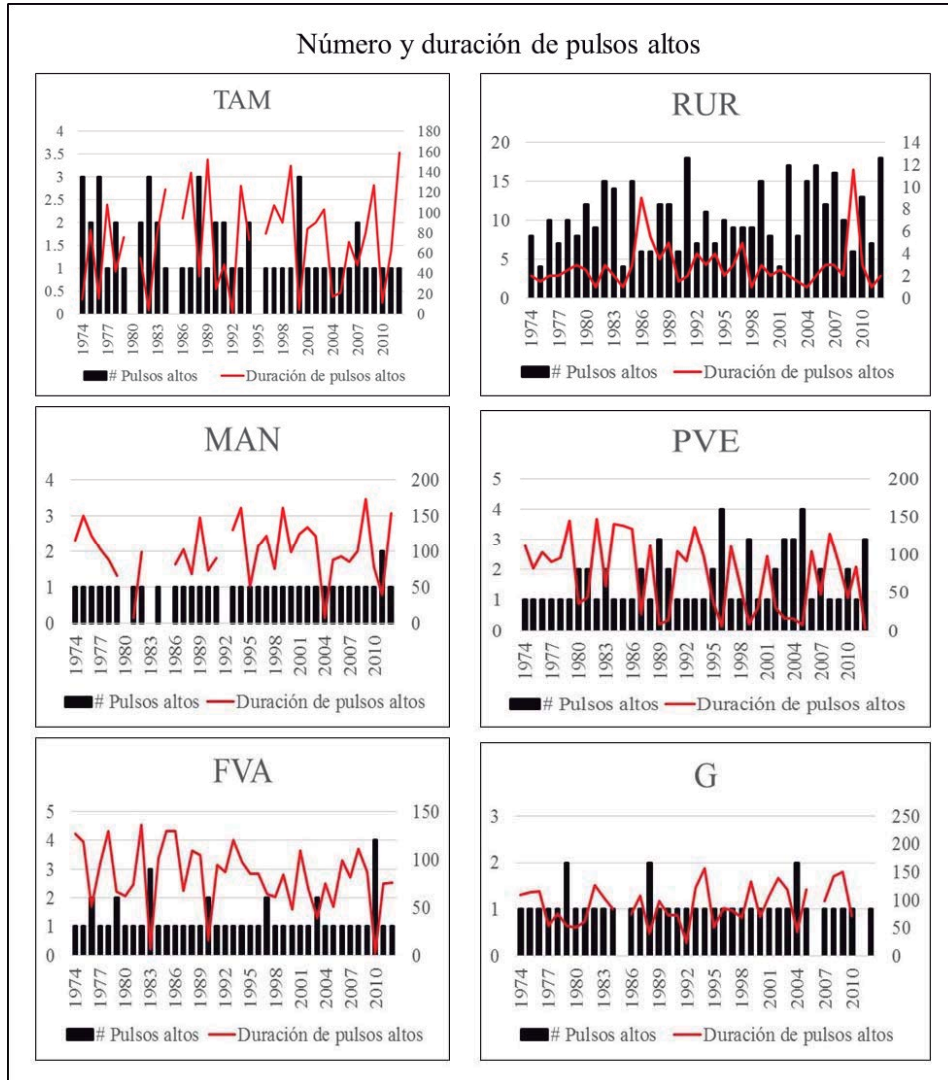




**Figura 19. Tendencia del número y duración de pulsos bajos en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en color gris no existe tendencia.**

La estación PVE presenta un incremento en el número de pulsos altos (tendencia positiva) y una disminución en la frecuencia de éstos (tendencia negativa) presentada en la Figura 20, en las que se puede ver que para los años 2002 al 2005 se incrementaron los pulsos (de dos a cuatro) con una baja duración (entre 7 y 16 días).

En la Figura 20 también se muestra que, para la estación FVA la duración de los pulsos altos oscila entre 38 y 120 días, pero como se ha visto en el análisis de los otros índices la duración de los pulsos es inversamente proporcional a su frecuencia, en la estación G se muestra que en general se presenta un pulso por año, con duraciones entre 50 y 150 días, para el año 2012 se presentó una duración de 238 días, siendo la mayor duración presentada en la estación G. En la figura 21, se graficaron las tendencias obtenidas para cada estación de acuerdo al Anexo 7.

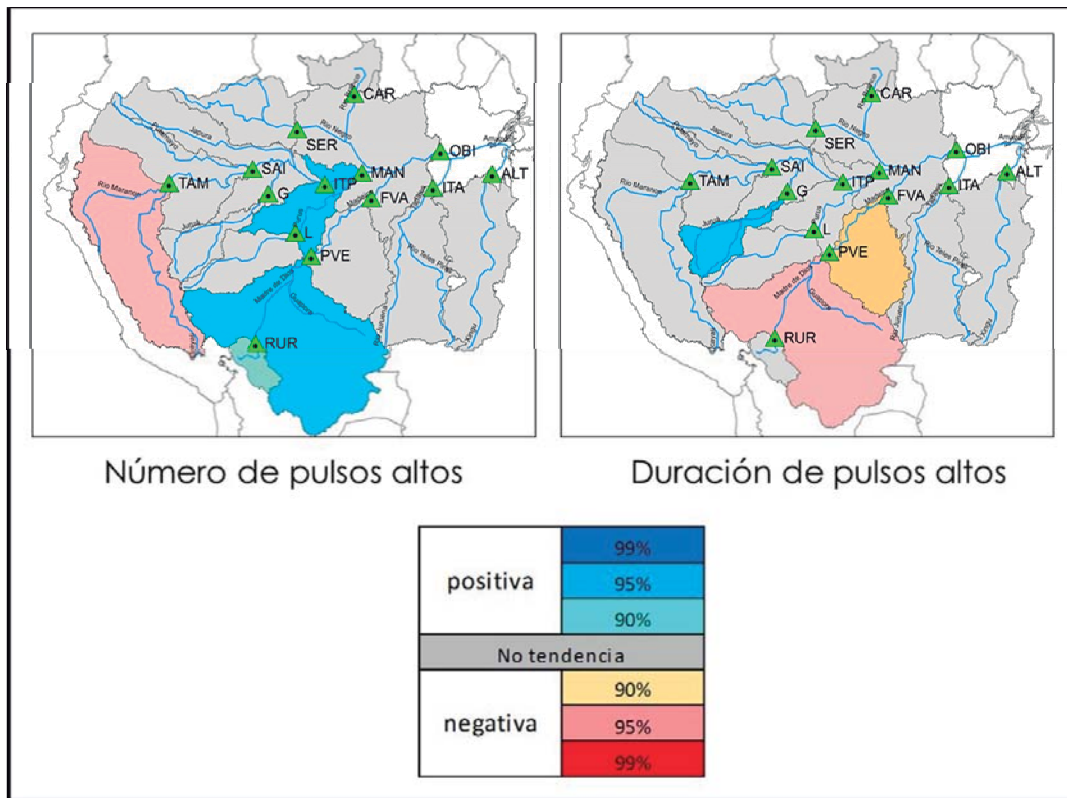


**Figura 20. Estaciones que presentaron tendencia en el índice de pulsos altos en la Cuenca Amazónica, la línea roja marca la duración y el histograma la frecuencia de los pulsos.**

#### **4.8.7 Tasas de ascenso y descenso en el hidrograma.**

La tasa de ascenso y descenso del hidrograma representa la mediana de todas las diferencias positivas y negativas respectivamente entre los valores diarios consecutivos, expresado en m<sup>3</sup>/s, el análisis de ésta se realizó para todas las estaciones y se graficaron las que presentaron una tendencia positiva o negativa en base al Anexo 8 (Figura 22).





**Figura 21. Tendencia del número y duración de pulsos altos en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en color gris no existe tendencia.**

En la tasa de ascenso del hidrograma, TAM presentó una disminución significativa al 99% de confianza del 0.83% anual, las estaciones MAN, CAR, PVE y OBI presentaron un aumento del caudal en la tasa de ascenso de +0.54%, +1.18%, +0.40% y +0.44% respectivamente, MAN también mostró una disminución de la tasa de descenso de -0.71%, FVA tuvo una tendencia positiva de 0.60% anual y SAI una tendencia negativa de -0.54%, en la Figura 23 y el Anexo 8 se presentan las estaciones en las que se observó la tendencia.

Utilizando el índice de 7 días mínimo y el de caudal base, se determinó cual es el valor de caudal base para cada año, en base a esto, se graficó la tasa de ascenso y descenso con el valor obtenido del software, como se observa en la Figura 23, la estación TAM presenta en promedio una tasa de ascenso de 112.77 m<sup>3</sup>/s sobre el valor de caudal base, con un pico de 400 m<sup>3</sup>/s en el año 1985 y disminuyendo hasta el año 2012 con un valor de 220 m<sup>3</sup>/s, PVE

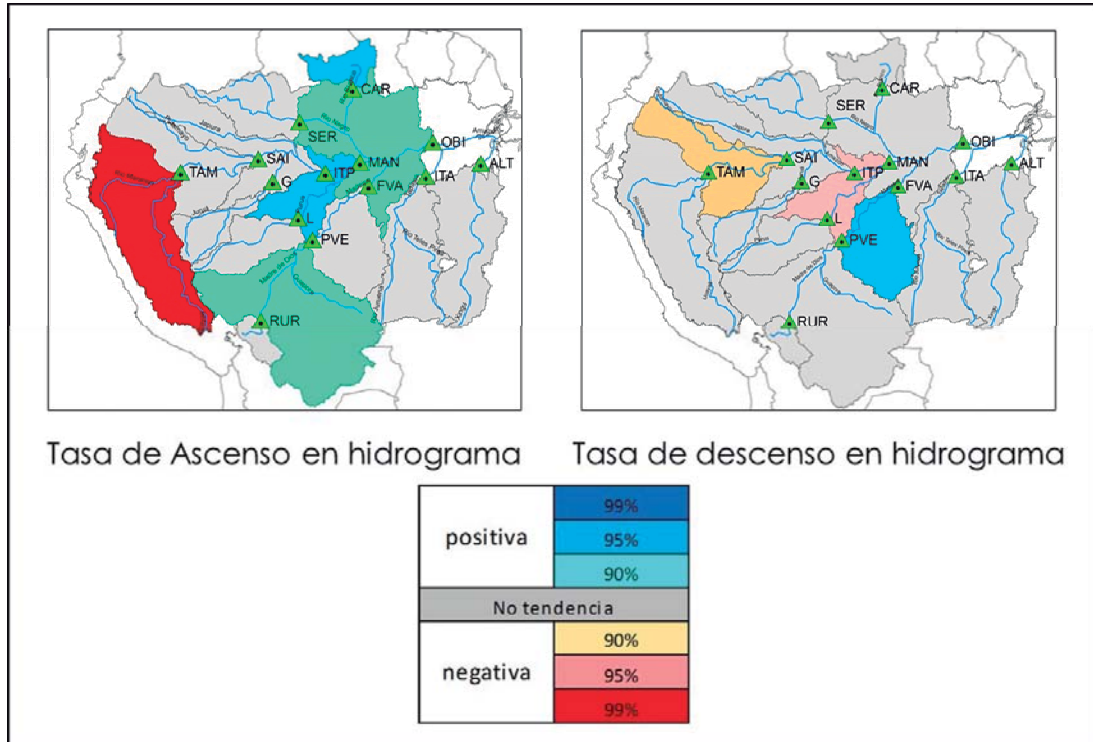
mostró una tendencia positiva en la tasa de ascenso a partir de 1996 con un caudal de 170 m<sup>3</sup>/s y hasta el final del periodo (2012) se incrementó en 295 m<sup>3</sup>/s, CAR presentó una tendencia positiva en la tasa de ascenso del hidrograma +1.18% al 95% de confianza, la menor tasa de ascenso se muestra en 1994 con un caudal de 44 m<sup>3</sup>/s incrementándose hasta 2012 con caudal de 219 m<sup>3</sup>/s.

MAN presentó tendencia en las dos tasas, se observó un promedio de ascenso de 409.43 m<sup>3</sup>/s, mostrando el pico más bajo en 1987 con 260 m<sup>3</sup>/s y para 2012 aumentó hasta 500 m<sup>3</sup>/s, la tasa de descenso para esa estación muestra que también se han disminuido desde 1981 (-300 m<sup>3</sup>/s) hasta 2012 (-930 m<sup>3</sup>/s) con un promedio de -583.46 m<sup>3</sup>/s. OBI presenta incremento en la tasa de ascenso de +0.44% por año, a pesar de que el caudal a los 7 días mínimo presenta disminución del -0.92% anual (Cuadro 12), esto se debe al incremento del caudal base de 0.53% anual (Cuadro 15), éste incremento se presentó a partir de 1982 donde se presentó una tasa de ascenso de 900 m<sup>3</sup>/s y presentando un máximo de ascenso en el año hidrológico 2009 – 2010 de 1000 m<sup>3</sup>/s.

La estación FVA mostró una tendencia positiva para el índice de tasa de descenso de +0.60% anual al 95% de confianza, la estación presenta en promedio una disminución de la tasa de descenso del hidrograma de 258 m<sup>3</sup>/s. SAI muestra un aumento del caudal en la tasa de disminución del hidrograma del +0.54% por año, las mayores tasas de descenso se presentaron en los años hidrológicos 1991 – 1992 con 575 m<sup>3</sup>/s a partir de ese año, el descenso disminuyó en promedio a 300 m<sup>3</sup>/s hasta 2007 y de 2008 a 2012 se incrementó nuevamente entre 440 y 590 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.9 Cálculo del régimen hidrológico a partir de las métricas IHA**

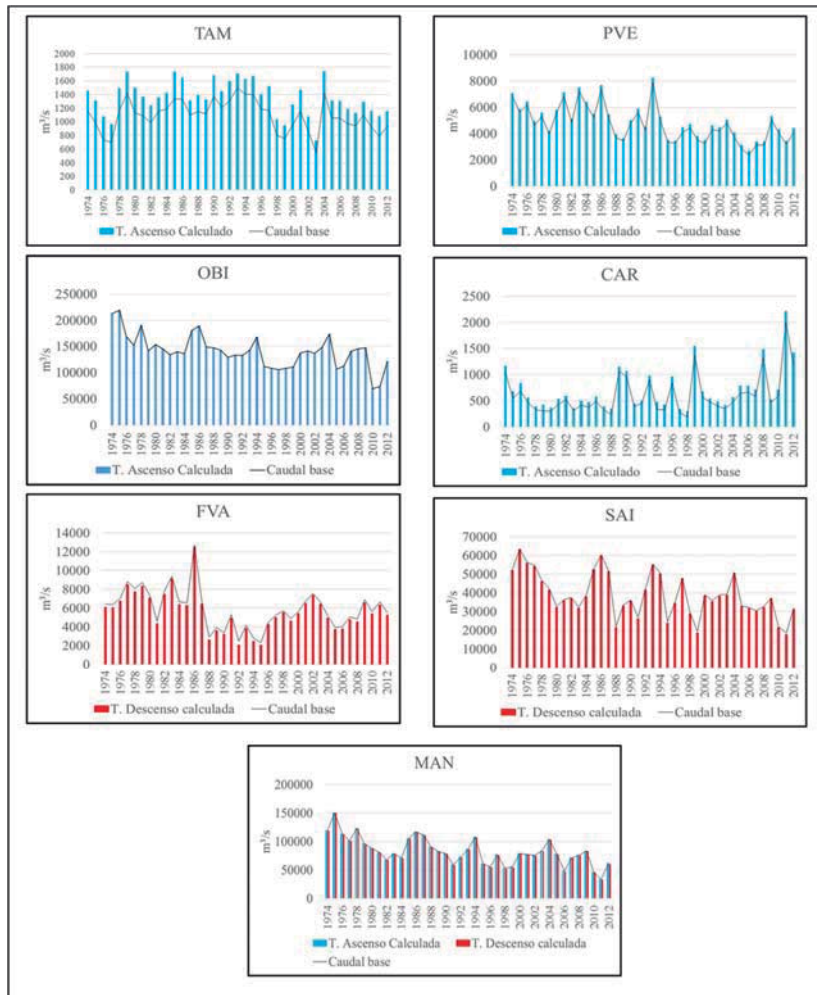
Utilizando el software IHA se calcularon los diferentes componentes del régimen hidrológico para las 14 estaciones de la Cuenca Amazónica: caudal bajo, caudal extremadamente bajo, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones, éste análisis se basa principalmente en la observación de los hidrogramas de los ríos, modelos hidrológicos ecológicamente relevantes que se repiten en el periodo analizado (Richter, *et al.* 1997).



**Figura 22. Tendencia la tasa de ascenso y descenso del hidrograma en la Cuenca Amazónica, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99%, en color gris no existe tendencia.**

El caudal base debe ser establecido en base a estudios técnicos realizados por la Autoridad Nacional competente, sin embargo, mientras no se disponga de éstos, se considerará caudal base al que permanece en la fuente más del 75% del año, este valor no garantiza la sostenibilidad del ecosistema, ni de los servicios ambientales que el río presta; éste análisis se basa en las curvas de duración de los caudales medios diarios (Anexo 9), determinando un caudal ambiental flexible dejando un amplio espacio para un análisis más profundo de las condiciones ambientales necesarios para mantener la biota de las aguas superficiales.

Como se detalló anteriormente, se utilizó el caudal mínimo de 7 días para el cálculo de caudal base, asumiéndose éste último como un porcentaje de aumento sobre el valor de caudal mínimo de 7 días y los 5 componentes del régimen hidrológico descritos. Los Anexos 10 al 25 resumen el análisis anterior, mostrando los periodos de extremos para todas las estaciones.

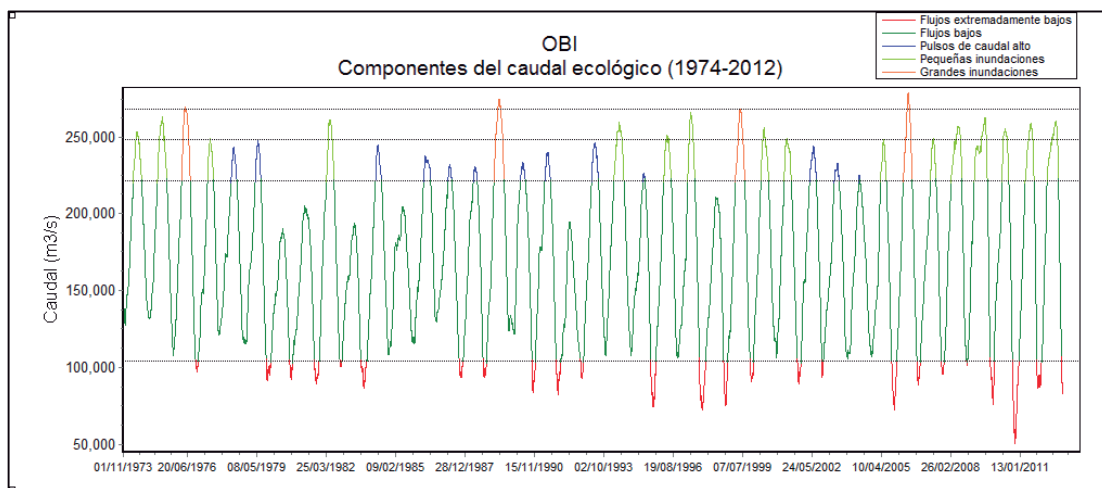


**Figura 23. Tasas de ascenso y descenso en el hidrograma para las estaciones en las que se observó tendencia positiva o negativa, la tasa de ascenso se presenta en color azul y la de descenso en rojo, la línea negra es el caudal base calculado con los índices de 7 días mínimo y de caudal base.**

La estación OBI (Figura 24) muestra un caudal base calculado entre 100 000 m<sup>3</sup>/s y 210 000 m<sup>3</sup>/s desde 1990 se observa un disminución de éste caudal considerado extremadamente bajo (menos de 100 000 m<sup>3</sup>/s) la mayor sequía se dio entre octubre de 2010 y enero de 2011 (50 000 m<sup>3</sup>/s), los caudales de pulso tuvieron mayor presencia entre 1984 y 1993 con caudales entre 210 000 y 240 000 m<sup>3</sup>/s, a partir de 2005 se observa también un incremento en el caudal de los años húmedos considerados como pequeñas inundaciones, superando los 250 000 m<sup>3</sup>/s, la mayor inundación en esta estación se observó entre noviembre de 2005 y enero de 2006 (mayor a 270 000 m<sup>3</sup>/s).

En el Anexo 10, se observa el cálculo de los componentes del régimen de caudal para la estación ALT, a partir de 1996 se presentan flujos por debajo del nivel del caudal base, las grandes inundaciones se presentaron en los años hidrológicos 1979 – 1980, 1981 – 1982 con caudal superior a 30 000 m<sup>3</sup>/s (color naranja), la gran inundación más reciente se presentó en 2003 – 2004 que también sobrepasó los 30 000 m<sup>3</sup>/s, como se observa, antes de una pequeña inundación, antecede uno o dos años de pulsos de caudal alto que superan los 20 000 m<sup>3</sup>/s.

En el Anexo 11, se observa el cálculo de los componentes del régimen de caudal para la estación TAM, el caudal medio es cercano a los 30 000 m<sup>3</sup>/s, se consideraron flujos extremadamente bajos más notorios a partir de 1995, presentándose el más bajo en 2010 – 2011, que fue menor a 10 000 m<sup>3</sup>/s, las grandes inundaciones se presentaron en 1985 – 1986, la más reciente en 2011 – 2012 superando los 55 000 m<sup>3</sup>/s, las pequeñas inundaciones son comunes en todo el periodo, se presentan con antecedentes de pulsos de caudal alto.



**Figura 24. Componentes del régimen hidrológico para la estación OBI, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 25 y 75 que determinan el valor de los extremos.**

En el Anexo 12, se observa el cálculo de los componentes del régimen hidrológico para la estación ITP, el caudal medio es cercano a los 80 000 m<sup>3</sup>/s, los flujos extremadamente

bajos se presentaron con mayor frecuencia y persistencia a partir de 1995 donde se observaron caudales inferiores a 55 000 m<sup>3</sup>/s, las pequeñas inundaciones fueron más frecuentes entre 1974 y 1979 y entre 1993 y 2003, las grandes inundaciones de 2006 y 2012 superaron los 120 000 m<sup>3</sup>/s, cuatro (4) pulsos de caudal alto fueron antecesores de la inundación de 2006 con caudal mayor a 100 000 m<sup>3</sup>/s.

La estación MAN presenta un caudal medio cercano a los 100 000 m<sup>3</sup>/s, en ésta estación se hacen evidentes los flujos extremadamente bajos a partir de 1979 con caudales entre 60 000 m<sup>3</sup>/s y 40 000 m<sup>3</sup>/s, el caudal más bajo se presentó en 2010 llegando a 22 000 m<sup>3</sup>/s y lo antecedió y siguió un año de pulsos altos cercanos a 130 000 m<sup>3</sup>/s, las grandes inundaciones se presentaron a partir de 1993 y la más grande se presentó en 2012 con un caudal cercano a los 160 000 m<sup>3</sup>/s, entre 1974 y 1977 se presentaron pequeñas inundaciones con caudales que superan los 140 000 m<sup>3</sup>/s (Anexo 13).

En el Anexo 14, se muestran los componentes del régimen hidrológico de la estación SER, los caudales extremadamente bajos se presentan durante todo el periodo, mostrando una mayor persistencia en los años hidrológicos 1991 – 1992, 1994 – 1995, 1997 – 1998, para el año 2005 – 2006 se presentó una sequía considerable con caudal menor a 4 500 m<sup>3</sup>/s, la más fuerte sequía documentada se observó en 2009 – 2010 (septiembre – marzo) durante todo el año el caudal estuvo entre 7 000 m<sup>3</sup>/s y 5 000 m<sup>3</sup>/s (Anexo 15).

La estación CAR, presenta una alta variabilidad interanual como se observa en el Anexo 16, con presencia de caudales altos en casi todo el periodo, se considera un caudal ambiental entre los 1 000 y 4 100 m<sup>3</sup>/s, pequeñas inundaciones con poca presencia y pulsos de caudal alto durante todo el periodo, el caudal extremadamente bajo (menos a 1 000 m<sup>3</sup>/s) se presentó entre 1974 y 1987 después de un año con pulso alto, entre 1987 y 1992 hubo un incremento del caudal base y se presentaron pequeñas inundaciones con caudal superior a 10 000 m<sup>3</sup>/s, a partir de 2 004 solo se presentó en el año 2 010 un caudal considerado como extremadamente bajo y dos grandes inundaciones una en 2006 con caudal superior a 13 000 m<sup>3</sup>/s y la mayor inundación en el 2012 (abril – julio) superior a 16 000 m<sup>3</sup>/s (Anexo 17).

En el Anexo 18 se presentan los componentes del régimen hidrológico de la estación RUR en la que se observa una alta variabilidad interanual, ésta estación está ubicada en el extremo sur de la Cuenca Amazónica (Río Beni), se consideraron flujos altos a partir de los 2500 m<sup>3</sup>/s mostrando que en su mayoría se presentaron pulsos de caudal alto con pequeñas inundaciones más notorias a partir de 1996, también se observó desde ese año grandes inundaciones en 1998 – 1999 (mayo a junio) con 22 000 m<sup>3</sup>/s, 2000 – 2001 (noviembre – enero) de 17 000 m<sup>3</sup>/s y 2010 – 2011 (abril – julio) 20 000 m<sup>3</sup>/s, los flujos extremadamente bajos se presentaron en los meses de agosto, de todo el periodo, pero se incrementaron a partir de 2007 con ocurrencias entre julio y septiembre (Anexo 19).

La estación PVE (Anexo 20) muestra un caudal base entre 7500 y 29 000 m<sup>3</sup>/s, se observa un incremento de los flujos extremadamente bajos a partir de 1994, presentándose la mayor sequía en 2005 con un caudal menor a 2 000 m<sup>3</sup>/s alternándose éstos caudales bajos con pulsos altos (hasta 38 000 m<sup>3</sup>/s) y pequeñas inundaciones (hasta 47 000 m<sup>3</sup>/s), las grandes inundaciones en ésta estación se consideraron a partir de los 45 000 m<sup>3</sup>/s, presentándose la mayor entre diciembre de 1 996 y febrero de 1 997.

En el Anexo 21, se observan los componentes de régimen hidrológico de la estación FVA, considerando el caudal base entre 7 500 y 45 000 m<sup>3</sup>/s, se muestra un incremento de las sequías a partir de 1997 siendo la mayor entre diciembre de 1993 y abril de 1994 con un caudal inferior a 5 000 m<sup>3</sup>/s, estas se alternan con años húmedos principalmente con pulsos altos menores a 56 000 m<sup>3</sup>/s, las pequeñas inundaciones fueron más comunes entre 1973 y 1979 haciendo referencia al shift de humedad de los años setenta con caudales superiores a 56 000 m<sup>3</sup>/s, las grandes inundaciones se presentaron entre 1982 y 1987, siendo ésta última la mayor con caudal superior a 70 000 m<sup>3</sup>/s.

El régimen hidrológico de la estación ITA (Anexo 22), donde se consideró el caudal base entre 5 000 y 18 000 m<sup>3</sup>/s, los flujos extremadamente bajos se incrementaron a partir de 1986 en 2010 se presentó un caudal inferior a 4 000 m<sup>3</sup>/s entre septiembre y noviembre, 2012 (abril) fue mucho más seco con un caudal inferior a 2 000 m<sup>3</sup>/s, los pulsos de caudal alto fueron más frecuentes entre 1 990 y 1996 con caudales inferiores a 25 000 m<sup>3</sup>/s, se observaron pequeñas inundaciones más frecuentes a partir de 2 003 (mayores a 25 000



m<sup>3</sup>/s) y grandes inundaciones en 1977, 1979, 1990, siendo la mayor la de noviembre de 2003 – enero de 2004.

El caudal base para la estación SAI (Anexo 23) se consideró entre 30 000 y 70 000 m<sup>3</sup>/s, las mayores sequías se presentaron a partir de 1987 con un caudal inferior a 30 000 m<sup>3</sup>/s, siendo las dos más grandes la de 1998 (agosto – diciembre) con un caudal de 15 000 m<sup>3</sup>/s y la de 2010 (agosto - diciembre) con un caudal de 8 000 m<sup>3</sup>/s, las pequeñas inundaciones fueron más frecuentes entre 1993 y 2003 (periodo en el que los flujos extremadamente bajos también fueron más frecuentes), con caudal superior a 80 000 m<sup>3</sup>/s, entre 2007 y 2012 se observaron tres grandes inundaciones con caudal superior a 86 000 m<sup>3</sup>/s siendo la mayor la de 2012 (marzo – junio) con un caudal de 90 000 m<sup>3</sup>/s.

En la estación G (Anexo 24) se estableció el caudal base entre 1000 y 8000 m<sup>3</sup>/s, los años secos (flujos extremadamente bajos) presentaron un caudal menos a 1 000 y desde 2005, éstos años secos disminuyeron su caudal hasta 500 m<sup>3</sup>/s, siendo 2005 (julio – noviembre) el año más seco seguido de 2010 y 2006 con 600 y 650 m<sup>3</sup>/s respectivamente, los pulsos altos se consideraron entre 7 500 y 9 000 m<sup>3</sup>/s, las pequeñas inundaciones con caudal superior a 9 000 m<sup>3</sup>/s y las grandes inundaciones superiores a 10 000 m<sup>3</sup>/s, presentándose cuatro (4) 1986 (10 500 m<sup>3</sup>/s), 1992 (10 100 m<sup>3</sup>/s), 1997 (10 000 m<sup>3</sup>/s) y 2008 (10 000 m<sup>3</sup>/s).

El Anexo 25 presenta los componentes del régimen hidrológico para la estación L, donde se observa que el caudal base oscila entre 1 700 y 10 000 m<sup>3</sup>/s, los flujos extremadamente bajos se presentan durante casi todo el periodo con un caudal menor a 1500 m<sup>3</sup>/s, los pulsos de caudal alto se observaron entre 10 000 y 11 200 m<sup>3</sup>/s, las pequeñas inundaciones superiores a 11 300 m<sup>3</sup>/s, las grandes inundaciones se consideraron a caudales que alcanzaron valores mayores a 11 600 m<sup>3</sup>/s siendo el caso de 1973 (11 650 m<sup>3</sup>/s), 1975 (12 000 m<sup>3</sup>/s), 1997 (13 200 m<sup>3</sup>/s) y 2012 (12 500 m<sup>3</sup>/s).

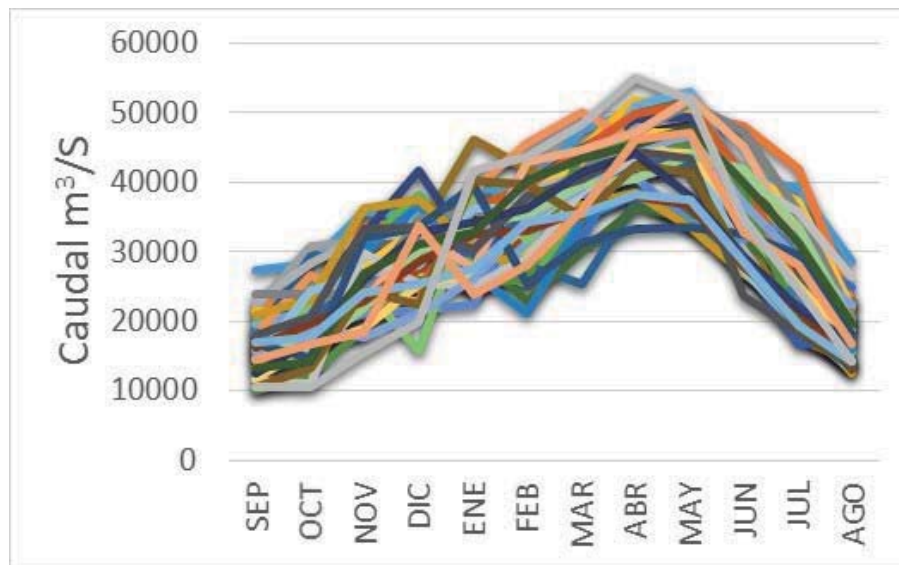
#### **4.10. Alteración hidrológica en la Amazonía Peruana (Tamshiyacu - TAM).**

Tamshiyacu (TAM) es la primera estación de aforo aguas arriba del Amazonas (Figura 1), se ubica en la confluencia del río Ucayali y Marañón (-4.00 Latitud sur y -73.16 Longitud



Oeste), con un área aproximada de 726400 km<sup>2</sup>, el caudal medio es de 30 731 m<sup>3</sup>/s (Cuadro 2) aproximadamente el 17.1% del caudal del Río Amazonas en la estación de Obidos (OBI), similar a lo encontrado en Espinoza *et al.*, 2009a. TAM presentó una disminución del Qmin de -4.58% con respecto al estudio realizado entre 1974 y 2004 (Espinoza *et al.*, 2009a), disminución del Qmed de -3.15% y con respecto al Qmax, una disminución de -1.75% (Cuadro 4).

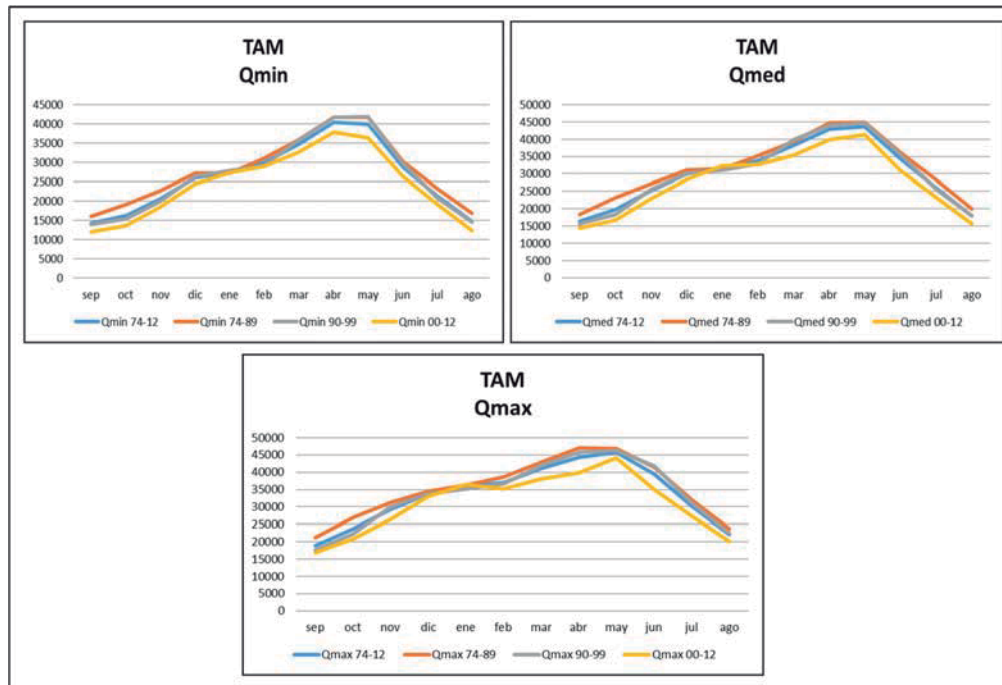
La variabilidad interanual es baja (0.24) en el Qmin, el Qmed (0.10) y el Qmax (0.11) (Cuadro 5), similar a las estaciones SER, SAI, G, L y OBI, presenta una disminución del caudal entre junio y septiembre (Figura 5D), el sVC es bajo (0.35) (Figura 25), presentando un ciclo estacional menos marcado que en las regiones tropicales, similar a la estacionalidad de las precipitaciones (Marengo *et al.*, 2008; Espinoza *et al.*, 2009a; Espinoza *et al.*, 2009b; Marengo *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2013; Satyamurty *et al.*, 2013). En la Figura 7, se puede observar que TAM tiene una relación similar entre la sVC y la iVC del Qmed que las estaciones ITP, SAI, MAN, SER y OBI, debido a que presentan una débil estacionalidad y una baja variabilidad estacional.



**Figura 25. Evolución del hidrograma anual para el periodo 1974 - 2012 de la estación TAM, mostrando la baja variabilidad estacional (sVC).**

En el análisis de la evolución estacional del caudal, se utilizaron los valores anuales del Qmin, Qmed y Qmax (Figura 8), la determinación de los cambios en la serie se realizó en

tres periodos: 1974 – 1989, 1990 – 1999 y 2000 – 2012, encontrando que para el Qmin, Qmed y Qmax se presentó una disminución del caudal para todos los periodos analizados, cercano al -0.01, a diferencia de lo encontrado en el análisis anual (Cuadro 6), en el que se encontró que el Qmed disminuyó en el primero (-0.09%), aumentó 0.07% en el segundo y en la última década se mantuvo, en el Qmax disminuyó en el primer periodo (-0.05%) y aumentó en el segundo y tercero (0.15% y 0.05% respectivamente) (Figura 26).



**Figura 26. Cambios en el hidrograma para los periodos 1974 – 1989, 1990 – 1999, 2000 – 2012 y 1974 – 2012.**

La serie fue analizada para estimar la tendencia positiva o negativa utilizando la regresión lineal y la Fórmula 1 propuesta en Espinoza *et al.*, 2009a (Cuadro 9), el índice de tendencia calculado, mostró una disminución del Qmin (-1.51), del Qmed (-0.44) y del Qmax (-0.20), la amplitud se calculó para determinar la relación entre el Qmax y el Qmin, encontrando que TAM presenta una amplitud de 0.47 incrementándose en +0.13 en comparación con otros estudios (Espinoza *et al.*, 2009a), esto se debe a que el Qmin disminuye significativamente en comparación al Qmax (-1.51 y -0.20 respectivamente), para tener un resultado más robusto de la tendencia, se utilizó la prueba no paramétrica de MKm (Gao *et al.*, 2012), debido a que algunos autores (Kundzewicz, 2004; Aziz & Burn, 2006) afirman

que se hace necesaria la aplicación de distintos métodos para corregir los datos debido a su autocorrelación o la correlación serial (preblanqueo libre de tendencia) así como para considerar la estructura de autocorrelación cruzada de los datos en algunos casos (Yue *et al.*, 2002; Svensson *et al.*, 2004).

Como se observa en la Cuadro 10 y la Figura 12, la estación TAM presenta una disminución del caudal con significancia del 95% en el  $Q_{min}$  y el  $Q_{med}$  que para el periodo 1974 – 2004 (Espinoza *et al.*, 2009a) se encontró una tendencia negativa al 99% de confianza. TAM en el  $Q_{max}$  no presentó tendencia igual que para el periodo 1974 – 2004.

#### **4.10.1. Índices de Alteración Hidrológica (IHA) en la Amazonía Peruana (TAM)**

Como se observa en el Cuadro 11, con respecto a los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimo, TAM presentó los valores más bajos en el año 2011, haciendo parte éstos valores del año hidrológico 2010 – 2011, estos valores se presentaron en los meses de septiembre a diciembre de 2010, es por esto que los valores más bajos, se pueden comparar con estudios realizados sobre sequías extremas en el amazonas como el de Espinoza *et al.* (2011), en el que se concluyó que estas sequías pudieron estar relacionadas a las ocurrencias sucesivas de un moderado El Niño en el verano austral.

El Cuadro 12 Anexo 2, muestran que en general para el periodo evaluado, hay una disminución del caudal para los cuatro índices con un 99% de confianza (-1.45, -1.41, -1.27 y -1.03 respectivamente), de acuerdo a Espinoza *et al.*, 2011, la disminución de los caudales para 2010, se debe a las anomalías negativas débiles en el verano (con excepción de diciembre) y en el otoño, y caudales muy bajos de mayo a septiembre (8363 m<sup>3</sup>/s en septiembre), que representa una anomalía del -51% del caudal medio histórico de septiembre.

En el Cuadro 16, se presenta en porcentaje el valor mínimo de los índices en comparación con el valor promedio para TAM, encontrándose que en general, hay una disminución de caudal cercano al -38% para el año hidrológico 2010 -2011.

En los índices 3, 7, 30 y 90 días máximos anuales, TAM presenta los valores máximos para el año hidrológico 2011 – 2012 en los meses de febrero a abril, es por esto que es posible comparar los resultados obtenidos con estudios recientes sobre inundaciones en la Cuenca amazónica como el de Satyamurty *et al.* (2013), en el que se concluyó que la precipitación sobre el continente cálido y rodeado de aguas drías en el Pacífico Ecuatorial y el Atlántico Sur Tropical, ayudado por una mayor convergencia de la humedad, se ha incrementado, lo que resulta en mayores inundaciones.

Cuadro 16: Porcentaje de anomalías del caudal medio histórico con respecto al valor mínimo de caudal para los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimo.

Estación	3-días mínimo				7-días mínimo			
	Min	Año	Prom	% anomalía	Min	Año	Prom	% anomalía
TAM	8363	2011	13432	-37.7	8449	2011	13758	-38.6
	30-días mínimo				90-días mínimo			
	Min	Año	Prom	% anomalía	Min	Año	Prom	% anomalía
TAM	9899	2011	15615	-36.6	11730	2011	20291	-42.2

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al Cuadro 14 y el Anexo 3, se puede afirmar que la estación TAM presenta tendencias negativas no significativas alrededor del -0.19% para todos los índices. En el cuadro 17, se observa que para los cuatro índices, hay un incremento en la anomalía cercana al 18%, que como afirma Marengo *et al.* (2013), las inundaciones son parte de la variabilidad natural del clima en ésta región que, en los últimos 10 años se ha enfrentado a las más intensas sequías e inundaciones en la historia reciente.

Cuadro 17: Porcentaje de anomalías del caudal medio histórico con respecto al valor máximo de caudal para los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo.

Estación	3-días máximo				7-días máximo			
	Max	Año	Prom	% anomalía	Max	Año	Prom	% anomalía
TAM	55380	2012	46883	-18.12	55300	2012	46803	-18.16
	30-días máximo				90-días máximo			
	Max	Año	Prom	% anomalía	Max	Año	Prom	% anomalía
TAM	54870	2012	46135	-18.93	51160	2012	43304	-18.14

Fuente: elaboración propia.

El caudal base se calculó utilizando el flujo anual de 7 días mínimo dividido por el caudal medio anual de la serie hidrológica (Cuadro 15), TAM presentó una reducción del caudal base de -0.99%, que puede afectar a las comunidades bióticas existentes ya adaptadas al clima (composición y abundancia) (Lake, 2003).

Los valores máximos y mínimos promedio por año para TAM, se calcularon utilizando las fechas julianas de caudal máximo y mínimo para cada año hidrológico, si éste presentó múltiples días en el mismo año y con el mismo valor de caudal, se registró la fecha más temprana. En el Cuadro 19, se observa que TAM no presenta tendencia.

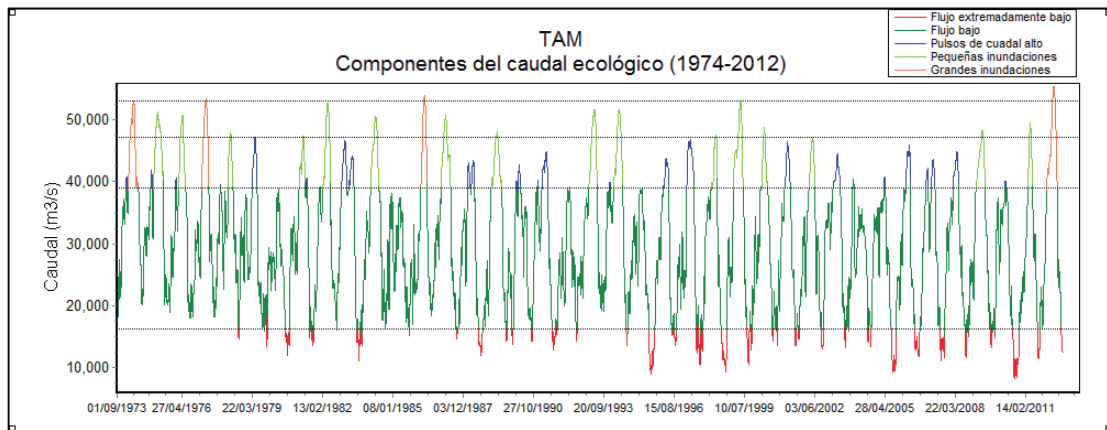
El número de pulsos altos por año se calculó en base a la mediana más el 25% (percentil 75), los periodos de días que se encuentran en el mismo tipo de pulso se cuentan como distintos eventos y los compartidos por dos años hidrológicos se cuentan solamente en el año hidrológico que empiezan y la duración de éstos eventos incluye la parte que ocurren en el año hidrológico siguiente.

En el Anexo 7, se observa que en el índice de número de pulsos altos en TAM tiene una tendencia negativa de -1.7%, en la Figura 20, se presenta una gráfica de la estación donde se observa una tendencia negativa que muestra que la frecuencia de los pulsos es de uno (1) en casi todos los años, éstos pulsos presentan una duración entre 70 y 159 días, las frecuencias altas (tres pulsos) tienen una duración corta entre 3 y 15 días, en 2006, 2009 y 2012 [inundaciones documentas por Espinoza *et al.* (2009 y 2013); Satyamurty *et al.* (2013); Marengo *et al.* (2012 y 2013)], se observa que la duración del pulso en cada año fue superior a los 100 días en cada uno.

La tasa de ascenso y descenso del hidrograma representa la mediana de todas las diferencias positivas y negativas respectivamente entre los valores diarios consecutivos, expresado en m<sup>3</sup>/s. En la tasa de ascenso del hidrograma, TAM presentó una disminución significativa al 90% de confianza de -0.83% anual. Utilizando el índice de 7 días mínimo y el de caudal base, se determinó cual es el valor de caudal base para cada año, en base a esto, se graficó la tasa de ascenso y descenso con el valor obtenido del software, como se observa en la Figura 16 la estación TAM presenta en promedio una tasa de ascenso de

112.77 m<sup>3</sup>/s sobre el valor de caudal base, con un pico de 400 m<sup>3</sup>/s en el año 1985 y disminuyendo hasta el año 2012 con un valor de 220 m<sup>3</sup>/s.

Finalmente se calculó el régimen hidrológico a partir de las métricas IHA, basado principalmente en la observación de los hidrogramas de los ríos, que son ecológicamente relevantes y se repiten en el periodo analizado (Richter, *et al.*, 1997). En la Figura 27, se observa que el caudal medio es cercano a los 30 000 m<sup>3</sup>/s, se consideraron flujos extremadamente bajos los que fueron menores a 17 000 m<sup>3</sup>/s que se presentaron durante todo el periodo evaluado, pero con una mayor incidencia a partir de 1995, presentándose el más bajo en el año hidrológico 2010 - 2011 (inferior a 10 000 m<sup>3</sup>/s), las grandes inundaciones se presentaron en 1973 - 1974, 1976 - 1977, 1985 - 1986 con caudal mayor a éstas inundaciones tienen un caudal mayor a 50 000 m<sup>3</sup>/s y el más reciente 2011 - 2012 (mayor a 55 000 m<sup>3</sup>/s) las pequeñas inundaciones son comunes en todo el periodo, se presentan con antecedentes de pulsos de caudal alto (Figura 27).



**Figura 27. Componentes del régimen hidrológico para TAM (1974 - 2012)**

## V. CONCLUSIONES

- Comparando el análisis de tendencia anual de 1974 – 2004 y 1974 – 2012, se observan una intensificación en las tendencias negativas para el caudal mínimo ( $Q_{min}$ ), principalmente en las estaciones centrales y del suroeste de los ríos Amazonas-Solimões (TAM, ITP) y Madeira (PVE) que están influenciadas por las cuencas andinas. Esta disminución fue mayor, debido al acontecimiento de sequías extremas de los últimos años, como las presentadas en 2005 y 2010. Estas fuertes sequías impactaron principalmente la región central y sur de la cuenca amazónica (Marengo *et al.*, 2008; 2011; Espinoza *et al* 2011).
- Se observaron cambios en la media de las series diarias de caudal mínimo ( $Q_{min}$ ) en el río Xingu (ALT) en el año 1997 con una disminución del 21% a partir de ésta fecha. En el río Solimões (SAI) también se observó el cambio en la media de la serie a partir del año 1987 con disminución del 23% hasta 2012. En el río Madeira (PVE) se presentó un cambio en el año 1995 con disminución del 32% hasta 2012. Igualmente sobre el río Madeira en la estación FVA, se presentó un cambio en la media en el caudal medio ( $Q_{med}$ ) para el año 1989, con disminución del 13% hasta 2012.
- La disminución de los valores extremos mínimos y el aumento de los valores de caudal máximo estimados con los Índices de Alteración Hidrológica (IHA) de 3, 7, 30 y 90 días, muestran que el análisis de variables más específicas sobre el comportamiento del caudal, contribuyen a analizar de manera más detallada las series con información diaria.
- La magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales mínimas (3, 7, 30 y 90 días) mostraron disminución (99% de confianza) del caudal en toda la cuenca amazónica, valores coincidentes con los encontrados para el año 2005 en las estaciones de los ríos Juruá (G) y Madeira (PVE) entre los meses de septiembre y octubre para el análisis diario y mensual (3, 7 y 30 días) y entre septiembre y

diciembre para el análisis estacional de 90 días. Igualmente, en el año 2010, se observó una fuerte disminución del caudal para las estaciones centrales sobre el río Amazonas (TAM, SAI, ITP, MAN y OBI) entre los meses de septiembre y noviembre considerando los valores extremos de caudales durante 3, 7 y 30 días y entre septiembre y diciembre para los 90 días de análisis.

- El análisis de la magnitud y duración de las condiciones hidrológicas de máximos anuales (3, 7, 30 y 90 días) mostraron un incremento en los caudales para las estaciones SAI sobre el río Solimões, MAN sobre el Amazonas, estaciones que hacen parte de las cuencas centrales de la cuenca amazónica, que presentaron sus valores máximos en el año 2012, año de inundación documentada por diferentes autores (Espinoza *et al*, 2013, Satyamurty *et al*, 2013, Marengo *et al*, 2013) que asociaron éstos incrementos del caudal a condiciones más frías de lo normal en el pacífico ecuatorial central.
- El caudal extremadamente bajo (inferior al percentil 10) en todas las estaciones, se presentó con mayor frecuencia y duración a partir de los años noventa, con un promedio de 25 eventos hasta 2012, siendo la estación TAM la que presentó una mayor presencia de éstos eventos para un total de 32.
- El análisis estacional (90 días) para los eventos extremos extraordinarios tanto inundaciones como sequías, mostró que éstos eventos tuvieron una duración mayor a 90 días inferior al percentil 10 y superior al percentil 90. En las estaciones ITP sobre el río Amazonas – Solimões y MAN sobre el Amazonas, presentaron periodos de duración mayor a 120 días en los años 1992, 1998, 2001, 2005 y 2010 en condiciones de extremos mínimos. En la estación G sobre el río Juruá, se observó un aumento en la duración de los eventos de caudal máximo (superiores al percentil 75), superando los 110 días en los 1994, 1999, 2002, 2003 y 2009. En las estaciones PVE y FVA sobre el río Madeira, se observó que, aunque los valores de caudal máximo superan los 90 días, la tendencia de duración disminuyó a partir de los años noventa llegando a un máximo de duración de 100 días para los años 1993, 2001 y 2005. Para el año 2010 (marzo y abril) en FVA, se presentaron cuatro eventos de caudal alto con una duración de 15 días cada uno y para PVE, dos eventos con duración de 50 días cada uno.
- A partir del año 2004 se observó una mayor presencia de eventos extremos de caudal alto (superiores al percentil 80), principalmente en las estaciones centrales, con una mayor incidencia en la estación de OBI.



## VI. PERSPECTIVAS

Se presentan a continuación algunas perspectivas para futuras investigaciones y desarrollo de estudios afines:

- Se considera necesario actualizar este análisis con los años 2013 al 2015, debido a que se presentaron inundaciones excepcionales en el año 2014 desde mediados de enero con precipitaciones en la región entre el 80 y 100% por encima de lo normal con respecto al periodo 1970 – 2013 en los Andes (Espinoza *et al.*, 2014).
- Es de gran importancia que estos índices sean complementados con variables climáticas que permiten determinar el origen de cada uno de los eventos registrados en la serie, tal como lo propuesto en Espinoza *et al.*, 2010, 2012, 2014; Marengo *et al.*, 2011, 2012, 2013; Satyamurty *et al.*, 2013; Pinho *et al.*, 2014.
- El análisis de las métricas IHA debe ser complementado con mapas de vegetación, temperatura, patrones de precipitación, variables hidrobiológicas (riquezas de especies) que permitan determinar si el grado de alteración ha modificado la biota de los ríos amazónicos.
- Las periodos secos por bajas precipitaciones y caudales, pueden dificultar la facultad de los bosques amazónicos de absorber el dióxido de carbono de la atmósfera y un incremento en la reducción de la población forestal, lo que conlleva a realizar un análisis de las tendencias de los extremos con las métricas IHA y complementarlo con estudios de vulnerabilidad de los bosques (Brienen *et al.*, 2015), las tasas de fijación de carbono y un análisis de la evapotranspiración e incremento de incendios que son el gran factor de la conversión de las selvas en sabanas (proceso de sabanización).

- El incremento de las sequías, han mostrado la vulnerabilidad de las comunidades asentadas a lo largo de los ríos amazónicos con respecto al abastecimiento hídrico, la pesca y el transporte fluvial, trayendo como consecuencias importantes impactos económicos y sociales, lo que permite complementar este estudio con el transporte de sedimentos y la viabilidad de los proyectos de construcción de muelles sobre los ríos amazónicos. La Sequía del año 2010 llevó a declarar el estado de emergencia pública en algunas ciudades amazónicas (amazonía peruana) debido a problemas en el transporte fluvial desde y hacia centros urbanos y mercados, las lanchas de abastecimiento tomaron el doble de días en su recorrido (en algunos casos más de 30 días), generando un incremento de hasta el 100% en los costos de alimentos y productos de primera necesidad (BBC 2010).
- El análisis de las métricas IHA mostraría una mejor representación de la alteración hidrológica si se determina el grado de intervención antrópica de las cuencas analizadas para mejorar los resultados obtenidos, como por ejemplo el establecimiento y proyección de presas, sistemas de riego, deforestación, entre otros, como lo muestra la RAISG en el año 2012.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agualimpia, Y. & Castro, C. 2006. Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. *Tecnogestión una mirada al ambiente* Vol 3, N°. 1 (2006)

Arnel, N. 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change* 9, 5 – 23.

Arthington, A.; Naiman, R.; McClain, M. & Nilsson, C. 2009. Preserving the biodiversity and ecological service of rivers: new challenges and research opportunities. *Freshwater Biology* 10 1365 – 2427.

Aziz, O. & Burn, D. 2006. Trends and variability in the hydrological regime of Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, 319: 282-294.

Beran, M. & Rodier, J. 1985. Hydrological aspects of drought. In: UNESCO-WMO Studies and Reports in Hydrology 39:149 pp.

Boulton, A. 2003. Parellels and contrasts in the effects of drought on stream macroinvertebrate assemblages. *Freshwater Biology* 48, 1173 – 1185.

Brabets, T. & Walvoord, M. 2009. Trends in streamflow in the Yukon River Basin from 1944 to 2005 and the influence of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Hydrology* 371: 108 – 119.

Brienen, R.; Phillips, L.; Feldepausch, T., Gloor, E.; Baker, T.; Lloyd, J.; Lopez-Gonzalez, G.; Monteagudo-Mendoza, A.; Malhi, Y.; Lewis, S.; Vasquez, R.; Alexiades, M.; Álvarez, E.; Alvarez-Loayza, P.; Andrade, A.; Aragao, L.; Araujo-Murakami, A, Arets, E.; Arroyo, L.; Aymard, G.; Bánki, O.; Baraloto, C.; Barroso, J.; Bonal, D.; Boot, A. *et al.* 2015. Long – term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519, 344 – 348.

Buishand, T. 1982. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology* 58, 51–69.

Bunn, S. & Arthington, A. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* Vol 30. No 4, pp. 492 – 507.

Bustamante, C.; Monsalve, E. & García, P. 2007. Los caudales Ecológicos: Herramienta fundamental en la gestión integral de las fuentes hídricas del Quindío. *Revista Investigaciones* No 17 – Universidad del Quindío pp 205 – 221.

Cachón de Mesa, J. 2008. Los regímenes de caudales con fines ambientales. Herramienta básica en la gestión y mejora del medio ambiente. I Congreso de ingeniería Civil, Territorio y Medio ambiente. Pag 311 – 323.

Coe, M.; Costa, M. & Soares-Filho, B. 2009. The Influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River—land Surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* 369, 165–174.

Cochner, T. & White, R. 1975. Stream resource maintenance flow studies. A cooperative study by Idaho Department of Fish and Game and Idaho Cooperative Fishery Research Unit, funded by Idaho Department of Water Resources. 36p.

Cochner, T. 1983. Abundance, distribution, growth and management of white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) in the middle Snake River, Idaho. Doctoral dissertation. University of Idaho, Moscow, Idaho.

Davidson, E.; De Araújo, A.; Artaxo, P.; Balach, J.; Foster, I.; Bustamante, M.; Coe, M.; DeFries, R.; Keller, M.; Longo, M.; Munguer, W.; Schroeder, W.; Seares-Filho, B.; Souza, C. & Wofsy, S. The Amazon basin in transition. 2012. *Nature*, Vol 481. 321 – 328.

Espinoza, J.; Guyot, J.; Ronchail, J.; Cochonneau, G.; Filizola, N.; Fraizy, P.; Labat, D.; de Olivera, E.; Ordoñez, J.J. & Vauchel, P. 2009a. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974 – 2004) *Journal of Hydrology* 375 (2009) 297 – 311.

Espinoza, J.; Ronchail, J.; Guyot, J.; Cochonneau, G.; Naziano, F.; Lavado, W.; De Olivera, E. & POMBOSA, R. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon Basin countries (Brazil, Perú, Bolivia, Colombia and Ecuador). 2009b. *Int. J. Climatol.* 29: 1574 – 1594 (2009).

Espinoza, J.; Ronchail, J.; Guyot, J.; Junquas, C.; Vauchel, P.; Lavado, W.; Drapeau, G. & Pombosa, R. 2011. Climate variability and extreme drought in the upper Solimoes River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*. 13p.

Espinoza, J.; Ronchail, J.; Guyot, J.; Junquas, C.; Drapeau, G.; Martinez, J.; Santini, W.; Vauchel, P.; Lavado, W.; Ordoñez, J. & Espinoza, R. 2012. From drought to flooding: understanding the abrupt 2010 – 11 hydrological annual cycle in the Amazon River and tributaries. *Environmental Research Letters* 7 (2012) 7p.

Espinoza, J.; Ronchail, J.; Frappart, F.; Lavado, W.; Santini, W. & Guyot, J. 2013. The major floods in the Amazon River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970 – 2012 period: A focus in the 2012 flood. *J. Hydrometeorol.* 14, 1000 – 1008.

Espinoza, J.; Marengo, J.; Ronchail, J.; Molina, J.; Noriega, L. & Guyot, J. 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical – subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters* 9 (2014) 124007 (9pp).

Fernández, J. & Martínez, C. 2011. Indicadores de alteración hidrológica para la designación de las masas de agua muy modificadas, aplicación en la demarcación hidrográfica del Tajo. VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. 8p.

Gao, B.; Yang, D.; Zhao, T. & Yang, H. 2012. Changes in the eco – flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology* 448 – 449 (2012) 30 – 38.

Gloor, M.; Brienen, J.; Galbraith, D.; Feldpausch, T.; Schöngart, J.; Guyot, J.; Espinoza J. C.; Lloyd, J. & Phillips, O. 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, 1729 – 1733.

Hart, D. & Finelli, C. 1999. Physical – Biological Coupling in streams: The pervasive effects of flow on Benthic Organism. *Annu. Rev. Ecol. Syst* 1999. 30: 363 – 95.

Harvey, C.; Harry, D. & Hannaford, J. 2012. An appraisal of the performance of data-infilling methods for application to daily mean river flow records in the UK. *Hydrology Research*, 43 (5). 618-636.

Hoppe, R.A. 1975. Minimum stream flow for fish. En: Gordon, N.D., McMahon, T.A., Finlayson, B.L. 1992. *Stream hidrology. An introduction for ecologist.* Jhon Wiley & Sons. Chichester (UK).

Hubert, P.; Carbonnel, J. & Chaouche, A. 1989. Segmentation des series hydrometeorologiques. Application a des series de precipitations et de debits de l’Afrique de l’Ouest. *Journal of Hydrology* 110, 349–367.

Jowett, I. & Duncan, M. 1990. Flow variability in New Zealand Rivers and its relationship to in-stream habitat and biota. *New Zealand Journal of marine and Freshwater Research* Vol 24: 305 – 317.

Kundzewics, Z. & Robson, A. 2004. Setting the scene. In: *Detecting trend and other changes in hydrological data* (Eds Kundzewicz, Z & Robson, A.). World Meteorological Organization. World Climate Programme – Water. WCDMP-45. WMO/TD-No. 1013: 1-5.

Lake, P. 2003. Ecological effects of perturbation by drought in flow waters. *Freshwater Research* (2003) 48, 1161 – 1172.

Lee, A. & Heghinian, S. 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables – a bayesian approach. *Technometrics* 19, 503–511.

Lewis, S.; Brando, P.; Phillips, O; van der Heijden, G. & Nepstad, D. The 2010 Amazon drought. *Science*. Vol 331 No. 6017 p. 554

Lozano, G. 2005. Caudales Ecológicos: Conceptos, Metodologías, Estado del Arte y estimación mediante métodos hidrológicos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

Lytle, D. & Poff, L. 2004. Adaptation to natural flow regimes. *TRENDS in Ecology and Evolution*. Vol 19 No. 2 Febrero 2004. 7p.

Magdaleno, F. 2004. Caudales ecológicos: conceptos básicos, métodos de cálculo y nuevas interpretaciones. *Revista Ingeniería Civil* 135/2004. 12p.

Magdaleno, F. 2005. Caudales Ecológicos: Conceptos, métodos e interpretaciones. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

Magilligan, F. & Nislow, K. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* 71 (2005) 61 – 78.

Marengo, J.; Nobre, C. & Tomasella, J. 2008. The drought of amazonia in 2005. *Journal of Climate* Vol 21. 495 – 516.

Marengo, J.; Tomasella, J.; Alves, L.; Soares, W. & Rodriguez, D. 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters* Vol. 38 L12703.

Marengo, J.; Tomasella, J.; Soares, W.; Alves, L. & Nobre, C. 2012. Extreme climatic events in the Amazon basin. *Extreme climatic events in the Amazon basin: Climatological and hydrological context of recent floods. Theor Appl Climatol* (2012) 1007: 73 – 85.

Marengo, J.; Borma, L.; Rodriguez, D.; Pinho, P.; Soares, W. & Alves, L. 2013. Recent extremes of drought and flooding in Amazonia: Vulnerabilities and human adaptation. *American Journal of Climate Change*, 2013, 2, 87 – 96.

Martínez, C. & Fernández, J. 2010. IAHRIS 2.2 Índices de alteración hidrológica en ríos. Manual de referencia metodológica. Universidad Pontificia de Madrid. 127p.

Molinier, M. & Guyot, J. 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. *L'hydrologie tropicale: geoscience et outil pour le développement. IAHS Publ no 238*: 209 – 221.

Monk, W.; Wood, P.; Hannah, D. & Wilson, D. 2008. Macroinvertebrate community response to inter – annual and region river flow regime dynamics. Loughborough University. 44p.

Observation Service for the geodynamical, hydrological and biogeochemical control of erosion/alteration and material transport in the Amazon basin. SO – HYBAM. S.f. Datos hidrológicos diarios de estaciones hidrométricas de la cuenca Amazónica. Recuperado el: 10 de marzo de 2014 de [www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org).

O'Keeffe, J. & Le Quesne, T. 2010. Serie Seguridad Hídrica de WWF 2: Cómo conservar los ríos vivos. Guía sobre los caudales ecológicos. WWF, 48p.

Pettitt, A. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28, 126–135.

Pinho, P.; Marengo, J. & Stafford, M. 2014. Complex socio – ecological dynamics driven by extreme events in the Amazon. Springer 13p.



Poff, L.; Allan, J.; Bain, M.; Karr, J.; Prestegard, K.; Richter, B.; Sparks, R. & Stromberg, J. 1997. The Natural Flow Regime: a paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, Vol. 47, No. 11. (Dec., 1997), pp. 769-784.

Poff, L. 2002 Ecological response to and management of increased flooding caused by climate change. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (2002) 360, 1497 – 1510.

Poff, L. & Zimmerman, J., 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology* (2010) 55, 194 – 205.

Red Amazónica de información socioambiental georreferenciada (AISG). [en línea]: *Hidroeléctricas en la Amazonía*. 2012. [4 de abril de 2015]. Disponible en: <<http://raisg.socioambiental.org/system/files/hidroelectricas-rev1.jpg>>.

Richter, B.; Baumgartner, J.; Powell, J. & Braun, D. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conservation Biology*, Volume 10 No 4: 1163 – 1174.

Richter, B.; Baumgartner, J.; Wigington, R. & Braun, D. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37, 231 – 249.

Satyamurty, P.; Wanzeler, C.; Manzi, A. & Candido, L. 2013. A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, 1396 – 1401.

Sharif, M.; Burn, D. & Hussain, A. 2010. Climate change impacts on extreme flow measures in Satluj Basin in India. *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change*. 14p.

Sevensson, C.; Kundzewicz, Z. & Mauren, T. 2004. Trends in flood and low flow series. Report 33. GRDC. Report Series.

Tennant, D. 1974. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fish and Wildlife Service, Billings, M.T. 18 pp.

The Nature Conservancy. 2011. Indicadores de alteración hidrológica Versión 7.1: Manual del usuario. 89p.

Tian, Y.; Xu, Y.; Booij, M.; Zhang, Q. & Lin, S. 2011. Trends in precipitation extremes and long – term memory of runoff records in Zhejiang, east China. *Hydro-Climatology: Variability and Change*, IAHS Publ. 344, 227 – 232.

Trenberth, K. & Stepaniak, D. 2003. Covariability of components of Poleward Atmospheric Energy Transports on Seasonal and Interannual Timescales. *Journal of Climate*. Vol 16: 3691 – 3705.

USGS. 2003. Applying indicators of hydrologic alteration to Texas Streams – Overview of methods with examples from the Trinity River Basin. USGS Fact Sheet 128 – 03. 6p.

Wood, A.; Leung, L.; Sridhar, V. & Lettenmaier, D. 2004 Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climate Change* 62: 189 – 216.

WWF & Fundación Gonzalo Río Arronte., 2011. Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos. Comisión Nacional del Agua. 26p.

Xu, L.; Samanta, A.; Costa, M.; Ganguly, S.; Nemani, R. & Maynei, R. 2011. Windespread decline in greenness of Amazonian Vegetation Due to the 2010 drought. *Geophysical Research Letters* 38 L07402.

Yue, S.; Pilon, P.; Phinney, B. & Cavadias, G. 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrol. Process.* 16, 1807 – 1829 (2002).

Zbigniew, W., 2004. Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal* 49, 7–119.

Zeng, N.; Yoon, J-H.; Marengo, J.; Subramaniam, A.; Nobre, C.; Mariotti, A. and Neelin, D. 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environmental Research Letters* 3 (2008) 9p.

## ANEXOS

**ANEXO 1. Resultados de Análisis de Tendencias Test de Mann-Kendall y Mann-Kendall Modificado Para Qmin al 99, 95 y 90% de confianza, la tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

ESTACIÓN	Tau - Kendall	Tau-Kendall Modif	Qmin					
			S	Var (S)	p-Valor	90	95	99
ALT	-0.181	-0.181	-134	15 953.314	0.292	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
TAM	-0.538	-0.538	-399	16 083.526	0.002	Rechaza H0	Rechaza H0	Acepta H0
ITP	-0.533	-0.533	-395	14 741.798	0.001	Rechaza H0	Rechaza H0	Rechaza H0
MAN	-0.444	-0.444	-329	14 811.603	0.007	Rechaza H0	Rechaza H0	Acepta H0
SER	0.001	0.001	1	14 478.210	1	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
CAR	0.134	0.134	99	16 504.179	0.446	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
RUR	0.015	0.018	13	15 656.089	0.924	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
PVE	-0.46	-0.46	341	14 327.630	0.005	Rechaza H0	Rechaza H0	Acepta H0
FVA	-0.285	-0.285	-211	18 221.262	0.12	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
OBI	-0.414	-0.414	-307	15 539.971	0.014	Rechaza H0	Rechaza H0	Acepta H0
ITA	-0.277	-0.277	-205	14 539.627	0.091	Rechaza H0	Acepta H0	Acepta H0
SAI	-0.379	-0.379	-281	15 086.451	0.023	Rechaza H0	Rechaza H0	Acepta H0
G	-0.279	-0.279	-207	15 305.307	0.096	Rechaza H0	Acepta H0	Acepta H0
L	-0.284	-0.285	-211	16 204.313	0.099	Rechaza H0	Acepta H0	Acepta H0

Acepta la Hipótesis Nula (H0) si el p-valor es mayor que el nivel de significancia.

Rechaza la hipótesis Nula (H0) si el p-valor es menor que el nivel de significancia

ESTACIÓN	Tau - Kendall	Tau-Kendall Modif	Qmed					
			S	Var (S)	p-Valor	90	95	99
ALT	-0.107	-0.107	-79.000	14477.447	0.517	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
TAM	-0.33	-0.333	-247.000	14741.875	0.043	Acepta H0	Rechaza H0	Acepta H0
ITP	-0.271	-0.271	-201.000	15238.286	0.105	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
MAN	-0.061	-0.061	-45.000	15571.288	0.724	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
SER	0.158	0.158	117.000	14358.379	0.333	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
CAR	0.26	0.26	193.000	15626.433	0.125	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
RUR	-0.077	-0.077	-57.000	15322.548	0.651	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
PVE	-0.311	-0.312	-231.000	15094.228	0.061	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
FVA	-0.404	-0.404	-299.000	14074.031	0.012	Acepta H0	Rechaza H0	Acepta H0
OBI	0.018	0.018	13.000	15415.938	0.923	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
ITA	-0.206	-0.206	-153.000	15200.252	0.218	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
SAI	-0.008	-0.008	-6.000	14954.510	0.967	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
G	-0.062	-0.061	-45.000	15388.083	0.723	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
L	-0.099	-0.099	-73.000	14816.078	0.554	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0

Acepta la Hipótesis Nula (H0) si el p-valor es mayor que el nivel de significancia.

Rechaza la hipótesis Nula (H0) si el p-valor es menor que el nivel de significancia

Continuación de ANEXO 1.

ESTACIÓN	Qmed							
	Tau - Kendall	Tau-Kendall Modif	S	Var (S)	p-Valor	90	95	99
ALT	-0.042	-0.042	-31.000	15180.583	0.808	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
TAM	-0.177	-0.177	-131.000	14579.868	0.282	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
ITP	-0.069	-0.069	-51.000	15131.713	0.684	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
MAN	0.092	0.092	68.000	16423.195	0.601	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
SER	0.088	0.088	65.000	14051.929	0.589	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
CAR	0.112	0.112	83.000	14956.104	0.503	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
RUR	-0.063	-0.063	-47.000	15490.400	0.712	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
PVE	-0.151	-0.151	-112.000	14303.278	0.353	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
FVA	-0.26	-0.260	-193.000	14050.963	0.105	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
OBI	0.178	0.178	132.000	15256.320	0.289	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
ITA	-0.011	-0.011	-8.000	14677.430	0.954	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
SAI	0.204	0.204	151.000	14812.212	0.218	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
G	0.022	0.022	16.000	14101.852	0.899	Acepta H0	Acepta H0	Acepta H0
L	0.346	0.346	255.000	14385.761	0.034	Rechaza H0	Rechaza H0	Acepta H0

Acepta la Hipótesis Nula (H0) si el p-valor es mayor que el nivel de significancia.

Rechaza la hipótesis Nula (H0) si el p-valor es menor que el nivel de significancia

**ANEXO 2. P-valor y pendiente para los índices 3, 7, 30 y 90 días mínimos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

ESTACIÓN	3-días mínimo		7-días mínimo		30-días mínimo		90-días mínimo	
	P-valor	Pendiente	P-valor	Pendiente	P-valor	Pendiente	P-valor	Pendiente
TAM	0.001	-194.1	0.001	-193.6	0.001	-197.6	0.001	-208.7
SAI	0.001	-269	0.001	-272.5	0.005	-274.8	0.05	-188.7
G	0.005	-6.971	0.005	-6.877	0.05	-6.105	0.5	-0.463
L	0.01	-6.595	0.01	-6.516	0.05	-6.076	0.5	-2.853
SER	0.5	11.76	0.5	13.88	0.5	16.42	0.5	4.11
ITP	0.001	-461.3	0.001	-462.7	0.001	-478.9	0.001	-403.1
MAN	0.001	-675.1	0.001	-673.1	0.001	-644.1	0.005	-432.4
CAR	0.025	8.689	0.05	8.89	0.1	9.209	0.005	24.19
RUR	0.5	1.251	0.5	1.438	0.5	0.599	0.5	-2.603
PVE	0.001	-54.35	0.001	-54.74	0.001	-63.31	0.01	-71.81
FVA	0.05	-44.86	0.05	-48.92	0.005	-64.13	0.01	-93.91
ITA	0.01	-31.51	0.01	-32.46	0.01	-32.52	0.005	-39.73
ALT	0.25	-3.507	0.25	-3.61	0.025	-6.486	0.025	-12.52
OBI	0.001	-866.1	0.001	-844.7	0.001	-723.7	0.05	-370.7

**ANEXO 3. P-valor y pendiente para los índices 3, 7, 30 y 90 días máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

Estación	3-días máximo		7-días máximo		30-días máximo		90-días máximo	
	p-valor	Pendiente	p-valor	Pendiente	p-valor	Pendiente	p-valor	Pendiente
TAM	0.25	-91.16	0.25	-91.02	0.25	-93.77	0.25	-95.54
SAI	0.05	190.5	0.05	189.7	0.05	178.9	0.1	177
G	0.5	-4.463	0.5	-4.442	0.5	-3.452	0.5	2.584
L	0.05	13.79	0.05	13.68	0.05	13.79	0.05	13.03
SER	0.5	34.77	0.5	35.14	0.5	36.61	0.5	34.5
ITP	0.5	-11.47	0.5	-11.68	0.5	-15.33	0.5	-34.27
MAN	0.1	260.7	0.1	260.6	0.1	255.3	0.1	258.1
CAR	0.5	18.07	0.5	20	0.5	36.28	0.25	37.85
RUR	0.5	15.8	0.5	2.653	0.5	-3.69	0.5	-4.629
PVE	0.5	-58.17	0.5	-62.19	0.25	-86.91	0.25	-77.57
FVA	0.025	-190.8	0.025	-192.4	0.025	-183.5	0.05	-173.1
ITA	0.5	-2.719	0.5	-3.209	0.5	-9.143	0.5	-17.14
ALT	0.5	-48.56	0.5	-47.9	0.5	-46.02	0.5	-39.47
OBI	0.25	520.3	0.25	519.8	0.25	516.6	0.25	495.1

**ANEXO 4. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución del caudal base en las 14 subcuencas de la Cuenca Amazónica. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

ESTACIÓN	Caudal Base		
	p-valor	Pendiente	Tendencia (%)
TAM	0.001	-0.004	-0.979
SAI	0.001	-0.005	-1.077
G	0.025	-0.001	-0.718
L	0.025	-0.001	-0.551
SER	0.5	0.000	0.101
ITP	0.001	-0.004	-0.660
MAN	0.001	-0.007	-1.265
CAR	0.5	0.001	0.530
RUR	0.25	0.001	0.377
PVE	0.001	-0.002	-0.917
FVA	0.5	-0.001	-0.374
ITA	0.05	-0.002	-0.757
ALT	0.5	0.000	-0.148
OBI	0.001	-0.005	-0.967



**ANEXO 5. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución del índice de fecha de caudal mínimo y máximo. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

Estación	Fecha caudal mínimo			Fecha caudal máximo		
	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)
TAM	0.25	-0.43	-0.169	0.5	0.075	0.07
SAI	0.50	0.56	0.216	0.5	0.041	0.03
G	0.25	0.26	0.095	0.1	-0.501	-0.45
L	0.50	0.12	0.045	0.500	-0.155	-0.16
SER	0.50	0.48	0.543	0.25	-0.445	-0.25
ITP	0.50	-0.19	-0.068	0.5	-0.158	-0.09
MAN	0.50	0.09	0.031	0.25	-0.282	-0.17
CAR	0.50	0.90	1.279	0.001	-1.630	-0.93
RUR	0.50	0.28	0.120	0.5	-0.323	-0.64
PVE	0.50	0.02	0.009	0.5	0.093	0.10
FVA	0.50	0.17	0.062	0.5	0.049	0.05
ITA	0.50	-0.33	-0.125	0.5	-0.082	-0.09
ALT	0.50	0.04	0.016	0.5	0.231	0.25
OBI	0.50	-0.07	-0.022	0.05	0.557	0.36

**ANEXO 6. Valor de P, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución de los índices de número y duración de pulsos bajos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

Estación	Número de Pulsos Bajos			Duración de Pulsos Bajos		
	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)
TAM	0.5	-0.011	-0.46	0.05	0.578	1.31
SAI	0.25	-0.011	-0.63	0.5	0.731	1.22
G	0.5	0.002	0.17	0.5	0.380	0.42
L	0.25	-0.007	-0.62	0.5	0.705	0.83
SER	0.5	-0.028	-1.05	0.5	0.262	0.80
ITP	0.005	-0.013	-0.97	0.5	1.974	2.69
MAN	0.1	-0.010	-0.82	0.05	1.044	1.37
CAR	0.5	-0.074	-2.52	0.25	0.204	0.84
RUR	0.5	0.003	0.04	0.1	-0.026	-0.40
PVE	0.5	0.016	0.90	0.05	-0.108	-0.21
FVA	0.25	-0.003	-0.21	0.5	0.622	0.99
ITA	0.5	-0.056	-1.50	0.5	0.488	2.13
ALT	0.5	0.014	1.15	0.5	-0.119	-0.14
OBI	0.5	0.001	0.10	0.25	0.309	0.34

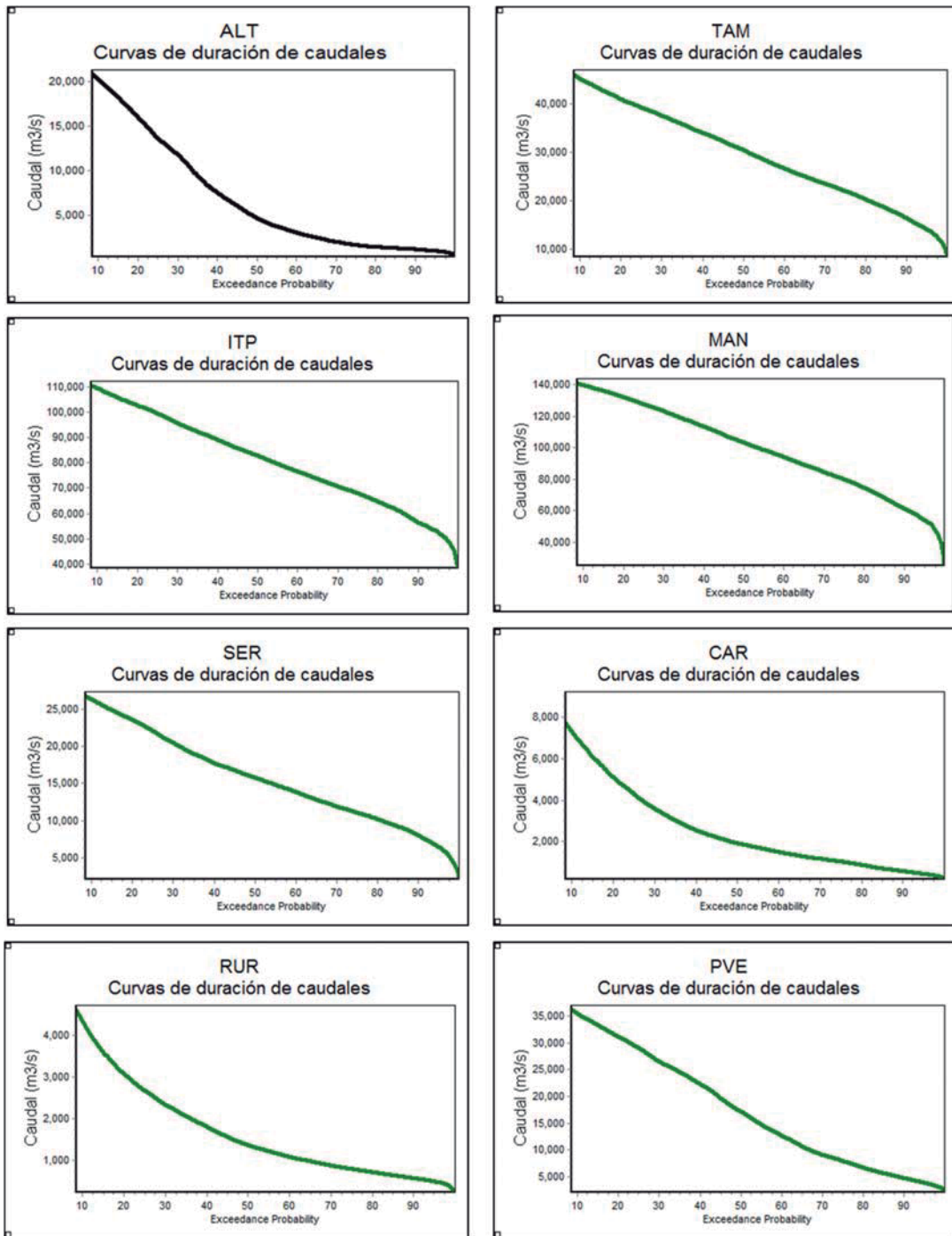
**ANEXO 7. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución de los índices de número y duración de pulsos altos. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

Estación	Número de Pulsos Altos			Duración de Pulsos Altos		
	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)
TAM	0.05	-0.0235	-1.70	0.50	0.501	0.70
SAI	0.5	0.0055	0.50	0.50	0.316	0.35
G	0.5	-0.0063	-0.63	0.050	1.360	1.430
L	0.5	0.0000	0.00	0.50	0.103	0.11
SER	0.5	0.0043	0.30	0.50	0.164	0.23
ITP	0.5	0.0022	0.25	0.25	-0.655	-0.64
MAN	0.05	0.0101	1.10	0.50	0.150	0.15
CAR	0.25	0.0314	1.02	0.50	0.306	0.96
RUR	0.1	0.0992	0.96	0.50	0.016	0.54
PVE	0.05	0.0257	1.57	0.025	-1.514	-2.093
FVA	0.5	0.0022	0.18	0.100	-0.817	-0.990
ITA	0.5	0.0012	0.08	0.25	-0.644	-0.87
ALT	0.5	0.0075	0.57	0.50	-0.476	-0.59
OBI	0.25	0.0079	0.93	0.50	0.676	0.63

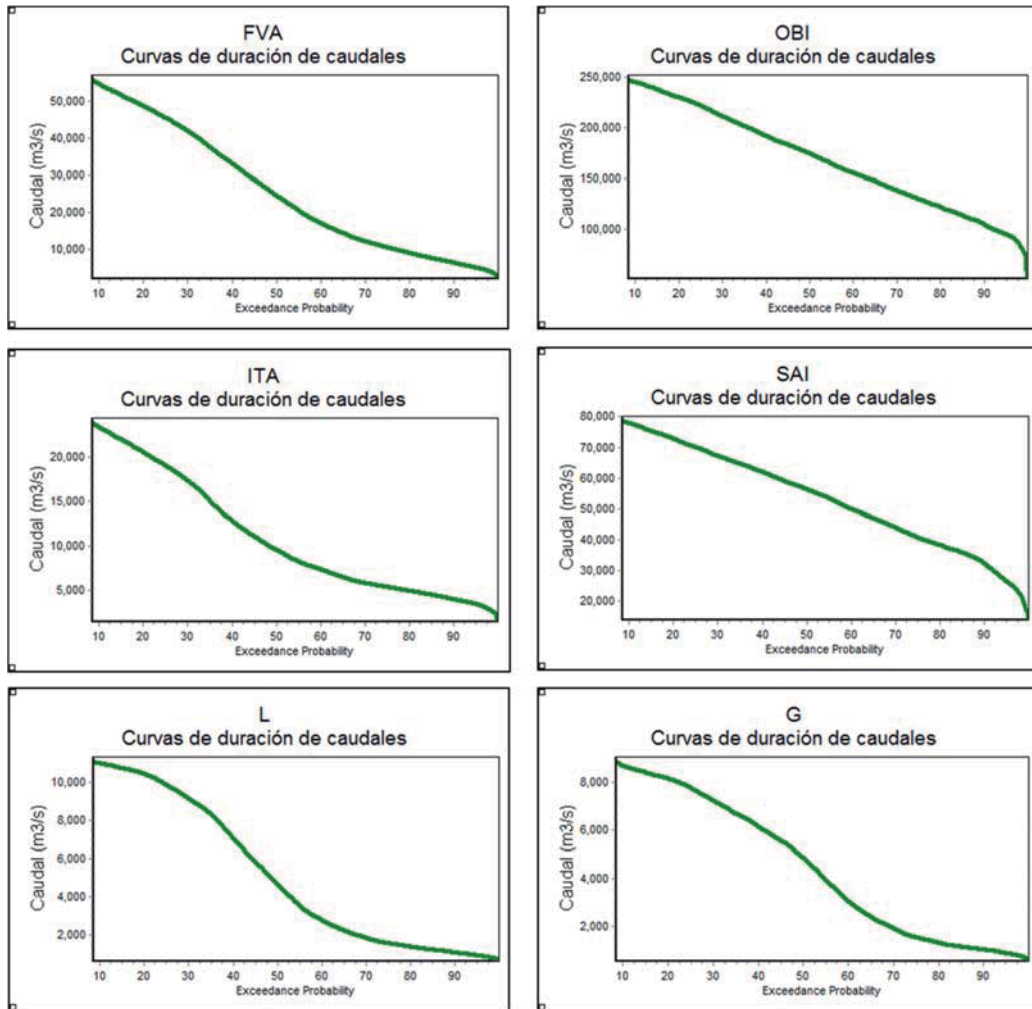
**ANEXO 8. P-valor, Pendiente y porcentaje de aumento o disminución de las tasas de ascenso y descenso en el hidrograma. La tendencia positiva en gama de azules y la negativa en gama de rojos, representando el 90%, 95% y 99% de confianza, en blanco se muestra la no tendencia.**

Estación	Tasa de ascenso			Tasa de descenso		
	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)	P-valor	Pendiente	Tendencia (%)
TAM	0.005	-2.1810	-0.83	0.25	0.838	0.28
SAI	0.5	0.0900	0.03	0.100	-2.040	-0.543
G	0.5	0.0928	0.24	0.50	0.157	0.56
L	0.5	0.0327	0.07	0.50	-0.075	-0.23
SER	0.5	0.4040	0.20	0.25	-0.568	-0.31
ITP	0.5	0.2856	0.10	0.500	-1.227	-0.313
MAN	0.05	2.2140	0.54	0.05	-3.834	-0.71
CAR	0.05	1.2470	1.18	0.01	-1.075	-1.57
RUR	0.5	-0.7624	-0.43	0.50	0.063	0.06
PVE	0.1	1.0810	0.40	0.50	-0.063	-0.03
FVA	0.25	-0.6867	-0.25	0.05	1.5540	0.60
ITA	0.5	0.1842	0.11	0.250	-0.478	-0.300
ALT	0.5	-0.1666	-0.15	0.50	0.242	0.30
OBI	0.1	3.3520	0.44	0.01	-6.567	-0.717

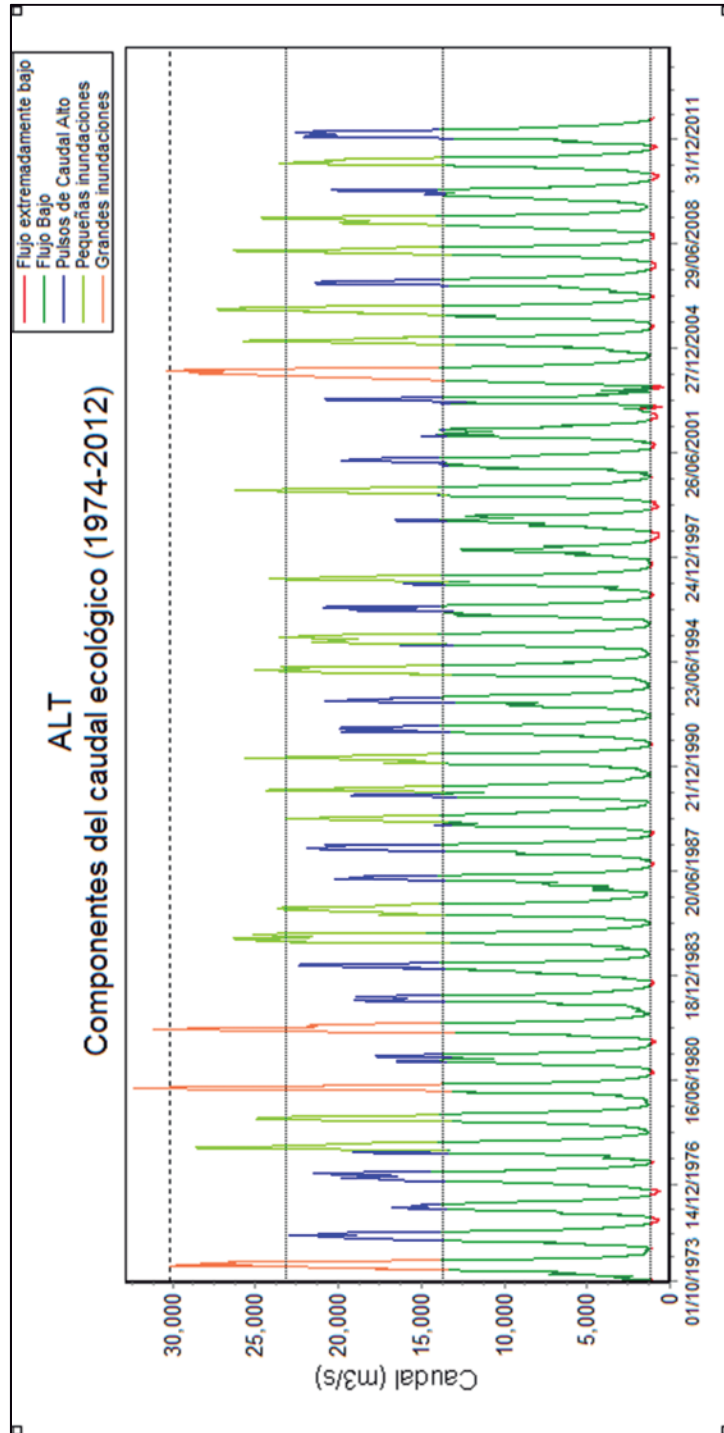
**ANEXO 9. Curvas de duración de 14 estaciones de la Cuenca Amazónica - Periodo 1974 – 2012.**



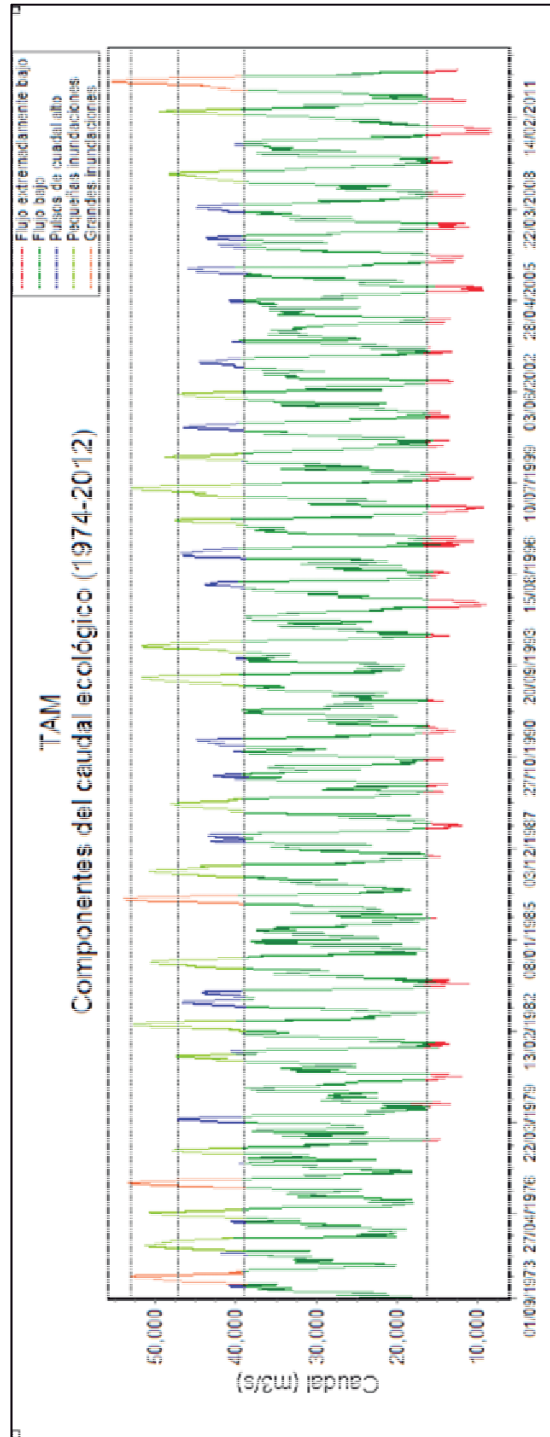
Continuación ANEXO 9



ANEXO 10. Componentes de la alteración del caudal estación ALT, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.

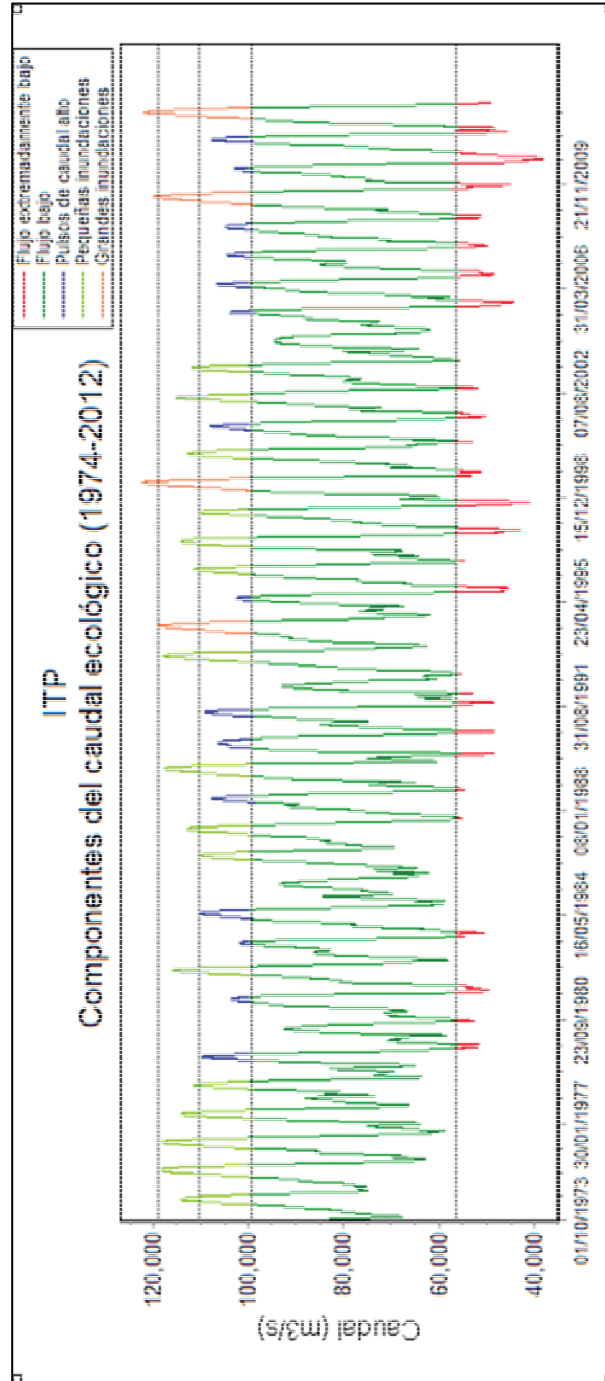


ANEXO 11. Componentes de la alteración del caudal estación TAM, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.

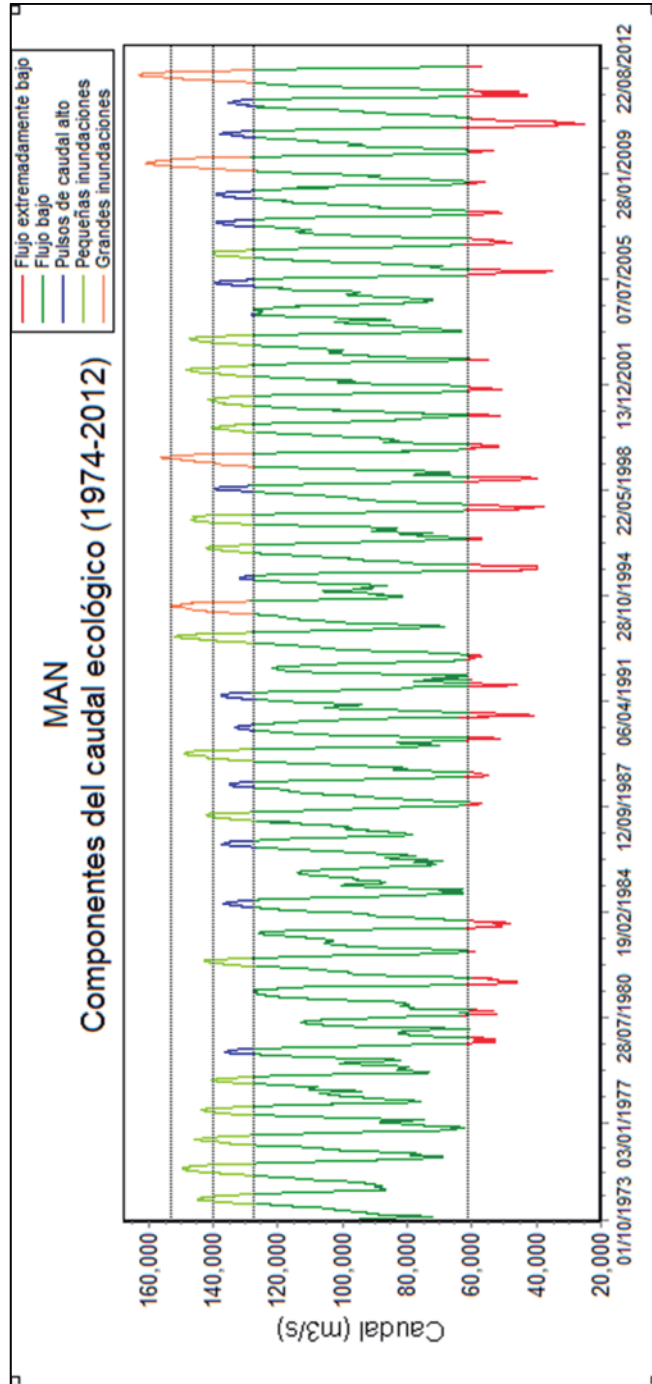




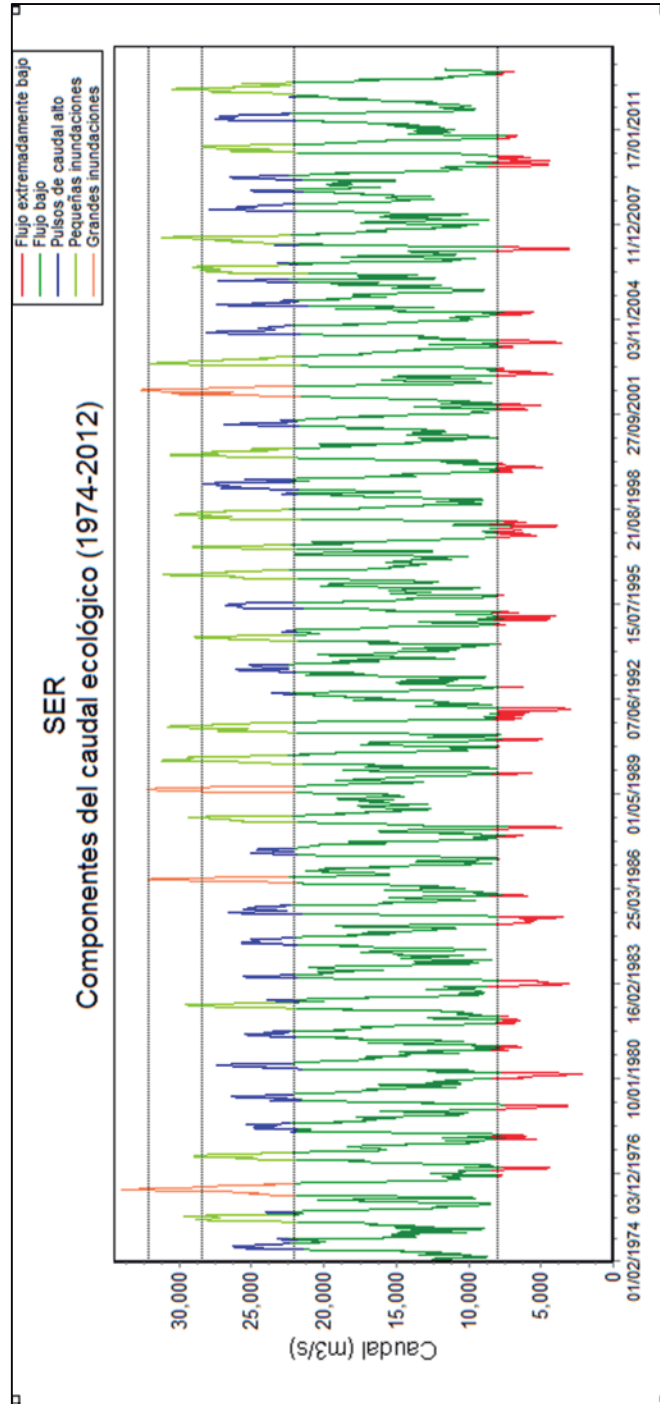
ANEXO 12. Componentes de la alteración del caudal estación ITP, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



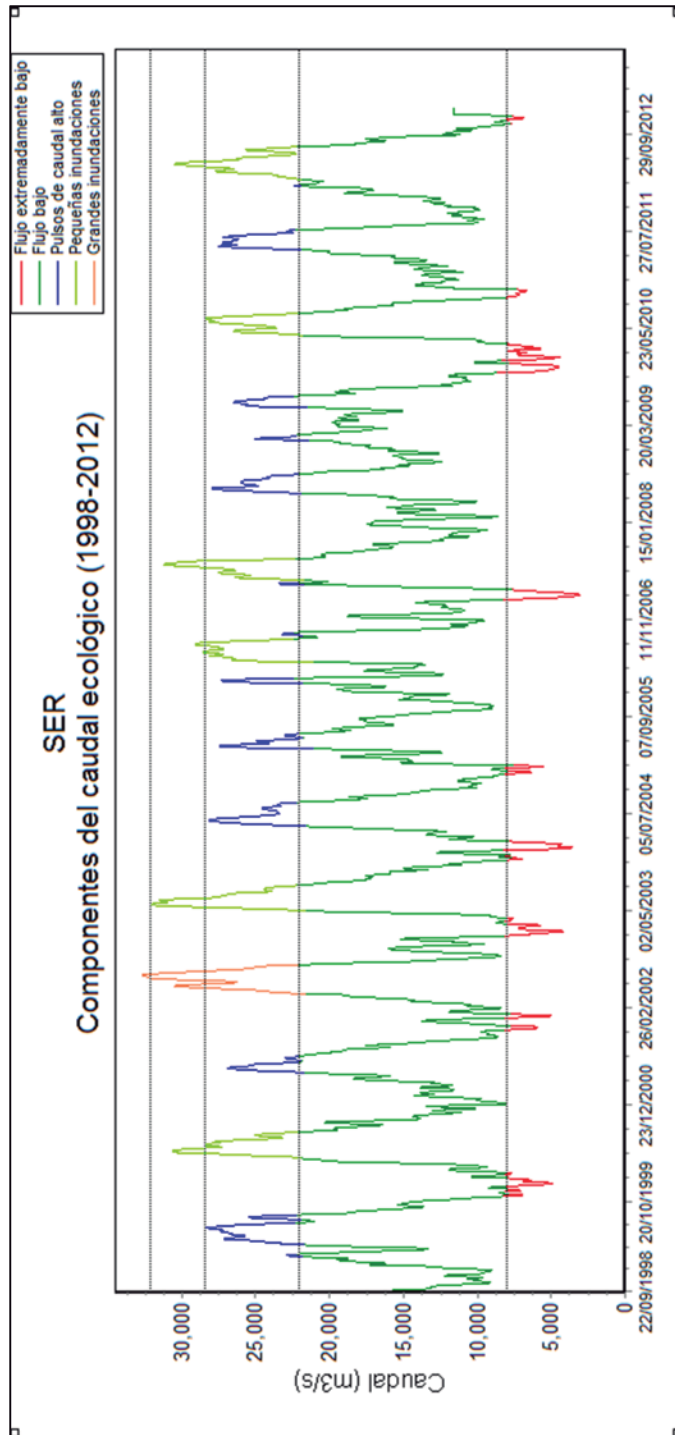
ANEXO 13. Componentes de la alteración del caudal estación MAN, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



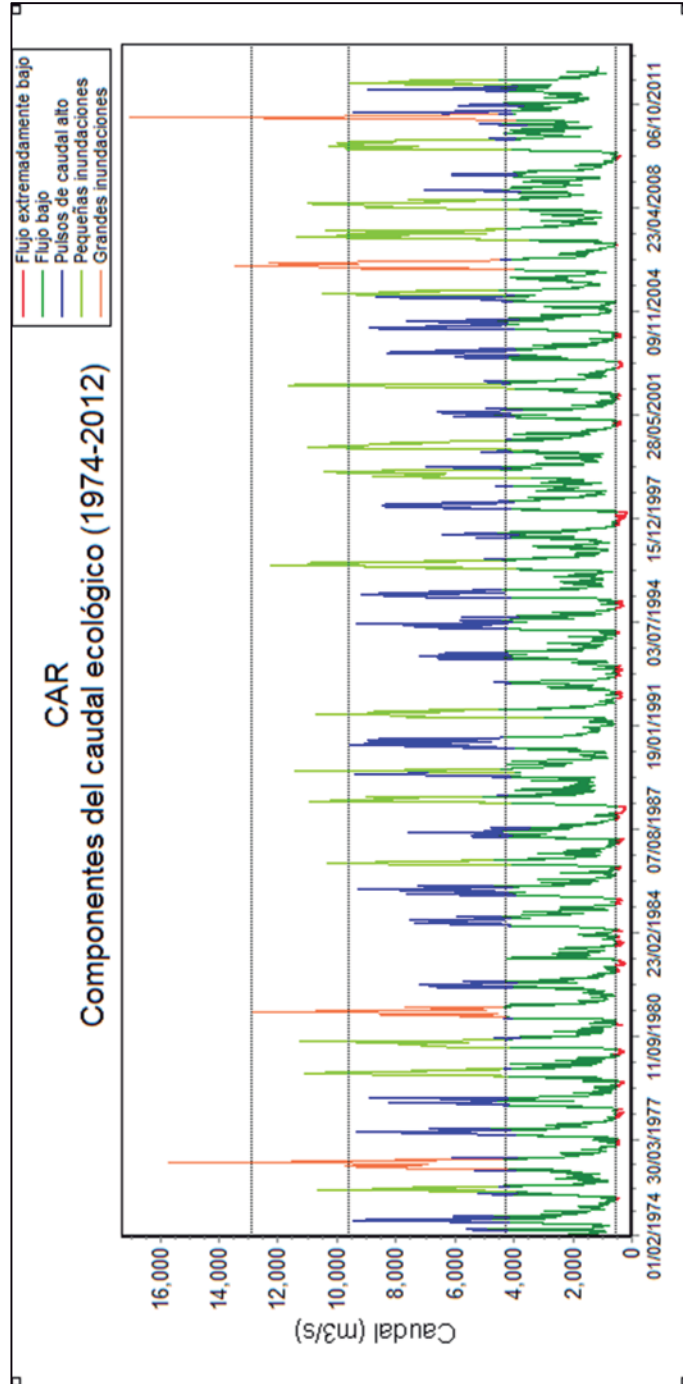
ANEXO 14. Componentes de la alteración del caudal estación SER, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



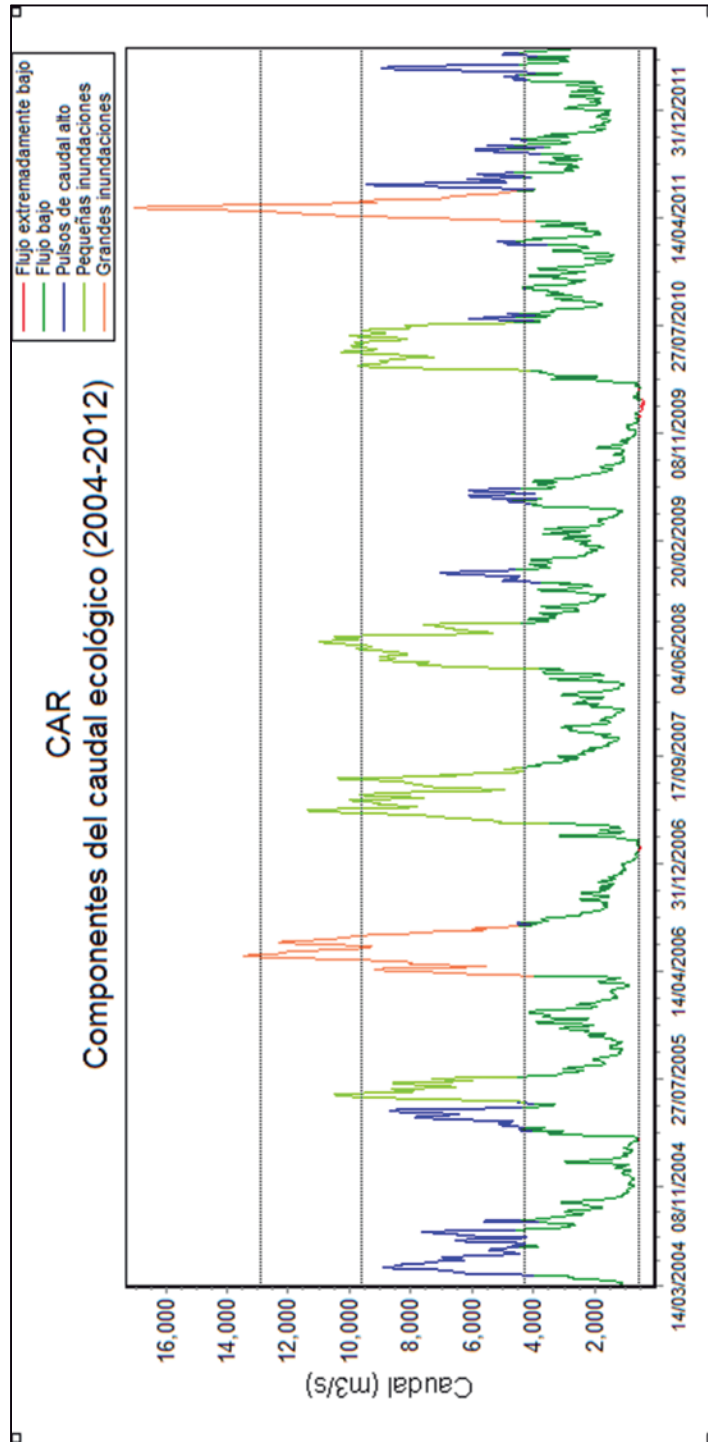
**ANEXO 15. Observación de los años con caudal por debajo del percentil 10 en la estación SER periodo 1998 - 2012**



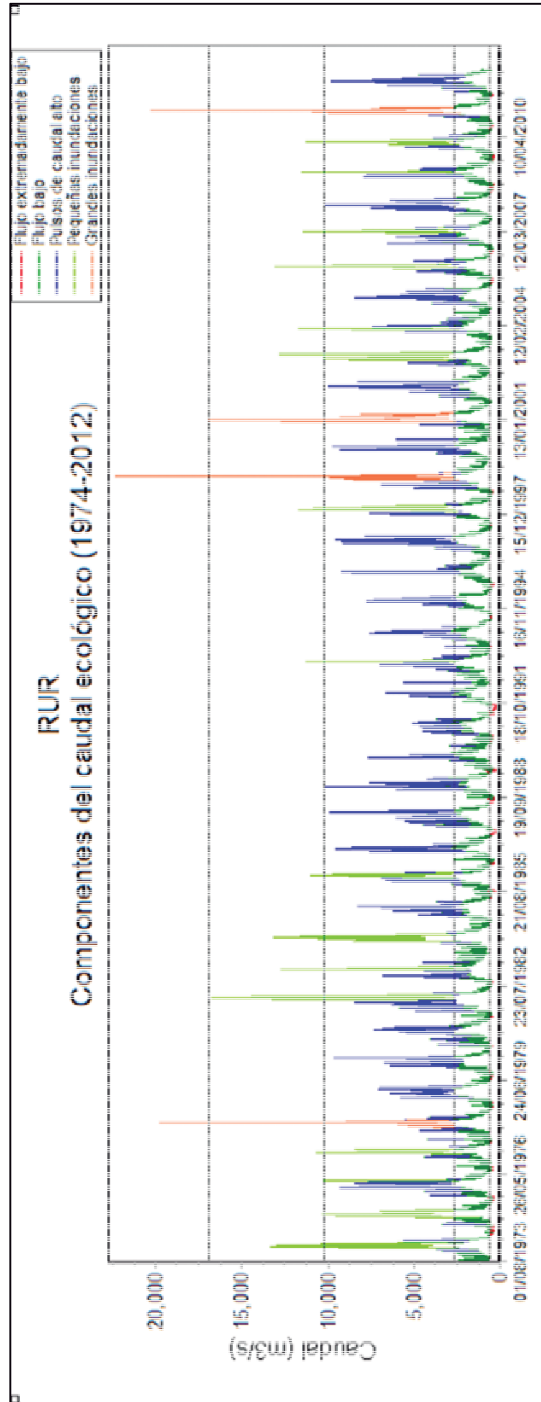
ANEXO 16. Componentes de la alteración del caudal estación CAR, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



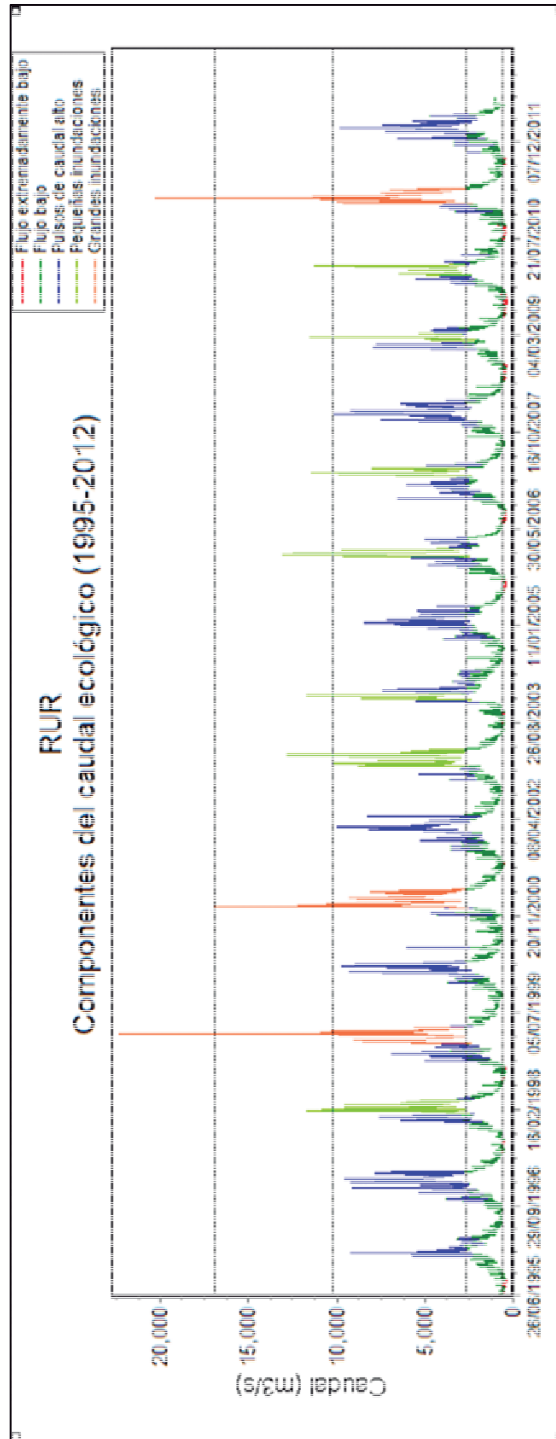
**ANEXO 17. Observación de pequeñas y grandes inundaciones en la estación CAR periodo 2 004 – 2 012.**



ANEXO 18. Componentes de la alteración del caudal estación RUR, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.

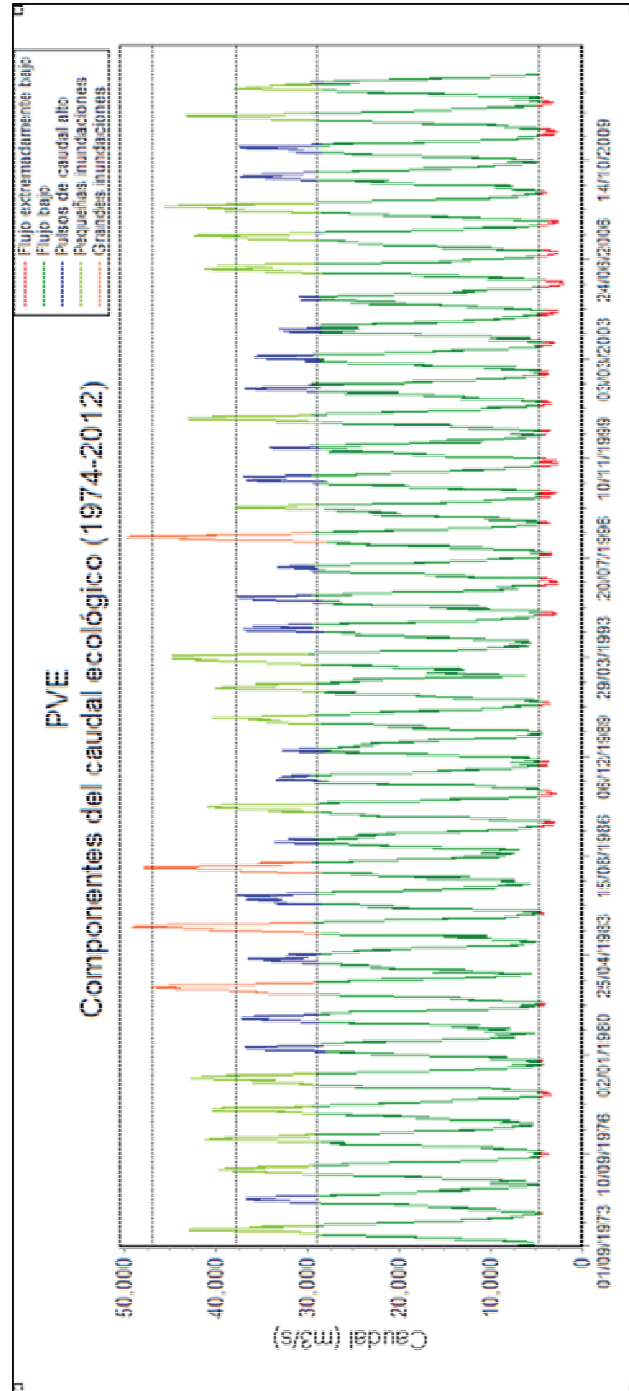


**ANEXO 19. Observación de la variabilidad interanual en la estación RUR periodo 1995 – 2012.**

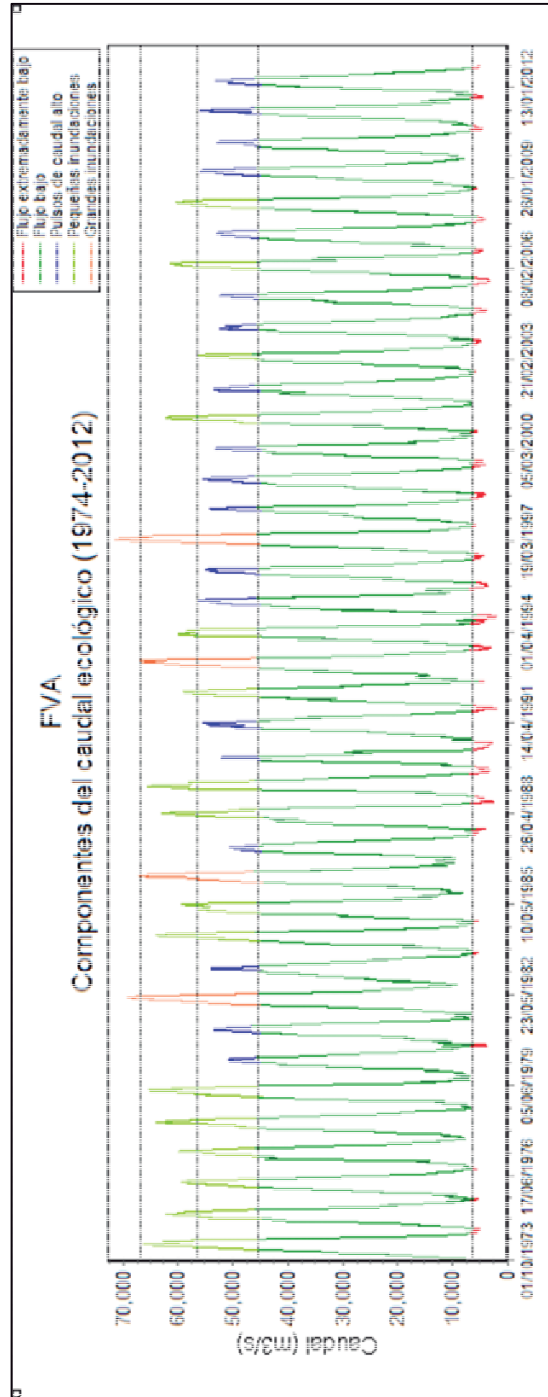




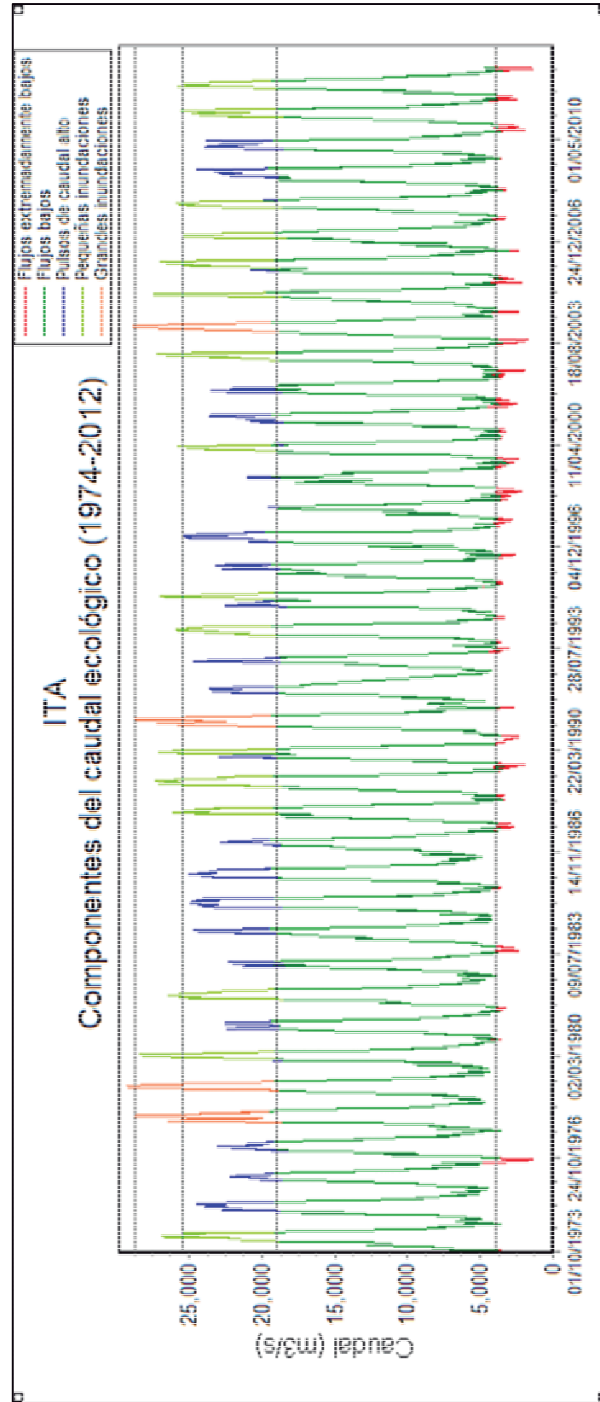
ANEXO 20. Componentes de la alteración del caudal estación PVE, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



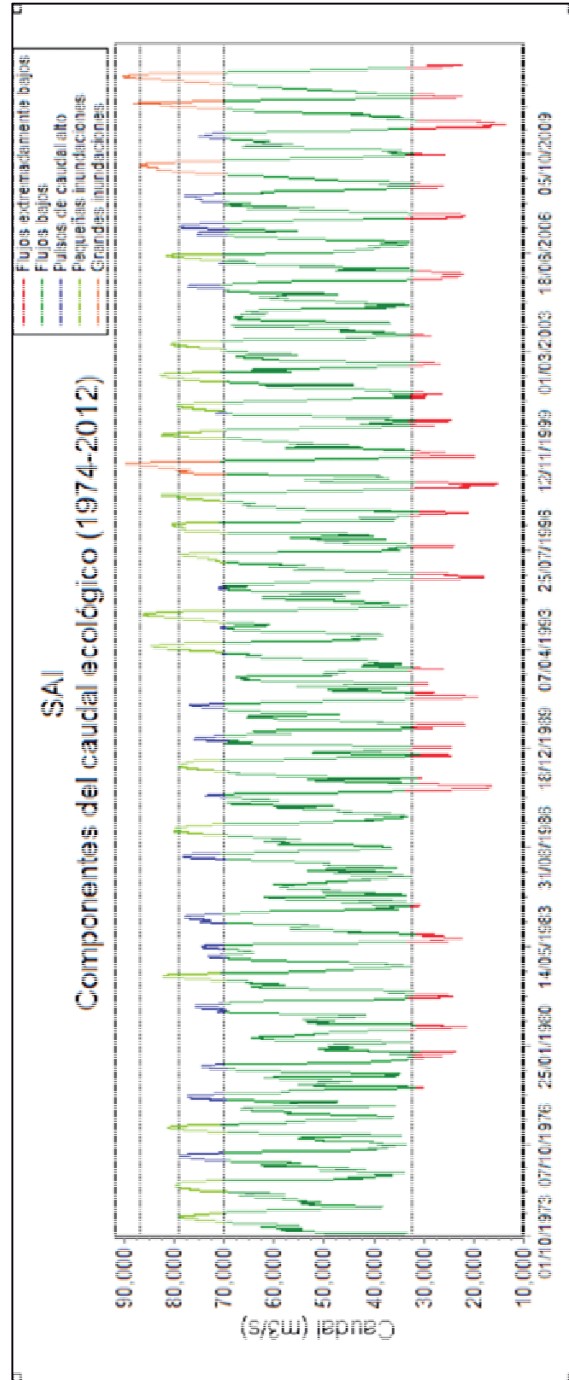
ANEXO 21. Componentes de la alteración del caudal estación FVA, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



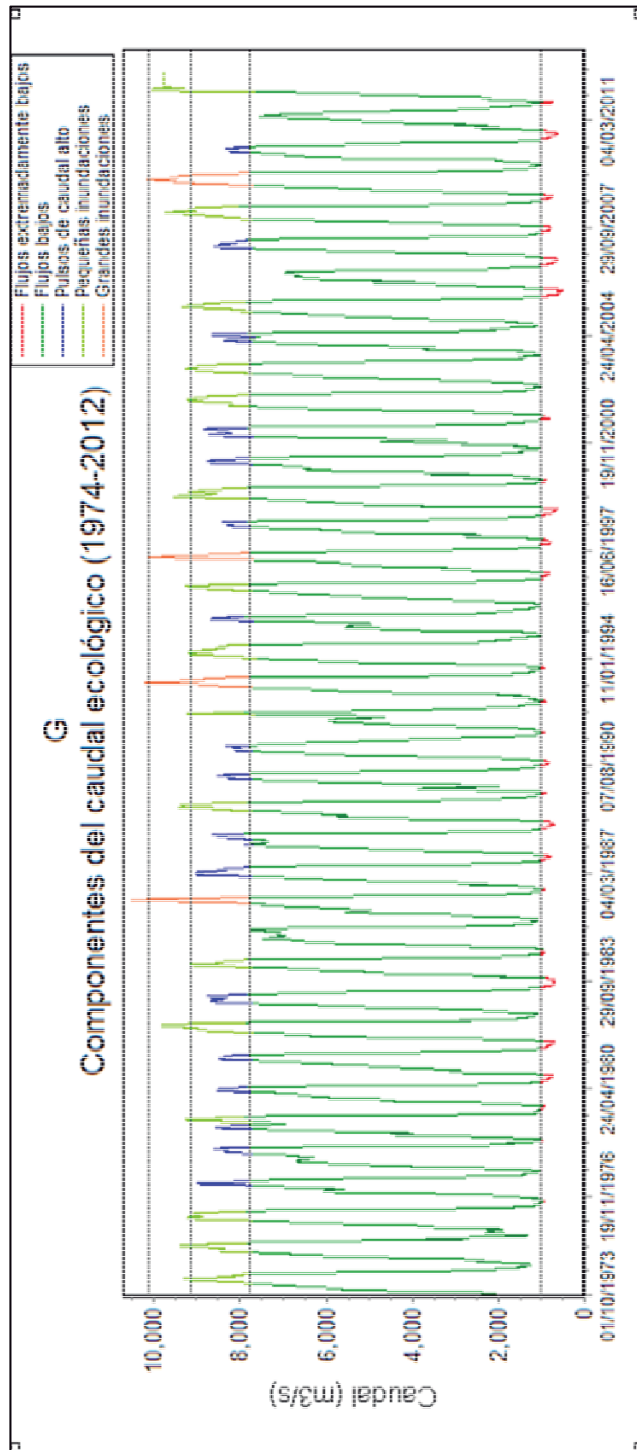
ANEXO 22. Componentes de la alteración del caudal estación ITA, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



ANEXO 23. Componentes de la alteración del caudal estación SAI, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



ANEXO 24. Componentes de la alteración del caudal estación G, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.



ANEXO 25. Componentes de la alteración del caudal estación L, las líneas punteadas se refieren a los percentiles 10, 50, 75 y 90 que determinan el valor de los extremos.

