



Fuente: CVC, 2012

## MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO PALO UTILIZANDO EL MODELO HIDROLÓGICO HBV PARA SIMULAR ESCENARIOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA ASOCIADOS AL FENOMENO ENOS EN SU FASE FRIA LA NIÑA.

Felipe Estrada Barbosa  
Juan Sebastián López Torres  
2015

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO PALO UTILIZANDO EL MODELO HIDROLÓGICO HBV  
PARA SIMULAR ESCENARIOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA ASOCIADOS AL FENOMENO  
ENOS EN SU FASE FRIA LA NIÑA

Presentado por:  
FELIPE ESTRADA BARBOSA  
JUAN SEBÁSTIAN LÓPEZ TORRES

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
PROGRAMA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2015

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO PALO UTILIZANDO EL MODELO HIDROLÓGICO HBV  
PARA SIMULAR ESCENARIOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA ASOCIADOS AL FENOMENO  
ENOS EN SU FASE FRIA LA NIÑA

Presentado por:  
FELIPE ESTRADA BARBOSA  
JUAN SEBÁSTIAN LÓPEZ TORRES

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TITULO DE:  
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

DIRECTOR  
YESID CARVAJAL ESCOBAR, PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
PROGRAMA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2015

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del evaluador**

---

**Firma del evaluador**

**Santiago de Cali, Enero de 2015**

## RESUMEN

En las últimas décadas el ser humano ha observado como los fenómenos de variabilidad climática han aumentado en magnitud y frecuencia, dejando a su paso devastadores efectos en las sociedades humanas; razón por la cual, el estudio y la simulación de dichos eventos que permitan prever las consecuencias de los mismos, recobra gran importancia; de acuerdo con lo anterior, la presente investigación consistió en efectuar la modelación hidrológica de los caudales de la cuenca del río Palo y asociar los resultados a la fase fría del fenómeno ENOS (La Niña), para lo cual, se desarrolló una metodología que consistió en realizar una descripción del modelo hidrológico así como la caracterización hidrológica y climatológica de la cuenca de estudio, un análisis exploratorio de datos, un análisis de frecuencia, un proceso de calibración del modelo hidrológico HBV con su respectivo análisis de sensibilidad, la simulación hidrológica y por último la asociación de los resultados obtenidos, al fenómeno climatológico estudiado.

La cuenca del río Palo según su descripción morfométrica e hidroclimatológica concentra grandes volúmenes de agua en poco tiempo, además es una cuenca que al parecer está muy deforestada, pues según el número de curva que es 73,61%, del total de las precipitaciones escurre superficialmente el 73,61%, mientras que solo un 26,39% se infiltra, la precipitación media multianual de la cuenca es de aproximadamente 1.590mm y presenta un caudal medio multianual de 39,15 m<sup>3</sup>/s, y un caudal mínimo y máximo oscila entre los 3,6 y 351,28 m<sup>3</sup>/s respectivamente, lo que la hace el segundo mayor aportante de caudal a el río Cauca, la cuenca tiene tendencia a las crecidas y a la generación de altos volúmenes de escurrimiento, como consecuencia la cuenca del río Palo presenta gran erodabilidad; la deforestación en la cuenca puede estar asociada a la industrialización de la zona, la deforestación, los cultivos ilícitos, el uso intensivo de los suelos por ganadería y agricultura, que trae como consecuencia el aumento del riesgo para los asentamientos humanos por el aumento de los caudales y el deterioro de la calidad del agua.

El análisis exploratorio de los datos realizado a las series de precipitación y caudal estudiadas permitieron definir una tendencia bimodal en el régimen de precipitaciones, encontrando que las precipitación media multianual oscila en el rango que va desde 38 mm para los valores mínimos y hasta los 250 mm para los valores máximos, en cada periodo específicos del año, lo que permite deducir que representan periodos lluviosos que corresponden a los meses de abril y octubre y periodos secos en enero y julio; por su parte el análisis de frecuencia realizado a las diferentes estaciones para el caso de las series de máximas anuales, se observó que presentaban un mejor ajuste con la función LogPearson III, ya que en el 54,5% de las estaciones se evidenció el ajuste con la misma, en contraste con las series LogNormal y Gumbel que alcanzaron solo el 27,3% y 18,2% respectivamente. El ajuste alcanzado con la función LogPearson III se debe principalmente a que los valores obtenidos en el CCG son más cercanos a 1 y el EEA es menor a 15% en comparación con las demás funciones estadísticas.

Por su parte, el proceso de calibración del modelo se realizó por medio del método de ensayo - error, modificando los valores que tiene cada uno de los parámetros que utiliza el modelo hidrológico HBV; esto con el fin de aproximar la diferencia acumulada a cero y hacer que el coeficiente de variación se aproximara a uno; en general el proceso de calibración del modelo hidrológico HBV es aceptable, según los criterios establecidos en la metodología, pues presentan una similitud gráfica

en la forma de las hidrógrafas registradas y calculadas; los valores obtenidos en la calibración del modelo hidrológico HBV fueron para el periodo (1992-2002) de un coeficiente de determinación y diferencia acumulada, con valores de 0,68 y 0,26 mm respectivamente, y para el periodo (1974-1984) un coeficiente de determinación y diferencia acumulada, cuyos valores fueron: 0,60 y 0,85 mm; estos resultados se consideran aceptables teniendo en cuenta los resultados obtenidos por la CVC en la calibración del mismo modelo para la cuenca del río Tuluá CVC (2007), donde el resultado de la calibración para el periodo (1974-1987) fue un coeficiente de variación de 0.61 y una diferencia acumulada de -6.38 mm y para el periodo (1974-1995) se obtuvo un coeficiente de variación de 0.51 y una diferencia acumulada = -64.06 mm, además se pudo observar que mientras mejor sea la calidad de datos suministrados al modelo hidrológico HBV, en especial los datos de caudal, mejor serán los resultados de la calibración.

El análisis de sensibilidad fue realizado a cada uno de los parámetros utilizados en la calibración del modelo hidrológico HBV, con el fin de determinar el grado de sensibilidad y la respuesta de cada uno de los parámetros a las variaciones de los valores, para esto se perturbaron los parámetros cambiando según el rango en cual oscilaban por valores máximos y mínimos, todo esto mientras los demás parámetros permanecían constante; se determinó con este análisis que el parámetro más sensible en la modelación de caudales en la cuenca de río Palo es el parámetro PCALT, ya que este cambia el volumen de la hidrógrafa calculada por el modelo al aumentar el valor asignado a este parámetro, por otra parte los parámetros de menor sensibilidad fueron MAX BASS, LP, ALFA, BETA, CFLUX estos presentan pequeñas variaciones y un comportamiento similar entre los límites de los rangos aceptables para cada parámetro.

La simulación de caudales se realizó para diferentes periodos, encontrándose que el periodo que arrojó valores más confiables, fue el que va desde el año de 1974 hasta 2012, pues se obtuvieron valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación de 5,2 mm y 0,6, respectivamente, que son valores que permiten tener mayor confianza en los resultados de la modelación, además se encontró que cuanto más años tiene el periodo de simulación mejor son los resultados de la misma, razón por la que, en promedio los periodos que superan los 10 años arrojan mejores resultados; finalmente se evidenció que los caudales simulados presentaron una alta asociación a la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, pues se observó que durante el periodo de simulación 1974-2012, muchos de los caudales máximos registrados, ocurrieron durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña; es así como los caudales máximos en un 75% de la veces, coincidieron con periodos asociados a La Niña.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A la Universidad del Valle, por habernos brindado la oportunidad de adquirir una formación integral como Ingenieros Sanitarios y Ambientales y por su compromiso en la formación de profesionales con compromiso social.
- A nuestro director Yesid Carvajal Escobar, por su paciencia, tiempo y motivación para culminar con éxito esta primera etapa académica.
- Al programa académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental por su colaboración y constante motivación.
- A nuestros amigos Diana Soraya Sánchez, María Alejandra Guzmán y Danny Felipe Ramírez por su apoyo incondicional y motivación.
- A la Corporación Autónoma Regional del Valle (CVC) por el suministro de información para el desarrollo de esta tesis de grado.
- A todos los integrantes del grupo de investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Desarrollo de Suelos - IREHISA, de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), en especial al Ingeniero Héctor Fabio Marroquín, por sus aportes para el desarrollo de nuestro proyecto.

***“Si no estás avergonzado por la primera versión de tu producto, es porque probablemente lanzaste el producto demasiado tarde” Reid Hoffman***

***“Recordar que algún día vas a morir es la mejor forma de no caer en la trampa de que tienes algo que perder por intentar algo”. Steve Jobs***

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	
1.0	OBJETIVOS ..... 1
1.1	OBJETIVO GENERAL ..... 1
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS ..... 1
2.0	ANTECEDENTES ..... 2
3.0	MARCO CONTEXTUAL ..... 3
3.1	SITUACIÓN MUNDIAL DEL AGUA ..... 3
3.2	OFERTA DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA ..... 3
3.3	GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS ..... 4
4.0	MARCO TEÓRICO ..... 4
4.1	CICLO HIDROLÓGICO ..... 4
4.1.1	Precipitación ..... 4
4.1.2	Infiltración ..... 5
4.2	FENÓMENO EL NIÑO OSCILACIÓN SUR ENOS ..... 5
4.2.1	La Niña: Fase Fría del Fenómeno ENOS ..... 6
4.2.2	Variabilidad Climática ..... 7
4.2.3	Escenario de Variabilidad Climática: ..... 7
4.2.4	Cambio climático ..... 8
4.3	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ..... 9
4.3.1	Análisis Cuantitativo ..... 9
4.3.2	Análisis Gráfico ..... 9
4.3.3	Prueba de Normalidad ..... 9
4.3.4	Análisis Confirmatorio ..... 9
4.4	ANÁLISIS DE FRECUENCIA ..... 9
4.4.1	Período de Retorno ..... 10
4.4.2	Distribuciones de Probabilidad ..... 10
4.4.3	Distribución LnNormal Biparamétrica ..... 10
4.4.4	Distribución Gumbel Biparamétrica ..... 10
4.4.5	Distribución Log Pearson III ..... 10
4.4.6	Pruebas de Calidad de Ajuste ..... 10



4.4.7	Coefficiente de Correlación de la Probabilidad Graficada (CCG).....	10
4.4.8	Error Estándar de Ajuste (EEA).....	11
4.5	MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	11
4.6	MODELO HIDROLÓGICO HBV-IHMS.....	11
4.6.1	Rutina de precipitación y fusión de nieve.....	12
4.6.2	Rutina de humedad del suelo.....	12
4.6.3	Rutina respuesta o estimación de la escorrentía.....	13
4.6.4	Rutina función de transformación del escurrimiento.....	14
4.7	DESCRIPCIÓN DEL MODELO HBV.....	14
4.7.1	Requerimientos Del Modelo.....	15
4.7.2	Parámetros De Entrada Al Modelo.....	15
5.0	METODOLOGÍA.....	16
5.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA.....	16
5.2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN CORRESPONDIENTE AL SUELO.....	16
5.2.1	Número de Curva (CN).....	17
5.3	SELECCIÓN DE LA RED DE MEDICIÓN.....	17
5.4	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LOS DATOS.....	18
5.5	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS.....	19
5.5.1	Preparación de los datos para el AED.....	19
5.5.2	Selección de las estaciones para el AED.....	19
5.6	ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES.....	20
5.6.1	Estimación de datos faltantes para series mensuales.....	21
5.6.2	Estimación de datos faltantes para series diarias.....	21
5.6.3	Análisis Cuantitativo.....	22
5.6.4	Análisis Gráfico.....	22
5.6.5	Prueba de Normalidad.....	23
5.6.6	Análisis Confirmatorio.....	23
5.7	ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	23
5.7.1	Análisis de Frecuencias de Eventos Máximos Diarios de Precipitación y Caudal.....	24
5.7.2	Pruebas de Calidad de Ajuste.....	24
5.8	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO HBV.....	25
5.9	VALIDACIÓN.....	27

5.10	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	27
5.11	MODELACIÓN DE LOS CAUDALES DIARIOS ASOCIADOS A LA FASE FRÍA DEL FENOMENO ENOS 27	
	Fuente: (NOAA, 2014).....	28
6.0	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	28
6.1	DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	28
6.1.1	Descripción del área de estudio .....	28
6.1.2	Localización.....	28
6.1.3	Descripción Morfométrica.....	29
6.1.4	Descripción Hidrometereológica.....	30
6.1.5	Usos del Suelo .....	31
6.1.6	Número de Curva (CN).....	31
6.2	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS .....	32
6.2.1	Resultados del Análisis Exploratorio Grafico.....	34
6.2.2	Resultados del análisis confirmatorio.....	35
6.2.3	Pruebas estadísticas No paramétricas de carácter confirmatorio .....	36
6.3	ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	37
6.4	CALIBRACIÓN MODELO HIDROLÓGICO HBV .....	41
6.4.1	Calibración primer periodo (1974-1984).....	42
6.4.2	Calibración segundo periodo (1992-2002) .....	44
6.5	VALIDACIÓN .....	46
6.5.1	Validación primer periodo (1984-1990) .....	46
6.5.2	Validación segundo periodo (2002-2007).....	47
6.6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	47
6.6.1	ALFA (mm/día) .....	48
6.6.2	BETA.....	49
6.6.3	CFLUX (mm/día).....	49
6.6.4	ECORR .....	50
6.6.5	FC (mm) .....	50
6.6.6	K4 (1/día).....	51
6.6.7	KHQ.....	51
6.6.8	LP.....	52

6.6.9	MAXBAS .....	52
6.6.10	PCALT .....	53
6.6.11	PCORR .....	53
6.6.12	PERC (mm/día) .....	54
6.7	SIMULACIONES HIDROLOGICAS.....	54
6.7.1	Simulación Hidrológica Periodo 2002 -2012 .....	54
6.7.2	Simulación Hidrológica Periodo 2007 -2008 .....	56
6.7.3	Simulación Hidrológica Periodo 2010-2011 .....	57
6.7.4	Simulación Hidrológica Periodo Total de estudio (precipitación).....	58
6.8	ASOCIACIÓN DE LA SIMULACION HIDROLÓGICA AL FENÓMENO ENOS-FASE FRÍA .....	59
6.9	RESUMEN GENERAL DE LOS RESULTADOS .....	63
7.0	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	65
7.1	CONCLUSIONES .....	65
7.2	RECOMENDACIONES .....	67
8.0	BIBLIOGRAFÍA.....	68
9.0	ANEXOS.....	72

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Figuras representativas de los tres escenarios en los que puede encontrarse el agua Ecuatorial del Océano Pacífico.....	6
Figura 2. Características oceánicas y atmosféricas del fenómeno de La Niña.....	7
Figura 3. Cambio del porcentaje de la precipitación multimodelo 2011-2040.....	8
Figura 4. Estructura general del modelo HBV. ....	12
Figura 5. Rutina de respuesta (Zona superior) del modelo HBV/IHMS. ....	13
Figura 6. Rutina de respuesta (Zona inferior) del modelo HBV/IHMS. ....	14
Figura 7. Rutina de escurrimiento del modelo HBV/IHMS. ....	14
Figura 8. Esquema de la metodología de estudio.....	16
Figura 9. Estaciones con influencia en la cuenca río Palo.....	18
Figura 10. Análisis exploratorio y confirmatorio de datos. ....	19
Figura 11. Pasos para la calibración del modelo HBV.....	27
Figura 12. Localización cuenca del río Palo. ....	28
Figura 13. Usos de suelo río Palo.....	31
Figura 14. Caudales Máximos, Mínimos y Medios anuales (1965-2012), estación Palo Pto Tejada...	33
Figura 15. Diagrama de serie de tiempo e histograma de la estación El Trapiche. ....	34
Figura 16. Gráfica de serie de tiempo, Histogramas y diagrama de cajas.....	35
Figura 17. Período de retorno para cada función de probabilidad, estación El Trapiche.....	39
Figura 18. Precipitación Máxima Anual según años de registro, estación El Trapiche.....	40
Figura 19. Hidrógrafas registradas y calculadas para la calibración del periodo 1974-1984. ....	43
Figura 20. Hidrógrafas registradas y calculadas para la calibración del periodo 1992-2002. ....	45
Figura 21. Hidrógrafas registradas y calculadas para el periodo de validación. ....	46
Figura 22. Hidrógrafas registradas y calculadas para el segundo periodo de validación.....	47
Figura 23. Sensibilidad del parámetro ALFA. ....	48
Figura 24. Sensibilidad del parámetro BETA. ....	49
Figura 25. Sensibilidad del parámetro CFLUX.....	49
Figura 26. Sensibilidad del parámetro ECORR. ....	50
Figura 27. Sensibilidad del parámetro FC. ....	50
Figura 28. Sensibilidad del parámetro K4.....	51
Figura 29. Sensibilidad del parámetro KHQ. ....	51
Figura 30. Sensibilidad del parámetro LP.....	52
Figura 31. Sensibilidad del parámetro MAXBAS. ....	52
Figura 32. Sensibilidad del parámetro PCALT.....	53
Figura 33. Sensibilidad del parámetro PCORR. ....	53
Figura 34. Sensibilidad del parámetro PERC. ....	54
Figura 35. Simulación Hidrológica de Caudal del Periodo 2002 - 2012. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 36. Simulación Hidrológica de Caudal en el Periodo 1980 - 1990.....	56

Figura 37. Simulación Hidrológica de Caudal en el Periodo 1984 - 1985.....	57
Figura 38. Simulación Hidrológica de Caudal del Periodo 1974 -2012.....	58
Figura 39. Comparación de los caudales simulados y registrados entre 2002-2012 con los periodos de la fase fría del Fenómeno ENOS.....	60
Figura 40. Comparación de los caudales simulados y registrados entre 1974-2012 con los periodos de la fase fría del Fenómeno ENOS.....	61

### LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones de monitoreo Cuenca río Palo.....	17
Tabla 2 .Porcentaje de registro de datos por estaciones para el periodo 1981 – 2011. ....	20
Tabla 3 .Red de estaciones para el AED en el periodo 1981 – 2011 .....	20
Tabla 4. Grado de correlación entre las estaciones.....	22
Tabla 5. Tendencia de uso de distribuciones de acuerdo a la longitud de datos. ....	23
Tabla 6. Parámetros de calibración del modelo HBV/IHMS .....	26
Tabla 7. Periodos clasificados como La Niña según NOAA, Oceanic Niño Index. ....	28
Tabla 8. Resumen características morfométricas.....	29
Tabla 9. Resultados Estadísticos descriptivos de precipitación mensual diaria.....	32
Tabla 10. Prueba de Normalidad.....	36
Tabla 11. Pruebas estadísticas No paramétricas U Mann Whitney.....	36
Tabla 12. Resultados de las distribuciones de probabilidad LogPerson III, LnNormal y Gumbel; .....	38
Tabla 13. Distribución porcentual de las funciones de probabilidad LogPerson III, LnNormal y Gumbel; .....	38
Tabla 14. Caudal máximo diario para cada período de retorno en la cuenca del río Palo.....	40
Tabla 15. Valor de cada parámetro para la calibración de la cuenca del río Palo .....	41
Tabla 16. Criterios estadísticos del primer periodo de calibración (1974-1984) .....	42
Tabla 17. Criterios estadísticos del primer periodo de calibración (1992-2002) .....	44
Tabla 18. Validación primer periodo (1984-1990).....	46
Tabla 19. Validación segundo periodo (2002-2007) .....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>AED</b>	Análisis Exploratorio de Datos
<b>CC</b>	Cambio Climático
<b>CCG</b>	Coefficiente de Correlación de la probabilidad Graficada
<b>CHA</b>	Condición de Humedad Antecedente
<b>CVC</b>	Corporación Autónoma Regional del Valle
<b>EEA</b>	Error Estándar de Ajuste
<b>ENOS</b>	El Niño Oscilación del Sur
<b>HU</b>	Hidrógrama Unitario
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
<b>MEI</b>	Índice Multivariado de ENOS
<b>NC</b>	Número de Curva
<b>ONI</b>	índice oceánico del Niño
<b>R</b>	Constante de almacenamiento
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográficos
<b>VC</b>	Variabilidad Climática
<b>VM</b>	Variables Macroclimáticas

## INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática y el cambio climático son términos que tienen gran trascendencia a nivel mundial al momento de hablar de anomalías climáticas; éstas asociadas a la construcción social del riesgo generan marcados impactos en los sectores productivos y en la sociedad en general; según Carvajal (2011) en Colombia, solamente las anomalías por inundaciones 2010 – 2011, han generado pérdidas superiores a 6.000 U.S millones, mostrando la necesidad real de generar medidas que permitan adaptarnos al Cambio Climático, y mirar el problema como un verdadero reto de las sociedades.

A nivel mundial las anomalías de origen hídrico comprenden inundaciones, tsunamis, tormentas, sequías, huracanes; de acuerdo con García et al (2012), los fenómenos de variabilidad climática que gobiernan el clima de Colombia están controlados en gran medida por la zona de confluencia intertropical, por los océanos Pacífico y Atlántico, y las cuencas del Amazonas y el Orinoco, lo que resulta en una compleja respuesta hidrológica que entre otros aspectos, dificulta la construcción de escenarios climáticos que apoyen la toma de decisiones para determinar el comportamiento de los recursos hídricos ante presiones de cambio climático y variabilidad climática con bajos niveles de incertidumbre (García et al, 2012).

Es determinante proporcionar alternativas con diversos enfoques para amortiguar las consecuencias de la variabilidad climática, dentro de las cuales encontramos el uso de modelos y sistemas capaces de predecir situaciones peligrosas con la mayor precisión posible, pues el agua no es solamente un recurso fundamental para la vida, sino que además, se constituye en un requisito indispensable para el desarrollo de cualquier actividad humana (Badano, 2010); para ello, la hidrología, a partir de diferentes métodos y modelos se constituye en una ciencia para el estudio de los flujos y dinámicas del agua (Amaya et al, 2009).

Según lo expuesto anteriormente, se hace necesario el uso de herramientas que ayuden a generar conceptos y mejorar la toma de decisiones, como lo son los modelos hidrológicos que permiten profundizar el conocimiento que se tiene de las cuencas ante los regímenes de precipitaciones. En el marco de este proyecto se utilizó el modelo matemático hidrológico HBV/IHMS (Hydrologiska Byråns Vattenvalansavdelning), que permite la predicción en tiempo real de la escorrentía, control de calidad de datos, relleno de datos faltantes en los registros, estudios de balance hídrico, o simulación de los efectos de la variabilidad y/o el cambio climático sobre los recursos hídricos. El modelo HBV, permite simular y estudiar diferentes escenarios de variabilidad climática, con el fin de dimensionar obras hidráulicas o definir medidas de protección y/o prevención ante eventos extremos. La línea de investigación para la modelación hidrológica se ha desarrollado desde los modelos hidrológicos concentrados, que simplifican las características de la cuenca, hasta modelos hidrológicos distribuidos que consideran en detalle la morfología, geología, hidrogeología y usos de suelo (Sanzana, 2008).

Con este trabajo de grado se efectuó la modelación hidrológica de la cuenca del río Palo, mediante el modelo hidrológico HBV, con el fin de asociar los datos generados por el modelo HBV con la fase fría del fenómeno ENOS (La Niña).

Los pasos metodológicos propuestos para la realización de este proyecto son los siguientes: revisión bibliográfica, caracterización morfométrica de la cuenca del río Palo, análisis exploratorio de datos, análisis de frecuencia, validación y simulación utilizando el modelo HBV y modelación de caudales diarios de la cuenca del río Palo para finalmente asociar los caudales simulados con los periodos en los cuales ha ocurrido el fenómeno ENOS en su fase fría La Niña.



## **1.0 OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Calibrar y validar el modelo hidrológico HBV/IHMS en la cuenca del río Palo, para simular caudales máximos diarios asociados a la fase fría del fenómeno ENOS, La Niña.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estudiar el comportamiento Hidrometeorológico de la cuenca del río Palo, mediante el análisis estadístico de precipitaciones y caudales diarios.
- Ajustar el modelo hidrológico HBV/IHMS para la estimación de caudales en la cuenca del río Palo.
- Simular periodos de caudales diarios durante la fase fría del ENOS, La Niña.

## 2.0 ANTECEDENTES

Los inicios de modelación hidrológica se remontan a 1674, cuando P. Perrault presenta el reporte del primer experimento cuantitativo conocido, con el cual estableció el concepto de caudal como un porcentaje de la precipitación. Seguidamente, en 1694 E. Halley demostró que la evaporación de los océanos era capaz de suplir la precipitación continental, en 1802 J. Dalton publica sus mediciones sobre la evaporación; por su parte, R. Maning en 1891 propone su fórmula para flujo en canales abiertos, W. H. Green y G.A. Ampt en 1911 desarrollan conjuntamente un modelo con base física para la infiltración, W.E. Fuller en 1914 introdujo por primera vez el concepto de frecuencia en hidrología y R.E. Horton en 1919 presenta una amplia discusión sobre los procesos de intercepción.

Desde entonces y a partir de los aportes mencionados, la hidrología comenzó a ser vista como una ciencia y no como un área de investigación, como se le consideraba hasta el momento. En 1930 A. Hazen publica Flood Flows donde reúne lo concerniente a los aspectos probabilísticos en hidrología. L.K Sherman en 1932 estableció los conceptos básicos del hidrograma unitario y R.E Horton en 1933 desarrolla su teoría de infiltración y él mismo en 1939 realizó intentos para cuantificar pérdidas como intercepción y almacenamiento en depresiones del terreno según el tipo de cobertura vegetal; En 1938 G.T McCarthy que presentó el primer enfoque del tránsito cinemático conocido como el tránsito de Muskingum. R. A. Hertzler en 1939 describe el proceso de interflujo, R.K Linsley y W.C. Ackerman en 1942 describen un experimento de un elemental balance de humedad para calcular valores diarios de escorrentía, mientras que dos años más tarde C.W. Thornthwaite presenta el concepto de evaporación potencial.

De esta forma fueron dados los conceptos básicos para la modelación hidrológica en espera de medios prácticos adecuados para cubrir los extensos requerimientos de cálculo (Linsley, 1981; Chow. et al. 1994), tales requerimientos fueron satisfechos tras la segunda guerra mundial con el desarrollo de los computadores digitales, permitiendo revolucionar la hidrología y hacer posible el análisis hidrológico a gran escala, utilizando para ello los métodos de simulación en el diseño de sistemas de recursos hídricos, iniciando en el año de 1953 cuando el American Corps of Engineers del ejército estadounidense, utilizó un modelo de simulación para investigar las propuestas correspondientes al río Missouri (Carr y Underhill, 1974).

En 1958 Rockwood divulgó el uso de una computadora digital para transitar caudales a través de la cuenca del río Columbia, evolucionando posteriormente al modelo SSARR. Seguidamente, en 1960 R.K. Linsley y N.H. Crawford reportan su trabajo con el Stanford Watershed Model I (SWM), siendo este un modelo sencillo que usaba lluvia diaria, una función simple de infiltración y una combinación de hidrograma unitario y función de recesión; para producir el caudal promedio diario, este modelo de igual forma fue profundamente transformado entre 1962 y 1966 emergiendo como el SWM IV. En 1961 M. Sugawara presenta una descripción de un modelo tipo tanque, que utiliza una serie de reservorios lineales en varios arreglos en serie y paralelo para representar el flujo de los ríos japoneses, lo que terminó con la generalización de la teoría del hidrograma unitario. Fue la década de los 60, donde se hace de la modelación hidrológica algo más complejo, pues con la implementación de computadoras las simulaciones del ciclo hidrológico se hacen más aproximadas a la realidad (Crawford y Linsley, 1966).

Ya en la década de los años 70's los modelos hidrológicos proliferaron de forma rápida, siendo durante este periodo los más relevantes: Storm Water Management Model SWMM y FreezeModel (1971), National Water Service Forecast River System NWSFRS (1972), HEC-1 y

modelo Sacramento (1973), CLS y modelo ILLUDAS (1974), USDA HL-74 (1975) y modelo ANSWERS (1977) (Linsley, 1981; Larson, et al. 1982).

En los años posteriores, a medida que la variabilidad espacial ha ido ganando importancia en la modelación de las cuencas hidrográficas se ha favorecido de manera especial el desarrollo de modelos distribuidos, porque se ha logrado reconocer las fallas que presentaban los modelos anteriores, ya que los primeros modelos que se generaron, tales como el método racional, la Curva Área Tiempo y La teoría del hidrógrama unitario, tenían una asunción de hipótesis altamente restrictiva. Por su parte, los modelos hidrológicos de segunda generación tales como: el modelo SACRAMENTO, el modelo STANFORD IV y el modelo HSPF fueron sobre parametrizados, además de carecer de significado físico. Los modelos de tercera generación tales como el modelo Arno y el modelo VIC fueron modelos que tenían pocos parámetros pero los significados de estos no estaban relacionados con variables físicas medibles. Los siguientes tipos de modelos podrían tener pocos parámetros y tener variables físicas medibles pero no eran modelos físicamente basados, un ejemplo de este tipo de modelos es: el modelo TOPMODEL. Los tipos de modelos que se encuentran actualmente pueden ser modelos distribuidos y agregados, en los modelos agregados la división de la cuenca se realiza en subcuencas y en los esquemas distribuidos la división de la cuenca y la subcuenca tienen en cuenta otros elementos (Ortiz 2005).

### **3.0 MARCO CONTEXTUAL**

#### **3.1 SITUACIÓN MUNDIAL DEL AGUA**

En la actualidad no es difícil encontrarnos con que gran parte de los países del mundo, incluso los que hasta hace poco se consideraban potencias hídricas como es el caso de Colombia, empiezan a enfrentar más y mayores conflictos hídricos a escala local y regional, que ponen al planeta entero en una preocupación constante ante la alerta de una crisis global de agua; a raíz de lo que, se consideró pensar y proponer nuevas iniciativas globales para el fortalecimiento institucional de los países por medio de una modificación en la evaluación de sus recursos hídricos, ya que durante muchos años el estado del recurso hídrico de los países del mundo ha sido evaluado tomando en cuenta solo la cantidad de agua que escurría por los territorios de las distintas naciones.

Ante esta necesidad de una mayor rigurosidad, se plantearon iniciativas entre las cuales se destacan la organización de redes mundiales y los esfuerzos por realizar evaluaciones globales que permitieran comparar el estado de los recursos hídricos de distintos países con base en metodologías más estrictas y estandarizadas, como lo fueron el Programa para la Evaluación Mundial de los Recursos Hídricos y el Programa Hidrológico Internacional, siendo así, como en el marco de estos proyectos la aplicación de indicadores hídricos surgió como una herramienta para cambiar el estatus quo de las evaluaciones sobre la disponibilidad de agua en el mundo, de forma que todas pudieran ser comparables; y sobresaliendo entre estos indicadores, el índice de disponibilidad per cápita propuesto por Malin Falkenmark (Gardner-Outlaw y Engelman, 1997), quien introdujo también unos valores críticos para el mismo, y que se caracterizaba por ser un indicador sencillo que detecta los países con crisis agudas del agua, tomando en cuenta la población como factor de presión. De acuerdo con los valores críticos establecidos por Falkenmark (1999), en los países en los que la disponibilidad de agua per cápita por año sólo alcanza a los 1000 m<sup>3</sup> se tiene una situación de escasez de agua (Domínguez et al, 2008).

#### **3.2 OFERTA DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA**

Colombia es un país que por su localización geográfica, orografía y gran variedad de regímenes climáticos, posee una extensa riqueza hídrica que la permiten catalogarse como una "Colombia-

potencia hídrica” que ocupaba los primeros renglones en la clasificación mundial sobre abundancia de recursos hídricos, sin embargo, en Colombia de acuerdo con las evaluaciones realizadas por el IDEAM, la disponibilidad de agua en 1985 alcanzaba una cifra aproximada de 60.000 m<sup>3</sup> por habitante al año, pero esta cifra ha evolucionado principalmente debido al crecimiento poblacional del país, y en el año 2000 se redujo hasta el valor de 40.000 m<sup>3</sup> por habitante al año (Domínguez et al, 2008). A pesar de lo anterior, y de acuerdo a lo planteado por Falkenmark, para el año 2000 Colombia no estaba en riesgo de crisis del recurso hídrico, sin embargo no deja de ser preocupante la tendencia de reducción registrada. Tal es así, que según los datos del IDEAM, de mantenerse por una parte el crecimiento poblacional y sectorial actual y por otra los hábitos de uso y consumo actuales, en el término de 40 años el país tendría una disponibilidad hídrica anual per cápita igual 1000 m<sup>3</sup>, alcanzando así los valores críticos señalados por Falkenmark para una crisis del agua.

De acuerdo a la anterior proyección, podemos predecir de forma muy desalentadora que en un periodo de tiempo aproximado de 40 años, Colombia enfrentaría una crisis real de agua.

### **3.3 GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

La Global Water Partnership (2002) definió la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) como “un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales”.

El enfoque integrado coordina la gestión de recursos hídricos en todos los sectores y grupos de interés, y a diferentes escalas, desde la local a la global, lo que permite una visión sistémica de los problemas ambientales, pues además le permite abordar las problemáticas del recurso hídrico en cada uno de los componentes del sistema ambiental, ecológico, social, político, económico y cultural. Por lo anterior el enfoque de la GIRH ayuda a administrar y desarrollar los recursos hídricos en forma sostenible y equilibrada.

## **4.0 MARCO TEÓRICO**

### **4.1 CICLO HIDROLÓGICO**

El ciclo hidrológico es el término que aplica para describir la circulación general del agua en la tierra, que está definido según Campos (1998) como “una sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y re evaporación”.

El ciclo hidrológico involucra el proceso de transporte re circulatorio permanente, este movimiento circulatorio en el ciclo se debe principalmente a dos razones: el sol proporciona la energía para que se eleve el agua (evaporación) y además la gravedad terrestre hace que el agua condensada descienda procesos conocidos como precipitación y escurrimiento; en ese sentido podemos suponer que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos, posteriormente el vapor de agua que resulta del proceso anterior es trasladado por las masas de aire hacia los continentes y a su vez este vapor bajo condiciones meteorológicas adecuadas se condensa para formar nubes, las cuales dan origen a las precipitaciones (Aranda, 1998).

#### **4.1.1 Precipitación**

Es la fase del ciclo hidrológico donde se presenta la caída de partículas líquidas en todos sus estados (Cuadrat, 1997). Las precipitaciones son el mecanismo primario de transporte de agua

desde la atmósfera hasta la superficie terrestre. Cuando las gotas de nubes, que se formaron por condensación del vapor de agua presente en la atmósfera mediante alguno de los procesos del ciclo hidrológico, crecen y se tornan demasiado pesadas para permanecer en la nube, precipitan o caen a la superficie, según Maderey (2005) están clasificadas así:

- Precipitación ciclónica: Es la que está asociada al paso de una perturbación ciclónica y se presenta en dos casos frontal y no frontal.
- Precipitación convectiva: Tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. La masa de aire caliente asciende, se enfría y se condensa y se forma la nubosidad, dando origen a precipitaciones en forma de chubascos o tormentas.
- Lluvias originadas por la orografía o de relieve: Se deben principalmente a masas de aire que precipitan en barlovento.

#### **4.1.2 Infiltración**

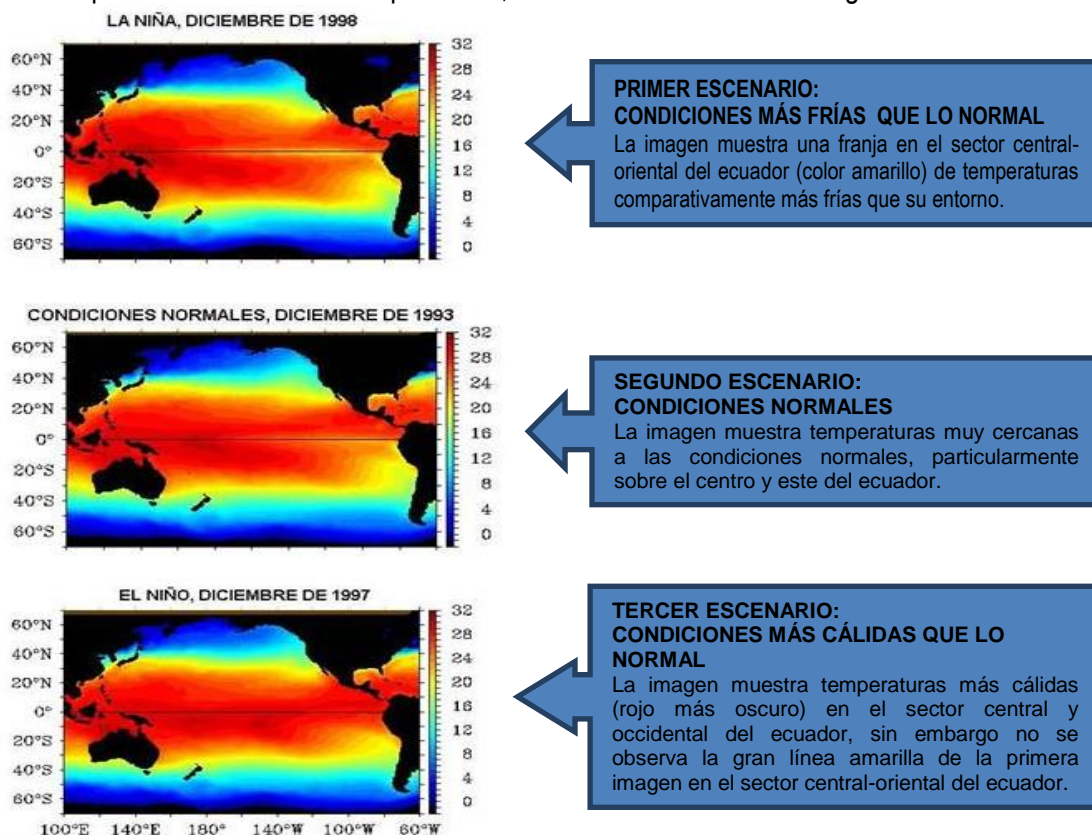
Infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de su superficie en contacto con la atmósfera. Posteriormente se moverá en el subsuelo de acuerdo a diferentes procesos, pudiendo recargar el perfil hídrico, percolar por debajo de la zona radical hacia los acuíferos, conformar el flujo subsuperficial o hipodérmico que termina en un área de drenaje (bajos, ríos, etc.). Su importancia radica en que el agua infiltrada constituye el principal sustento de la vegetación y origen de las aguas subterráneas. Existen Factores que afectan la infiltración, entre los que se destacan dos grupos, Factores que definen las características del terreno o medio permeable y los factores que definen las características del fluido que se infiltra (Marano, 2012).

#### **4.2 FENÓMENO EL NIÑO OSCILACIÓN SUR ENOS**

El ENOS es el conjunto de variaciones climáticas interanuales más poderoso a escala planetaria (Carvajal 2011). El Niño y su fase opuesta La Niña, son las componentes oceánicas del ENOS y corresponden, en términos generales, a la aparición, de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que lo normal en el Pacífico tropical Central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia (IDEAM, 2010). Dicho patrón climático cuasi-periódico ocurre en el Océano Pacífico tropical en promedio cada 4 años, con variaciones entre 2 y 7 años. En sus fases extremas (El Niño y La Niña), se caracteriza por cambios en la temperatura superficial del Océano Pacífico Oeste (calentamiento o enfriamiento, respectivamente) y variaciones acopladas de la presión atmosférica en dicha región. La Niña se caracteriza por temperaturas bajas y duraderas en el Océano Pacífico, mientras El Niño presenta temperaturas más elevadas a las normales. Ambos fenómenos producen cambios en el patrón de vientos atmosféricos sobre el Océano Pacífico tropical (Carvajal 2011).

Los mecanismos que causan la oscilación, están bajo estudio. En el trópico y, en particular, en Colombia, el efecto del fenómeno ENOS en sus fases extremas influye drásticamente (Mesa, 2008; Poveda y Salazar, 2004; Carvajal, 2004; Poveda et al, 2010), caracterizando eventos hidrometeorológicos críticos, que están cambiando las características hidroclimáticas mundiales, aumentando tormentas, sequías, etcétera, que afectan el pronóstico climático (Kundzewicz et al., 2007), potenciando mayor incertidumbre en la gestión hídrica futura (Kabat y Van Shaik, 2003). Mientras El Niño ha ocurrido en los últimos 60 años, con una frecuencia media de 4 años, y variaciones entre 2 y 7 años; la Niña, es un evento no periódico, que sucede con frecuencias

medias de 7 años. (Carvajal, 2011); dentro del fenómeno se identifican tres escenarios representativos de las condiciones en las que se puede encontrar el océano pacífico tropical, desde el punto de vista de sus temperaturas, tal como se muestra en la Figura 1:



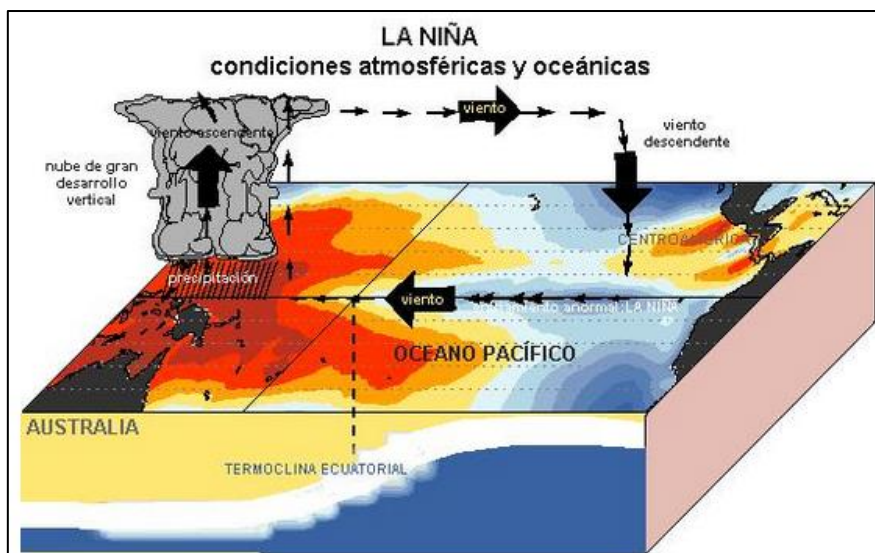
**Figura 1.** Figuras representativas de los tres escenarios en los que puede encontrarse el agua Ecuatorial del Océano Pacífico.

Fuente: (NOAA; 2013)

#### 4.2.1 La Niña: Fase Fría del Fenómeno ENOS

La Niña es el término popular con el cual se conoce la fase fría del ENOS. Es el enfriamiento anormal de las aguas ecuatoriales del Océano Pacífico Tropical, que se caracteriza principalmente por precipitaciones que acumulan cantidades por encima de lo normal sobre Indonesia y en general sobre Centroamérica, al igual que por temperaturas superficiales del mar anómalamente bajas (más frías que lo normal) sobre una extensa zona del océano, particularmente sobre el centro y oriente del ecuador, tal como se muestra en la Figura 2. Este fenómeno influencia considerablemente las condiciones del tiempo en muchas partes del mundo, aunque de manera distinta, y en algunas ocasiones opuesta, a como lo hace El Niño (Solano y Stolz, 2010).

Con base en los reportes de desastres del Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Oriente colombiano (OSSO), y de la Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres (DGPAD), en Colombia entre los años 1950 y 2007 se estableció que los desastres asociados con las lluvias tienen un incremento del 16,1% y los desastres asociados con sequías, una reducción de 99,6%, en relación con las condiciones normales durante los meses en los cuales se presenta el fenómeno de la Niña. También se ha identificado que durante años La Niña incrementa las precipitaciones en las regiones Andina, Caribe y Orinoquia, trayendo como consecuencia un aumento en los reportes de procesos de remoción en masa, avenidas torrenciales e inundaciones (IDEAM, 2010).



**Figura 2.** Características oceánicas y atmosféricas del fenómeno de La Niña.  
Fuente: (NOAA, 2013).

#### 4.2.2 Variabilidad Climática

La variabilidad del clima se refiere a variaciones en las condiciones de estado del tiempo medias y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.) en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La variabilidad puede deberse a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa), (IPCC, 2007).

#### 4.2.3 Escenario de Variabilidad Climática:

Estos escenarios son condiciones climáticas asumidas para efectos de evaluación de impactos de la variabilidad climática o para la evaluación de recursos hídricos (Ruiz, 2010), que pretenden la representación verosímil de contextos futuros construidos a partir de las relaciones entre las variables del clima observado y las variables del clima proyectado. El IPCC (2007) establece que estos escenarios son “una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo”, razón por la que recobran importancia, ya que suelen ser utilizados como fundamento para la elaboración de patrones de impacto futuro (Palma et al. 2007).

Las principales fuentes de incertidumbre en los escenarios de cambio climático (utilizados para evaluar los impactos potenciales) son:

- a) Incertidumbre en las emisiones
- b) Incertidumbres en la variabilidad natural
- c) Incertidumbres asociadas a los modelos climáticos.

De acuerdo con García et al (2012), los fenómenos de variabilidad climática que gobiernan el clima de Colombia están controlados en gran medida por la zona de confluencia intertropical, por la dinámica de los océanos Pacífico y Atlántico, y las cuencas del Amazonas y el Orinoco, lo que resulta en una compleja respuesta hidrológica que entre otros aspectos, dificulta la construcción de escenarios climáticos que apoyen la toma de decisiones para determinar el comportamiento de los recursos hídricos ante presiones de cambio climático y variabilidad climática con bajos niveles de incertidumbre (García, et al. 2012).

#### 4.2.4 Cambio climático

Cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992). De acuerdo al IPCC (2007), el cambio climático es una variación estadística importante en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más).

Aunque las emisiones de gases de efecto de invernadero en Colombia son reducidas con respecto al resto del mundo (0,37%) el país enfrenta riesgos de sufrir los efectos de este problema, por la vulnerabilidad de su población y ecosistemas (Carvajal, 2011); algunos estudios reportan que por efecto del CC se incrementará la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos tales como el fenómeno ENOS, que impactarían considerablemente la región hasta el punto de convertir dichos eventos en una normalidad climática (Carvajal, 2011). Colombia es un país especialmente vulnerable al cambio climático, por la ubicación de su población en zonas inundables de las costas y en suelos inestables de las partes altas de las cordilleras, y por presentar una alta recurrencia y magnitud de desastres asociados al clima (PNUD, 2010), en la Figura 3 se puede apreciar cómo cambia el régimen de precipitaciones proyectándolo al año 2040.

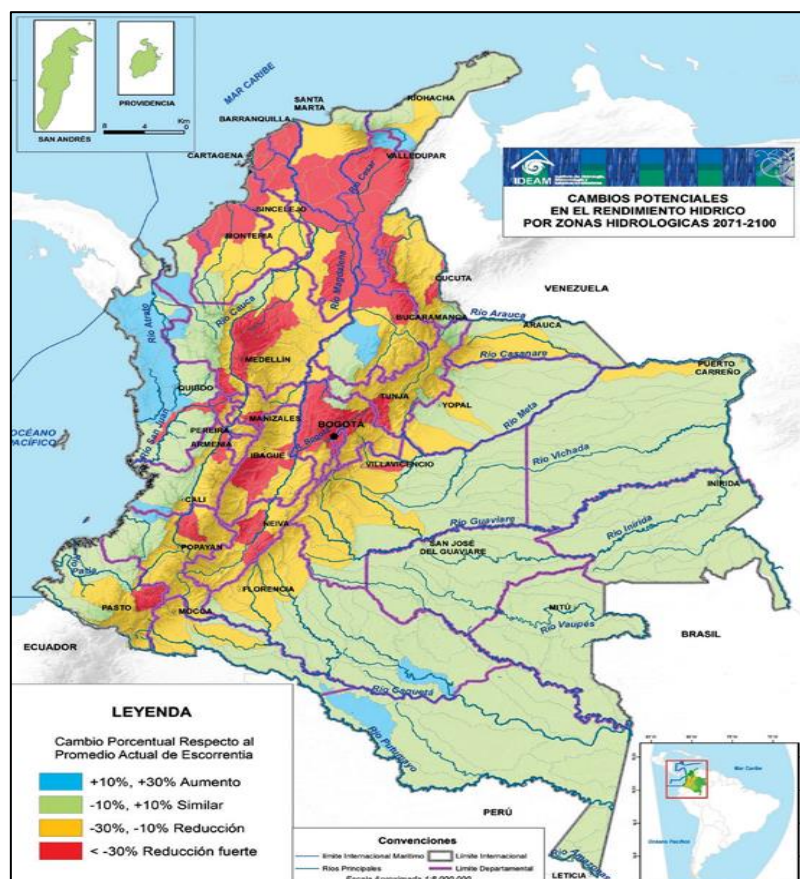


Figura 3. Cambio del porcentaje de la precipitación multimodelo 2011-2040. Fuente: (IDEAM, 2010)



### **4.3 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS**

El análisis exploratorio de datos se aplica a los datos, empleando técnicas para incrementar el entendimiento de los mismos mediante la visualización de las relaciones existentes entre las variables analizadas, con el objetivo de detectar valores atípicos y anomalías, así como también para la determinación de ajustes y evaluación los datos ausentes (Castro y Carvajal, 2010). El análisis exploratorio permite examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística, las técnicas utilizadas para la elaboración del análisis exploratorio de datos son generalmente gráficas, con algunas evaluaciones cuantitativas (UNESCO, 2006).

#### **4.3.1 Análisis Cuantitativo**

El análisis cuantitativo utiliza métodos tales como media aritmética, percentiles y cuartiles, coeficiente de curtosis, varianza y desviación estándar. La media aritmética permite observar el valor característico de la serie de datos, los percentiles y los cuartiles identifican datos atípicos en los datos, la varianza y la desviación estándar determinan la variabilidad de los datos, es decir, mediante estos métodos se puede determinar si los datos son homogéneos o heterogéneos entre ellos.

#### **4.3.2 Análisis Gráfico**

Para realizar el análisis gráfico de datos se utilizan métodos como gráficas de serie de tiempo, histogramas de frecuencia y diagramas de cajas. Las gráficas de serie de tiempo posibilitan observar las tendencias y los cambios en las misma, los histogramas por su parte evidencian si existen cambios o tendencias en las series, los diagramas de cajas permite determinar las diferencias significativas entre las características estadísticas de las series, mientras que las gráficas de normalidad proporcionan un contraste de la normalidad en el conjunto de los datos analizados (Castro y Carvajal, 2010).

#### **4.3.3 Prueba de Normalidad**

Las pruebas de normalidad de los datos permiten determinar una posible distribución normal de los mismos a partir del planteamiento de una hipótesis y la búsqueda del valor de significancia correspondiente para aceptar o rechazar la misma. (Castro y Carvajal, 2010).

#### **4.3.4 Análisis Confirmatorio**

Este análisis de los datos utiliza estadísticos numéricos de resumen que son generados posterior al empleo de un modelo definido, para confirmar o no una hipótesis por medio del empleo de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas, dependiendo de si existe tendencia y/o falta de homogeneidad en la información, se procede a usar una parte de la misma o remover de ésta la tendencia o la falta de homogeneidad (Castro y Carvajal, 2010). Las pruebas paramétricas a diferencia de las pruebas no paramétricas no requieren de ningún supuesto de normalidad o de otra distribución conocida, es por esto que son útiles bajo un amplio rango de distribuciones de la población (Castro y Carvajal, 2010).

### **4.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA**

El análisis de frecuencia es un análisis estadístico que permite estimar la magnitud de los eventos extremos de los sistemas hidrológicos así como su frecuencia de ocurrencia o periodo de retorno a partir de registros históricos de variables hidrológicas que satisfacen ciertos criterios como son aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionariedad mediante el uso de distribuciones de probabilidad. En la práctica usualmente los análisis de frecuencia se llevan a cabo seleccionando el máximo anual de la variable que está siendo analizada, es decir, el flujo pico instantáneo máximo que ocurre en cualquier momento durante el año, con la expectativa de que observaciones sucesivas de dicha variable de un año a otro sean independientes (Chow, 1994)

#### **4.4.1 Período de Retorno**

El interés del análisis de frecuencia no se centra en los fenómenos hidrológicos ocurridos, sino en la probabilidad de que sobrevengan otros fenómenos extremos en algún momento del futuro, probabilidad que se denomina periodo de retorno. El periodo de retorno es el promedio del número de años en que se espera un único fenómeno igual o de mayor magnitud, es decir, es igual al valor inverso de la probabilidad de excedencia durante un único año, como se describe en la Ecuación 1.

$$T = 1/T_a \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,  $T_a$  es el periodo de retorno anual y  $T$  es el periodo de retorno.

#### **4.4.2 Distribuciones de Probabilidad**

Existen muchas distribuciones de probabilidad utilizadas en estudios hidrológicos entre las que se encuentran las distribuciones de Frechet, LogNormal, Gumbel, Wakeby, Weibull, LogPearson III, Logística Generalizada, entre otras; sin embargo pese a las innumerables investigaciones de autores como Waylen y Cavides (1990) y Chow (1994) dedicadas a este tema, ninguno de los modelos parece ser adecuado para todas las aplicaciones prácticas, razón por la que es necesario seleccionar el modelo de distribución de probabilidad a utilizar teniendo en cuenta el problema que se desea resolver y a la naturaleza de los datos con los que se cuenta.

#### **4.4.3 Distribución LnNormal Biparamétrica**

La distribución LnNormal paramétrica se encuentra normalmente distribuida en la forma  $Y = \ln X$ . Esta transformación logarítmica se usa para normalizar la información hidrológica, permitiendo que al utilizarla, se logre reducir la distribución asimétrica de las series de valores extremos (Arbeláez y Castro, 2007).

#### **4.4.4 Distribución Gumbel Biparamétrica.**

Es una distribución asimétrica con límite inferior, por lo que puede ser definida positivamente, ampliamente utilizada en el análisis de frecuencia de series hidrológicas de caudales máximos anuales (Ávila, 2012).

#### **4.4.5 Distribución Log Pearson III**

Esta es una de las distribuciones más eficientes para estimar la frecuencia de valores máximos, puesto que se caracteriza por 5 parámetros que le confieren mayor capacidad de ajuste a los datos y le permite minimizar las deficiencias en comparación con otras distribuciones caracterizadas por menos parámetros (Arbeláez y Castro, 2007).

#### **4.4.6 Pruebas de Calidad de Ajuste**

Estas son pruebas estadísticas rigurosas utilizadas en hidrología para determinar cuál de las distribuciones teóricas que se utilizan para modelar los datos se ajusta mejor a la muestra, o si es o no razonable concluir que un conjunto de observaciones dado ha sido obtenido de una familia de distribuciones en particular y coherentes con un conjunto de datos (Stedinger et al, 1993). Las pruebas utilizadas con mayor frecuencia son la Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y la prueba gráfica, en la cual la escala debe ser tal que la variable aleatoria (caudales máximos anuales) y su correspondiente probabilidad acumulada produzcan una relación lineal.

#### **4.4.7 Coeficiente de Correlación de la Probabilidad Graficada (CCG)**

Es una correlación  $r$  entre los datos observados  $x_i$  y la correspondiente cantidad ajustada determinada, usando las posiciones de graficación  $F_i$  para cada valor de  $x$ . Valores de  $r$  cercanos a 1 indican que las observaciones podrían haber sido dibujadas de una distribución ajustada (Ávila, 2012).

#### **4.4.8 Error Estándar de Ajuste (EEA).**

El error estándar es una medida de la desviación estándar de las magnitudes de eventos calculadas mediante muestras con respecto a la magnitud verdadera del evento; los valores respecto de EEA que en magnitud sean menores del 15% sugieren un buen ajuste (Chow, 1994).

#### **4.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías, modelos físicos y modelos matemáticos (Chow et al., 1994). Los modelos físicos son construcciones reducidas que representan el mundo real y se implementan principalmente para la apertura de obras hidráulicas, estos modelos son utilizados para proveer información y la solución de problemas en sistemas hidráulicos complejos, por su parte los modelos matemáticos están definidos por una ecuación o varias de ellas, para representar la respuesta de las componentes de un sistema hidrológico a un cambio en las condiciones hidrometeorológicas; entre los modelos matemáticos encontramos (HEC, 2000):

- Modelos continuos y de eventos.
- Modelos Agregados o distribuidos.
- Modelos empíricos y conceptuales
- Modelos determinísticos o estocásticos
- Modelos de parámetros medidos y parámetros estimados.

#### **4.6 MODELO HIDROLÓGICO HBV-IHMS**

El modelo hidrológico HBV-IHMS fue utilizado en la presente investigación ya que este es un modelo agregado, sencillo y de calibración relativamente fácil y rápida, que permite modelar registros continuos, además de realizar predicciones en tiempo real de escorrentía, control de calidad de datos faltantes y generar pronósticos a corto, mediano y largo plazo, con el que se han obtenido experiencias exitosas en la modelación de diferentes cuencas de la región (IREHISA, 2014).

Este modelo fue desarrollado por el Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) en Norrköping, Suecia en los años 70 para la gestión de centrales hidroeléctricas (Bergström and Forsman, 1973, Bergström, 1976) y actualmente es utilizado en más de 30 países del mundo para el estudio de múltiples aspectos medioambientales como son los efectos del cambio climático, predicciones hidrológicas, simulaciones de la respuesta del agua subterránea y la generación de balances hídricos.

El modelo HBV es un modelo lluvia – escorrentía perteneciente a modelos de segunda generación, utilizado para la simulación de caudales y pronósticos hidrológico; este tipo de modelos tienen como entrada principal los datos de precipitación conjugados con otras variables físicas y climáticas mediante la cuantificación de procesos hidrológicos a través de funciones matemáticas, así cuantifican permanentemente el agua almacenada en la cuenca y simulan en forma continua los caudales (Suarez et al. ,2009). La estructura básica del modelo HBV se presenta en la Figura 4 (Ortiz 2005).

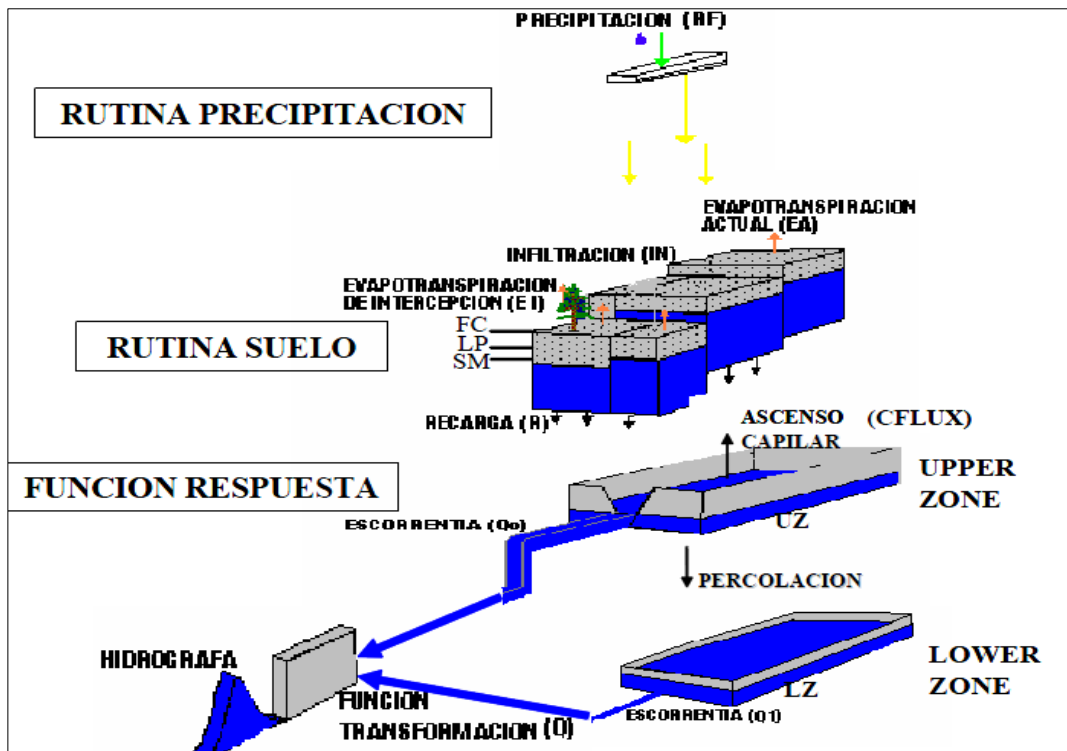


Figura 4. Estructura general del modelo HBV.  
Fuente: (CVC, 2007)

El modelo hidrológico HBV/IHMS contiene las rutinas generales que se describen a continuación:

#### 4.6.1 Rutina de precipitación y fusión de nieve

La precipitación y la nieve se calculan de forma separada, por lo que dadas las condiciones climáticas de la región, los aspectos relacionados con la nieve no son tenidos en cuenta (CVC, 2007). Los parámetros empleados en esta rutina son **PCORR** que representa el factor de corrección de la precipitación para mejorar la representatividad de los registros de entrada y **PCALT** que permite ajustar la precipitación en la cuenca teniendo en cuenta la altitud (CVC, 2007).

#### 4.6.2 Rutina de humedad del suelo

Controla la formación de la escorrentía. Esta rutina está definida por tres parámetros BETA, FC, LP, como se muestra en la ecuación 2; donde **BETA** es la variable que controla el aporte en función de la respuesta ( $\Delta Q/\Delta P$ ) o el incremento en el almacenamiento de la humedad del suelo ( $1 - \Delta Q/\Delta P$ ) por cada milímetro de lluvia; **FC** es la capacidad máxima de retención de agua en el suelo debida a la fuerza de la gravedad (capacidad de campo); **LP** es un fracción de FC, definida como el límite en el almacenamiento de humedad del suelo por encima del cual la evapotranspiración alcanza su valor potencia,. Otro parámetro que tiene incidencia en esta rutina es **CFLUX** con el cual se determina el aporte por ascenso capilar del tanque superior al de humedad del suelo (CVC, 2007).

$$(\Delta Q/\Delta P) = (SM/FC)^{BETA} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

$(\Delta Q/\Delta P)$  = coeficiente de escorrentía

$\Delta Q$  = precipitación efectiva

SM = humedad del suelo

FC = máxima humedad del suelo (capacidad de campo)

BETA = coeficiente empírico

Finalmente, los valores de evaporación ingresados al modelo pueden ser corregidos mediante el parámetro **ECORR** o factor de corrección general de la evaporación.

#### 4.6.3 Rutina respuesta o estimación de la escorrentía

La rutina de generación de escurrimiento es la "Función Respuesta" que transforma los excesos del agua del suelo en escorrentía, incluyendo el efecto directo de la precipitación, evaporación de lagos, ríos y otras áreas húmedas. La función simula las condiciones de escurrimiento superficial (incluyendo subsuperficial) y subterráneo a través de dos tanques, uno superior (no lineal) y uno inferior (lineal), dando origen a la componente rápida y lenta de la hidrógrafa (CVC, 2007).

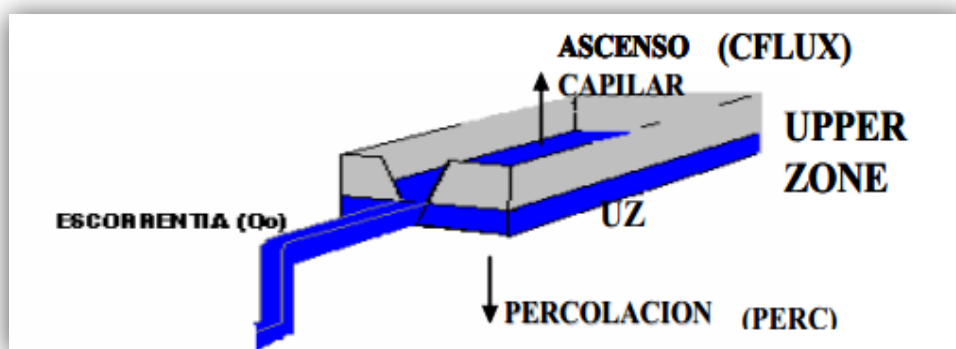


Figura 5. Rutina de respuesta (Zona superior) del modelo HBV/IHMS.  
Fuente: (CVC, 2007)

Mediante el parámetro **PERC** (Percolación), se controla la contribución de agua del tanque superior al tanque inferior. El tanque inferior o flujo base representa el almacenamiento subterráneo de la cuenca. El caudal que contribuye de manera directa desde el tanque superior se obtiene a partir de la ecuación 3:

$$Q_0 = K * UZ^{(1 + ALFA)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

$Q_0$ = Caudal generado en el tanque superior (mm)

$K$ = Coeficiente de recesión del tanque superior

$UZ$ = Almacenamiento en el tanque superior (mm)

$ALFA$ = Parámetro de la función de respuesta

**ALFA** es una medida típica de no-linealidad, de orden 1. El programa usa los parámetros **KHQ**, **HQ** y **ALFA** para calcular el valor de  $K$ .

**HQ** es el caudal máximo en el rango donde se asume la recesión de  $KHQ$  y se calcula utilizando la ecuación 4, este valor no debe ser calibrado ya que es característico de cada cuenca y depende de la serie histórica de registros (CVC, 2007). Una estimación del coeficiente de recesión de **HQ** puede hacerse desde la hidrógrafa observada, y usarla como una primera aproximación al valor de **KHQ**.

$$HQ = KHQ * UZ \quad \text{Ecuación 4}$$

El caudal que contribuye de manera lenta (flujo base) desde el tanque inferior se obtiene con la ecuación 5.

$$Q_1 = K4 * LZ$$

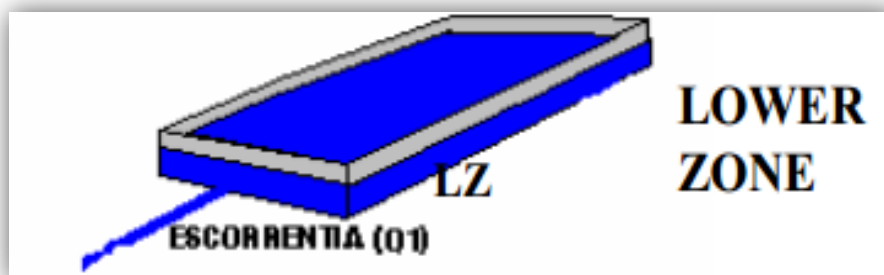
**Ecuación 5**

Dónde:

$Q_1$ = Caudal generado en el tanque inferior (mm)

$K4$ = Coeficiente de recesión del tanque inferior

$LZ$ = Almacenamiento en el tanque inferior (mm)

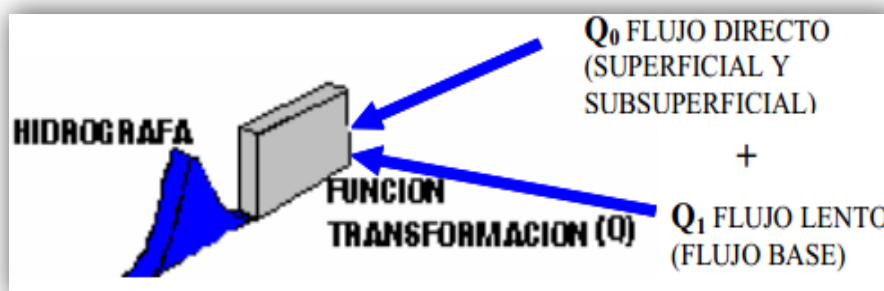


**Figura 6.** Rutina de respuesta (Zona inferior) del modelo HBV/IHMS.

Fuente: (CVC, 2007)

#### **4.6.4 Rutina función de transformación del escurrimiento**

El escurrimiento generado desde la rutina respuesta es transitado a través de una función de transformación la cual permite obtener la escorrentía en el tiempo, es decir la forma de la hidrógrafa a la salida de la cuenca. La función de transformación es un simple filtro técnico con una distribución triangular de los pesos. El tiempo base de la función de distribución está dado por el parámetro **MAXBAZ** (CVC, 2007).



**Figura 7.** Rutina de escurrimiento del modelo HBV/IHMS.

Fuente: (CVC, 2007)

#### **4.7 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HBV**

El modelo HBV/IHMS está basado en una modificación de la teoría de tanques, en este modelo se asume una distribución estadística del almacenamiento que se presenta en la cuenca, más específicamente la humedad del suelo. El HBV/IHMS ha desarrollado gradualmente un modelo semi-distribuido, esto significa que la cuenca puede dividirse en subcuencas y que cada una de éstas tiene una distribución del escurrimiento de acuerdo con su elevación y vegetación (CVC, 2005).

El sistema de modelización incluye numerosas opciones de representación gráfica, además de permitir la aplicación de varios métodos de verificación de los datos antes de la calibración, simulación o preparación de pronósticos. Los resultados impresos o trazados incluyen la

precipitación, el caudal registrado y el calculado, las diferencias acumuladas entre el caudal registrado y el calculado, la humedad del suelo calculada, la acumulación de nieve, el deshielo de la nieve, y la evaporación así como análisis estadísticos de los resultados (WMO, 1999).

El modelo HBV como se ha mencionado anteriormente, es un modelo conceptual semi-distribuido, cuya unidad hidrológica básica es la subcuenca, que acompañada de una caracterización del área de la cuenca, sus elevaciones y la clasificación de uso de suelo nos permite obtener como resultado simulaciones de balance subterráneo, mapas de balance hídrico sinóptico y predicciones hidrológicas en tiempo real. La subdivisión en Subcuencas se realiza cuando se trabaja en una cuenca geográficamente o climatológicamente heterogénea, o cuando hay presencia de lagos con importante extensión (Ortiz 2005).

#### **4.7.1 Requerimientos Del Modelo**

Para poner en operación el modelo HBV/IHMS fue necesario disponer del siguiente tipo de información (CVC, 2005):

- Componentes del Modelo: las componentes del modelo son las características físicas de la cuenca.
- Características físicas de la cuenca: elevación, cobertura y área.
- Variables de Estado: son aquellas que indican el grado de influencia que tienen las estaciones de lluvia en la cuenca analizada.
- Peso de las estaciones: grado de afectación o influencia de las estaciones de precipitación identificadas y localizadas geográficamente en la cuenca analizada.
- Variables de Entrada: son los datos de precipitación, caudal y evaporación provenientes de las estaciones con influencia en la cuenca analizada.

#### **4.7.2 Parámetros De Entrada Al Modelo**

Los datos de entrada requeridos por el modelo son:

**Precipitación:** Es el parámetro de mayor importancia en la implementación del modelo. Se usan los registros de las estaciones pluviométricas que tengan representatividad o que indican el comportamiento en la cuenca, los datos se proporcionan con paso temporal diario, sin embargo, también acepta resoluciones temporales más bajas (García, 2005). El modelo HBV puede emplear cualquiera de estos períodos de tiempo: 24, 12, 6, 4, 3, 2, y 1 hora (WMO, 1999).

**Humedad del suelo:** El procedimiento de cálculo del estado de humedad del suelo requiere datos de evapotranspiración potencial, que pueden ser proporcionados mediante calculo (ecuación de Penman) o por medio de medidas, en este caso es importante que los datos estén depurados de los errores sistemáticos de las herramientas, antes de entrar al modelo (Ortiz 2005).

**Valores Climáticos:** se calculan independientemente para cada Subcuenca, mediante un balance pesado en el cual los pesos se determinan por consideraciones topográficas y climatológicas, o por métodos geométricos, como por ejemplo el método de los polígonos de Thiessen (Ortiz 2005).

**Caudal:** se usan los registros de las estaciones hidrométricas instaladas en la cuenca del río Palo, sus tributarios y estaciones de las cuencas vecinas.

## 5.0 METODOLOGÍA

El desarrollo de la metodología se llevó a cabo mediante el esquema que se muestra a continuación en la Figura 8.

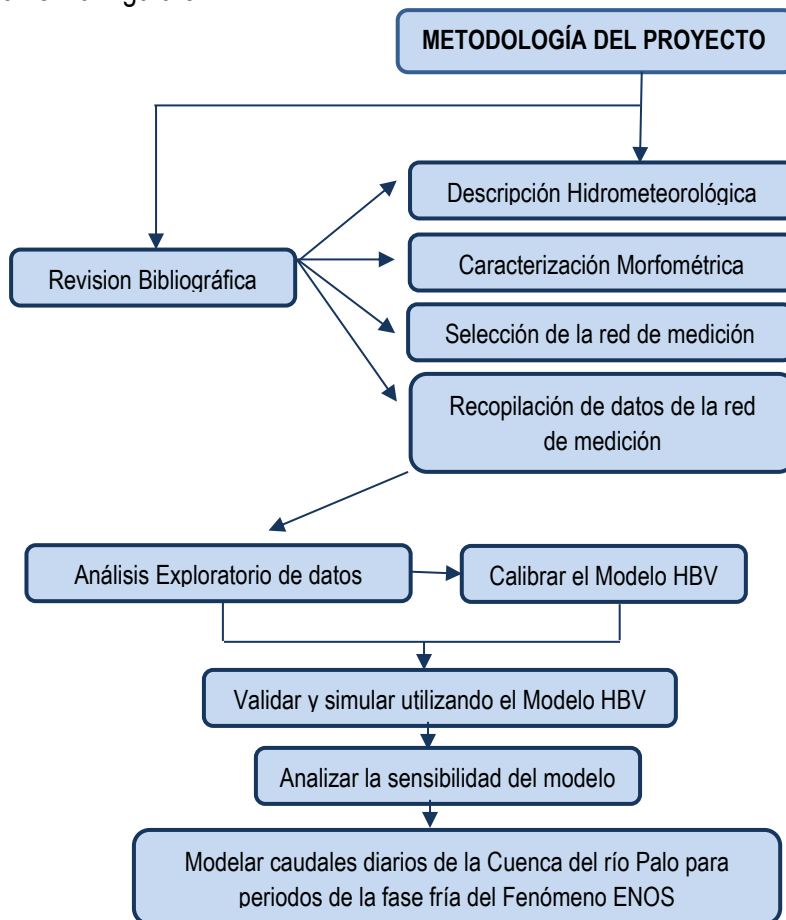


Figura 8. Esquema de la metodología de estudio.

Fuente: Elaboración Propia

### Objetivo Específico 1

#### 5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

La información hidroclimatológica se obtuvo de la red de monitoreo en la cuenca del río Palo, perteneciente a la Corporación Autónoma del Valle del Cauca (CVC) y la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC); las estaciones que componen esta red son de tipo:

**Pluviométrica:** Precipitación total mensual multianual.

**Pluviográfica:** Caudal medio mensual multianual.

**Climatológica:** Brillo solar medio, evaporación total, humedad relativa media, recorrido medio del viento, temperatura media y tensión de vapor media, a nivel mensual multianual.

#### 5.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN CORRESPONDIENTE AL SUELO

La recopilación de la información correspondiente al suelo, se realizó a partir de la información Hidrometeorológica y cartográfica que se recopiló con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la revisión bibliográfica realizada, además el número de curva permitió tener una mayor comprensión del suelo y su comportamiento durante precipitaciones.



### 5.2.1 Número de Curva (CN)

El número de curva (CN) fue empleado para tener una mayor comprensión del comportamiento del suelo en la cuenca del río Palo, ya que el valor asignado a este parámetro permite transformar la precipitación total en precipitación total efectiva, con lo que es posible tener una mayor comprensión de la escorrentía en la cuenca, a partir de descontar a la precipitación todas aquellas pérdidas que se deben a factores tales como la infiltración, la evapotranspiración, la intercepción y el almacenamiento superficial. De acuerdo con la relación existente entre variables como pendiente del terreno, condición de humedad antecedente, uso, tipo y condición hidrológica del suelo entre otras, se decidió acoger el número de curva determinado por IREHISA (2014) en la *Guía Básica para la Estimación del Parámetro Número de Curvas en las Cuencas del Valle Geográfico del Alto Cauca*.

### 5.3 SELECCIÓN DE LA RED DE MEDICIÓN

En el área geográfica de la cuenca del río Palo actualmente hay cinco estaciones de monitoreo de diferentes tipos, para llevar a cabo este proyecto se utilizaron adicionalmente estaciones que no se encontraban en el área geográfica de la cuenca de estudio, esto con el fin de sustituir las estaciones con datos faltantes, aumentar la disponibilidad de datos para el modelo y teniendo en cuenta que estas estaciones tienen influencia directa con las precipitaciones en la región, es así como se seleccionó una red de medición inicial que consta de quince estaciones de diferentes tipos, tal y como se muestra en la Tabla 1, donde adicionalmente se puede apreciar algunas características de cada una; las estaciones que no se encuentran en los límites de la cuenca del río Palo son consideradas estaciones de influencia, y se seleccionaron siguiendo el criterio de estar a un rango máximo de 5 km del límite de la cuenca del río Palo como se puede observar en la Figura 9.

Para el caso de la estación Univalle, no se tuvo en cuenta el criterio de los cinco kilómetros después del límite de la cuenca del río Palo, esto debido a la disponibilidad de estaciones climatológicas en la zona; se seleccionó la estación Univalle pues esta fue la más cercana y con mejor calidad de registros.

**Tabla 1.** Estaciones de monitoreo Cuenca río Palo.

Estación	Categoría	Cuenca	Altitud (msnm)	Inicio
Silvia	Pluviométrica	Piendamó	2650	Ene-46
Cajones	Pluviométrica	Desbaratado	2370	May-72
Corinto	Pluviométrica	Río Palo	1300	Ene-72
Villa Rica	Pluviométrica	Río Palo	1450	Mar-72
Tacueyo	Pluviométrica	Río Palo	1790	Ene-72
Jambalo	Pluviométrica	Río Palo	2322	Mar-72
El Trapiche	Pluviométrica	Río Palo	1500	Mar-71
Palo Bocatoma	Pluviométrica	Río Palo	1069	Sep-79
Palo Bocato(q)	Pluviométrica	Río Palo	1060	Ago-45
Florida	Pluviométrica	Pescador	1375	Mar-01
Los Andes	Pluviométrica	Fraile	1960	Mar-71
Univalle	Climatológica	Lili	989	Ene-85
Santa Teresa	Pluviométrica	Nima	3690	Jun-69
Palo Pto Tejada	Pluviométrica	Río Palo	966	Ene-97
Palo Pto Tejada(q)	Pluviográfica	Río Palo	966	Ene-45

Fuente: Elaboración Propia

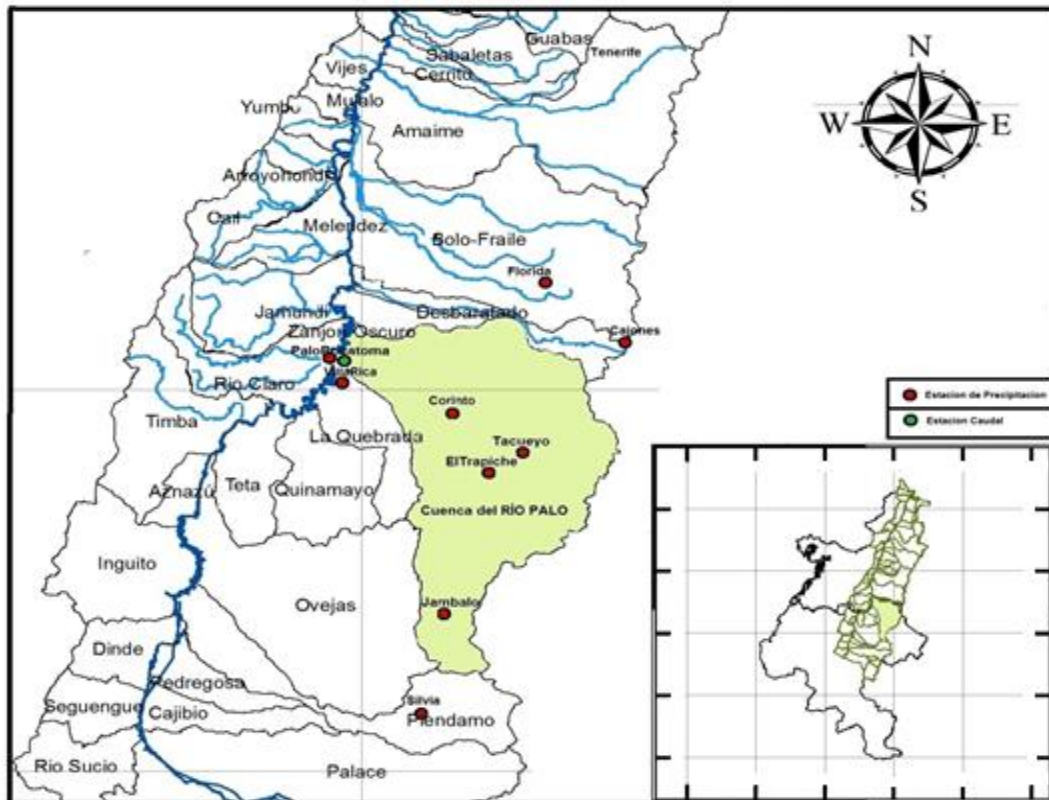


Figura 9. Estaciones con influencia en la cuenca río Palo.  
Fuente: Modificado de (IREHISA, 2014)

#### 5.4 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LOS DATOS

El análisis de consistencia requirió la utilización de los datos observados en las estaciones hidrométricas y la verificación de los valores correspondientes a la precipitación ya que es común encontrar errores accidentales que se pueden originar por errores en el instrumento, perturbaciones aleatorias por la vida silvestre (animales) o errores sistemáticos debido a la instalación de un pluviómetro cerca de algún obstáculo que pueda llevar a mediciones de precipitación por defecto (UNESCO 2006).

A partir de lo anterior se logró realizar una evaluación espacial de la precipitación, para lograr verificar que las observaciones fueran consistentes, es decir, que la estación de interés permaneciera durante el período de observaciones en las mismas condiciones, que no se deberían alterar significativamente a menos de que se cambie el instrumento. Para esta verificación se empleó el método de doble acumulada (CDA) o método de doble masa (MDM). Este método se aplicó para detectar errores sistemáticos en regiones homogéneas definidas en este caso por el mismo régimen pluviométrico, para su realización se debió contar con una estación pluviométrica confiable o patrón, la cual se contrastó gráficamente con una estación para la cual se creía que existía algún nivel de error sistemático en sus registros y posteriormente se realizó un contraste gráfico, definiendo el registro de la estación patrón en el eje x y el registro de la estación dudosa en el eje y. Este método asume además que para un lapso constante, se debería manifestar una relación estable de proporcionalidad entre los datos registrados por la estación patrón y los registrados por la estación dudosa, lo que significa que la relación de incrementos, entre los datos de precipitación de la estación dudosa y de la estación patrón, debería permanecer relativamente constante de no tener errores sistémicos (UNESCO 2006).

## 5.5 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

Se realizó a partir de los datos de precipitación y caudales diarios que se entregaron en formato Excel, los cuales tenían registro de datos desde el año 1971 hasta 2011. Este se aplicó a los datos proporcionados por la CVC, de las diferentes estaciones con influencia en la cuenca del río Palo, empleando técnicas para incrementar el entendimiento de los datos, visualizar las relaciones existentes entre las variables analizadas, detectar valores atípicos y anomalías, así como también determinar los ajustes y evaluar los datos ausentes, tal como se ilustra en la Figura 10.

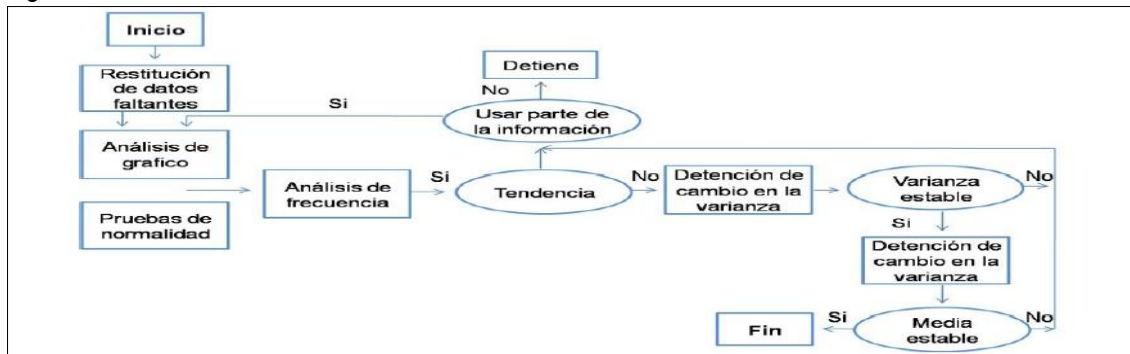


Figura 10. Análisis exploratorio y confirmatorio de datos.

Fuente: (Castro y Carvajal, 2010).

### 5.5.1 Preparación de los datos para el AED

Los datos obtenidos contemplaban tres tipos de registro: los días en los que no se obtenían datos, indicados por los dígitos -999; ausencia de precipitación, indicado por el número 0; y datos de la precipitación registrada para los demás días; por lo que fue necesario preparar dichos datos con el software Microsoft Excel, con el que, utilizando la opción de formato condicional se logró reemplazar los valores sin registro y resaltar las celdas con ausencia de datos.

Este procedimiento se realizó con el fin de evitar errores en la cuantificación de los parámetros estadísticos y gráficas correspondientes al AED, por lo que fue necesario procesarlos de la manera antes descrita.

### 5.5.2 Selección de las estaciones para el AED

Para la selección de la red de estaciones a las cuales se realizó el AED se tuvo en cuenta diferentes factores como son la previa selección de la red de estaciones de la cuenca del río Palo que fueron utilizadas por el modelo, la ubicación espacial de las estaciones en la cuenca del río Palo, así como también la cantidad de datos faltantes en cada una de las estaciones; además de lo anterior, para la selección se diseñó una plantilla en Microsoft Excel para cada estación perteneciente a la red, separando por columnas los datos anuales, mensuales y diarios; de igual forma, se diseñó una tabla dinámica para cada estación con el fin de obtener valores de precipitación mensual a partir de los datos diarios, todo lo anterior, con el objetivo de hacer más fácil la labor de encontrar los periodos con ausencia, disponibilidad y/o continuidad de datos a partir de los datos diarios.

Posteriormente, se diseñó una tabla en la cual se condensaba la disponibilidad de datos mensuales por año en cada una de las estaciones de la red, de esta forma las columnas representaban las estaciones y las filas los años (Ver Anexo 1); logrando identificar los periodos en los cuales existía continuidad de datos y permitiendo la elección de aquellos que contaban con una continuidad de mínimo 10 años de acuerdo a lo exigido por el modelo HVB; de acuerdo a esto, se encontró que el periodo que se ajustaba mejor a los requerimientos del modelo fue el comprendido entre 1981 y 1990, sin embargo se encontró también que 6 de las 12 estaciones de

la red no cumplían con el criterio de un 10% máximo de ausencia de datos (como se observa en la Tabla 2) para completar datos faltantes, tal como establece Guevara (2003) en el documento Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos.

Por lo anterior, fue necesario entonces replantear el criterio de máximo 10% de datos faltantes, ya que no existía representatividad geográfica por parte de las estaciones que si cumplían este criterio, por lo que se decidió aumentar este máximo del 10% al 25 %, con lo que se encontró que aun así algunas regiones de la cuenca no tenían representación en la red seleccionada, razón por la que se hizo necesario definir de nuevo el rango de registro de datos, pasando de 1971-2011 a 1981-2011, de esta forma se redujo considerablemente la ausencia de datos por estaciones tal como se muestra en la Tabla 3, excluyendo únicamente las estaciones de Los Andes y Palo Pto. Tejada, con lo que la red quedo definida para el AED como se observa en la Tabla 3.

**Tabla 2 .**Porcentaje de registro de datos por estaciones para el periodo 1981 – 2011.

%PORCENTAJE DE REGISTRO DE DATOS POR ESTACIONES PARA EL PERIODO 1981-2011													
	Palo Bocatoma	El Trapiche	Jambalo	Tacueyo	Villa Rica	Corinto	Cajones	Florida	Los Andes	Silvia	Univalle	Palo Pto Tejada	Palo Pto Tejada(q)
Total	11322	11322	11322	11322	11322	11322	11322	11322	11322	11322	11322	11322	11322
Disponibles	9762	11025	11028	11052	9804	11106	10269	10779	3673	8509	10261	1782	10554
Faltantes	1560	297	294	270	1518	216	1053	543	7649	2813	1061	9540	768
% Faltantes	13,78	2,62	2,60	2,38	13,41	1,91	9,30	4,80	67,56	24,85	9,37	84,26	6,9

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3 .**Red de estaciones para el AED en el periodo 1981 – 2011

Estación	Categoría	Cuenca	Altitud(msnm)	Inicio
Univalle	Climatológica	Meléndez	996	Nov-82
Silvia	Pluviométrica	Piendamo	2650	Ene-46
Cajones	Pluviométrica	Desbaratado	2370	Mayo-72
Corinto	Pluviométrica	Río Palo	1300	Ene-72
Villa Rica	Pluviométrica	Río Palo	1450	Mar-72
Tacueyo	Pluviométrica	Río Palo	1790	Ene-72
Jambalo	Pluviométrica	Río Palo	2322	Mar-72
El Trapiche	Pluviométrica	Río Palo	1500	Mar-71
Palo Bocatoma	Pluviométrica	Río Palo	1069	Sep-79
Florida	Limnimétrica	Pescador	1375	Mar-01
Palo Pto Tejada(q)	Limnimétrica	Río Palo	966	Ene-45

Fuente: Elaboración Propia

## 5.6 ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES

Los datos climáticos o hidrológicos por las características de su registro y transmisión fácilmente pueden presentar vacíos en las series (también llamados lagunas de información), ya sea porque el dato no se ha registrado o porque se sabe que es erróneo, estos vacíos muchas veces representan una restricción al uso simultáneo de los registros obtenidos en distintos puntos de una región. En este sentido, los métodos de relleno de datos faltantes se basan en suponer que existe una estructura de dependencia espacial que permite para cada intervalo de tiempo completar el valor faltante con información regional (UNESCO, 2006).

La estimación de datos diarios faltantes se realizó por medio de dos procedimientos complementarios, en los que se utilizó inicialmente el análisis estadístico realizado por la CVC en 2007 “Análisis Estadístico de Estaciones Hidroclimáticas Requeridas por el Modelo Hidrológico HBV - IHMS”, que plantea el uso de estaciones de reemplazo en caso de ausencia de datos, por medio de factores de correlación encontrados por el método de los polígonos de Thiessen para cada una de las estaciones. Por su parte, para la estimación de datos mensuales faltantes, éstos fueron completados utilizando el método de proporciones normales.

### **5.6.1 Estimación de datos faltantes para series mensuales**

Para estimar los datos faltantes en las series mensuales de precipitaciones y caudal se utilizó el método de proporciones normales descrito por Guevara (2003), que permite estimar dichos datos siempre y cuando los datos faltantes no superen un máximo del 10% del total de datos, para este caso, como se estableció en la selección de la red de estaciones para el AED se decidió que este máximo de datos faltantes sería del 25% del total de los datos, con el fin de garantizar que hubiera representatividad de las estaciones a la ubicación espacial de las mismas en la cuenca del río Palo, apoyándose en los años que poseen informaciones de precipitaciones completas, es decir, para realizar la estimación de datos fue necesario contar con años en los cuales los registros estaban completos. Además de lo anterior, es de resaltar que solo una de las estaciones de Precipitación no cumplía con la disponibilidad de datos mínima, por lo que se excluyó del proceso de AED, dado que para esta estación fue imposible realizar el procedimiento de completar datos faltantes de acuerdo a los criterios del método escogido (Método de proporciones normales) y una estación de caudal que no contaba con la adecuada continuidad en los datos, por lo que teniendo en cuenta que las estaciones de caudal no tienen estaciones de reemplazo, se decidió excluirla.

Posteriormente, se procedió a realizar un análisis para encontrar los puntos con datos faltantes, verificando que en cada uno de ellos fuera posible aplicar el método de proporciones normales según la Tabla 2, de ésta forma y utilizando la Ecuación 8 se completaron los datos.

$$DF = \frac{\sum P_m * \sum P_a}{\sum P_{ta} - \sum P_m} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

Pm: Promedio de precipitación mensual

Pa: Promedio de precipitación anual

Pta: Promedio total de precipitaciones anuales

### **5.6.2 Estimación de datos faltantes para series diarias**

Teniendo en cuenta que el Modelo Hidrológico HBV utiliza el método de reemplazo en el caso de ausencia de datos, se determinó que para realizar el respectivo análisis de las series diarias era necesario completar los datos utilizando estaciones de reemplazo, ya que por la gran cantidad de datos (11322) se hacía demasiado engorroso el proceso de completar los datos faltantes. Para la determinación de las estaciones que reemplazarían aquellas con ausencia de datos, primero se verificó la disponibilidad en cada una de las estaciones y se determinó jerárquicamente que estaciones podrían ser reemplazo de otra; seguidamente con base en el estudio realizado por la CVC en 2007 “Análisis Estadístico de Estaciones Hidroclimáticas Requeridas por el Modelo Hidrológico HBV - IHMS” se determinó por medio del uso de polígonos de Thiessen el grado de correlación entre dichas estaciones, tal como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Grado de correlación entre las estaciones.

Estación	Estación de Reemplazo	Correlación	Factor de correlación
<i>El Trapiche</i>	Corinto	0,719	1,018
	El Tambo	0,65	0,806
	Coconuco	0,641	1,027
<i>Jambalo</i>	Aepto. Machangara	0,631	0,619
	Coconuco	0,557	0,767
	Piendamo	0,555	0,643
<i>Palo Bocatoma</i>	Jambalo	0,535	0,920
	Tacueyo	0,474	0,638
<i>Tacueyo</i>	Coconuco	0,568	1,106
	Jambalo	0,537	1,143
<i>Silvia</i>	Piendamo	0,550	0,682
	Corinto	0,468	0,806
<i>Cajones</i>	La Selva	0,629	1,415
	La Diana	0,604	1,067
<i>Florida</i>	La Fonda	0,653	0,734
	Univalle	0,618	1,063
<i>Villa Rica</i>	Ingenio La Quinta	0,738	1,819
	Juanchito	0,611	1,810
<i>Corinto</i>	Coconuco	0,756	1,009
	El Trapiche	0,719	0,983

Fuente: CVC, 2007

Después de reemplazar los datos faltantes utilizando las estaciones correlacionadas, se realizó una segunda evaluación para encontrar datos ausentes, los cuales fueron completados mediante el método de proporciones normales utilizado para completar las series mensuales.

### **5.6.3 Análisis Cuantitativo**

Para realizar el análisis cuantitativo se utilizaron métodos tales como media aritmética, percentiles y cuartiles, coeficiente de curtosis, varianza y desviación estándar. La media aritmética permitió observar el valor característico de la serie de datos, los percentiles y los cuartiles por su parte se utilizaron con el objetivo de identificar valores atípicos en los datos, mientras que la varianza y la desviación estándar permitió determinar la variabilidad de los mismos.

Para el análisis de los valores extremos y análisis descriptivos numéricos se utilizó el programa SPSS, para lo cual se tuvieron en cuenta los valores mensuales y diarios del periodo seleccionado y se organizaron en forma descendente, posteriormente se procedió a utilizar las diferentes opciones dentro del software que permitieron encontrar los datos necesarios para dicho análisis.

### **5.6.4 Análisis Gráfico**

Para realizar el análisis gráfico de datos se utilizó la "Guía Metodológica Para El Análisis Exploratorio Y Confirmatorio De Datos" (2013) del grupo IREHISA y el programa MiniTab 16, donde se obtuvieron Histogramas y Diagramas de Cajas; los histogramas permitieron observar los cambios o tendencias en las series y analizar su forma para comprender los datos; el diagrama de cajas permitió determinar las diferencias significativas entre las características estadísticas de las series.

### 5.6.5 Prueba de Normalidad

Ésta se utilizó como un modo de análisis de los datos, con la cual se pudo confirmar la hipótesis de la normalidad de los datos, dependiendo de si existe tendencia y/o falta de homogeneidad en la información; de acuerdo con Castro y Carvajal (2010) cuando se utilizan estas pruebas se debe proceder a usar una parte de la misma o remover de esta la tendencia o la falta de homogeneidad. La prueba de normalidad se realizó utilizando el Software SPSS Statics Data Editor donde se analizó con la prueba de Kolmogorov- Smirnov, ya que el tamaño de la muestra era mayor a 50; seguidamente se evaluó la significancia resultante y se encontró que en todas las estaciones era igual a 0,00, teniendo en cuenta que el nivel de confianza que se estableció como hipótesis era del 95%, en ninguna estación se cumplió dicha condición pues en ningún caso la significancia dio mayor a 0,05; adicionalmente se realizó un chequeo de las gráficas de distribución normal y se encontró que los datos en muchos casos no se ajustaban a la tendencia de los mismos, por lo tanto se concluyó finalmente que los datos presentaban una distribución no normal, por lo que se determinó utilizar las pruebas estadísticas no paramétricas.

### 5.6.6 Análisis Confirmatorio

Para realizar la prueba no paramétrica se escogió el método de U Mann Whitney, para lo cual se procedió a organizar la serie de datos históricos en dos columnas; en la primer columna se colocan los datos de precipitación en orden cronológico para cada estación, en la segunda columna se le asigna un valor a cada estación para que el programa reconozca la población a comparar.

La prueba se la realiza utilizando el software SPSS Statics Data Editor, este procedimiento se realiza con cada estación, comparándolas una a una entre ellas (IREHISA, 2013).

### 5.7 ANÁLISIS DE FRECUENCIA.

Para la realización del análisis de frecuencia se utilizaron hojas de cálculo de Excel, las cuales se ajustaron con los algoritmos implementados para el desarrollo de cada una de las distribuciones que permitieran el análisis de frecuencia de las estaciones de precipitación y caudal.

De acuerdo con Castro y Hoyos (2004) la tendencia de uso de las distribuciones depende del periodo de registro de datos; para este caso, se contaba con un periodo de registro de 31 años, razón por la que se tuvieron en cuenta las distribuciones correspondientes a longitudes mayores a 30 años; en la Tabla 5 se muestran diferentes funciones de distribución de probabilidad.

**Tabla 5.** Tendencia de uso de distribuciones de acuerdo a la longitud de datos.

Distribución	Probabilidad empírica	Longitud
LnNormal MM	Weibull	< 30
LnNormal MPP	Gringorten	>30
Log Pearson III	Weibull	>30
Gumbel MM	Blom,Cunnane	<30
Gumbel MV	Weibull	>30
Wakeby MPP	Landwerh	<30 &> 30

Fuente: (Castro y Hoyos, 2004).

Las funciones de distribución de probabilidad analizadas se describen a continuación:

La Ecuación 9 describe el valor de la precipitación y caudales máximos diarios obtenidos a partir del factor de frecuencia.

$$X_t = \hat{\mu} + K\sigma \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

$X_t$ : Precipitación o caudales máximos diarios para el período de retorno  $T_r$

$\mu, \sigma$ : Parámetros de distribución, correspondientes a la media y la desviación estándar de los datos respectivamente.

K: Factor de frecuencia, cuyo cálculo depende de cada función de distribución.

La Ecuación 10 describe la distribución Gumbel o Valor Extremo tipo I.

$$K = -\sqrt{6/\pi} \{0.5772157 + \ln[-\ln(1-1/T)]\} \quad \text{Ecuación 8}$$

La Ecuación 11 describe la distribución LogNormal:

$$\ln(X_T) = \hat{\mu}_y + K\hat{\sigma}_y \quad \text{Ecuación 9}$$

$$K = z = w \frac{2.515517 + 0.802853w + 0.0103128w^2}{1 + 1.432788w + 0.189269w^2 + 0.001308w^3}$$

Donde w es:

$$W = [\ln(1/p^2)]^{1/2}, \quad p \text{ es la probabilidad de excedencia } (0 < p < 0,5), \quad p = 1/T$$

Para la distribución de LogPearson III (Ecuación 10) se debe tomar los logaritmos de la información hidrológica  $Y = \log X$ ; el factor de frecuencia depende del periodo de retorno  $T$  y del coeficiente de asimetría  $C_s$ , ( $Y, z$ , se calcula igual que la distribución LogNormal).

$$Kt = z + (z^2 - 1) + 1/3 (z^3 - 6z) K^2 - (z^2 - 1) K^3 + 2K^4 + 1/3K^5 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde  $K = C_s/6$

### 5.7.1 Análisis de Frecuencias de Eventos Máximos Diarios de Precipitación y Caudal

Con el fin de conocer y analizar los eventos extremos registrados en la cuenca del río Palo, se recolectó la información histórica de precipitaciones diarias registradas en 10 estaciones y de caudales diarios registrados en 1 estación, a las que se le realizó un análisis de frecuencia con el fin de establecer los periodos de retorno asociados a dichos eventos.

El registro histórico reúne toda la información disponible desde 1981 hasta 2011, correspondiente a series de caudales y precipitaciones máximos diarios. De acuerdo con la disponibilidad y confiabilidad de la información suministrada por la Dirección Técnica Ambiental de la CVC, se procedió a evaluar la dinámica de la precipitación y caudales máximos diarios a partir del análisis de frecuencia para las series máximas anuales de las estaciones más representativas, ya que éstas garantizan mayor independencia entre los datos en comparación con la serie de excedencias, para periodos de retorno de 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años, con lo que se espera que como menciona Chow (1994) a medida que el período de retorno es mayor, los resultados de las dos metodologías se vuelvan muy similares.

### 5.7.2 Pruebas de Calidad de Ajuste

Por su parte, de acuerdo con las expresiones empíricas de probabilidad y por medio del CCG y el EEA (Ecuación 13 y 14 respectivamente) se logró evaluar la calidad del ajuste gráfico de los datos respecto a la distribución teórica y la dispersión de los registros estimados respectivamente, teniendo en cuenta estas variables fue posible determinar la calidad del ajuste para cada distribución, considerando como un ajuste bueno cuando se obtiene un valor de EEA con respecto a la media muestral no mayor de un 15% y cuando el valor del CCG de la serie analizada es cercano a 1; para el caso en que las pruebas no coincidieron en el mejor ajuste



para una misma función, fue necesario seleccionar aquella con menor EEA, por ser éste el índice que representa mayor diferencia entre funciones (Castro y Hoyos, 2004).

$$CCG = \frac{\sum (xi - \mu)(wi - w_{media})}{[\sum (wi - \mu)(wi - \mu)^2 \sum_{i=1}^n (wi - w_{media})^2]^{0.5}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde,

$\mu$  denota el valor promedio de las observaciones y  $w$  denota el valor promedio de las cantidades ajustadas.

La ecuación 12 define la EEA, ésta es utilizada para seleccionar la mejor función de distribución, para lo que se compara la distribución empírica con los resultados de la misma.

$$EEA = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Xi - Wi)^2}{(n - np)} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde  $X_i$  son los eventos observados y  $W_i$  son los eventos calculados, no es el número de parámetros de ajuste.

### Objetivo Específico 2

#### 5.8 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO HBV-IHMS

El proceso de calibración se llevó a cabo a partir de la configuración inicial definida por la CVC, entendiendo que ésta funciona con base en la aplicación de tres criterios fundamentales que permitieron ajustar las hidrógrafas medidas con las generadas por el modelo, todo a partir de la información de lluvias y las condiciones climatológicas de la cuenca. Los criterios de calibración utilizados fueron los siguientes (CVC, 2005):

- Inspección visual de las hidrógrafas generadas y registradas.
- Observación continua de las diferencias acumuladas entre la hidrógrafa calculada por el modelo y las registradas, buscando que el valor correspondiente a este parámetro fuera lo más cercano a cero (0) CVC (2005).
- Para el coeficiente de determinación, la recomendación según la CVC (2005) el valor de  $R^2$  debe de ser lo más cercano a 1,0, en la práctica se aceptan valores entre 0,80 y 0,95, para que se pueda considerar aceptable la calibración.

Para la etapa de calibración y validación del modelo hidrológico HBV, se debieron escoger periodos en los cuales se tenían registros completos de caudal y un mínimo de 15 años de registro en las estaciones de caudal (10 años para calibrar el modelo y 5 años para validarlo).

Para empezar a desarrollar el proceso de calibración se tuvo en cuenta la disponibilidad de datos en las estaciones pluviométricas, por lo cual fue necesario realizar una revisión de la disponibilidad de los mismos, asegurando el mínimo de 15 años previamente establecido para el proceso de calibración, es así como para los casos donde no existían datos, se consideró el informe de la CVC (2007) "Análisis Estadístico De Las Estaciones Hidroclimatológicas requeridas por el modelo hidrológico HBV-IHMS", para obtener las estaciones de reemplazo de cada estación de precipitación incompleta, a diferencia del AED este proceso no se realizó con el Software Microsoft Excel, sino, utilizando el modelo hidrológico HBV - IHMS por medio de la opción "MISSING DATA" (ver Anexo 2), culminado este paso se procedió a realizar la calibración.

Para el caso de la estación Pluviográfica no se utilizaron estaciones de reemplazo, ya que los caudales son propios para cada cuenca, por lo cual se utilizó una metodología distinta a la que se empleó en las estaciones Pluviométricas al momento de seleccionar el periodo de calibración,

esta consistió en utilizar la opción “MISSING DATA” del modelo hidrológico HBV para encontrar los periodos donde había continuidad de datos mayor o igual a 15 años.

El modelo hidrológico HBV tiene 13 parámetros libres (ver Tabla 6), que deben de ser calibrados. La calibración del modelo se realizó de forma manual, es decir se realizó mediante pruebas de ensayo-error (trial and error), durante las cuales se variaron los valores de los parámetros hasta obtener resultados aceptables con los criterios de calibración anteriormente mencionados; es de resaltar que las variaciones de los valores de cada parámetro se realizaron teniendo en cuenta los rangos recomendados por el Manual del modelo hidrológico HBV (2005), ver Tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros de calibración del modelo HBV/IHMS

Rutina	Parámetro	Valor recomendado	Rango
Precipitación	PCORR	1,0	-
	PCALT	0,1	0-0,5
Humedad del suelo	FC	-	100-1500
	LP	-	<=1
	BETA	-	1,0-4,0
	CFLUX	-	0-2,0
	ECORR	1,0	-
Respuesta o estimación de escorrentía	PERC	-	0,01- 6,0
	ALFA	-	0,5-1,1
	HQ	Calculado, es propio de la cuenca de estudio	-
	KHQ	-	0,05-2,0
	K4	-	0,1-0,001
Función de transformación de la escorrentía	MAXBAZ	-	1,0-5,0

Fuente: (Manual HBV, 2005)

Según el manual del modelo hidrológico HBV (2005), el procedimiento normal para realizar la calibración de los parámetros, sigue en el siguiente orden:

1. Calibrar parámetros de volumen (PCORR)
2. Calibrar parámetros de nieve
3. Calibrar parámetros de suelo (FC, LP, BETA)
4. Calibrar parámetros de respuesta ( K4, PERC, KHQ, HQ y ALFA)
5. Calibrar parámetros de amortiguación (MAXBAZ)

Los parámetros como ECORR y PCALT tienen valores fijos 1,0 y 0,1 respectivamente, el parámetro HQ es un valor fijo que se calcula con la Ecuación 15.

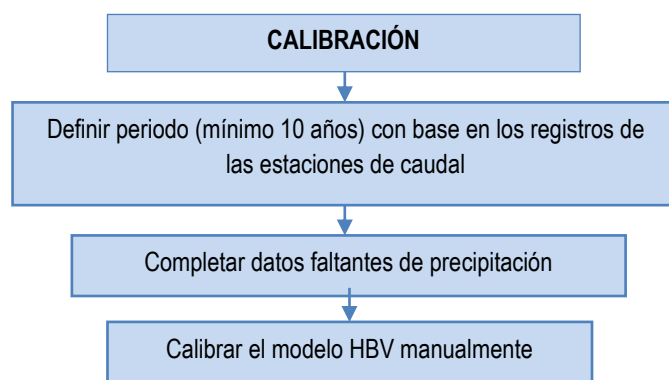
$$((MQ \times MHQ)^{1/2} \times 86,4 / (\text{area de la cuenca en Km}^2)) = HQ \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

MQ= promedio de caudales de todos los años (m<sup>3</sup>/s)

MHQ= promedio de los caudales máximos anuales de todos los años (m<sup>3</sup>/s)

En la Figura 11 se resume de forma general, como se llevó a cabo el proceso de calibración del modelo hidrológico HBV en este proyecto.



**Figura 11.** Pasos para la calibración del modelo HBV.  
Fuente: Elaboración Propia

## 5.9 VALIDACIÓN

La validación permite la comparación y se constituye como punto de referencia utilizado para evaluar la calidad del modelo, ya que permite realizar pruebas después de que el modelo es optimizado y, como tal, probablemente es seleccionado después de un número de iteraciones de validación, de esta forma, el error del modelo de datos de prueba puede ser utilizada para evaluar el desempeño del modelo resultante (Corzo, 2009).

La selección de variables de entrada generalmente se formula utilizando las variables de precipitación, evapotranspiración, descarga y algunas veces temperatura. El modelo utiliza normalmente sus medidas para aumentar la información disponible sobre el sistema (Corzo, 2009).

La validación del modelo se desarrolló en dos partes: la primera se realizó para el periodo comprendido desde 1986 hasta 1991, y la segunda parte fue desde 2002 hasta 2007.

## 5.10 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se realizó a través de la “perturbación de parámetros” de entrada al modelo HBV, es decir, mediante la variación de un parámetro del modelo, mientras el resto permanecían constantes, de modo que las variaciones sufridas en las variables de estado reflejaran la sensibilidad de la solución al parámetro modificado (Chapra, 1997), la perturbación de parámetros se realizó utilizando los valores máximos y mínimos de los parámetros del modelo HBV, anteriormente presentados en la Tabla 6.

### **Objetivo Específico 3**

## 5.11 MODELACIÓN DE LOS CAUDALES DIARIOS ASOCIADOS A LA FASE FRÍA DEL FENOMENO ENOS

La simulación de caudales de la cuenca del río Palo se realizó con el modelo hidrológico HBV inicialmente al periodo siguiente de la calibración, es decir 2002-2012, con el fin evaluar el comportamiento del mismo en un periodo de 10 años, posteriormente se realizó a los periodos 2007-2008, 2010-2011 con el fin de evaluar el comportamiento del modelo en periodos cortos de tiempo con ausencia de datos, por último se realizó la simulación al total de los datos válidos, es decir 1974-2012, identificados los periodos de simulación se contrasto con los periodos en los cuales se ha presentado el fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, teniendo en cuenta el índice ONI (Oceanic Niño Index) proporcionado por el Nacional Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos (ver Tabla 7); para establecer la posible relación se comparó los caudales máximos simulados y su posible relación con la el acontecer del fenómeno de La Niña.

**Tabla 7.** Periodos clasificados como La Niña según NOAA, Oceanic Niño Index.

Fenómeno La Niña (1950-2013)					
N	INICIO	FINAL	N	INICIO	FINAL
1	Dic-50	Abr-51	8	Sep-84	Oct-85
2	May-54	Feb-57	9	Abr-88	Jun-89
3	Ago-62	Feb-63	10	Ago-95	Abr-96
4	May-64	Feb-65	11	Jun-98	Jul-00
5	Nov-67	May-68	12	Ago-07	Jun-08
6	Jun-70	Ene-72	13	Jul-10	Abr-11
7	Abr-73	Jun-76	14	Sep-11	Mar-12

Fuente: (NOAA, 2014)

## 6.0 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

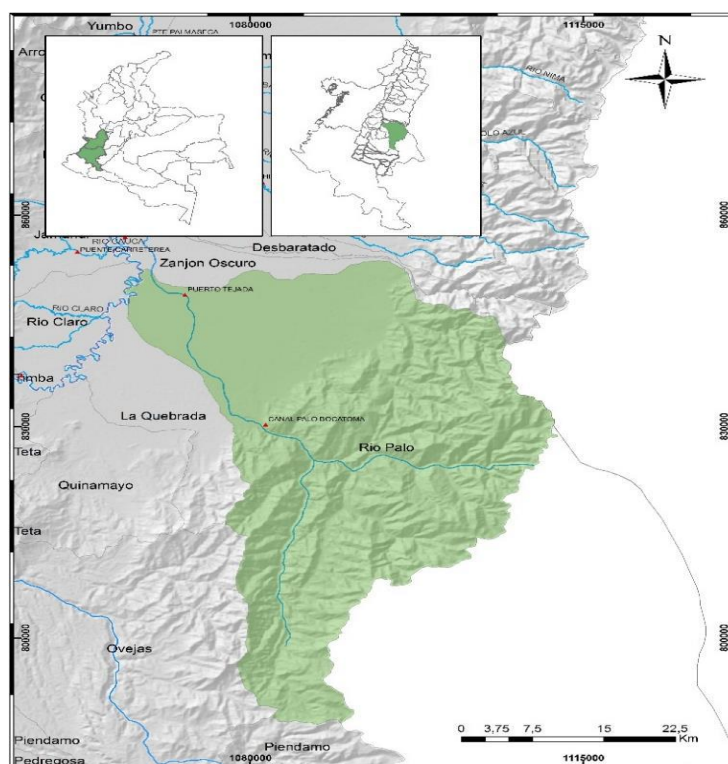
### 6.1 DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

#### 6.1.1 Descripción del área de estudio

La cuenca del río Palo nace en el páramo de Santo Domingo y comprende una extensión aproximadamente de 150.000 Has, conformada por diferentes áreas correspondientes a la jurisdicción político administrativa de Caloto, Corinto, Jámbalo, Miranda, Padilla, Puerto Tejada, Silvia, Toribio y Villa Rica.

#### 6.1.2 Localización

La Subcuenca del río Palo se encuentra localizada al nororiente del departamento del Cauca como se observa en la Figura 12, ésta limita al norte con la subcuenca del río Desbaratado, al este con la cuenca del río Magdalena, al oeste con la subcuenca del río la Quebrada, Tauala y Japio, al sur con la sub cuenca del río Piendamó y en el sureste con la subcuenca del Río Paez.



**Figura 12.** Localización cuenca del río Palo.

Fuente: (IREHISA, 2014)

### 6.1.3 Descripción Morfométrica

El análisis de la descripción morfométrica se realizó con base en la información encontrada en el “Estudio Demanda – Oferta Hídrica del río Palo”, realizado por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) en el año 2001, teniendo en cuenta que ésta era una fuente confiable y con información actualizada. En la Tabla 8 se observan las principales características morfométricas del río Palo, a partir de las cuales, fue posible conocer de manera cualitativa el comportamiento de la subcuenca.

**Tabla 8.** Resumen de las características morfométricas de la cuenca río Palo

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Área	Km <sup>2</sup>	1.500
Perímetro	Km	226,55
Longitud Axial	Km	47
Ancho Promedio	Km	31,9
Factor de Forma		0,68
Coefficiente de Compacidad		1,65
Forma de la Cuenca		Oval Oblonga a Rectangular Oblonga
Índice de Alargamiento		0,33
Índice de Homogeneidad		1,12
Pendiente Promedio Tramo 1 = 5.85 Tramo 2 = 0.26	%	3,3

Fuente: CRC, 2001

De acuerdo con la información consultada, se logró establecer que los valores consignados en la Tabla 8 hacen referencia a una pendiente promedio del 3,3 % que equivale a un relieve ligeramente suave; con lo que además se logró analizar las siguientes características morfométricas:

- **Área:** El área de la subcuenca del río Palo es de 1.500 Km<sup>2</sup> (CRC, 2001).
- **Perímetro:** El perímetro de la subcuenca del río Palo es de 226.554 m, es decir 226,55 Km (CRC, 2001).
- **Longitud Axial:** Corresponde a la distancia entre el nacimiento y la desembocadura, que para el río Palo es de 47.000 m equivalentes a 47 Km (CRC, 2001).
- **Ancho Promedio:** El ancho promedio de la subcuenca del río Palo es de 31.914 m. que equivalen a 31,9 Km (CRC, 2001).
- **Factor de Forma:** El factor de forma para la subcuenca del río Palo es de 0,68, por lo que se puede considerar mediano de incidencia a las crecidas; este valor indica además “la tendencia de la subcuenca hacia la ocurrencia de crecidas”. Se exceptúan algunos puntos críticos tal como el punto de desembocadura del Río Paila al río Palo en el perímetro urbano de Puerto Tejada (CRC, 2001).
- **Coefficiente de Compacidad:** El coeficiente de compacidad es 1,65. Según la Corporación Autónoma Regional del Cauca (2001), la cuenca del río Palo se cataloga como de clase Kc3, lo que corresponde a la forma oval oblonga a rectangular oblonga.
- **Índice de Alargamiento:** En el caso de la subcuenca del río Palo se observa un índice de alargamiento muy pequeño en el cual el ancho de la subcuenca es tres veces mayor que su propia longitud (CRC, 2001).
- **Índice de Homogeneidad:** La forma de la subcuenca del río Palo se asemeja más a un rectángulo en el cual el lado mayor corresponde al ancho y es paralelo a la línea Sur - Norte;

el lado menor corresponde a la longitud de la subcuenca y es paralelo a la línea Este – Oeste (CRC, 2001).

- **Pendiente Promedio:** Para el cálculo de la pendiente la Corporación Autónoma Regional del Cauca (2001) ha caracterizado la pendiente del cauce de acuerdo a dos tramos de la cuenca divididos de la siguiente forma:
  - **TRAMO 1.** Corresponde a la pendiente de la parte alta que abarca desde el nacimiento hasta el puente sobre la vía Caloto – Corinto, con una longitud de 49.860 m. y un descenso de 2.920 m., para una pendiente de 5,85 %.
  - **TRAMO 2.** Corresponde a la pendiente de la zona plana que se inicia en el puente sobre la vía Caloto - Corinto hasta la desembocadura del río Palo en el río Cauca a 950 m. Su longitud es de 42.140 m. y su descenso de 110 m. para una pendiente de 0,26 %.

La cuenca del río Palo nace en el Nevado del Huila y desemboca en la margen derecha del río Cauca, con una longitud axial de 47.000 m, limitando con las cuencas de los ríos Piendamó, La Quebrada, Ovejas y Desbaratado, a lo largo de un área aproximada de 1.500 Km<sup>2</sup>, en los que atraviesa los municipios de Caloto, Santander de Quilichao, Toribio, Páez y Puerto Tejada; con caudal promedio de 39,15 m<sup>3</sup>/s y una longitud del cauce principal de 46,21 Km, siendo sus principales tributarios los ríos López, Jambaló y La Paila. La precipitación media multianual de la cuenca es aproximadamente de 1.594 mm (IREHISA, 2013).

La forma de la cuenca esta entre Oval Oblonga y Rectangular Oblonga, además el factor de forma corresponde a 0,68, lo que indica que es una cuenca alargada, con incidencia mediana en la formación de crecidas, los parámetros mencionados influyen de manera directa en la eficiencia de drenaje de aguas lluvias, en caso de excesos en la misma, al igual que en la generación de mayores volúmenes de escurrimiento y velocidades de desplazamiento de agua, lo que trae consigo el aumentando de la erodabilidad a lo largo de la cuenca, convirtiéndola en el segundo mayor tributario tanto de sólidos como líquidos al río Cauca, después del río la Vieja; por lo que, de acuerdo con Reyes et al (2010) los hidrógramas en principio pueden presentar cortos tiempos de concentración.

#### **6.1.4 Descripción Hidrometeorológica**

A la cuenca del río Palo corresponden climas que van desde el cálido moderado hasta el páramo; los valores más bajos de humedad relativa en la cuenca del río Palo se presentan en los meses de junio a agosto y septiembre coincidiendo con la época en que las precipitaciones son menores en el sector, los valores de humedad relativa se registran entre el 70% y el 80% (CRC, 2002); los vientos que pasan la cordillera Occidental tienen un efecto secante sobre el Valle del río Cauca. Pues al pasar absorben la humedad de la atmósfera, para su conversión en nubes y así originar altas precipitaciones en las estribaciones del flanco occidental de la Cordillera Central (CRC, 2002).

La cuenca del río Palo tiene una precipitación media multianual de aproximadamente 1.590mm, presenta un caudal medio multianual de 39,15 m<sup>3</sup>/s, y un caudal mínimo y máximo oscila entre los 3,6 y 351,28 m<sup>3</sup>/s respectivamente (CRC, 2002); y medios donde las diferencias son considerables, lo que puede deberse a la poca capacidad de acuerdo con lo anterior se aprecia que las diferencias entre los caudales mínimos y caudales medios no son fuertemente significativos, contrario a lo que sucede entre los caudales máximos de retención de agua que tiene la cuenca y que hace que al momento de presentarse precipitaciones estas sean evacuadas rápidamente en cortos periodos de tiempo.

### 6.1.5 Usos del Suelo

En la cuenca del río Palo, con respecto al uso del suelo, existen sistemas complejos de producción comercial de alta productividad y rentabilidad, tanto en el sector agropecuario como manufacturero. El uso del suelo en la cuenca del río Palo es predominantemente agropecuario, siendo el cultivo de la caña de azúcar la principal actividad; por su parte el sector industrial también ocupa parte importante de los suelos, situación que sumada con la presencia de cultivos ilícitos desplazan el bosque nativo de la región, tal como se puede observar en la Figura 13.

La cobertura vegetal de la cuenca del río Palo es mínima y se representa por cultivos en el 68% de la misma, así como pastos con usos agrícolas y ganaderos con inadecuadas prácticas de manejo en pendientes superiores al 35%, provocando la degradación de la cuenca, la erosión de suelos, la disminución de su fertilidad y el arrastre de sólidos a cursos de agua (Cifuentes, 2014). Lo anterior, sumado a las talas indiscriminadas, el sobrepastoreo y las siembras a orillas de las quebradas, ha ocasionado problemas graves de erosión e inestabilidad irreversible del terreno (CRC, 2005); razón por la que de acuerdo con Cifuentes (2014) en la cuenca se produce aproximadamente 24.2 millones t/año de sedimentos, lo que la convierte en la principal aportante de sólidos al río Cauca en el tramo Salvajina – Anacaro.

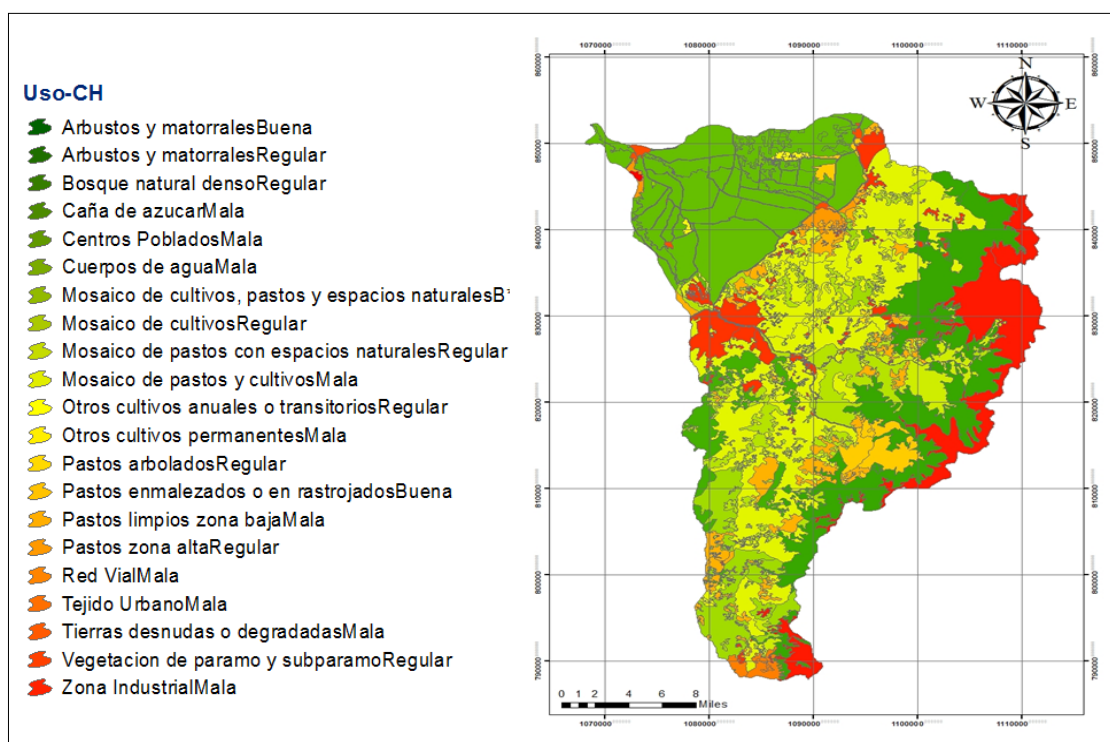


Figura 13. Usos de suelo río Palo.

Fuente: (IREHISA, 2014)

### 6.1.6 Número de Curva (CN)

Según la información disponible en la *Guía Básica para la Estimación del Parámetro Número de Curvas en las Cuencas del Valle Geográfico del Alto Cauca* (IREHISA, 2014), el número de curva para la cuenca del río Palo es 73,61 con lo que se indica, que el 73,61 % del agua que precipita en la cuenca escurre, planteamiento que corresponde a la situación real de la cuenca, si se tiene en cuenta que el número de curva depende de factores como la pendiente y el tipo y uso del suelo, y que de acuerdo a lo observado en la Figura 13, se aprecia la predominancia de suelos desnudos, zonas industriales y de uso agrícola, lo que señala que la cuenca presenta muy poca regulación.

El número de curva acogido para la cuenca del río Palo indica que es más el agua que escurre que la que se infiltra, específicamente un 73,61% escurre, contrastando con un 26,39% que se infiltra, lo que indica un deterioro de la capacidad de infiltración en los suelos de la cuenca, esta característica de los suelos puede ser causa de la industrialización de la zona, deforestación, cultivos ilícitos, uso intensivo de los suelos por ganadería y agricultura, que trae como consecuencia el aumento del riesgo para los asentamientos humanos por el aumento de los caudales, de la erosión de los suelos, y el deterioro de la calidad del agua.

## 6.2 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

Las pruebas gráficas y cuantitativas se llevaron a cabo con la información de las series diarias y mensuales multianuales de la precipitación y caudal, debido a que el respectivo análisis de las series diarias permitió detectar las tendencias no significativas o la falta de homogeneidad en los datos, mientras que las series mensuales construidas a partir de los datos diarios permitieron tener una comprensión del comportamiento de los datos. En la Tabla 9 se muestran los resultados de los estadísticos descriptivos para la red de medición.

**Tabla 9.** Resultados Estadísticos descriptivos de precipitación mensual diaria

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS	Media	Desviación Estándar	Varianza	<sup>1</sup> C.V	Mediana	Min	Max	<sup>2</sup> R.IC	% Datos Faltantes
<b>Series de Precipitación (mm)</b>									
Silvia	104,67	83,90	7040,20	0,80	87	0	503	128,5	24,4
Cajones	125,18	87,15	7595,43	0,69	109	0	434,5	131,00	8,87
Corinto	136,63	100,87	10176,31	0,73	136,63	0	555	147,50	1,8
Villa Rica	150,47	100,22	10044,09	0,66	133	1	664	128,50	12,6
Tacueyo	152,65	144,06	20755,32	0,94	112	0	840	167,50	1,9
Jambalo	108,80	87,50	7658,32	0,80	88	0	382	140,00	2,41
El Trapiche	142,03	99,54	9909,04	0,70	127	0	579	140,80	2,15
Palo Bocatoma	125,01	93,70	8778,15	0,74	109	0	484	139,50	8,3
Florida	128,07	95,23	9069,97	0,74	113,5	0	462	134,60	3,22
<b>Series de Caudal (m3/s)</b>									
Palo Pto. Tejada	1144,17	699,41	489184	0,61	1033,53	27	3855,5	886,63	6,98

<sup>1</sup>C.V=Coficiente de Variación, <sup>2</sup>R.IC=Rango Intercuartílico

Fuente: Elaboración Propia

De la Tabla 9, se concluye que dichas estaciones cuentan con una adecuada cantidad de registros, que resultan útil en el primer filtro para proceder a completar los datos faltantes de la serie mensual; adicionalmente, para el caso de la serie diaria, la media y la mediana no presenta diferencias superiores al 20% entre ellas mismas, salvo para la estación Tacueyo que alcanza una diferencia del 27%, lo que representa un quiebre en la serie y posiblemente se deba a un error sistemático en el método de recolección de los datos, en general los datos indican que la serie en su mayoría presenta valores extremos aceptables, adicionalmente podemos decir que dichos valores extremos que posee la serie no restan representatividad a la media. Los mayores valores de la media los representan las estaciones de precipitación que se encuentran en la parte media de la zona de estudio como son las estaciones Villa Rica, Tacueyo, El Trapiche. El menor valor de la media de las 9 estaciones los presento la estación Silvia, localizada en la parte baja del área de interés.

Se encontró que la serie diaria presenta un coeficiente de variación que se encuentra en el rango que va desde 0,61 hasta 0,94, por tanto podemos decir que la serie de datos posee una tendencia promedio a desviarse entre dicho rango del valor de la media; el rango intercuartílico es una medida sencilla que permite ver la variabilidad de los datos en la serie mensual, tal y



como es posible observar en la Tabla 9, esta representa la diferencia que hay entre el cuartil superior (3) e inferior (1).

Además de lo anterior, se pudo encontrar que el rango de las series estudiadas es amplio y es resultado de un régimen con tendencia bimodal que asociado al origen de los datos nos permiten deducir que representan periodos lluviosos y periodos secos, lo cual es propio de la hidrología Colombiana, y los efectos de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación en la parte baja de la cuenca del río Cauca, como se puede observar en la Figura 15.

Finalmente, se realizó un análisis a las series de caudal medio mensual de la estación Pluviográfica Palo Pto. Tejada, esta última estación presentó valores ajustados a los resultados de las estaciones pluviométricas con relaciones de media y mediana aceptables y un rango intercuartílico que se ajusta al comportamiento bimodal; además se estudiaron los valores arrojados por las series de datos anuales, evaluando la media, los máximos y los mínimos en la estación Pluviográfica, como ejemplo se utilizó la estación Palo Pto. Tejada, esto se realiza con el fin de observar el comportamiento de los valores mínimos, medios y máximos, pero haciendo una evaluación como un solo conjunto de datos; vale la pena aclarar que dicho análisis es básicamente gráfico.

En esta evaluación se analizan específicamente valores extremos de caudales, es por esto que sólo se realiza en la estación Pluviográfica, permitiendo identificar periodos con valores extremos que podrían estar asociados al fenómeno ENOS en su fase fría La Niña. Como se observa en la Figura 14 las diferencias entre los caudales mínimos y caudales medios no son significativas, contrario a lo que sucede entre los caudales máximos y medios donde las diferencias son considerables, lo que puede deberse a la poca capacidad de retención de agua que tiene la cuenca y que hace que al momento de presentarse precipitaciones estas rápidamente se van representadas por un incremento en los caudales de la cuenca del río Palo.

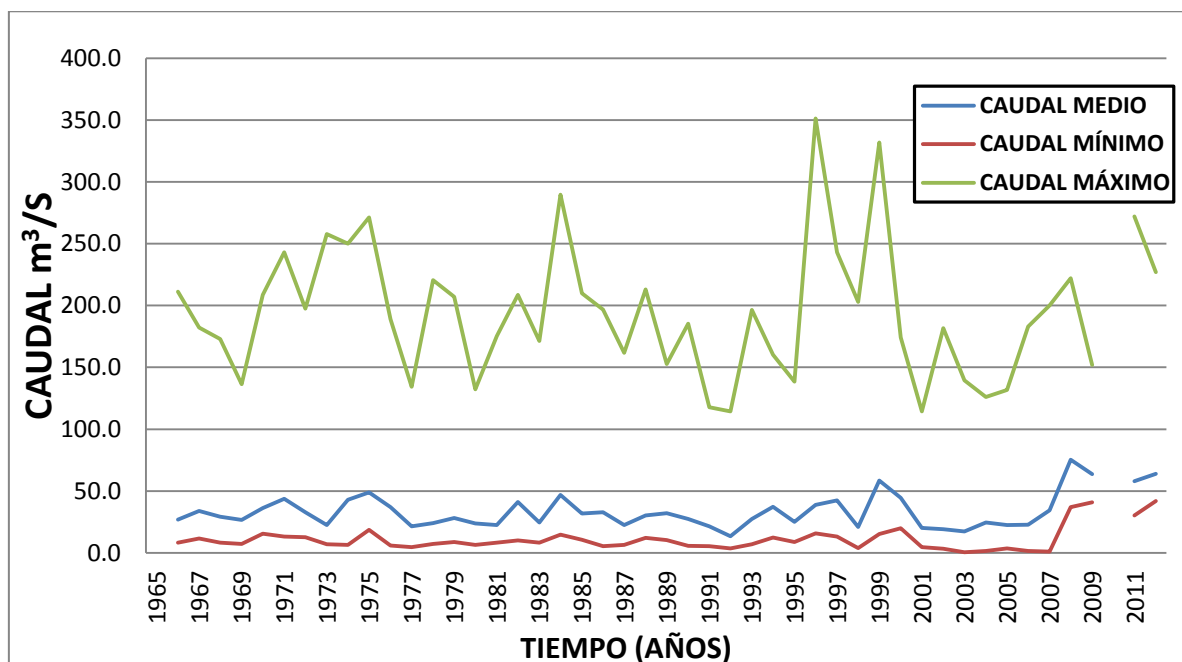
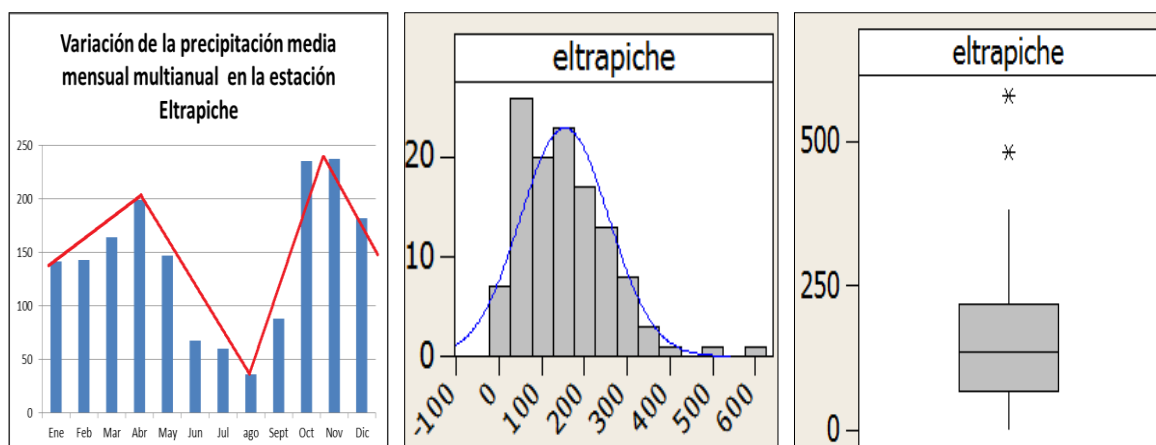


Figura 14. Caudales (m³/s) Máximos, Mínimos y Medios anuales (1965-2012), Palo Pto Tejada.

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1 Resultados del Análisis Exploratorio Grafico

El análisis exploratorio gráfico, permitió una clara comprensión del comportamiento de las dos series de precipitación (series diarias y mensuales (mm)). A continuación se presentan los resultados obtenidos en dicho análisis gráfico, en este estudio se realizaron 3 diferentes tipos de gráficos; I) Gráfica de serie de tiempo, II) Histogramas, III) Diagrama de cajas; que se muestran en la Figura 15. Es de resaltar que se optó por mostrar los resultados del análisis exploratorio gráfico para la estación El Trapiche, ya que se consideró que reflejaban fácilmente el comportamiento de los datos, en el Anexo 3 se ilustran las gráficas obtenidas en las demás estaciones involucradas en este proyecto de simulación hidrológica.

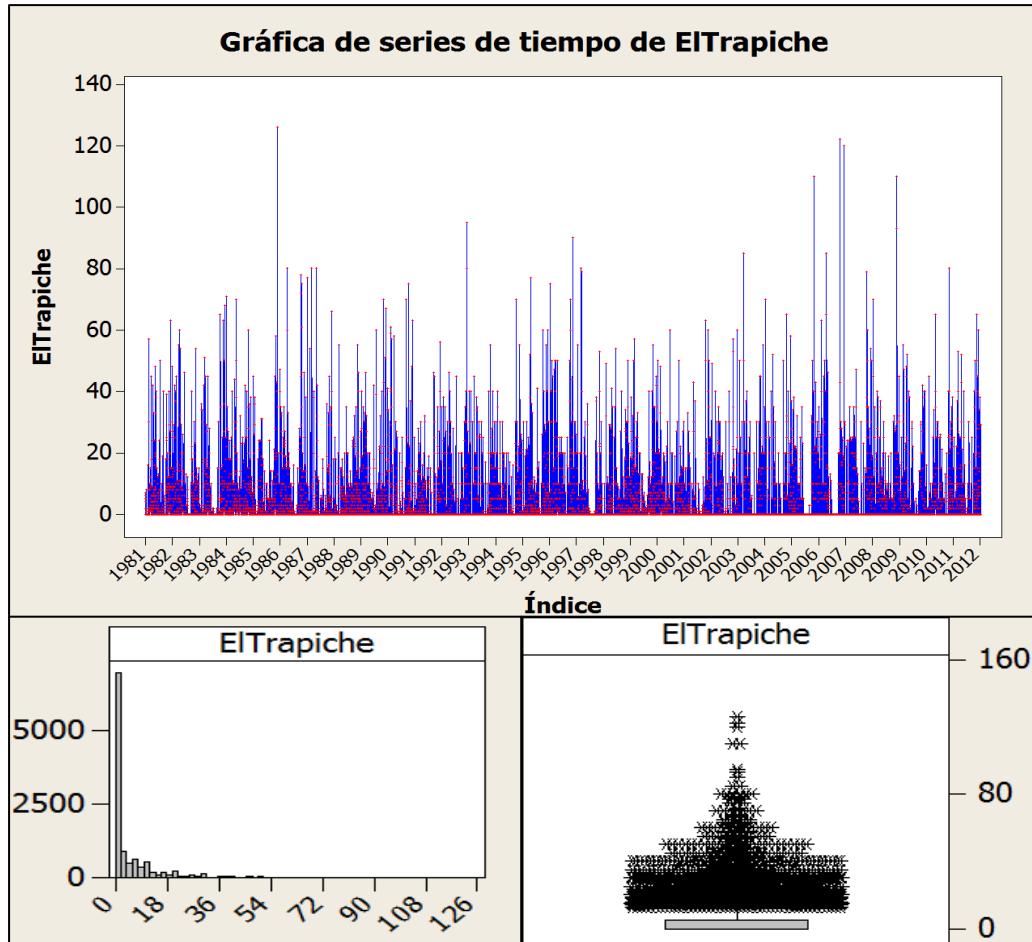


**Figura 15.** (I)Diagrama de serie de tiempo, (II) histograma y (III) diagrama de caja de la estación El Trapiche.

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de series de tiempo muestran una tendencia definida, que refleja un comportamiento de las series en su distribución anual de la precipitación en la cuenca río Palo, presentando la tendencia a un comportamiento bimodal, con máximos en los meses de abril y octubre y mínimos en enero y julio; en los histogramas se observa una concentración de barras acumuladas mostrando la mayor frecuencia de valores entre el rango de 50 y 200 mm, lo que, al compararlo con el valor de la media para la estación El Trapiche se encuentra ajustado, ya que es proporcional a la frecuencia de los valores representados en los Histogramas.

Por otra parte se observa también, que existen valores altos que oscilan entre los 600 mm, sin embargo estos valores son atípicos y pueden ser resultado de una mala medición o de un fenómeno hidrológico; de igual forma, en los diagramas de cajas es posible visualizar la simetría de la distribución de los datos, para el caso de la serie mensual de datos se encontró que la distribución era simétrica, ya que la mediana está en la mayoría de los casos en una parte central del rectángulo, dicho rectángulo correspondía al rango intercuartílico, es decir, que hay correspondencia con los valores del análisis estadístico descriptivo anteriormente mencionado, pero además los diagramas de cajas y bigotes permitieron visualizar la existencia de valores atípicos representados con asteriscos, que se encuentran por fuera de los rangos establecidos por los bigotes, valores que como se mencionó anteriormente pueden corresponder a un mal registro o a fenómenos de variabilidad climática. Para el caso de las series diarias de datos se utilizaron el mismo tipo de graficas que en el AED gráfico de las series mensuales, como se puede visualizar en la Figura 16.



**Figura 16.** I) Gráfica de serie de tiempo, II) Histogramas, III) Diagrama de cajas.  
Fuente: Software Minitab15 (2006)

Las gráficas de series de tiempo para las series de datos diarios de la figura, muestra un comportamiento de máximos y mínimos a lo largo de cada año, que refleja el comportamiento bimodal antes descrito; es de resaltar además, que es posible observar puntos con valores extremos que sobresalen al rebasar los puntos máximos, lo que se podría asociar a fenómenos extremos de variabilidad climática, objeto de este proyecto.

En los histogramas de la Figura 16 se observa una concentración de barras acumuladas mostrando la mayor frecuencia de valores entre el rango de 0 y 18, lo que al compararlo con el valor de la media para la estación El Trapiche se encuentra ajustado, ya que es proporcional a la frecuencia de los valores representados en los Histogramas. Por su parte, en los diagramas de cajas de la misma figura, es posible visualizar la simetría de la distribución de los datos, que para el caso de las series de datos diarios se observó gran variedad de datos atípicos representados con asterisco que se encontraban por fuera de los bigotes lo que se puede deber a errores en la toma de registros diarios.

### 6.2.2 Resultados del análisis confirmatorio.

El comportamiento estadístico de los datos hidrometeorológicos se determinó utilizando las pruebas estadísticas confirmatorias Shapiro Wilk y Kolmogorov-Smirnov, donde se puso a prueba la hipótesis nula de que los datos proceden de una población con distribución normal,

frente a una hipótesis alternativa de que no es así. Para determinar el supuesto de normalidad de las series analizadas se estableció un nivel de significancia de 0,05, teniendo en cuenta el tamaño de la serie se escoge la prueba Kolmogorov Smirnov, con lo que se obtuvo como resultado los valores de significancia menores a la hipótesis, por lo tanto, se rechazó la hipótesis de normalidad y los datos se determinan no normales, como se observa en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Prueba de Normalidad

Prueba de Normalidad			
Estación	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	df	significancia
Univalle	0,294	11322	0,00
Silvia	0,330	11322	0,00
Cajones	0,317	11322	0,00
Corinto	0,390	11322	0,00
Villa Rica	0,337	11322	0,00
Tacueyo	0,327	11322	0,00
Jambalo	0,322	11322	0,00
El Trapiche	0,324	11322	0,00
Palo Bocatoma	0,349	11322	0,00
Florida	0,343	11322	0,00

Fuente: Elaboración Propia

Se observa en la Tabla 10 que los valores de significancia son menores a 0,05, por lo tanto hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis, es decir que es conveniente la aplicación de técnicas no paramétricas.

### 6.2.3 Pruebas estadísticas No paramétricas de carácter confirmatorio

En el caso de la pruebas no paramétricas se trabajó con la prueba U Mann Whitney, donde la hipótesis nula de contraste es que las dos muestras de tamaño  $n_1$  y  $n_2$  respectivamente, proceden de poblaciones continuas idénticas, por su parte la hipótesis alterna puede ser unilateral o bilateral, donde se supone que la tendencia central de una población difiere de la otra; por lo que se estableció un grado de significancia  $p > 0,05$  para aceptar la hipótesis nula de la no existencia de diferencias significativas entre los valores medios de las muestras. En la Tabla 11 se muestran los resultados de las pruebas no paramétricas.

**Tabla 11.** Pruebas estadísticas No paramétricas U Mann Whitney.

		PRUEBA NO PARAMETRICA- U MANN WHITNEY								
		Series de Precipitación (mm)								
ID	Estación	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Univalle	0,000	0,000	0,036	0,001	0,003	0,000	0,015	0,010	0,000
2	Silvia		0,001	0,000	<b>0,089</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	Cajones			<b>0,381</b>	<b>0,929</b>	<b>0,717</b>	0,000	0,005	0,067	0,175
4	Corinto				<b>0,143</b>	<b>0,456</b>	<b>0,554</b>	<b>0,848</b>	<b>0,954</b>	0,591
5	Villa Rica					<b>0,240</b>	<b>0,120</b>	<b>0,073</b>	0,004	0,008
6	Tacueyo						<b>0,868</b>	<b>0,795</b>	<b>0,224</b>	<b>0,615</b>
7	Jambalo							0,001	0,008	<b>0,131</b>
8	El Trapiche								0,040	<b>0,072</b>
9	Palo Bocatoma									<b>0,061</b>
10	Florida									

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 11, se aprecia que para la estación Corinto las estaciones Villa Rica, Tacueyo, Jambalo, El Trapiche, Palo Bocatoma y Florida provienen de la de la misma población; al igual que para el caso de la estación Silvia con respecto a la estación Villa Rica, la estación Cajones con respecto a las estaciones Corinto Villa Rica, Tacueyo y Palo Bocatoma, Tacueyo con respecto a las estaciones Jambalo, El Trapiche, Palo Bocatoma y Florida; Jambalo con respecto a la estación Florida, y la estación Palo Bocatoma con respecto a la estación Florida; es decir, que la precipitación en las estaciones anteriormente relacionadas será similar entre ellas.

En términos generales los resultados del análisis exploratorio de datos que se efectuó a las series de precipitación mensual, diaria y caudal, después de haber completado los datos faltantes, se concluye que la información generada por las estaciones involucradas en este proyecto son consistentes, pues las muestras cumplen con la independencias de sus datos; de igual forma, se hace evidente la presencia de valores atípicos (Outliers), ya que todas las series analizadas cuentan con al menos un valor dudoso, por lo que se considera como ya se mencionó, que éstos pueden estar asociados a diferentes factores tales como fenómenos de extremos de variabilidad climática, el cambio en la localización del pluviómetro, deficiencias en el aparato, remplazo del operador o errores humanos.

### **6.3 ANÁLISIS DE FRECUENCIA**

A continuación se mostrarán los resultados del ajuste gráfico de las funciones analizadas a las series de precipitación y caudales máximos diarios correspondientes a las estaciones analizadas; para este caso se expondrá el caso de la estación de precipitación El Trapiche (ver Figura 17), los ajustes correspondientes a las demás estaciones se presentan en el Anexo 4.

Las funciones de distribución analizadas fueron Gumbel, LogNormal y LogPearson III. El mayor promedio de precipitación máxima anual se presenta en la estación Tacueyo con un valor correspondiente a 230 mm; por su parte en la estación a analizar (El Trapiche), el mayor promedio que se reporta es 96 mm.

De manera general al realizar el AF a las diferentes estaciones para el caso de las series de máximas anuales, se observó que presentaban un mejor ajuste con la función LogPearson III, ya que en el 54,5% de las estaciones se evidenció el ajuste con la misma, en contraste con las series LogNormal y Gumbel que alcanzaron solo el 27,3% y 18,2% respectivamente; tal como se observa en la Tabla 12 y Tabla 13. El ajuste alcanzado con la función LogPearson III se debe principalmente a que los valores obtenidos en el CCG son más cercanos a 1 y el EEA es menor a 15% en comparación con las demás funciones estadísticas ya mencionadas.

**Tabla 12.** Resultados de las distribuciones de probabilidad LogPerson III, LnNormal y Gumbel;

ESTACIÓN	MAXIMAS ANUALES	VARIABLE
Corinto	LogPerson III	Precipitación (mm)
Cajones		
El Trapiche		
Florida		
Villa Rica	LogNormal	
Palo Bocatoma		
Tacueyo		
Silvia	Gumbel	
Jambalo		
Palo Puerto Tejada	LogPerson III	

Fuente: Elaboración Propia

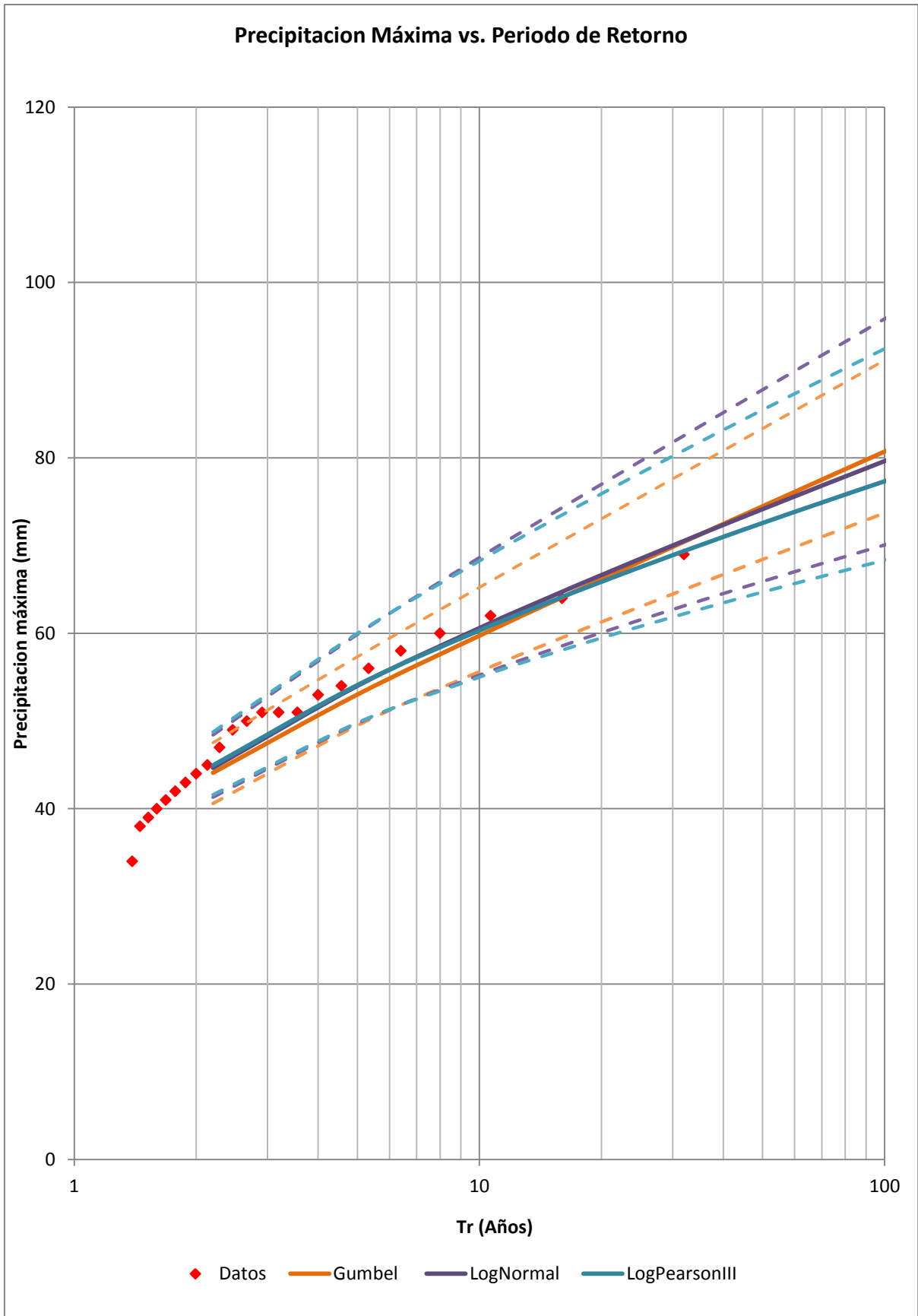
**Tabla 13.** Distribución porcentual de las funciones de probabilidad LogPerson III, LnNormal y Gumbel;

Series	Porcentaje
LogPerson III	54.5%
LogNormal	27.3%
Gumbel	18.2%

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de la estación El Trapiche, se encontró que los resultados del CCG de acuerdo al análisis realizados mostró que se presenta un ajuste adecuado con la función LogPearson III, ya que se obtuvieron valores de éste coeficiente de alrededor de 0,993.

De acuerdo a los valores arrojados por el CCG y el EEA (ver Tabla 15), es posible establecer una correlación con la función de probabilidad que mejor se adapte a estos datos, de igual forma al generar graficas se logra observar y determinar la similitud con la respectiva función de probabilidad, para el caso de la estación El Trapiche esto se puede observar en la Figura 17 y en la Figura 18 respectivamente.



**Figura 17.** Período de retorno para cada función de probabilidad, estación El Trapiche  
Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)

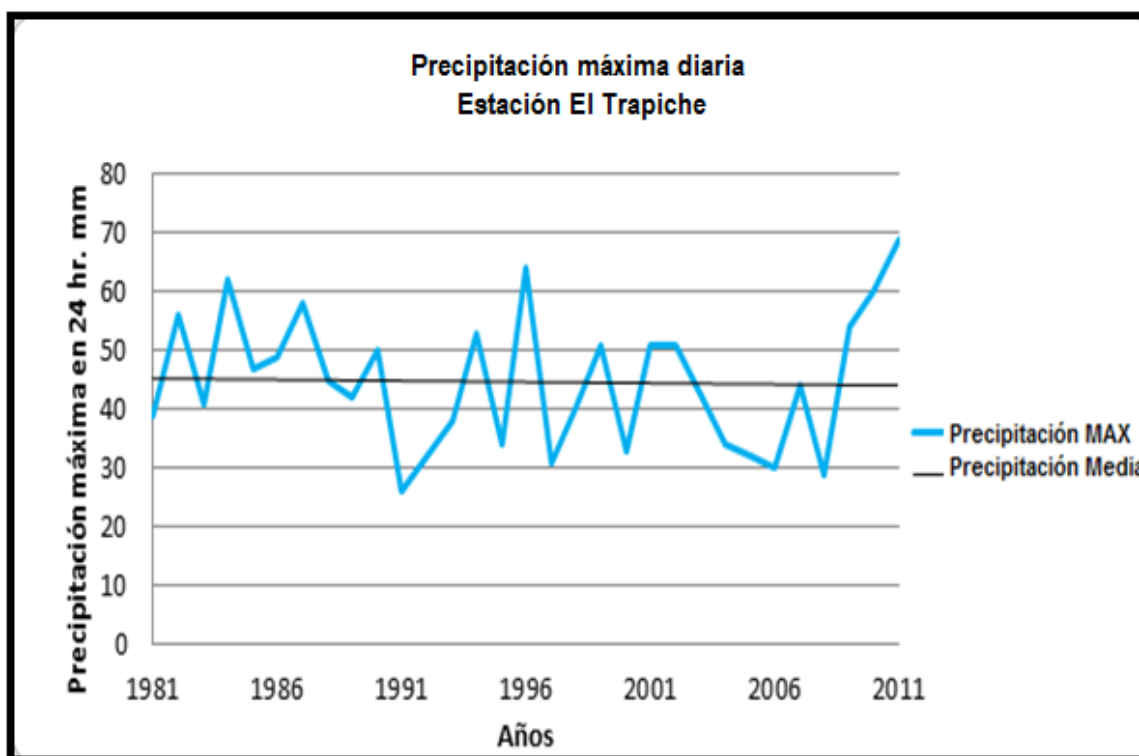
En la Tabla 14 se presentan diferentes valores de las precipitaciones máximas anuales registradas en la estación El Trapiche, éstos valores máximos se encuentran asociados a diferentes periodos de retorno planteados para el estudio de AF, donde dicha asociación refleja la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo igual al de valor máximo en el periodo de retorno correspondiente.

Al examinar los valores de precipitación máximos en las diferentes estaciones se pudo establecer que los eventos extremos ocurrieron con una mayor frecuencia para el periodo comprendido entre 1981-1996, y con una menor frecuencia pero con una mayor intensidad durante el periodo de 2009 - 2010, lo que guarda relación con lo reflejado por la Figura 18.

**Tabla 14.** Caudal máximo diario para cada período de retorno en la cuenca del río Palo, estación Puerto Tejada.

Estación El Trapiche			
Prueba de Ajuste	Gumbel	LogNormal	LogPerson III
CCG	0,987	0,992	0,993
EEA	2,257	1,628	1,543
Tr	5	57	60
	10	65	68
	20	73	76
	30	78	80
	50	83	85
	100	91	96

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 18.** Precipitación máxima diaria según años de registro, estación El Trapiche.

Fuente: Plantilla Grupo IREHISA (2014)



#### 6.4 CALIBRACIÓN MODELO HIDROLÓGICO HBV

La calibración se empezó a realizar después de verificar un periodo con continuidad de registros, el periodo seleccionado fue desde 1992 hasta el 2002 pero cuando se realizó la validación de los datos, se observó que los datos simulados para periodos anteriores a 1992, empezaban a tener fluctuaciones y no cumplían con los parámetros de calibración, por lo que se optó por dividir el periodo de calibración en dos partes, es así como se divide en: un primer periodo que comprende desde 1974 hasta 1984 y un segundo periodo que comprende desde 1992 hasta 2002, esta división del tiempo de calibración permitió tener mejores resultados simulados por el modelo HBV; una posible causa de que el periodo escogido presentara fluctuaciones en los parámetros de calibración esto se puede deber a cambios en el uso del suelo en la cuenca a lo largo del tiempo años, haciendo que se modifiquen los caudales, por otro lado también está la posibilidad de que anteriormente no se tomaran registros de forma adecuada, afectando la calidad de los datos.

En la Tabla 15 se observan los valores de los parámetros calibrados para los diferentes periodos de calibración en la cuenca río Palo, teniendo en cuenta los rangos para la calibración para cada parámetro del modelo mencionados en la metodología.

**Tabla 15.** Valor de cada parámetro para la calibración de la cuenca del río Palo

PARÁMETRO	VALOR INICIAL	Valor calibración (1974-1984)	Valor calibración (1992-2002)
ALFA	1	0,7	0,8
BETA	1,3	1	4
CFLUX (mm/d)	0	0	0
ECORR	0,8	0,36	0,16
FC (mm)	250	221	287
HQ (mm/d)	4,26	11,48	11,48
K4 (1/d)	0,1	0,01	0,005
KHQ (1/d)	0,1	0,1	0,2
LP	0,9	1	1
MAXBAZ (d)	1	1	1
PCALT	0	0	0
PCORR	0,85	0,83	0,96
PERC (mm/d)	1	2,5	4,5

Fuente: Elaboración Propia

Hay que tener en cuenta que el parámetro **BETA** tiene un rango establecido en el modelo hidrológico HBV (desde 1 hasta 4), para el primer periodo de calibración se observa que **BETA** tiene un valor de 1 y para el segundo periodo de calibración tiene un valor de 4, teniendo en cuenta que este parámetro controla el aporte de la función de respuesta  $\Delta Q / \Delta P$  (rutina humedad del suelo, también ver Ecuación 1) se puede inferir que el suelo en el segundo periodo de calibración tiene mayor capacidad de drenaje en relación al primer periodo de calibración.

Para el caso del parámetro **ECORR**, se decidió por asignarle un valor que esta por fuera de las recomendaciones del manual del modelo hidrológico HBV, donde indica que este debe ser 1.0, esta decisión trajo consigo un avance en el proceso de calibración, ya que permitió un mayor ajuste de los demás parámetros de calibración, es de resaltar que el parámetro ECORR indica que se evapora poca cantidad de agua en la cuenca, por lo tanto el ECORR influye en el volumen de la hidrógrafa.

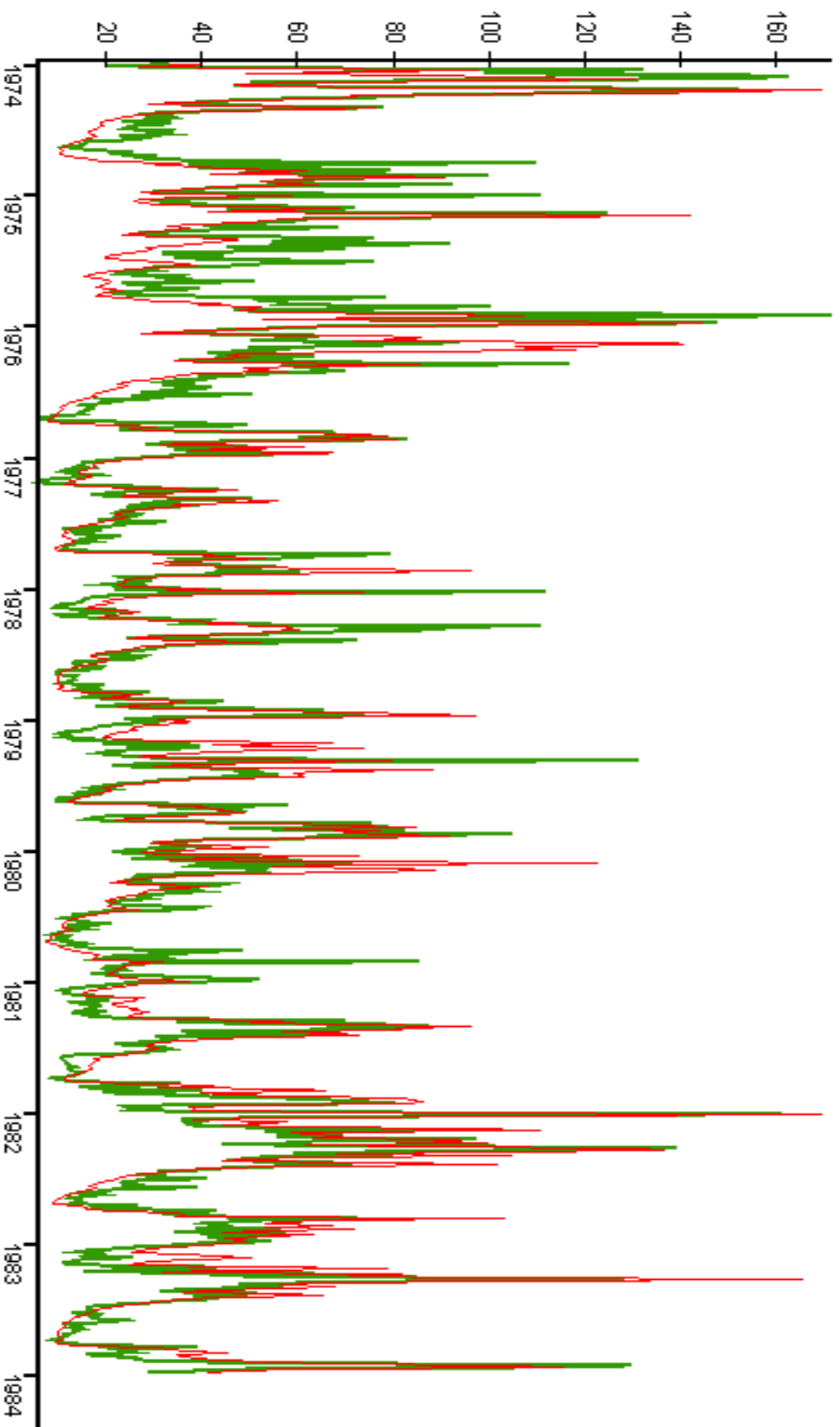
#### 6.4.1 Calibración primer periodo (1974-1984)

Como se observa en la Figura 19, en general se conserva la similitud en la forma de las hidrógrafas registradas y calculadas mediante el modelo hidrológico HBV, pero esta similitud gráfica no es el único criterio en la calibración, por lo que también se tuvo en cuenta criterios como el coeficiente de determinación y la diferencia acumulada que para el periodo (1974-1984), arrojó valores de 0,60 y 0,85 mm respectivamente, el valor del coeficiente de determinación es bajo según los criterios establecidos por CVC (2007), pero para este proyecto se consideró un valor aceptable el coeficiente de determinación ya que en el estudio de la CVC (2007) “Calibración y Validación Del Modelo Lluvia Escorrentía HBV IHMS En Las Cuencas Hidrográficas De Tercer Orden Afluentes Al río Cauca En El Departamento Del Valle Del Cauca” se consideró aceptable valores de coeficiente de determinación iguales a 0,51 para la calibración de la cuenca del río Tuluá, por todo lo anterior se considera que el modelo hidrológico HBV en el periodo 1974/01/01 – 1983/12/31 se CALIBRO adecuadamente (Ver Tabla 16).

**Tabla 16.** Criterios estadísticos del primer periodo de calibración (1974-1984)

CRITERIOS	PRIMER PERIODO
<b>Coeficiente de determinación</b>	0,60
<b>Diferencia acumulada</b>	0,85 mm
<b>Comentario</b>	Calibrado

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 19.** Hidrógrafas registradas y calculadas para la calibración del periodo 1974-1984. Rojo: Calculada, Verde: Registrada. Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)

#### 6.4.2 Calibración segundo periodo (1992-2002)

Como se observa en la Figura 20, en general se conserva la similitud en la forma de las hidrógrafas registradas y calculadas mediante el modelo hidrológico HBV, además se tuvo en cuenta criterios como el coeficiente de determinación y la diferencia acumulada que para el periodo (1992-2002), arrojó valores de 0,68 y 0,26 mm respectivamente, el valor del coeficiente de determinación es bajo pero se considera aceptable según el estudio de la CVC (2007), la diferencia acumulada se considera adecuada dada su cercanía a cero, por lo anterior se considera que el modelo hidrológico HBV en el periodo 1992/01/01 – 2001/12/31 se CALIBRO adecuadamente (Ver Tabla 17).

Los valores del coeficiente de determinación y diferencia acumulada obtenidos en el segundo periodo de calibración son mejores con respecto, al primer periodo de calibración ya que se obtuvo un  $R^2$  mayor, además la diferencia acumulada fue más cercana a cero, esto se debe a que el modelo ya había sido calibrado anteriormente, y esto influye de manera positiva en los resultados obtenidos en el segundo periodo de calibración.

En la Tabla 17, se registran los criterios estadísticos para evaluar el primer periodo de calibración (1992-2002).

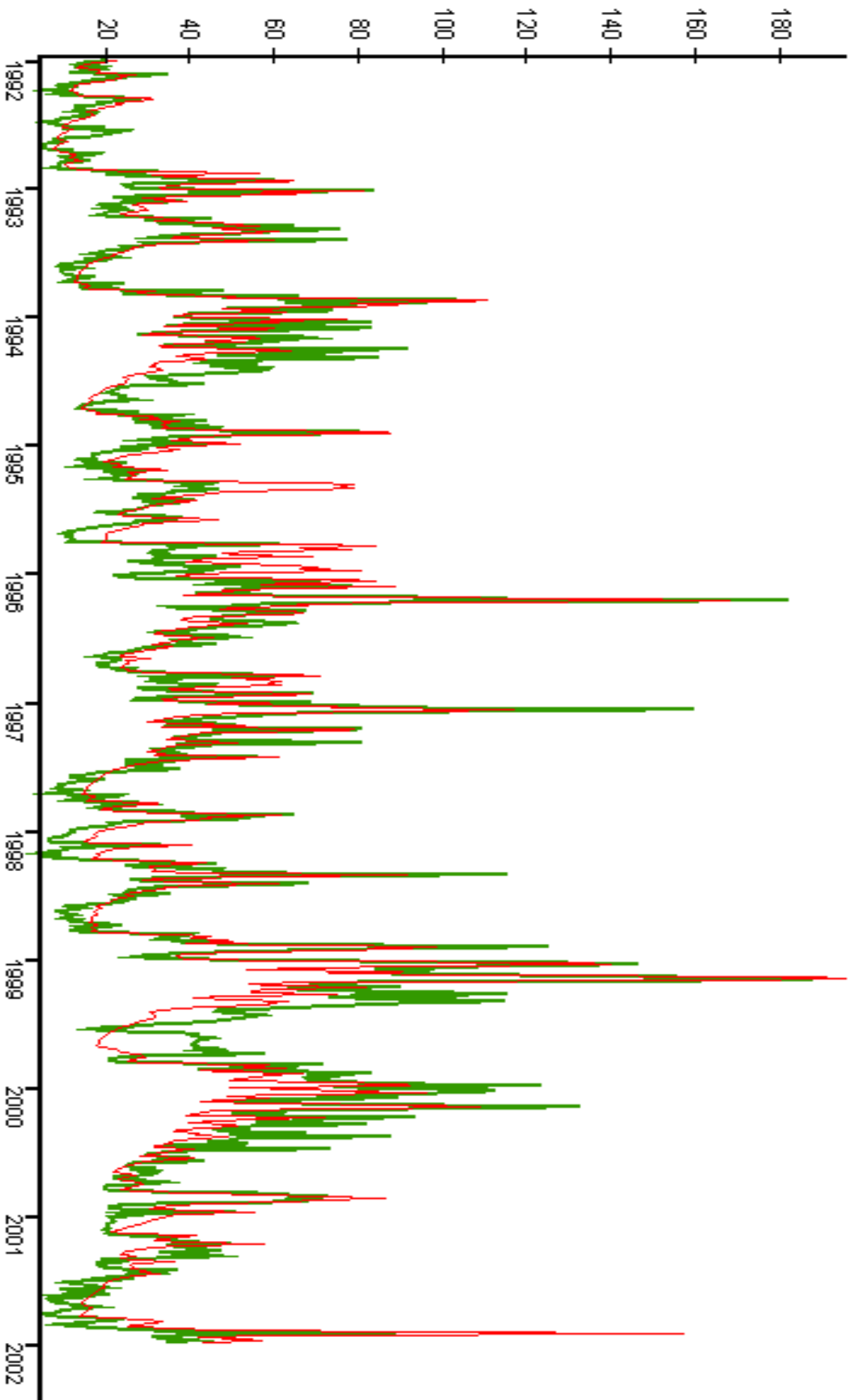
**Tabla 17.** Criterios estadísticos del primer periodo de calibración (1992-2002)

CRITERIOS	SEGUNDO PERIODO
Coeficiente de determinación	0,68
Diferencia acumulada	0,26 mm
Comentario	Calibrado

Fuente: Elaboración Propia

En general el proceso de calibración del modelo hidrológico HBV cumple con una calibración aceptable, según los criterios establecidos en la metodología, pues presentan una similitud gráfica en la forma de las hidrógrafas registradas y calculadas, una diferencia acumulada cercana a cero, que resulta adecuada y un coeficiente de variación que a pesar de no estar en el rango óptimo según criterios establecidos en la metodología, si puede ser considerado aceptable según el estudio de modelación hidrológica con HBV en la cuenca del río Tuluá de la CVC (2007).

Los valores obtenidos en la calibración del modelo hidrológico HBV, en la cuenca del río Palo, resultan ser mejores, en relación, a los valores que obtuvo la CVC en la calibración del mismo modelo para la cuenca del río Tuluá, ya que la CVC (2007) realizó la calibración de un primer periodo (1974-1987), obteniendo un coeficiente de determinación de 0.61 y una diferencia acumulada de -6.38 mm (CVC, 2007), pero esta cuenca presentaba problemas, en cuanto a la información de caudal, ya que la CVC solo generó caudales, y no realizó la validación del modelo, después, el estudio muestra que se siguió calibrando el modelo, desde al año 1974-1995, obteniendo un  $R^2= 0.51$  y una diferencia acumulada de -64.06 mm (CVC, 2007), esta metodología seguida por la CVC, se realizó para completar los registros de la estación pluviométrica “Mateguadua”, con base a lo expuesto, se puede afirmar, que mientras mejor sea la calidad de datos suministrados al modelo hidrológico HBV, en especial los datos de caudal, mejor serán los resultados de la calibración.

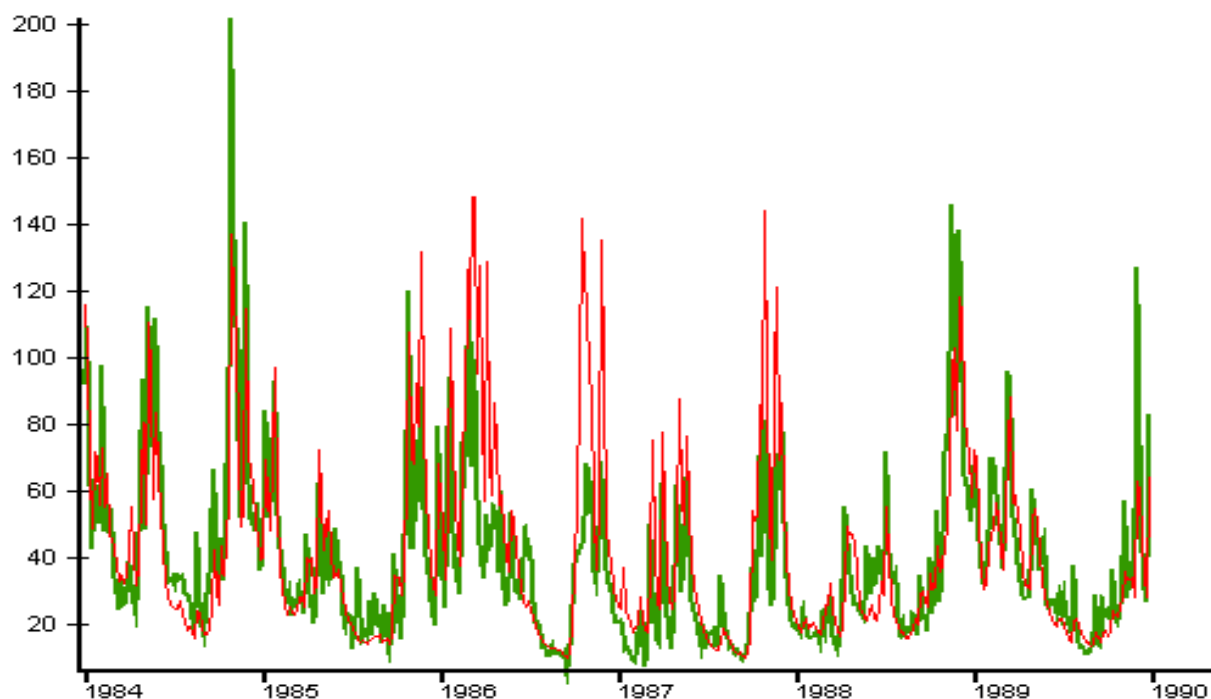


**Figura 20.** Hidrógrafas registradas y calculadas para la calibración del periodo 1992-2002. Rojo: Calculada, Verde: Registrada. Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)

## 6.5 VALIDACIÓN

La validación del modelo se realizó para los periodos comprendidos entre 1984 – 1990 (6 años) y 2002 – 2007 (5 años), teniendo en cuenta que esta se realiza para un mínimo de cinco años, después de cada periodo calibrado.

### 6.5.1 Validación primer periodo (1984-1990)



**Figura 21.** Hidrógrafas registradas y calculadas para el primer periodo de validación de la cuenca río Palo. Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)

Los criterios estadísticos para la validación del modelo hidrológico HBV en el primer periodo (1984-1990) se presentan en la Tabla 18.

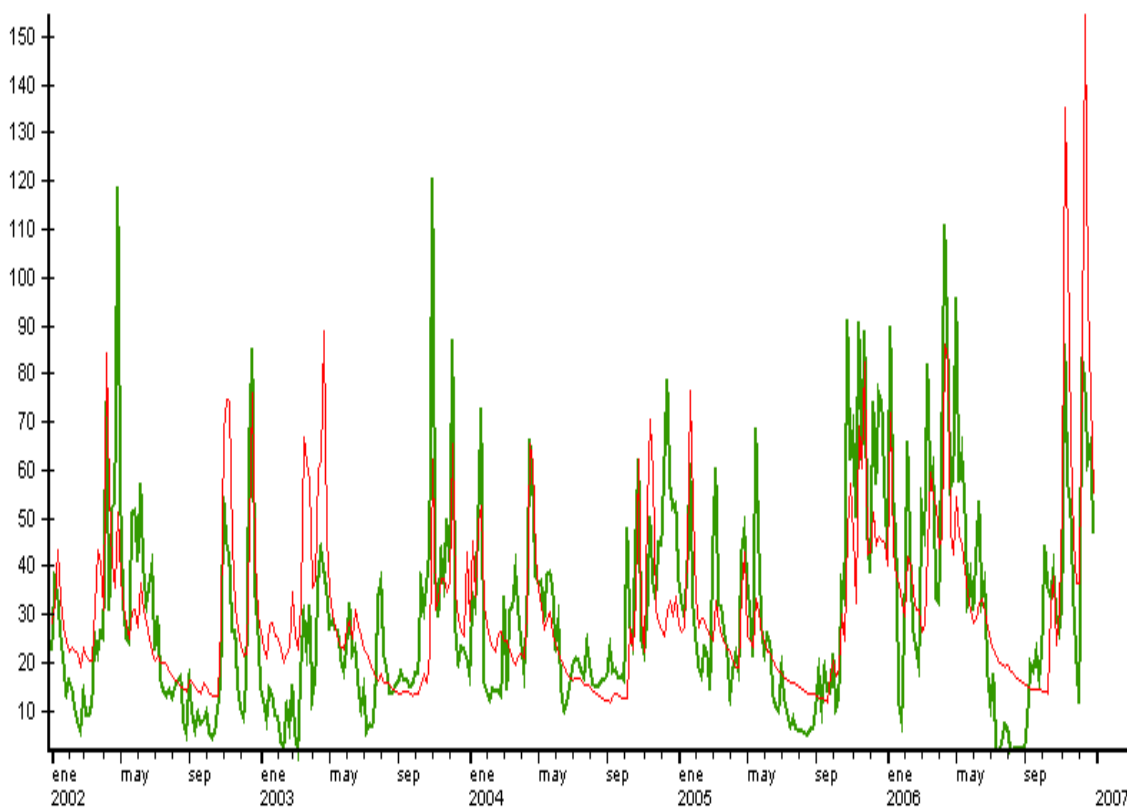
**Tabla 18.** Validación primer periodo (1984-1990)

CRITERIOS	VALIDACIÓN PRIMER PERIODO
<b>Coefficiente de determinación</b>	0,51
<b>Diferencia acumulada</b>	168,26 mm
<b>Comentario</b>	Validado

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 21 se muestran las hidrógrafas registradas (Verde) y calculadas (Roja) del primer periodo de validación (1984-1990), estas conservan la similitud entre ellas, a pesar de que presentan valores de diferencia acumulada de 168,26 mm y coeficiente de determinación de 0,51, la diferencia acumulada es un valor que se aparta de los criterios definidos en la calibración del modelo, esto puede deberse a errores en la medición de caudales, cambios en el uso del suelo y/o falta de mantenimiento en la estación Pluviográfica; sin embargo se considerara el modelo validado para este periodo puesto que el valor del coeficiente de determinación es aceptable, además de que se observa similitud grafica entre las hidrógrafas calculadas y registradas.

## 6.5.2 Validación segundo periodo (2002-2007)



**Figura 22.** Hidrógrafas registradas y calculadas para el segundo periodo de validación.  
Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)

Los criterios estadísticos para la validación del modelo hidrológico HBV en el segundo periodo (2002-2007) se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Validación segundo periodo (2002-2007)

CRITERIOS	VALIDACIÓN PRIMER PERIODO
Coefficiente de determinación	0,42
Diferencia acumulada	117,51 mm
Comentario	Validado (similitud grafica)

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 22 se muestran las hidrógrafas registradas (Verde) y calculadas (Roja) del segundo periodo de validación (2002-2007), estas conservan la similitud entre ellas, a pesar de que presentan valores de diferencia acumulada de 117,51 mm y coeficiente de determinación de 0,42, que son valores que se apartan de los criterios definidos en la calibración del modelo, esto puede deberse a errores en la medición de caudales, cambios en el uso del suelo y/o falta de mantenimiento en la estación pluviográfica; sin embargo se considerara el modelo validado pues para el periodo 1984-1990 el valor del coeficiente de determinación fue aceptable y para el periodo 2002-2007 a pesar de que el valor del coeficiente de determinación no alcanza al rango aceptable, este se consideró validado, pues existe similitud grafica entre las hidrógrafas calculadas y registradas.

## 6.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad fue realizado a cada uno de los parámetros utilizados en la calibración del modelo hidrológico HBV, con el fin de determinar el grado de sensibilidad y la respuesta de cada uno de los parámetros a las variaciones de los valores, para esto se perturbaron los

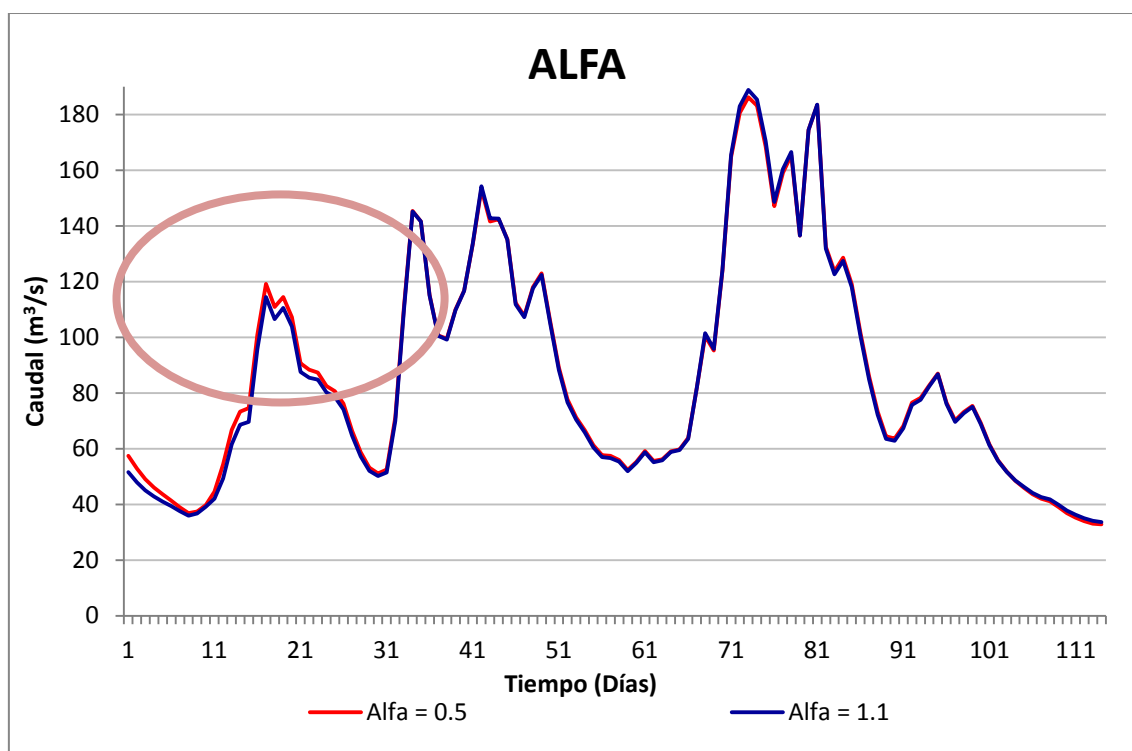
parámetros cambiando según el rango en cual oscilaban por valores máximos y mínimos, todo esto mientras los demás parámetros permanecía constante; a continuación se detalla el análisis de sensibilidad.

Como se puede observar en la Figura 32, el parámetro más sensible en la modelación de caudales en la cuenca de río palo es el parámetro PCALT, ya que este cambia el volumen de la hidrógrafa calculada por el modelo al aumentar el valor asignado a este parámetro, es de resaltar que la variación que tiene este parámetro es constante a partir de los primeros días de modelación, es decir, los resultados dejan de ser similares entre ellos mismos, aproximadamente después del undécimo día de modelación, como se puede apreciar en la Figura 33; las variaciones de este parámetro no restan representatividad a los resultados de la modelación pues a pesar de no ser idénticos presentan un mismo comportamiento.

Los parámetros de menor sensibilidad fueron MAX BASS, LP, ALFA, BETA, CFLUX estos presentan pequeñas variaciones y un comportamiento similar entre los límites de los rangos aceptables para cada parámetro.

### 6.6.1 ALFA (mm/día)

El parámetro ALFA tiene como función ajustar los picos más altos de la hidrógrafa, como se observa en la Figura 22 el parámetro incide de manera muy leve en la hidrógrafa siendo más notorio en el principio de la misma, según el Manual del modelo HBV este parámetro incide en la forma más no en el volumen total de la hidrógrafa.



**Figura 23.** Sensibilidad del parámetro ALFA.  
Fuente: Elaboración Propia



### 6.6.2 BETA

El parámetro BETA controla el aporte de la función de respuesta  $\Delta Q/\Delta P$ , este parámetro tiene influencia en el volumen de la hidrógrafa, pero solo al inicio del periodo de simulación tal y como se observa en la Figura 24.

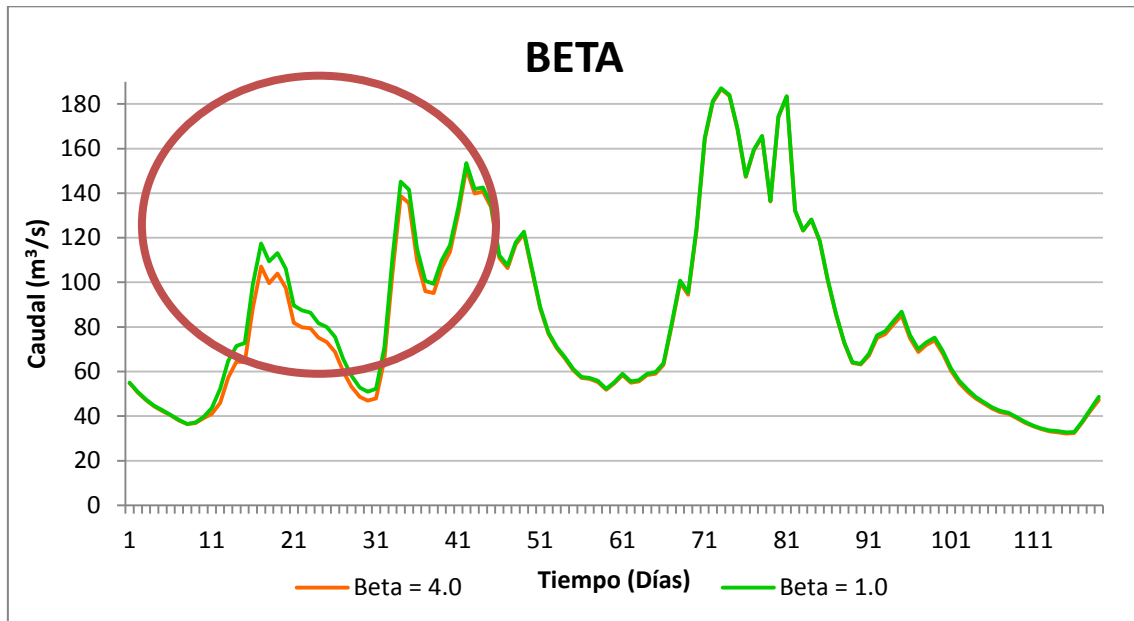


Figura 24. Sensibilidad del parámetro BETA.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.3 CFLUX (mm/día)

El parámetro CFLUX representa el aporte por ascenso capilar del tanque superior a la rutina de humedad del suelo. Este parámetro debería incidir en el volumen de la hidrógrafa pero como se observa en la Figura 25, CFLUX tiene una sensibilidad muy leve, es decir, no hay mucha diferencia entre las gráficas resultantes para los valores extremos del parámetro CFLUX.

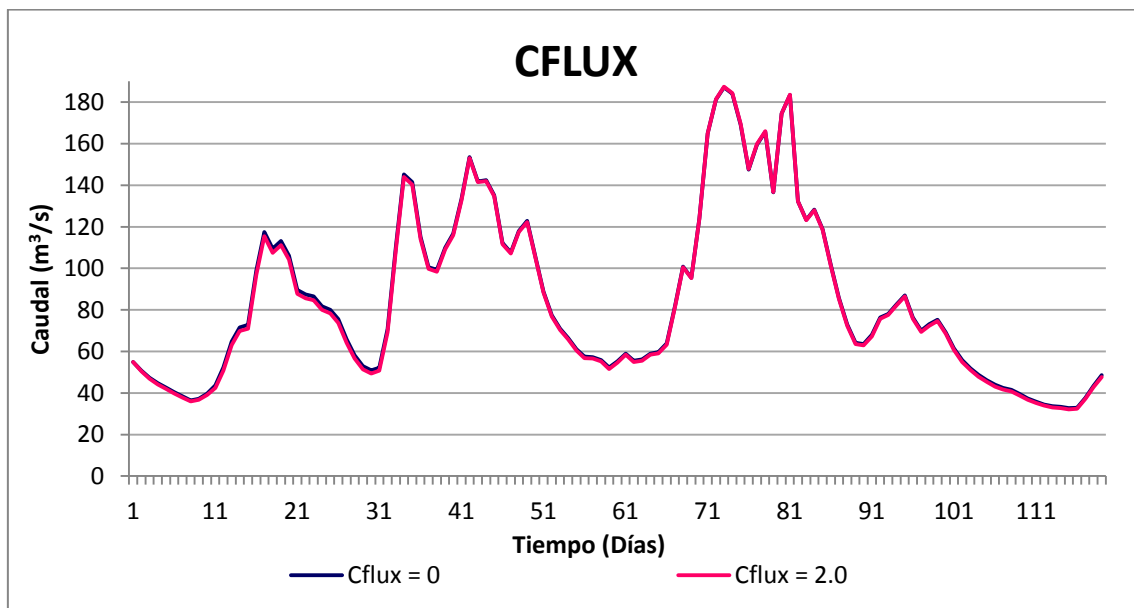
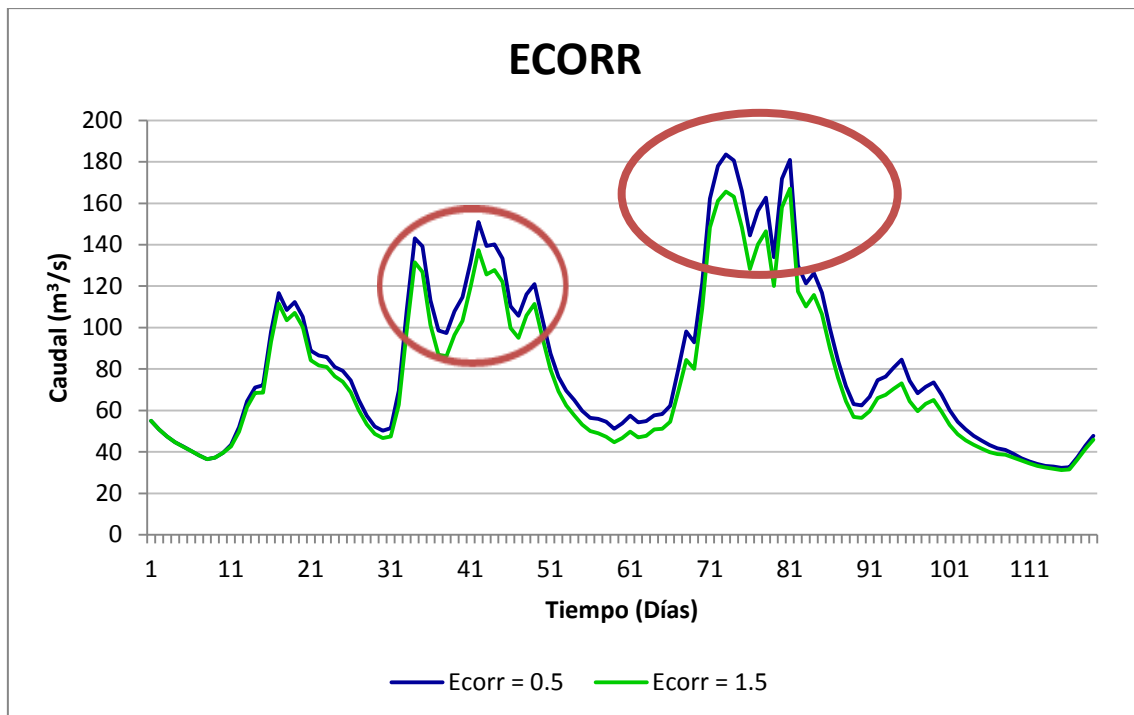


Figura 25. Sensibilidad del parámetro CFLUX.  
Fuente: Elaboración Propia

#### 6.6.4 ECORR

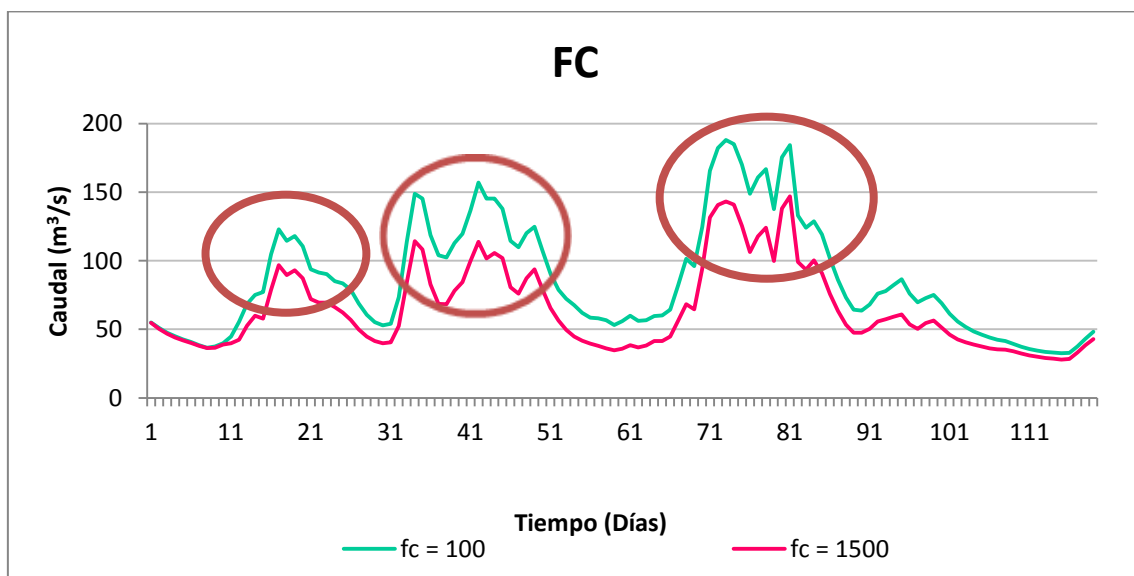
El parámetro ECORR es el factor de corrección de la evaporación, lo que indica que a mayor valor de este parámetro, se evaporará mayor cantidad de agua en la cuenca, por lo tanto el ECORR influye en el volumen de la hidrógrafa, tal y como se muestra en la Figura 26.



**Figura 26.** Sensibilidad del parámetro ECORR.  
Fuente: Elaboración Propia

#### 6.6.5 FC (mm)

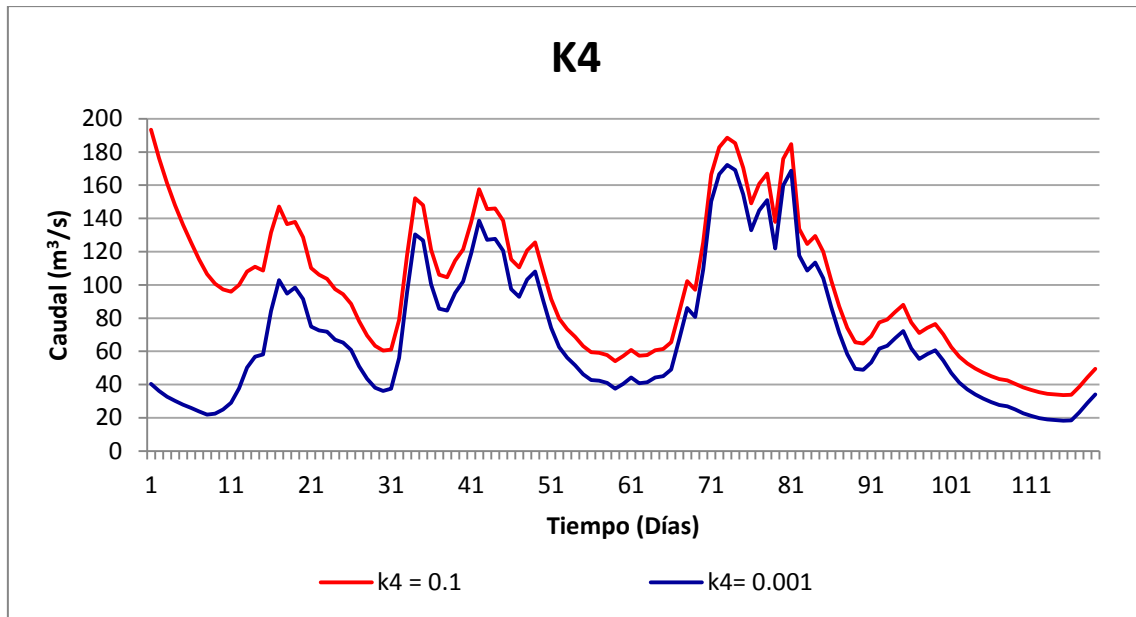
El parámetro FC representa la capacidad de campo de la cuenca, por lo tanto a menor valor de este parámetro menor capacidad de retención de agua va a tener el suelo, por lo tanto, aumentará la escorrentía. El parámetro FC influye en el volumen de la hidrógrafa tal y como se observa en la Figura 27.



**Figura 27.** Sensibilidad del parámetro FC.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.6 K4 (1/día)

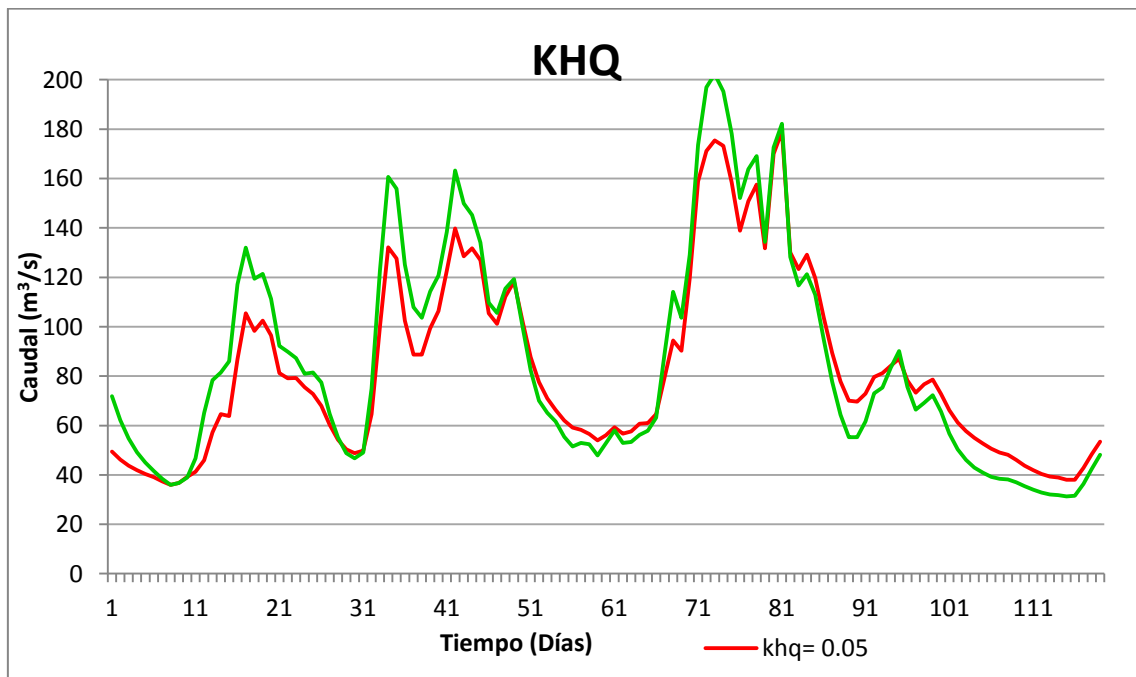
El parámetro K4 es el coeficiente de recesión del tanque inferior, este parámetro influye en el flujo base de la hidrógrafa. En la Figura 28 se puede observar que a mayor valor de K4, más alto será el flujo base.



**Figura 28.** Sensibilidad del parámetro K4.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.7 KHQ

El parámetro KHQ está relacionado con la recesión del tanque superior, como se puede observar en la Figura 29, este parámetro influye en el volumen y forma de la hidrógrafa, también influye en la generación de caudales picos.



**Figura 29.** Sensibilidad del parámetro KHQ.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.8 LP

El parámetro LP está ligado con la humedad del suelo. Como se puede observar en la Figura 30, este parámetro tiene una baja sensibilidad, por lo tanto, los valores extremos no inciden ni en la forma, ni en el volumen de la hidrógrafa.

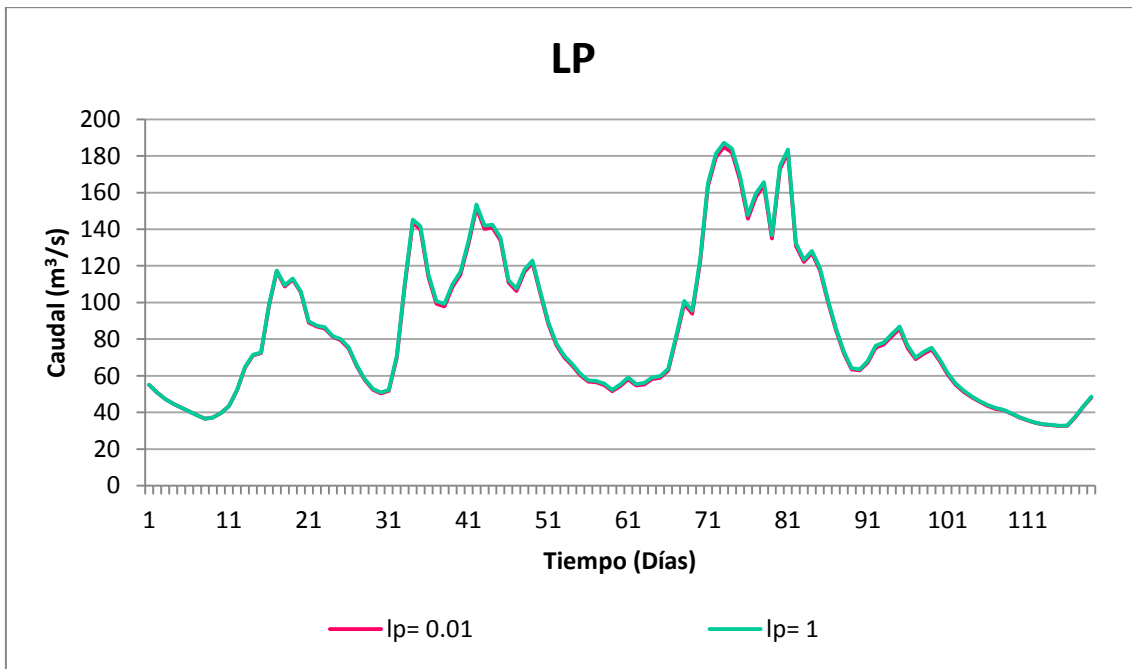


Figura 30. Sensibilidad del parámetro LP.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.9 MAXBAS

El parámetro MAXBAS define el tiempo base de la función de distribución, es decir, el número de días de la rutina de transformación. En la Figura 31 se observa que a menor valor de MAXBAS se presentan picos, este parámetro influye en la forma más no en el volumen de la hidrógrafa.

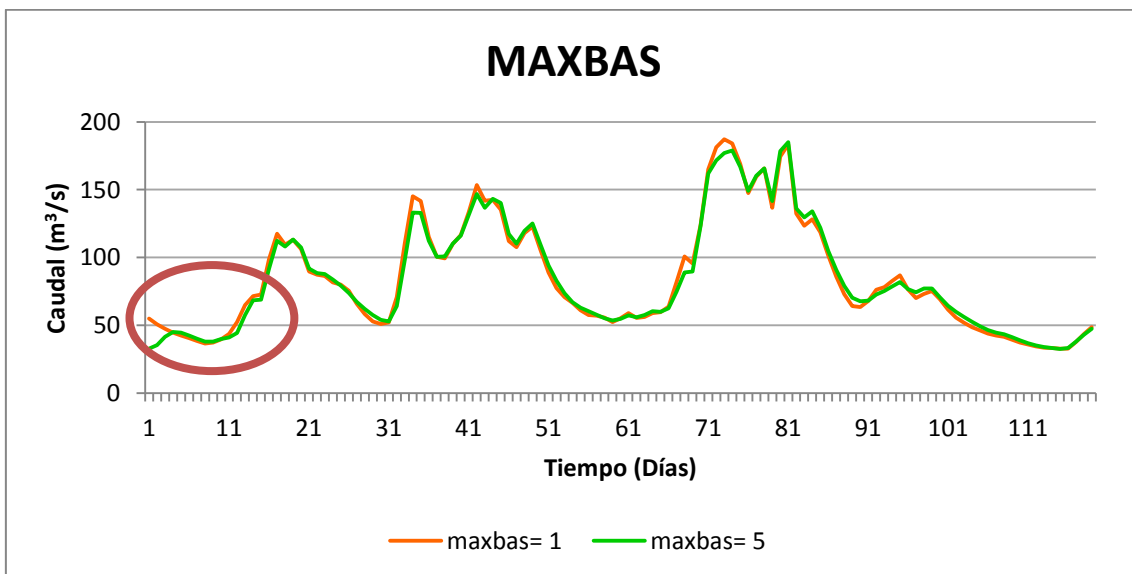


Figura 31. Sensibilidad del parámetro MAXBAS.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.10 PCALT

El parámetro PCALT permite ajustar la precipitación de la cuenca con respecto a la altitud, siendo así como se espera que a mayor altitud de la cuenca se presenten mayores volúmenes en las hidrógrafas calculadas. Como se observa en la Figura 32, el parámetro PCALT es el que tiene mayor sensibilidad en el modelo hidrológico HBV para la modelación de caudales en la cuenca del río Palo, ya que las variaciones en el volumen calculado son considerables al modificar los valores entre los máximos y los mínimos admisibles para dicho parámetro.

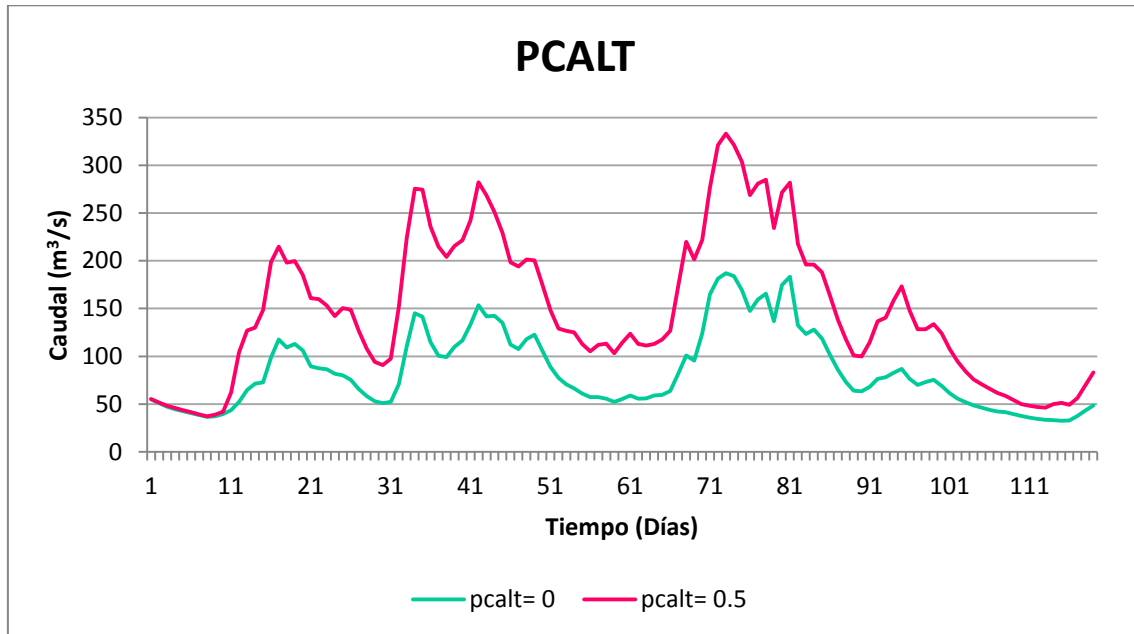


Figura 32. Sensibilidad del parámetro PCALT.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.11 PCORR

El parámetro PCORR representa el factor de corrección de la precipitación, por lo tanto influye en el volumen de la hidrógrafa. En la figura 33 se puede observar que a mayor valor del parámetro mayor serán los caudales generados por el modelo hidrológico HBV.

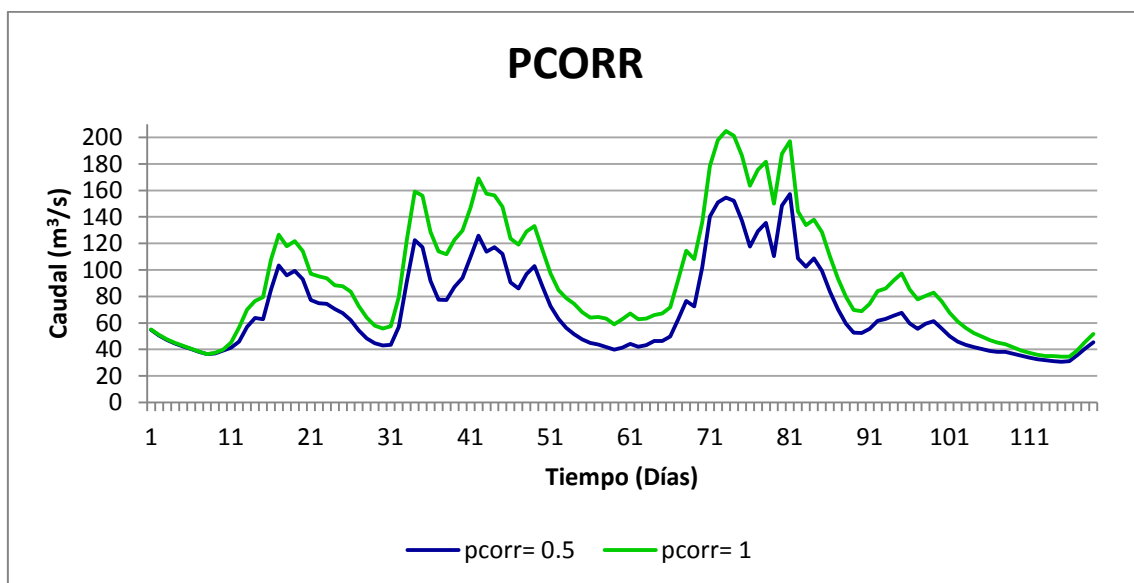


Figura 33. Sensibilidad del parámetro PCORR.  
Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.12 PERC (mm/día)

El parámetro PERC representa el flujo base de la hidrógrafa, es decir, que a mayor valor de PERC mayor cantidad de agua se va a contribuir del tanque superior al tanque inferior. En la Figura 34 se observa que a menor valor del parámetro se aumentan los caudales simulados por el modelo HBV y también que al final de la simulación cambia la forma de la hidrógrafa.

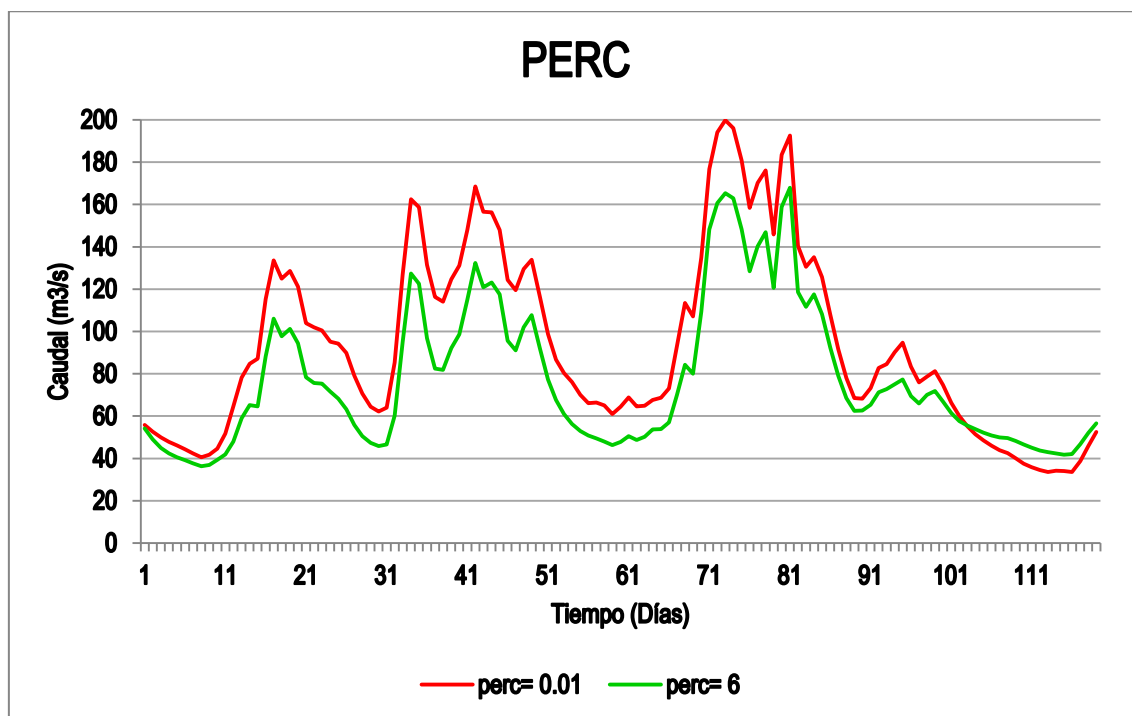


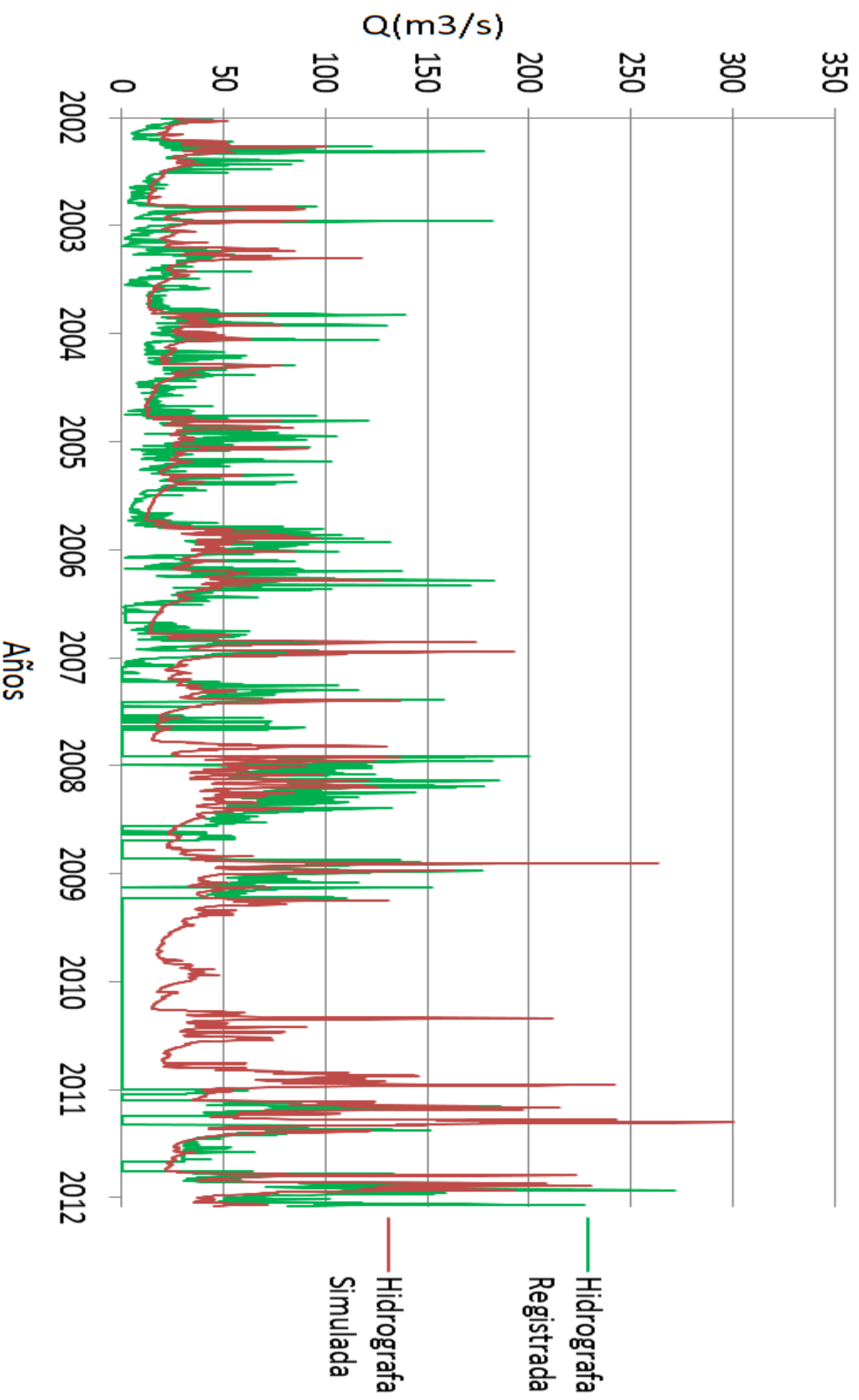
Figura 34. Sensibilidad del parámetro PERC.  
Fuente: Elaboración Propia

## 6.7 SIMULACIONES HIDROLOGICAS

La simulación hidrológica de los caudales de la cuenca del río Palo se inició desde el año siguiente al periodo calibrado, es así como se tomó el periodo que va desde el año 2002 hasta el 2012, además se tuvo en cuenta el índice ONI, del NOAA, en el cual se registran los periodos en los cuales se presentó el fenómeno ENOS, buscando específicamente que para dicho periodo se hubiera presentado el fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, encontrando que para dicho periodo se habían presentado dos veces dicho fenómeno (Ago 2007-Jun 2008; Jul 2010-Abr 2011 y Sep 2011-Mar 2012).

Adicionalmente se simuló caudales para los periodos 2007-2008 y 2010-2011 con la intención de evaluar el comportamiento del modelo en periodos en los cuales no hay registros de caudal, encontrando que la falta de datos resta confiabilidad a los resultados arrojados por el modelo hidrológico HBV, pues para dichos periodos específicos se obtuvieron valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación no representativos de los caudales de la cuenca del río Palo.

### 6.7.1 Simulación Hidrológica Periodo 2002 -2012



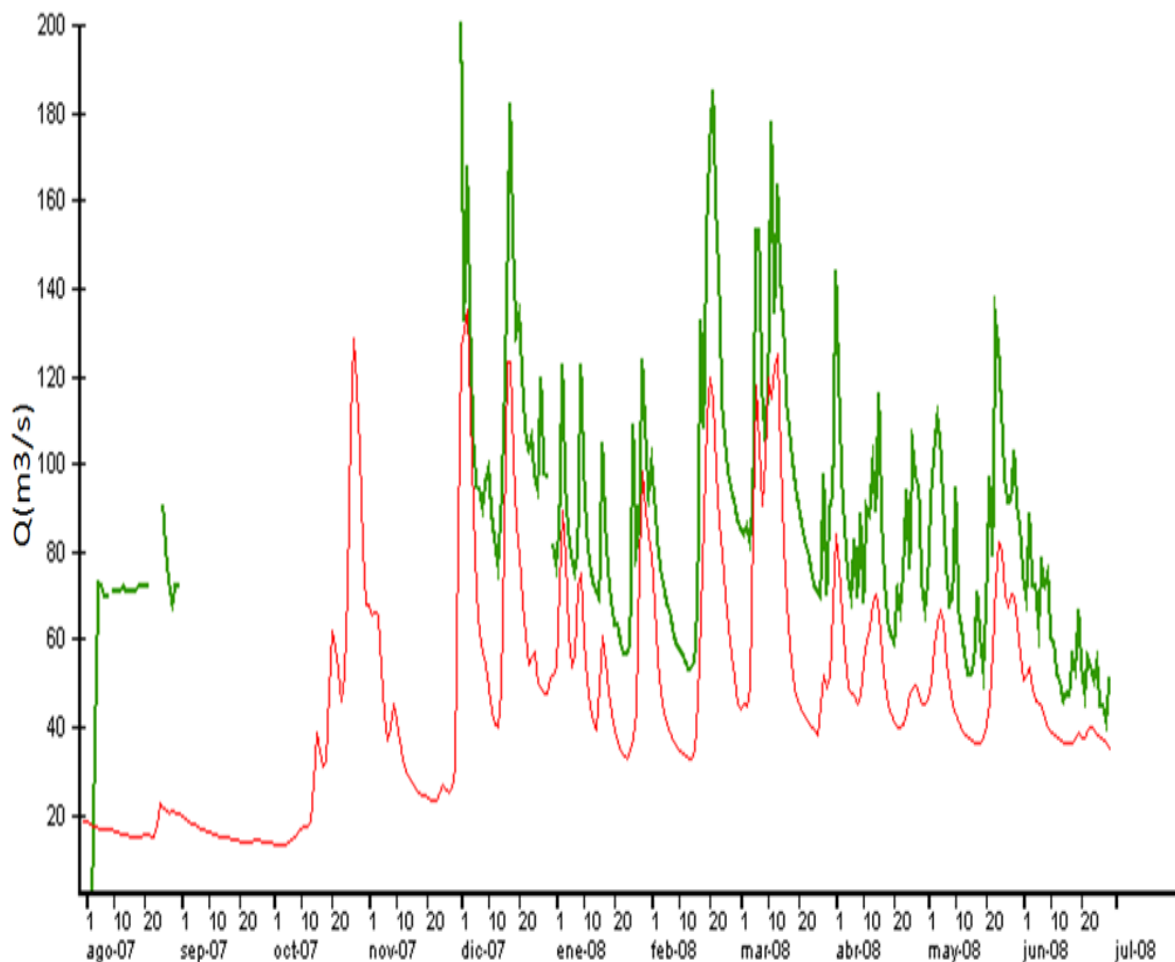
**Figura 35.** Simulación Hidrológica de Caudal del Periodo 2002 - 2012.

Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)

En la Figura 35 se observa que hay una similitud visual en la tendencia de las hidrógrafas calculadas (color rojo) y registradas (color verde), además se presentan valores máximos entre los periodos comprendidos entre los años 2008 -2009, 2010 -2011 y 2011 - 2012 siendo el último periodo el que presentó mayor pico de caudal. Según los caudales simulados para este periodo se muestra un caudal elevado para el periodo 2010-2011, aun cuando para este periodo específico no se cuenta con registros de caudal, es de resaltar que este valor de caudal elevado podría estar asociado al fenómeno ENOS en su fase fría La Niña.

Para el periodo de simulación que va desde el año 2002 hasta el 2012 se obtiene un valor de diferencia acumulada y coeficiente de determinación de -54,34 mm y 0,55, estos valores son parcialmente aceptables, ya que el coeficiente de determinación se encuentra dentro de los valores aceptables, comparado con los resultados obtenidos en la modelación de la cuenca del río Tuluá por CVC (2007), por lo anterior se considera confiables dichos resultados, es de resaltar que para este periodo se presenta ausencia de registros de caudal pero los resultados obtenidos no se dispersan de los caudales registrados, lo que indica que el modelo hidrológico HBV maneja mejor la ausencia de datos en periodos largos de simulación (mayores a 10 años).

### 6.7.2 Simulación Hidrológica Periodo 2007 -2008



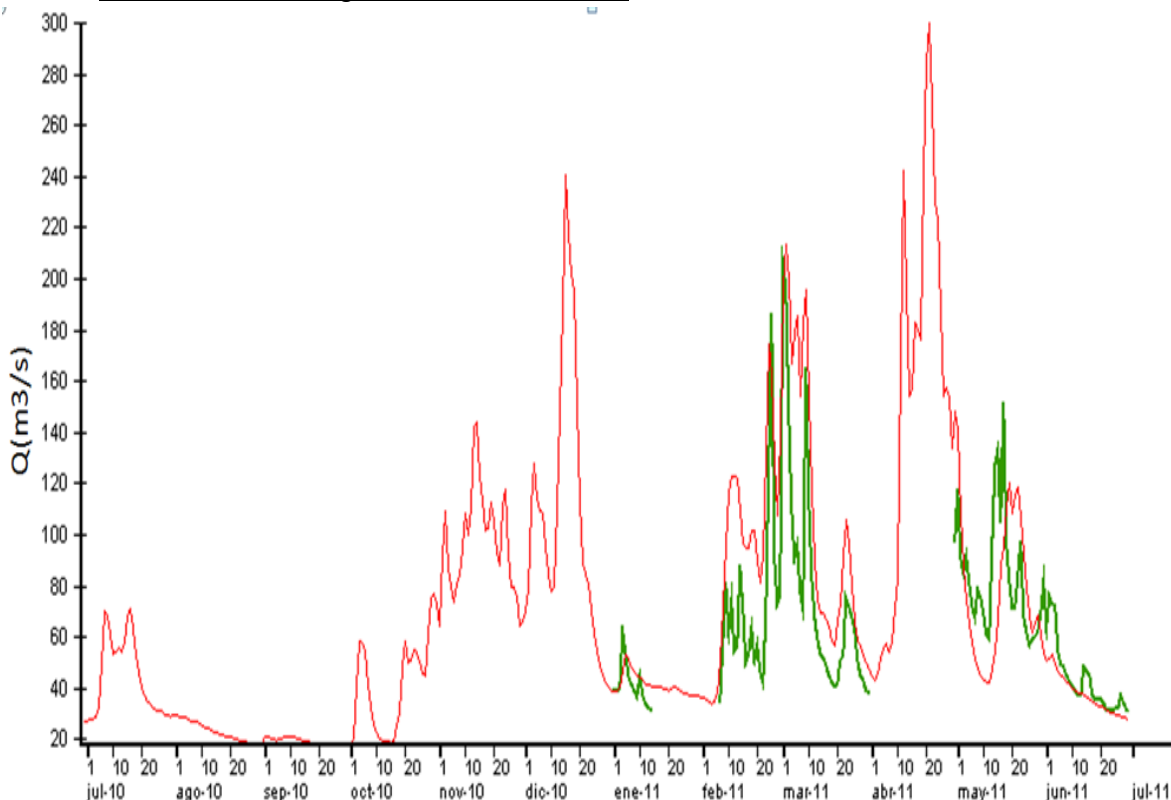
**Figura 35.** Simulación Hidrológica de Caudal en el Periodo 1980 - 1990.

Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)



Para el periodo simulado que va desde Agosto de 2007 a Julio de 2008 se obtuvieron valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación de -302,03mm y -0,43, respectivamente, indicando que los resultados arrojados por el modelo no son representativos del comportamiento de los caudales en la cuenca, como se observa en la Figura 36 para el periodo en el cual no hubo registros de caudales en la estación Palo Pto. Tejada, no hay similitud grafica en la forma de las hidrógrafas, diferente a lo que se puede observar cuando empieza a haber registros, donde las hidrógrafas calculadas empiezan a ajustarse a las registradas, en forma más no en volumen.

### 6.7.3 Simulación Hidrológica Periodo 2010-2011



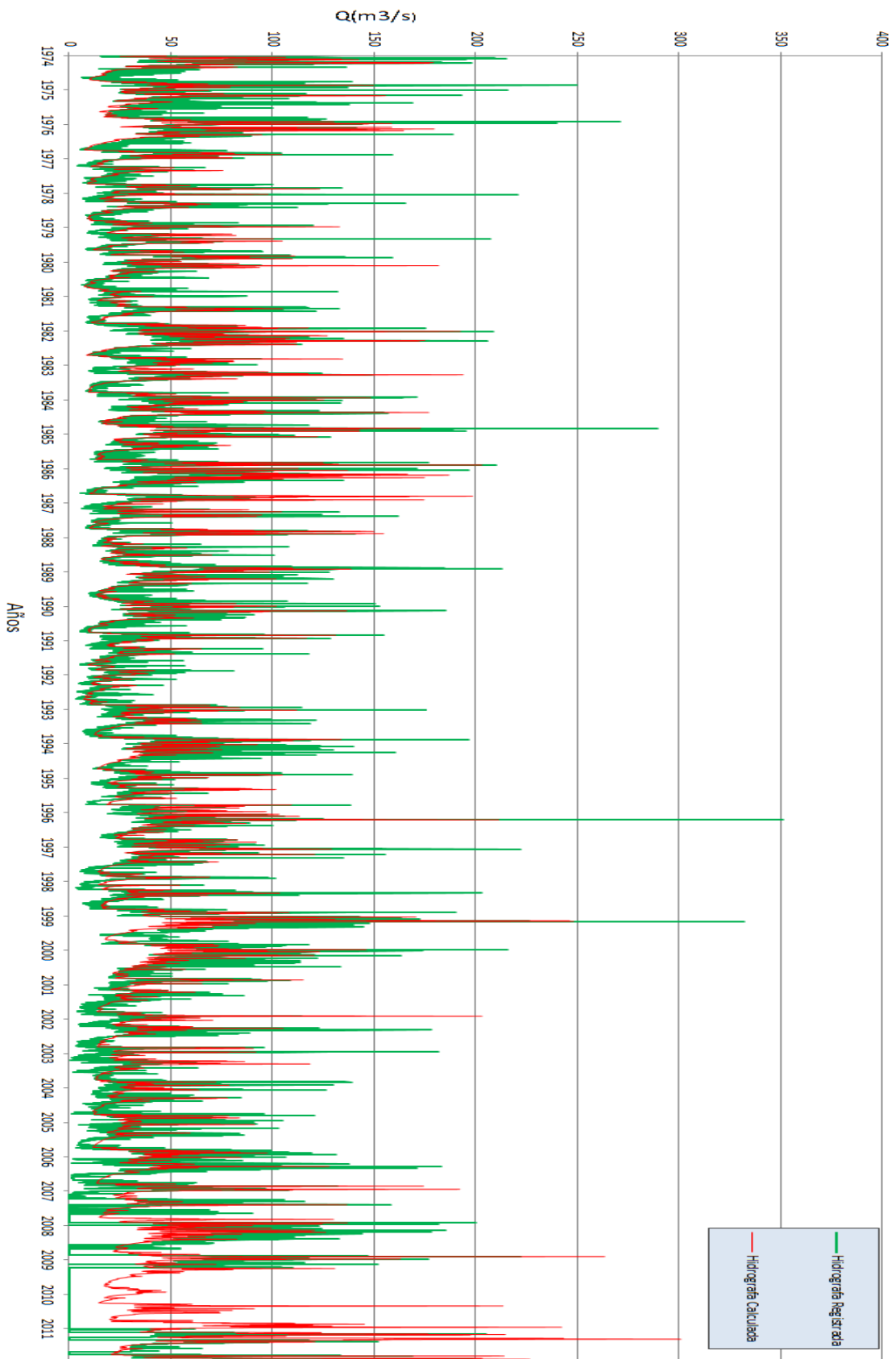
**Figura 36.** Simulación Hidrológica de Caudal en el Periodo 1984 - 1985.

Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)

Para el periodo simulado que va desde Julio de 2010 a Julio de 2011 se obtuvieron valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación de -16,80 mm y 0,11, respectivamente, indicando que los resultados arrojados por el modelo no son representativos del comportamiento de los caudales en la cuenca, como se observa en la Figura 37, a pesar de ello los resultados de la simulación en este periodo se ajustan mejor que en el periodo simulado 2007-2008, esto se puede deber a la calidad de los registros de caudal para este periodo, es de resaltar que los periodos simulados son muy cortos, lo cual no permite mejorar el ajuste de los resultados en el tiempo.

Es posible apreciar en los periodos los periodos 2007-2008 y 2010-2011 que la falta de datos resta confiabilidad a los resultados arrojados por el modelo hidrológico HBV, así también como los periodos de simulación muy cortos, ya que para dichos periodos se obtuvieron valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación que le restan representatividad a los resultados obtenidos.

### 6.7.4 Simulación Hidrológica Periodo Total de estudio (precipitación)



**Figura 38.** Simulación Hidrológica de Caudal del Periodo 1974 -2012.  
Fuente: Modelo Hidrológico HBV (2014)

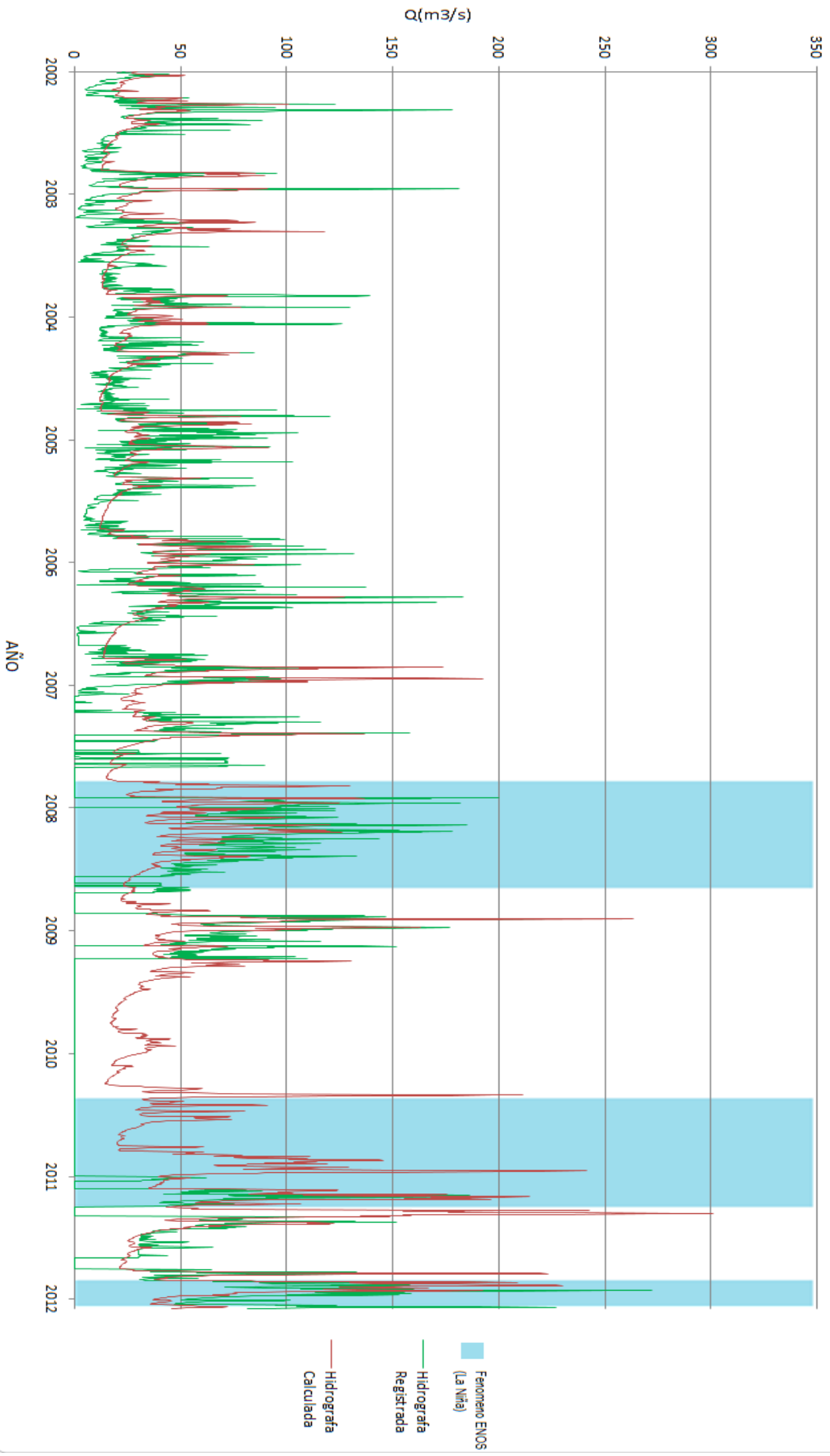
A partir de los datos disponibles, se realizó la simulación hidrológica para el periodo comprendido entre los años 1974 y 2012 y se realizó posteriormente la gráfica de los valores de salida del modelo obtenidos para el mismo periodo (Figura 38), con el objetivo de validar los resultados arrojados por el modelo a partir de la información y registros hidroclimatológicos existentes de la zona de estudio, teniendo en cuenta el resultado encontrado en posteriores simulaciones, que indicaban que a mayor cantidad de años de simulación mejores eran los resultados obtenidos. Una vez simulado dicho periodo, fue posible apreciar la similitud en la tendencia de las hidrógrafas calculadas y las registradas para realizar el respectivo análisis.

Para el periodo simulado que va desde 1974 a de 2012 se obtuvieron valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación de 5,2 mm y 0,6, respectivamente, indicando que los resultados arrojados por el modelo son representativos del comportamiento de los caudales en la cuenca, como se observa en la Figura 38, esto comprueba la hipótesis de que a mayor cantidad de años de simulación se mejora el ajuste de los resultados a los caudales reales de la cuenca.

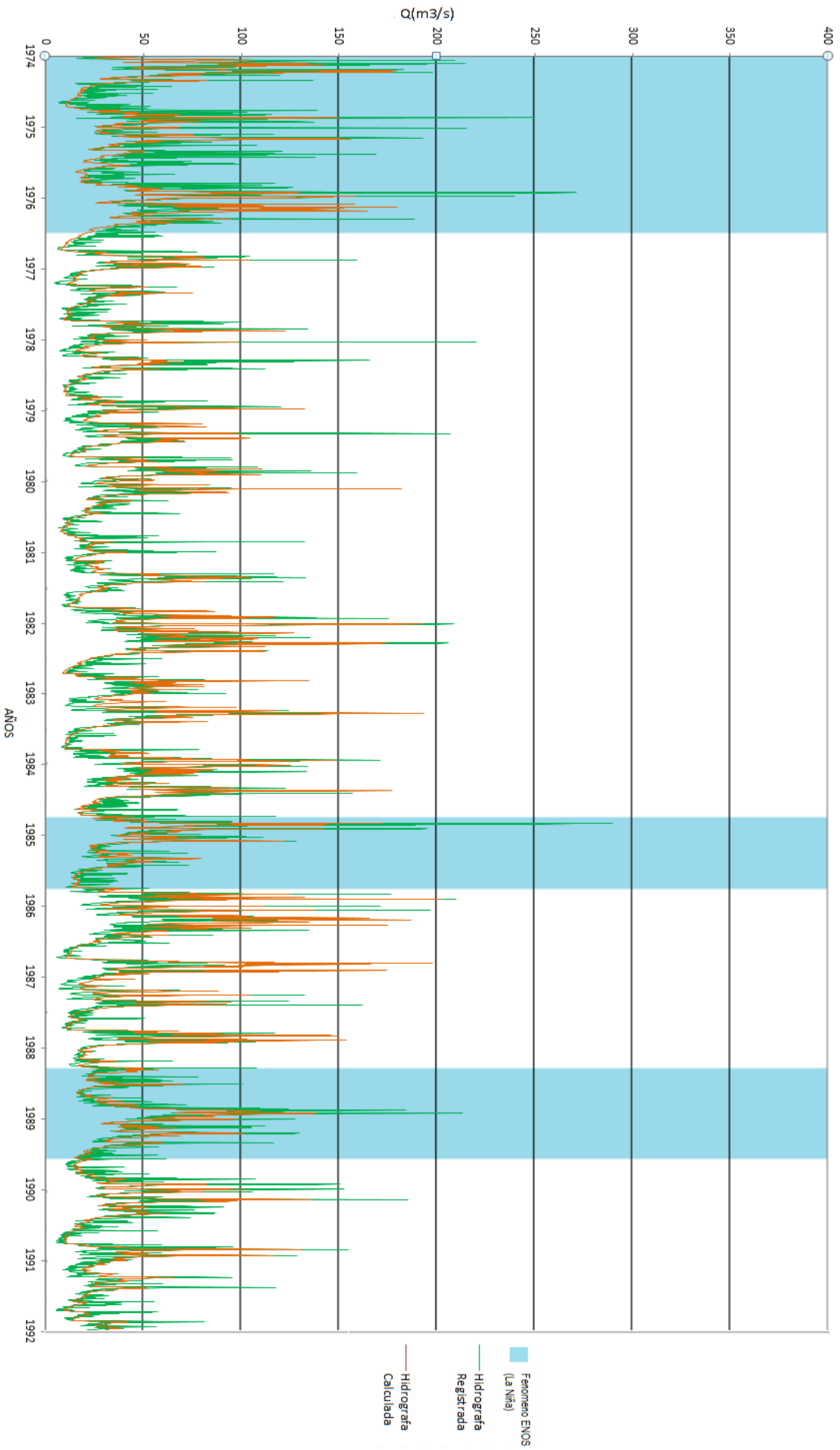
## **6.8 ASOCIACIÓN DE LA SIMULACION HIDROLÓGICA AL FENÓMENO ENOS-FASE FRÍA**

En la Figura 39 se puede observar al superponer los resultados de la simulación para el periodo 2002-2012 con periodos en los cuales se presentó el fenómeno ENOS, específicamente la fase fría, La Niña, que se evidencia una alta asociación entre los caudales máximos de la simulación y los periodos en los cuales se presentó el fenómeno de La Niña, es de resaltar que en algunos tramos del periodo simulado no se contó con registros de caudal en la estación Palo Pto. Tejada, a pesar de ello los resultados muestran caudales máximos por encima del promedio para los el periodo simulado 2010-2011 y finales del 2011, que corresponde a fechas entre las cuales se presentó el fenómeno de ENOS en su fase fría La Niña, lo que deja en evidencia una posible asociación de los resultados a dicho fenómeno, además permite generar confianza en los resultados obtenidos para este periodo de simulación.

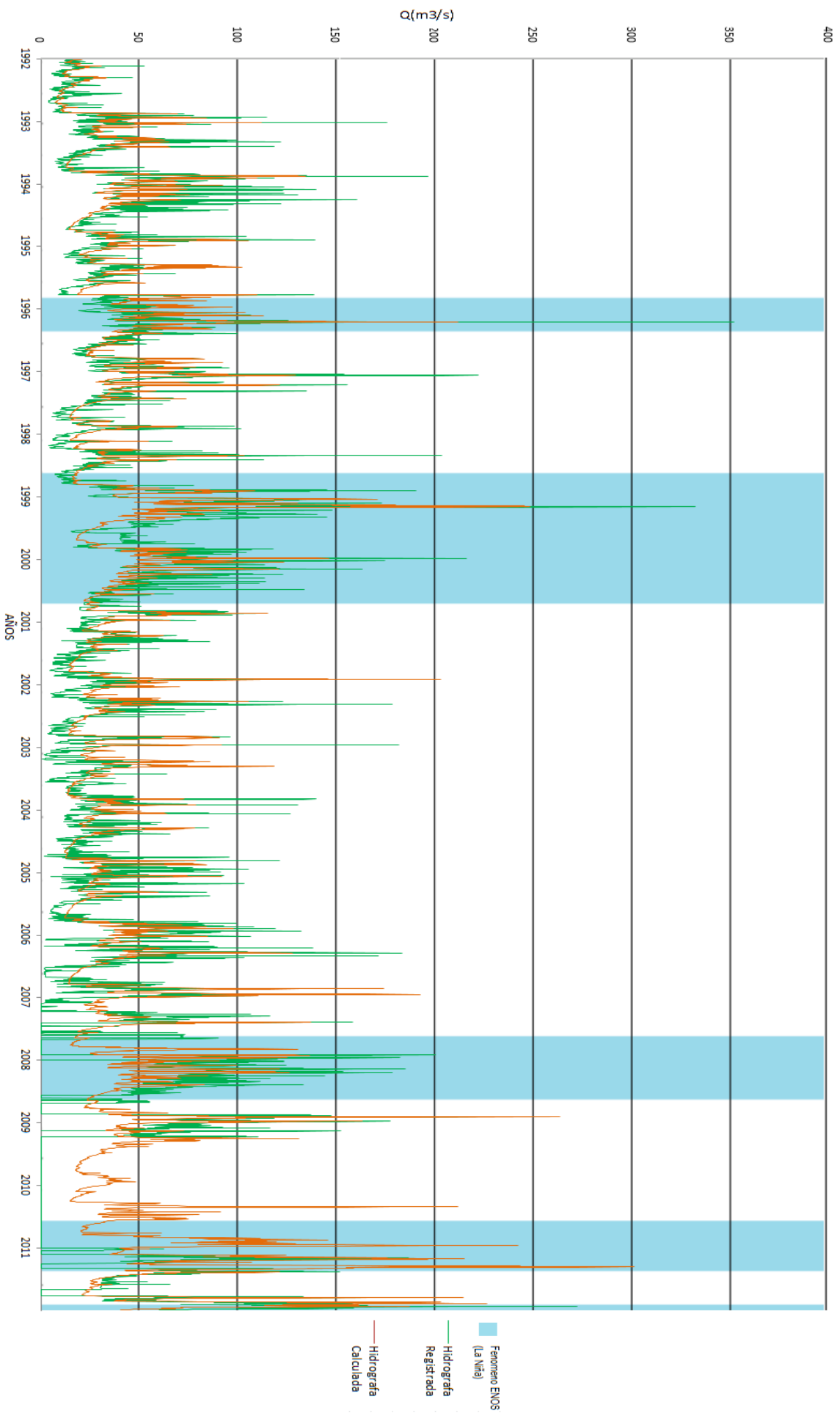
En la Figura 39 también es posible observar que para el periodo 2008-2009 donde se presentó el fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, el modelo hidrológico HBV arroja valores de caudal que se asemejan a el comportamiento de las hidrógrafas registradas en su forma, mas no en los volúmenes, esto no resta la representatividad a los resultados y puede deberse a errores mínimos en la calibración del modelo o puede estar asociado a la calidad de los datos registrados en la estación Palo Pto. Tejada.



**Figura 39.** Comparación de los caudales simulados y registrados entre 2002-2012 con los periodos de la fase fría del Fenómeno ENOS en el mismo periodo.  
Fuente: Modificado de Modelo Hidrológico HBV (2014)



**Figura 40.** Comparación de los caudales simulados y registrados entre 1974-2012 con los periodos de la fase fría del Fenómeno ENOS en el mismo periodo.  
Fuente: Modificado de Modelo Hidrológico HBV (2014)



**Figura 40.** Comparación de los caudales simulados y registrados entre 1974-2012 con los periodos de la fase fría del Fenómeno ENOS en el mismo periodo (Continuación).  
Fuente: Modificado de Modelo Hidrológico HBV (2014)

La Figura 40 representa el periodo de simulación que comprende desde el año 1974 hasta 2012, este periodo representa la simulación de caudales para todo el periodo estudiado que posee registros válidos de caudal, además es posible observar la similitud entre las hidrógrafas registradas y calculadas, dejando en evidencia la asociación entre los caudales máximos simulados y los periodos en los cuales se presentó el fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, es así como el modelo hidrológico es capaz de representar caudales máximos que pueden coincidir con periodos de ocurrencia del fenómeno La Niña.

Para el periodo de simulación 1974-2012, se observa en la Figura 40 que el fenómeno acierta con caudales máximos para periodos de ocurrencia del fenómeno La Niña en 1974-1976, 1985-1986, 1995-1996, 1999-2000, 2010-2011 y finales del 2011, en total acierta seis veces arrojando caudales elevados en periodos de ocurrencia de La Niña, teniendo en cuenta que para el periodo total simulando el fenómeno de la Niña se presenta ocho veces, reafirmando la asociación de los resultados del modelo hidrológico HBV a la ocurrencia de dicho fenómeno. Es de resaltar que para el periodo de simulación 1974-2012 la diferencia acumulada y el coeficiente de determinación arrojó valores de 5,2 mm y 0,6 respectivamente, que son valores considerados aceptables según criterios definidos anteriormente, lo cual indica que los resultados de la simulación sean confiables.

## **6.9 RESUMEN GENERAL DE LOS RESULTADOS**

Según la descripción morfométrica e hidroclimatológica de la cuenca del río Palo, esta es una cuenca torrencial, que concentra grandes volúmenes de agua en poco tiempo, además es una cuenca que al parecer está muy deforestada según el número de curva que es 73,61 lo que quiere decir que el 73,61% de las precipitaciones escurre superficialmente, mientras que solo un 26,39% se infiltra, la precipitación media multianual de la cuenca es de aproximadamente 1.590mm y presenta un caudal medio multianual de 39,15 m<sup>3</sup>/s, y un caudal mínimo y máximo que oscila entre los 3,6 y 351,28 m<sup>3</sup>/s respectivamente, lo que la hace el segundo mayor tributario de caudal al río Cauca.

Con respecto al AED, los resultados de las series de precipitación y caudal estudiadas permitieron definir la tendencia bimodal del régimen de precipitaciones, encontrando que las precipitación media multianual oscila en el rango que va desde 38 mm para los valores mínimos y hasta los 250 mm para los valores máximos, en cada periodo específico del año, lo que permite deducir que representan periodos lluviosos que corresponden a los meses de abril y octubre y periodos secos en enero y julio, lo cual es propio de la hidrología Colombiana, y los efectos de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación en la parte baja de la cuenca del río Cauca. La estación de caudal presentó valores ajustados a los resultados de las estaciones pluviométricas con relaciones de media y mediana aceptables, además de un rango intercuartílico que se ajusta al comportamiento bimodal.

De manera general el AF de las diferentes estaciones para el caso de las series de máximas anuales, se observó que presentaban un mejor ajuste con la función LogPearson III, ya que en el 54,5% de las estaciones se evidenció el ajuste con la misma, en contraste con las series LogNormal y Gumbel que alcanzaron solo el 27,3% y 18,2% respectivamente. El ajuste alcanzado con la función LogPearson III se debe principalmente a que los valores obtenidos en el CCG son más cercanos a 1 y el EEA es menor a 15% en comparación con las demás funciones estadísticas.

Los valores obtenidos en la calibración del modelo hidrológico HBV para el periodo 1992-2002 del coeficiente de determinación y diferencia acumulada, fueron de 0,68 y 0,26 mm

respectivamente, y para el periodo 1974-1984, el coeficiente de determinación y la diferencia acumulada, obtuvieron valores de 0,60 y 0,85 mm; estos resultados se consideraron aceptables teniendo en cuenta los resultados obtenidos por la CVC en la calibración del mismo modelo para la cuenca del río Tuluá CVC (2007), donde el resultado de la calibración para el periodo (1974-1987) fue un coeficiente de determinación de 0.61 y una diferencia acumulada de -6.38 mm y para el periodo (1974-1995) se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.51 y una diferencia acumulada de -64.06 mm, además se pudo observar que mientras mejor sea la calidad de datos suministrados al modelo hidrológico HBV, en especial los datos de caudal, mejor serán los resultados de la calibración.

La simulación hidrológica de la cuenca del río Palo se inició para el periodo 2002-2012 obteniendo valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación de -54,34 mm y 0,55; estos valores fueron parcialmente aceptables, pues la diferencia acumulada no dio un valor aceptable según los criterios definidos en la metodología, sin embargo se realizó una comparación de los resultados obtenidos en la modelación de la cuenca del río Tuluá por CVC (2007), donde se consideraron aceptables valores similares de diferencia acumulada, por lo anterior se consideró confiables dichos resultados; adicionalmente se realizó la simulación para dos periodos cortos con ausencia de datos, con el fin de determinar la confianza que podrían generar estos resultados, encontrando que para los periodos cortos (menores a cinco años) con ausencia de datos, los resultados no eran representativos pues no se encontró similitud grafica entre las hidrógrafas registrada y calculada; por su parte los valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación para estos periodos en general fueron de -302,03mm y -0,43 respectivamente, lo que los aleja de ser valores aceptables.

Para el caso de la simulación del periodo total de registros, que va desde el año de 1974 hasta 2012 se obtuvieron valores de diferencia acumulada y coeficiente de determinación de 5,2 mm y 0,6, respectivamente, que son valores que permiten tener mayor confianza en los resultados de la modelación, además se encontró que cuanto más años tiene el periodo de simulación mejor son los resultados de la misma, razón por la que, en promedio los periodos que superan los 10 años arrojan mejores resultados.

Los caudales simulados por el modelo hidrológico HBV presentaron una alta asociación a la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, siendo así como se observó que durante el periodo de simulación 1974-2012 se presentó dicho fenómeno ocho veces y en seis oportunidades los caudales generados por el modelo coincidieron con la ocurrencia del fenómeno, es así como el modelo generó el 75% de las veces caudales que podrían estar asociados a La Niña.



## 7.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

Según la descripción morfométrica e hidroclimatológica de la cuenca del río Palo, esta es una cuenca torrencial, que concentra grandes volúmenes de agua en poco tiempo, además es una cuenca que al parecer está muy deforestada según el número de curva, la pendiente del terreno y el uso del suelo en la cuenca, es posible asegurar que se presenta en épocas de lluvia escorrentías superficiales con arrastre de sedimentos y otros, esto puede deberse a la pérdida de la cobertura vegetal que protege el suelo y lo deja vulnerable a los efectos del agua, ésta pérdida de la cobertura vegetal puede tener origen en factores que inciden en la cuenca de estudio como son por ejemplo los diferentes usos del suelo.

Teniendo en cuenta las características torrenciales de la cuenca del río Palo y los volúmenes de sedimentos que esta cuenca aporta a el río Cauca en el tramos Salvajina-Anacaro, se hace importante desarrollar medidas que mitiguen los impactos en los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano, específicamente para la planta de tratamiento de Puerto Mayarino, que abastece agua potable a una importante cantidad de habitantes de la ciudad de Santiago de Cali, esto teniendo en cuenta que al presentarse eventos con precipitaciones máximas en la cuenca del río Palo gran parte de la comunidad de la ciudad de Santiago de Cali va a verse perjudicada, pues las características del agua del río Cauca cambian considerablemente y de forma brusca durante la ocurrencia de eventos máximos, lo que perjudica su tratabilidad.

Los grandes picos de caudales máximos observados en la cuenca del río Palo, se generan debido al alto escurrimiento generado como consecuencia del grado de deforestación en que se encuentra la misma, y que ha sido identificado por diferentes autores, situación que ha llevado al aumento del riesgo de inundaciones, crecidas y deslizamientos, así como a los efectos del fenómeno ENOS en su fase fría La Niña sobre la cuenca, generando consigo grandes pérdidas en aspectos sociales, económicos y culturales.

La selección de la red de estaciones permitió garantizar la representatividad de los datos de la cuenca del río Palo, ya que los criterios de selección de la misma fueron la distribución geográfica de las estaciones y la disponibilidad de datos en cada una de ellas, esto permitió aumentar la confianza en los resultados.

Al realizar el AED se concluye que los datos de las estaciones involucradas en este proyecto son consistentes, pues las muestras cumplen con la independencia de sus datos, de igual forma se hace evidente la presencia de valores atípicos, ya que todas las series analizadas cuentan con al menos un valor dudoso que se considera se puede deber a diferentes factores como: el cambio en la localización del pluviómetro, cambios en el uso del suelo, deficiencias en los aparatos, errores humanos y reemplazo del operador.

La disponibilidad de datos para la modelación hidrológica aumenta la confianza en las simulaciones, ya que no se acude a medidas que puedan llegar a restar representatividad o confianza a los datos arrojados por el modelo hidrológico, ya que para este proyecto fue necesario realizar ajustes a los criterios que definían las estaciones a las cuales se les realizó el AED.

Los resultados de las series de precipitación estudiadas con el AED en la cuenca del río Palo, permitió definir la tendencia bimodal del régimen de precipitaciones, definiendo periodos lluviosos que corresponden a los meses de abril y octubre y periodos secos en enero y julio; los resultados del estudio de la serie de caudal presentó valores ajustados a los resultados de las

estaciones pluviométricas con relaciones de media y mediana aceptables, además de un rango intercuartílico que se ajusta al comportamiento bimodal.

El AF de las diferentes estaciones de la cuenca del río Palo demostró que los datos presentan un mejor ajuste con la función LogPearson III, ya que en el 54,5% de las estaciones se evidenció el ajuste con la misma, en contraste con las series LogNormal y Gumbel que alcanzaron solo el 27,3% y 18,2% respectivamente. El ajuste alcanzado con la función LogPearson III se debe principalmente a que los valores obtenidos en el CCG son más cercanos a 1 y el EEA es menor a 15% en comparación con las demás funciones estadísticas.

En general el proceso de calibración del modelo hidrológico HBV cumple con una calibración aceptable para la cuenca del río Palo, pues presentan una similitud gráfica en la forma de las hidrógrafas registradas y calculadas, además la partición del periodo de calibración (dos periodos) permitió asegurar la representatividad de las simulaciones en todos los periodos de registro.

En general, se pudo observar en la calibración que mientras mejor sea la calidad de datos suministrados al modelo hidrológico HBV, en especial los datos de caudal, mejor serán los resultados de la calibración, pues el proceso de calibración se puede ver influenciado por factores tales como cambios en el uso del suelo y/o la inadecuada medición y registro de datos (Precipitación y caudal).

La validación del modelo hidrológico HBV demostró que a menores periodos de tiempo simulados (<6 años) se disminuye la calidad y confiabilidad de los resultados (coeficiente de determinación y diferencia acumulada).

Con el análisis de sensibilidad se determinó que el parámetro más sensible en la modelación de caudales en la cuenca de río palo es el parámetro PCALT, ya que este cambia el volumen de la hidrógrafa calculada por el modelo al aumentar el valor asignado a este parámetro, por otra parte los parámetros de menor sensibilidad fueron MAX BASS, LP, ALFA, BETA, CFLUX estos presentan pequeñas variaciones y un comportamiento similar entre los límites de los rangos aceptables para cada parámetro.

Con la simulación hidrológica de caudales realizada a la cuenca del río Palo, se pudo apreciar que cuando más largos son los periodos de simulación con el modelo hidrológico HBV, los valores de coeficiente de determinación y diferencia acumulada se acercan más a los valores ideales para los mismos, a diferencia de lo ocurrido cuando los periodos de simulación son cortos, es así como la simulación hidrológica de periodos largos de tiempo resulta ser más confiable y representativa de la hidrología de una región específica.

Los caudales simulados por el modelo hidrológico HBV presentaron una alta asociación a la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, siendo así como se observó que durante el periodo de simulación 1974-2012 el modelo generó el 75% de las veces caudales que podrían estar asociados a La Niña.

El estudio del fenómeno ENOS es de gran importancia en la gestión del recurso hídrico, ya que a partir de los resultados obtenidos, es posible establecer estrategias tales como sistemas de alertas tempranas, mapas de riesgo, planes y programas ambientales, desarrollar una política de gestión integral del recurso hídrico, entre otras, que reduzcan el riesgo ocasionado por eventos extremos, además de permitir generar acciones de adaptación y mitigación frente a los eventos VC y CC que afectan las diferentes regiones del país como son las inundaciones.

## 7.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar en la cuenca del río Palo una estación climatológica, ya que para el desarrollo de este estudio se utilizó la estación climatológica Univalle, que se encuentra considerablemente alejada de la cuenca del río Palo, el contar con dicha estación permitirá obtener resultados más precisos y confiables en futuras simulaciones, más aun cuando la cuenca del río Palo es una cuenca que requiere continuamente evaluación con el fin de ajustar parámetros como el CN, realizar simulaciones hidrológicas y generar pronósticos hidrológicos, teniendo en cuenta que el desarrollo de alertas tempranas es una necesidad dada la vulnerabilidad en los sistemas de abastecimiento de agua potable que se pueden ver afectados.

La cuenca del río Palo es una cuenca torrencial, que concentra grandes volúmenes de agua en poco tiempo, además presenta una precipitación media multianual de aproximadamente 1.590mm y un alto de escurrimiento, aproximadamente 73%, razón por la cual se recomienda realizar un monitoreo constante, ya que se esperan crecientes en tiempos de concentración cortos.

Se hace necesario desarrollar programas de reforestación en la cuenca del río Palo, con el ánimo de aumentar la capacidad de retención de la cuenca del río Palo y disminuir la probabilidad de que ocurran desastres naturales.

En general se recomienda revisar y actualizar la curva de calibración de la estación de caudal Palo Pto. Tejada y el correcto funcionamiento de esta, teniendo en cuenta que el río Palo es uno de los tributarios que mayor caudal aportan al río Cauca.

Se recomienda para futuros estudios, tener en cuenta que las estaciones de reemplazo pueden tener un comportamiento similar en cuanto al régimen de precipitación, pero en muchos casos los factores de correlación no tienen en cuenta características como usos del suelo y características del mismo.

Para estudios próximos, se recomienda utilizar además del modelo HBV-IHMS, otros modelos que permitan utilizar información adicional como por ejemplo usos del suelo; y que además permitan simular escenarios en escala temporal de horas, con el fin de obtener resultados más precisos que contribuyan a aumentar la confiabilidad de los resultados.

Aunque para el desarrollo de este proyecto la disponibilidad de datos fue la necesaria para realizar una modelación representativa de la hidrología de la cuenca, los resultados obtenidos podrían haber sido más precisos si se contara con una disponibilidad de datos continuos y confiables, razón por la cual se hace necesario realizar una inversión considerable en equipos automatizados y sistematizados que registren de manera continua y precisa datos tan importantes y necesarios como son los registros hidroclimatológicos.

## 8.0 BIBLIOGRAFÍA

Amaya, G., Restrepo, C., Vélez, M., Álvarez, J. 2009. Modelación del Comportamiento Hidrológico de tres Cuencas en el Urabá Antioqueño. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Arbeláez, A., Castro, H. 2007. Low Flow Discharges Regional Analysis using Wakeby Distribution in an ungauged basin in Colombia. Hydrology Days. Disponible En: [http://hydrologydays.colostate.edu/Papers\\_2007](http://hydrologydays.colostate.edu/Papers_2007). Fecha de Consulta: 22-09-2014

Ávila, A. 2012. Simulación Hidrológica Utilizando HEC-HMS Como Herramienta Para Estimar Caudales Máximos En La Cuenca Hidrográfica Del Río Cali. Universidad del Valle. Cali.

Badano, D. 2010. Modelación Hidrológica Integrada de Grandes Cuencas de Llanura con Énfasis en la Evaluación de Inundaciones. Universidad de Buenos Aires.

Bergström, S., Forsman, A. 1973. Development Of A Conceptual Deterministic Rainfall-Runoff Model. Nordic Hydrol.

Bergström, S. 1976. Development And Application Of A Conceptual Runoff Model For Scandinavian Catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrköping.

Campos, Aranda. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. D.F México: Universidad Autónoma de San Luis de Potosi, 1998.

Carr, D., Hunderhill, H. 1974. Los Métodos de Simulación en el Aprovechamiento de los Recursos Hídricos. Roma.

Carvajal, Y., Castro, M. 2008. Análisis de Tendencia y Homogeneidad de Series Climatológicas. Universidad del Valle. Cali.

Carvajal, Y. 2011. Inundaciones en Colombia. ¿Estamos preparados para enfrentar la variabilidad y el cambio climático?. Cali.

Castro, L., Carvajal, Y. 2010. Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. Revista EIDENAR: Ejemplar 9. Cali. Disponible En: <http://eidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/9/c.htm>. Fecha de Consulta: 14-07-2014

Castro, H., Hoyos, C. 2004. Análisis de frecuencia de crecientes con diferentes distribuciones de probabilidad. Tesis de pregrado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Colombia.

Chapra, S. 1997. Surface Water-Quality Modeling. Mc Graw Hill. Nueva York.

Chow, V., Maidment, D., Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill. Colombia.

Cifuentes, A. 2014. Análisis de la incidencia de las fuentes de contaminación difusa relacionadas con el uso y las prácticas de manejo del suelo en la producción de sedimentos en la cuenca del río palo. Universidad del Valle. Colombia

Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC. «Estudio Demanda-Oferta Hídrica del río Palo.» Popayan, 2001.

- Corporación Autónoma Regional del Cauca. «Plan Básico de Ordenamiento Territorial.» Puerto Tejada, 2005.
- Corporación Autónoma Regional del Cauca. «Plan Básico de Ordenamiento Territorial.» Caloto, 2005.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. 2005a. Modelamiento Hidrológico. Proyecto Twinlatin. Cali. A
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. 2005b. Zonificación Forestal y Caracterización de los Bosques Naturales en las Cuencas de los Ríos Desbaratado, Bolo- Fraile, Amaime, Cerrito, Guadalajara, San Pedro en el Departamento del Valle del Cauca. Cali. B
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. 2007. Caudales Específicos para las Cuencas en el Departamento del Valle del Cauca. Cali
- Corzo, A. 2009. Hybrid Models for Hydrological Forecasting: Integration of Data-Driven and Conceptual Modelling Techniques . Delft: UNESCO-IHE.
- Crawford, N., Linsley, R. 1966. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University.
- Cuadrat, J., Pita, M. 1997. Climatología. Madrid: Cátedra Cátedra S.A.
- Domínguez, E., Rivera, H., Vanegas, R., Moreno, P. 2008. Relaciones Demanda-Oferta de Agua y el Índice de Escasez de Agua como Herramientas de Evaluación del Recurso Hídrico Colombiano.
- Falkenmark, M. 1999. Forward to the future: a conceptual framework.
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F., Ardila, E. 2012. Variabilidad Climática, Cambio Climático y el Recurso Hídrico en Colombia. Bogotá.
- Gardner, T., Egelman, R. 1997. Sustaining Water: Population and the Future of Renewable Water Supplies. Population Action International. New York.
- Global Water Partnership. 2002. Principios de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.
- Guevara. 2003. Métodos de Estimación y Ajuste de Datos Climáticos. Mérida: Universidad Central de Venezuela. Venezuela.
- Hydrologic Engineering Center HEC. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers. Estados Unidos.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. 2010. Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Colombia.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 2007. Contribución de los Grupos I, II y III al Cuarto Informe Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra.
- IREHISA. 2013. Proyecto “Construcción del Modelo Conceptual para la Restauración del Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Sistema Río Cauca en su Valle Alto”. Convenio 001 de 2013, entre ASOCARS y la Universidad del Valle.

IREHISA. 2014. Guía Básica Para La Estimación Del Parámetro Número De Curva (Cn) En Cuencas Del Valle Geográfico Del Alto Cauca. Universidad del Valle. Cali.

Kabat, P., Van Schaik, H. 2003. Climate Changes the Water Rules: how water managers can cope with today's climate variability and tomorrow's climate change. Delft.

Kundzewicz, Z. 2007. Freshwater, Resources and their Management. Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Reporte IPCC. Cambridge University Press. Cambridge.

Larson, C., Onstad, C., Richarson, H., Brooks, K. 1982. Some particular watershed models. In Hydrologic Modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural. . Estados Unidos.

Linsley, R. 1981. Rainfall-runoff models – an overview. In proceedings of the International Symposium of Rainfall-Runoff Modeling. Water Resources Publications. . Estados Unidos.

Maderey, L. 2005. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrogeológico. Universidad Nacional de México . México.

Marano, P. 2012. Cátedra Diagnóstico y Tecnología de Aguas. Universidad Nacional del Litoral. Argentina.

Mesa, O. 2008. ¿ A dónde va a caer este Globo? Acerca del futuro de la Tierra. Universidad Nacional de Colombia. Medellin.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. 2013.

<http://www.ospo.noaa.gov/Products/ocean/sst/contour/index.html> (último acceso: 12 de Enero de 2013).

ONU. «Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.» 1992.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación UNESCO. 2006. Guía Metodológica para la Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas Secas de América Latina y El Caribe.

Ortiz, E. 2005. Memoria-Informe sobre Modelo de Previsión Hidrológica Empleado en otras Organizaciones.

Palma, B., Conde, C. Morales, R., Colorado, G. 2007. Escenarios climáticos.» Programa de Estudios sobre cambio climático de la Universidad Veracruzana. Veracruz.

Poveda, G., Alvarez, D., Rueda, O. 2010. Hydroclimatic Variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. Clim Dyn.

Poveda, G., Salazar, L. 2004. Annual and Interannual (ENSO) Variability of Spatial Scaling Properties of Vegetation Index in Amazonia. Sensing of Environment.

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo PNU. 2010. El Cambio Climático en Colombia y en el Sistema de las Naciones Unidas. Proyecto Integración de Riesgos y Oportunidades del Cambio Climático en los Procesos Nacionales de Desarrollo y en la Programación de País de las Naciones Unidas. Colombia.

Reyes, A., Ulises., F., Carvajal, Y. 2010. Guía Básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Universidad del Valle. Cali.

Ruiz, C. 1988. Obtención del tiempo de rezago y del tiempo de concentración para varias cuencas del Valle geográfico del río Cauca. Tesis de Ingeniería Agrícola. Universidad del Valle. Cali.

Sanzana, P. 2008. Análisis de la incertidumbre en la modelación hidrológica mediante el uso de SIG y GSSHA. Universidad de Chile. Chile.

SMHI. «Integrated Hydrological Modelling System.» Manual, Sweden, 2005.

Solano, E., Stolz, W. 2010. El Fenómeno ENOS. Instituto Meteorológico Nacional. Costa Rica.

Stedinger, J., Vogel, R., Foufoula-Georgiu, E. 1993. Frequency analysis of extreme events, in Handbook of Hydrology, D.R. Maidment. McGraw-Hill.

Suarez, J., Soto, B., Díaz, F. 2009. Aplicación del Modelo HMV/IHMS en la Determinación del Aporte de la Zona no Saturada al Caudal de una Cuenca Forestal. Universidad de La Coruña. La Coruña.

US Army Corps of Engineers. 2010. Disponible en: <http://www.usace.army.mil>. Fecha de Consulta: 01/05/2014.

World Meteorological Organization WMO. 1999. World Meteorological Organization. Disponible en: [http://www.wmo.int/pages/index\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/index_es.html). Fecha de consulta: 10/04/2013.

## 9.0 ANEXOS

### ANEXO 1. Disponibilidad de datos para selección del periodo a modelar.

AÑO	ESTACIONES									
	Palo Bocatom:El Trapiche	Jambalo	Tacueyo	Villa Rica	Corinto	Cajones	Florida	Silvia	Univalle	Palo Pto. Tejada
1981										
1982										
1983										
1984										
1985										
1986										
1987										
1988										
1989										
1990										
1991										
1992										
1993										
1994										
1995										
1996										
1997										
1998										
1999										
2000										
2001										
2002										
2003										
2004										
2005										
2006										
2007										
2008										
2009										
2010										
2011										

\* Color Blanco representa ausencia de registros

Fuente: Elaboración Propia



## ANEXO 2. Análisis de datos faltantes mediante la opción “MISSING DATA”.

### Parte A Discriminación de datos faltantes

Estación	Datos Faltantes	
	Desde	Hasta
Cajones	1974-03-08:00	1974-03-26:00
Cajones	1974-05-18:00	1974-06-15:00
Cajones	1974-08-13:00	1974-08-22:00
Cajones	1975-02-23:00	1975-03-08:00
Cajones	1975-05-03:00	1975-05-07:00
Cajones	1975-07-01:00	1975-07-03:00
Cajones	1975-07-10:00	1975-07-11:00
Cajones	1975-08-01:00	1975-08-04:00
Cajones	1977-06-14:00	1977-06-20:00
Cajones	1977-07-14:00	1977-07-31:00
Cajones	1979-09-16:00	1979-09-18:00
Cajones	1979-10-30:00	1979-10-31:00
Cajones	1979-11-01:00	1980-05-01:00
Cajones	1983-01-27:00	1983-02-01:00
Cajones	1983-04-01:00	1983-05-01:00
Cajones	1985-01-31:00	1985-02-01:00
Cajones	1985-05-20:00	1985-05-22:00
Cajones	1993-11-30:00	1993-12-01:00
Cajones	1996-03-01:00	1998-01-01:00
Cajones	1998-12-01:00	1999-03-01:00
Cajones	2000-01-31:00	2000-02-01:00
Cajones	2000-05-25:00	2000-06-01:00
Cajones	2011-05-01:00	2012-03-31:00

Fuente: Elaboración Propia

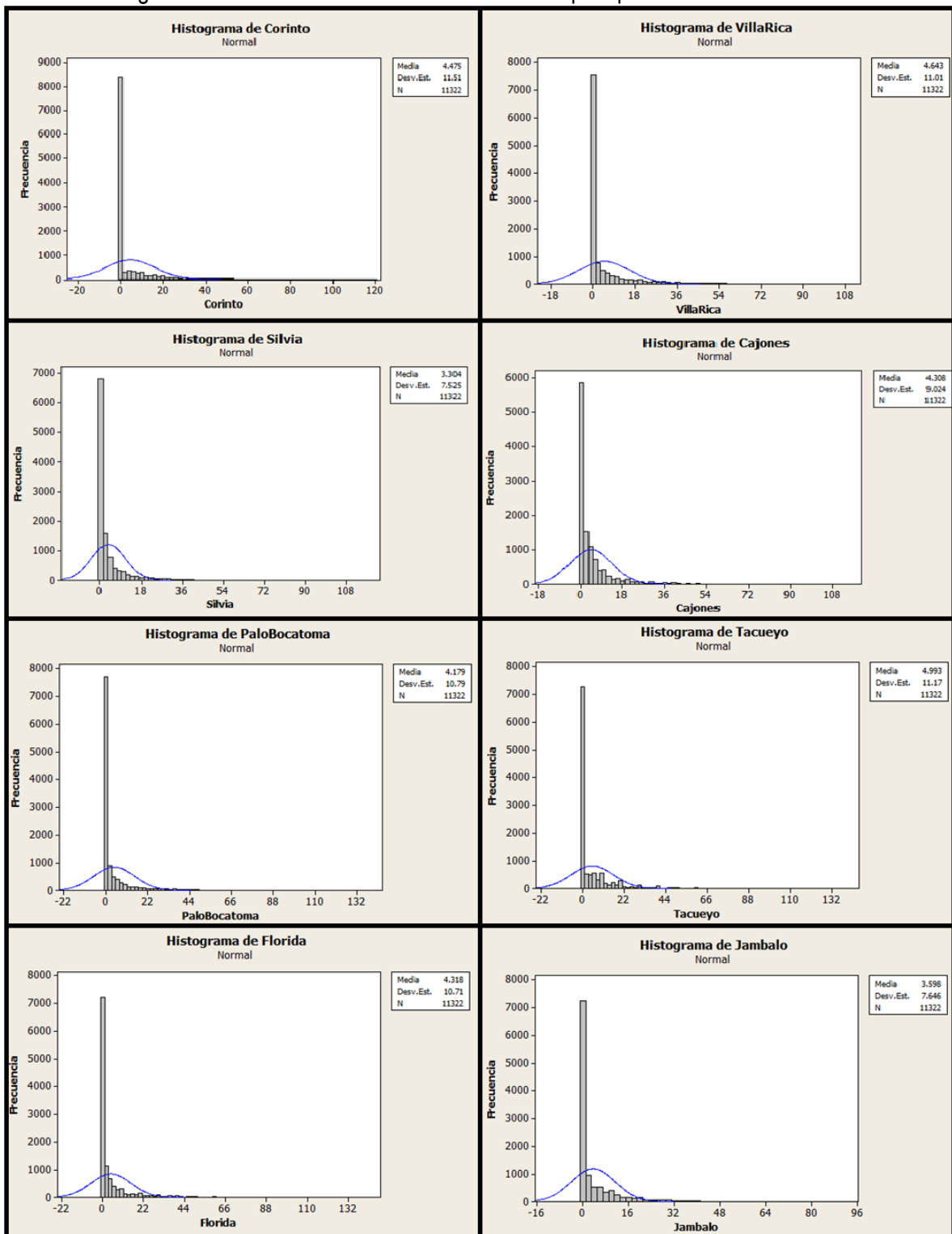
### Parte B. Estación de reemplazo a datos faltantes de la estación Cajones

Estación	Datos faltantes	
	Desde	Hasta
La Selva	2010-12-31:00	2011-01-01:00
La Selva	2011-01-31:00	2011-02-01:00
La Selva	2012-02-01:00	2012-03-31:00

Fuente: Elaboración Propia

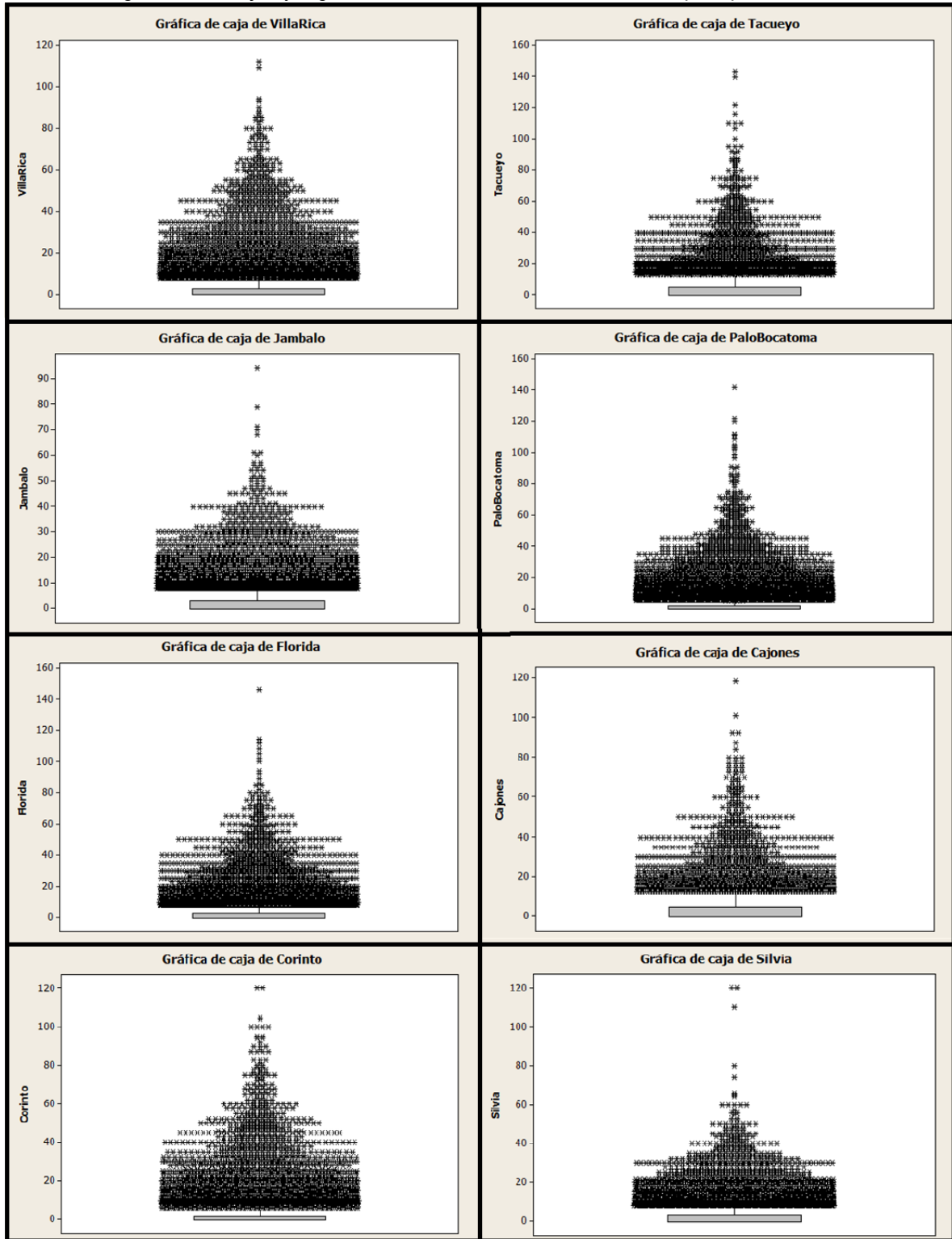
### ANEXO 3

#### Parte A. Histogramas de frecuencia de las series diarias de precipitación.



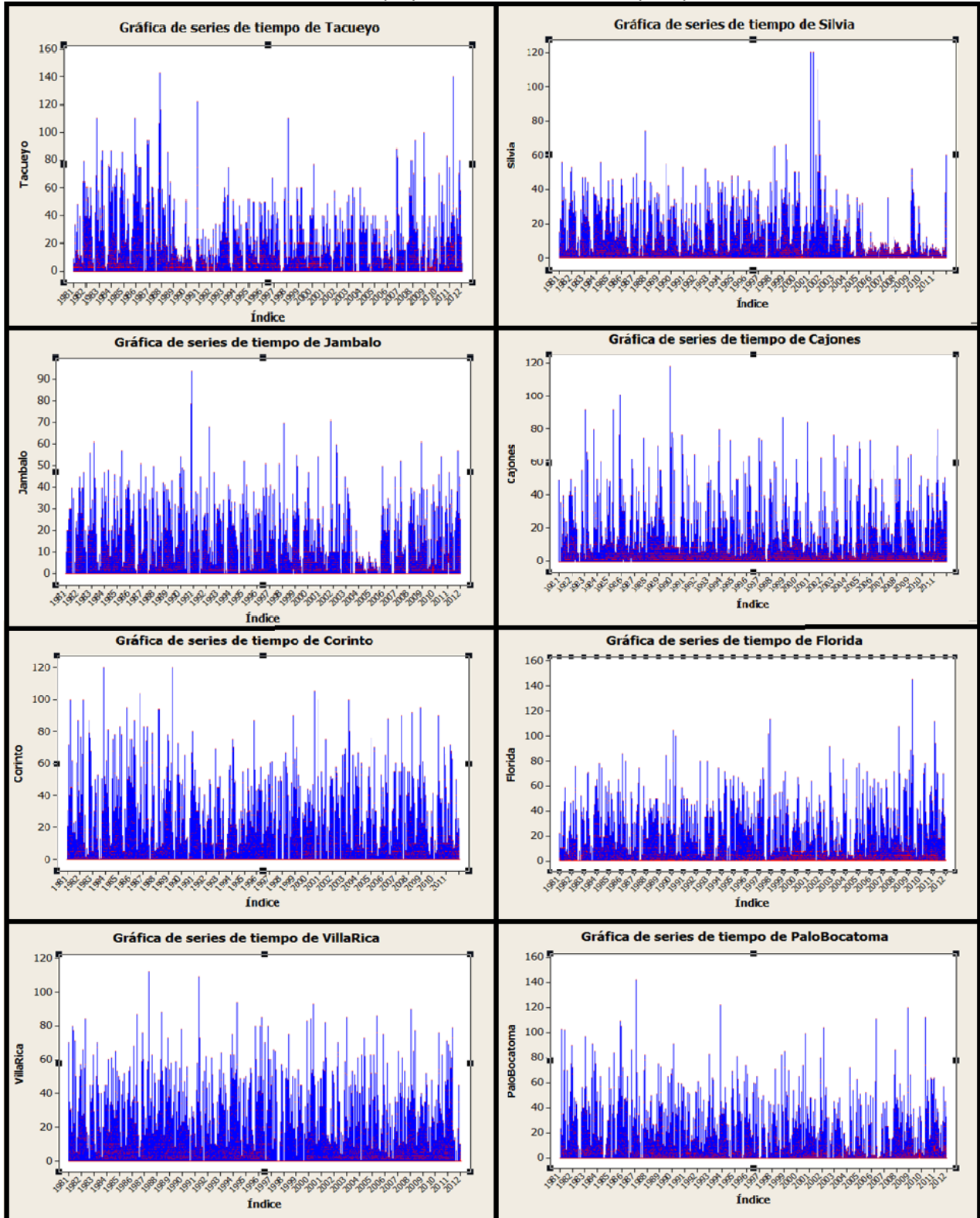
Fuente: Minitab15, 2006

Parte B. Diagramas de cajas y bigotes de las series de datos diarios de precipitación.



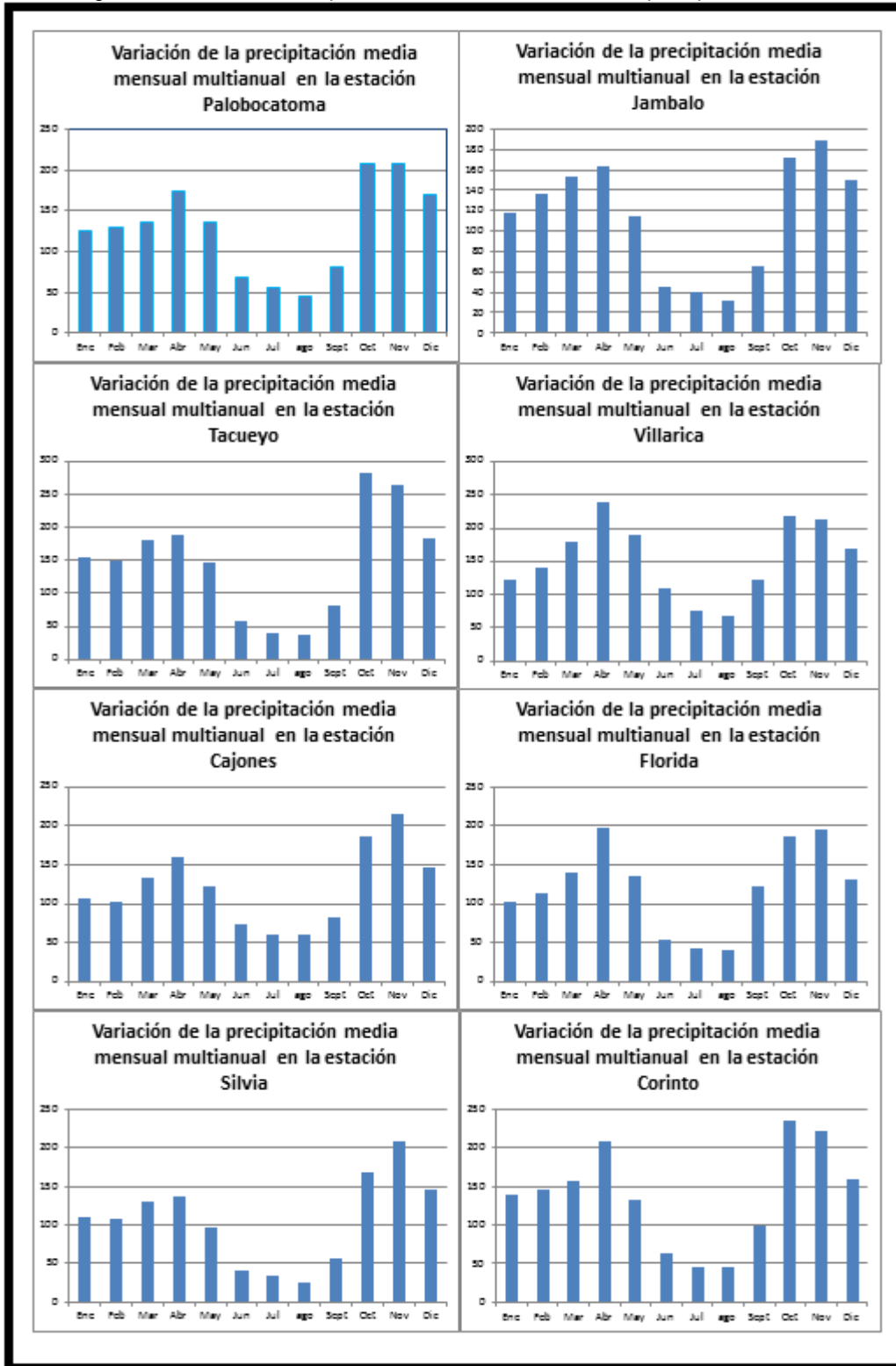
Fuente: Minitab15, 2006

Parte C. Graficas de series de tiempo para los datos diarios de precipitación.



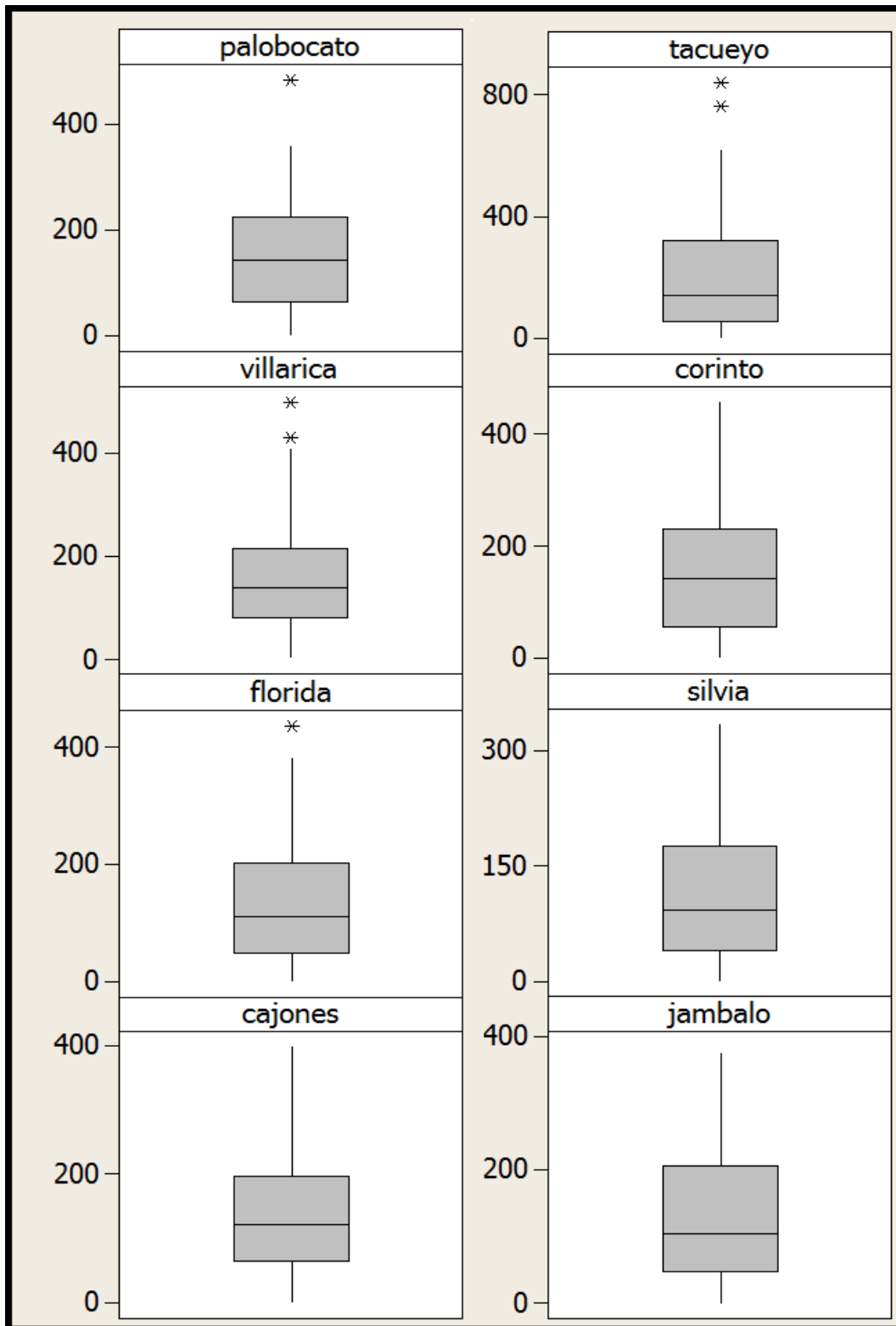
Fuente: Minitab15, 2006

**Parte D.** Diagrama de serie de tiempo de las series mensuales de precipitación.



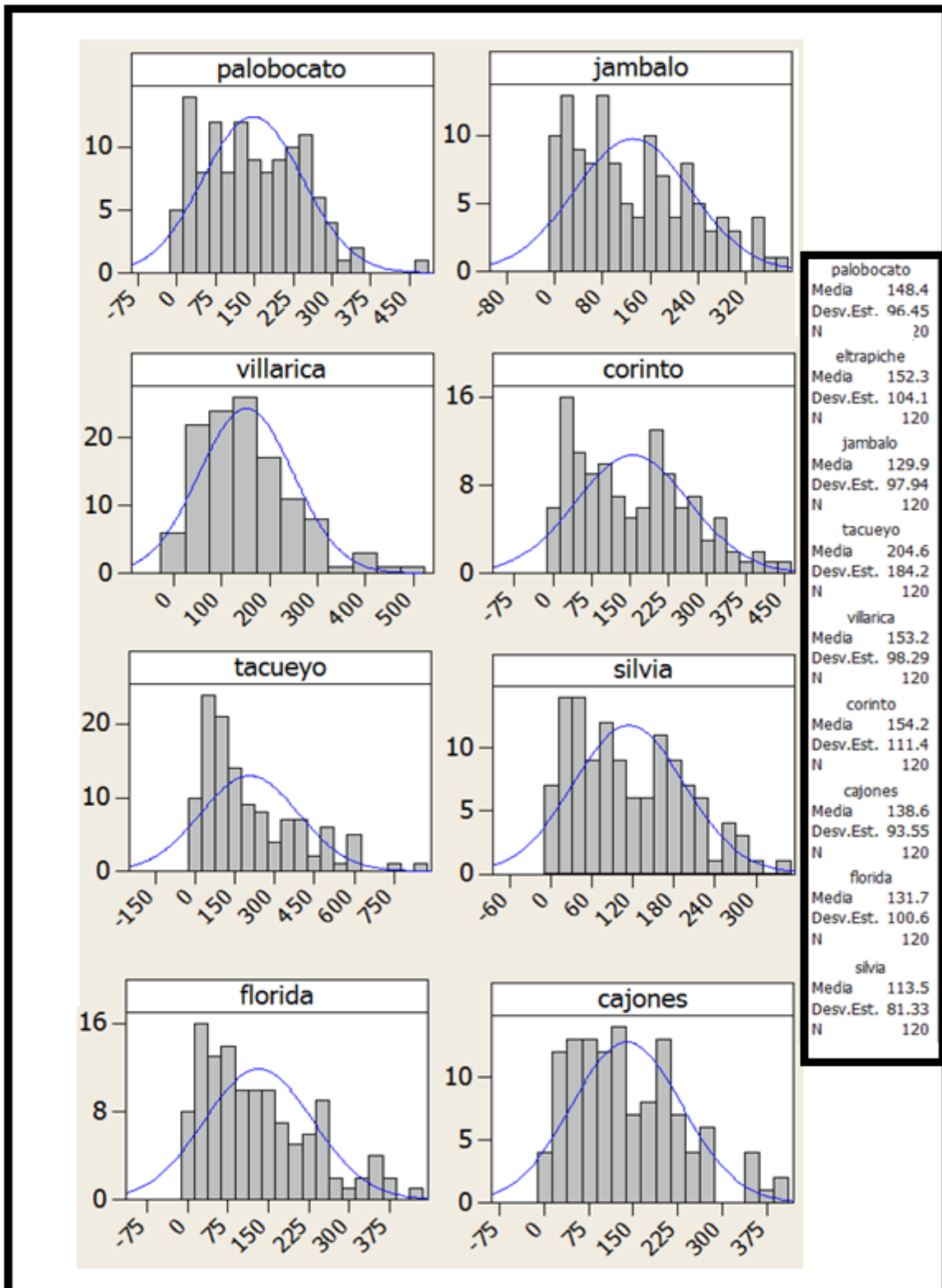
Fuente: Minitab15, 2006

Parte E. Diagramas de cajas de las series mensuales de precipitación.



Fuente: Minitab15, 2006

Parte F.. Histogramas de las series mensuales de precipitación.

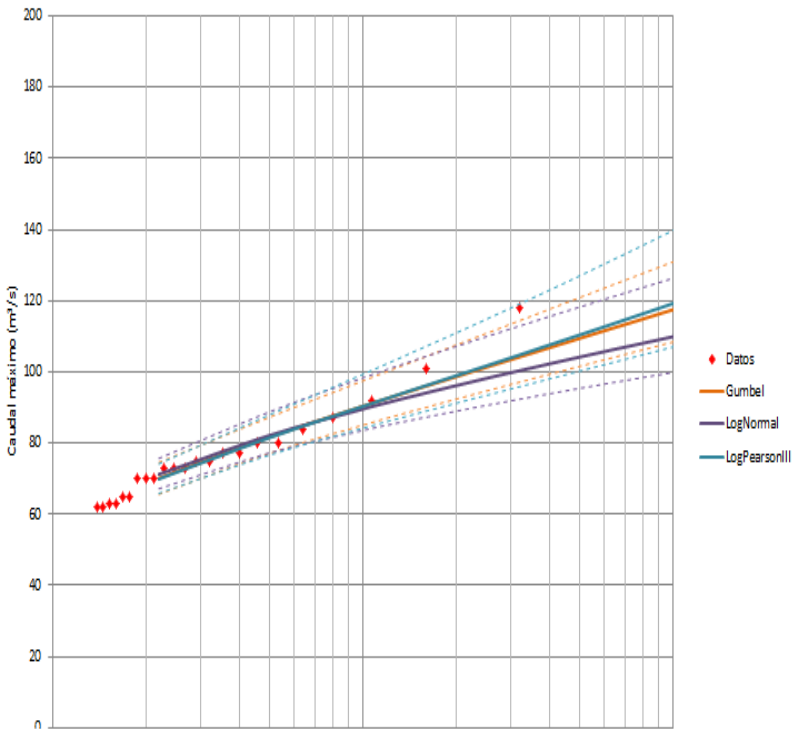


Fuente: Minitab15, 2006

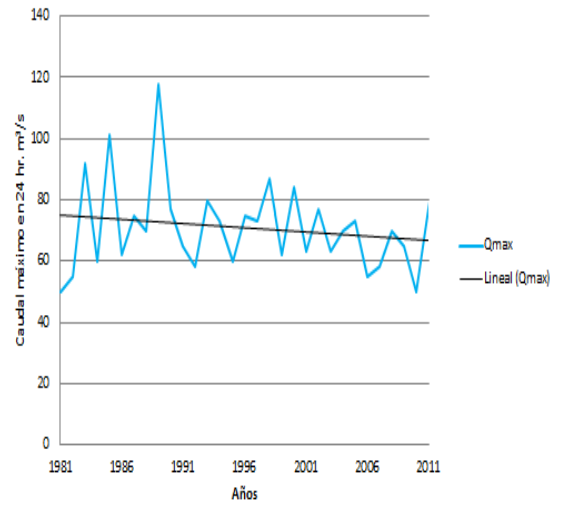
## ANEXO 4

- Análisis de Frecuencia estación Cajones

Caudal máximo 24 hr. vs. Periodo de Retorno

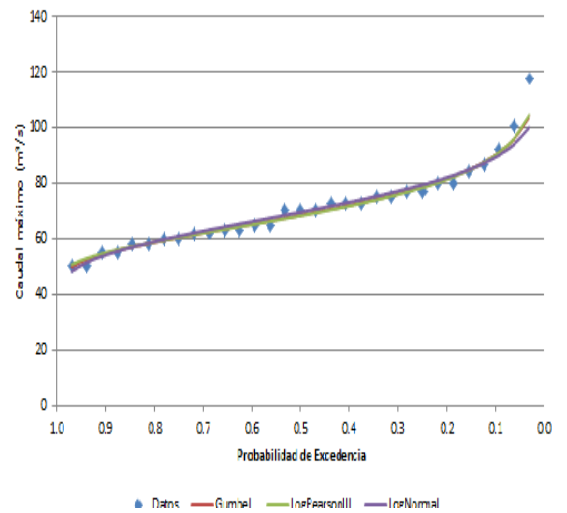


Caudal máximo anual  
estación Cajones



Estación Cajones				
Prueba de Ajuste		Gumbel	LogNormal	LogPerson III
CCG		0,986	0,975	0,988
EEA		2,978	3,783	2,895
Tr	5	87	89	88
	10	97	98	99
	20	108	107	111
	30	113	112	118
	50	121	118	127
	100	131	126	140

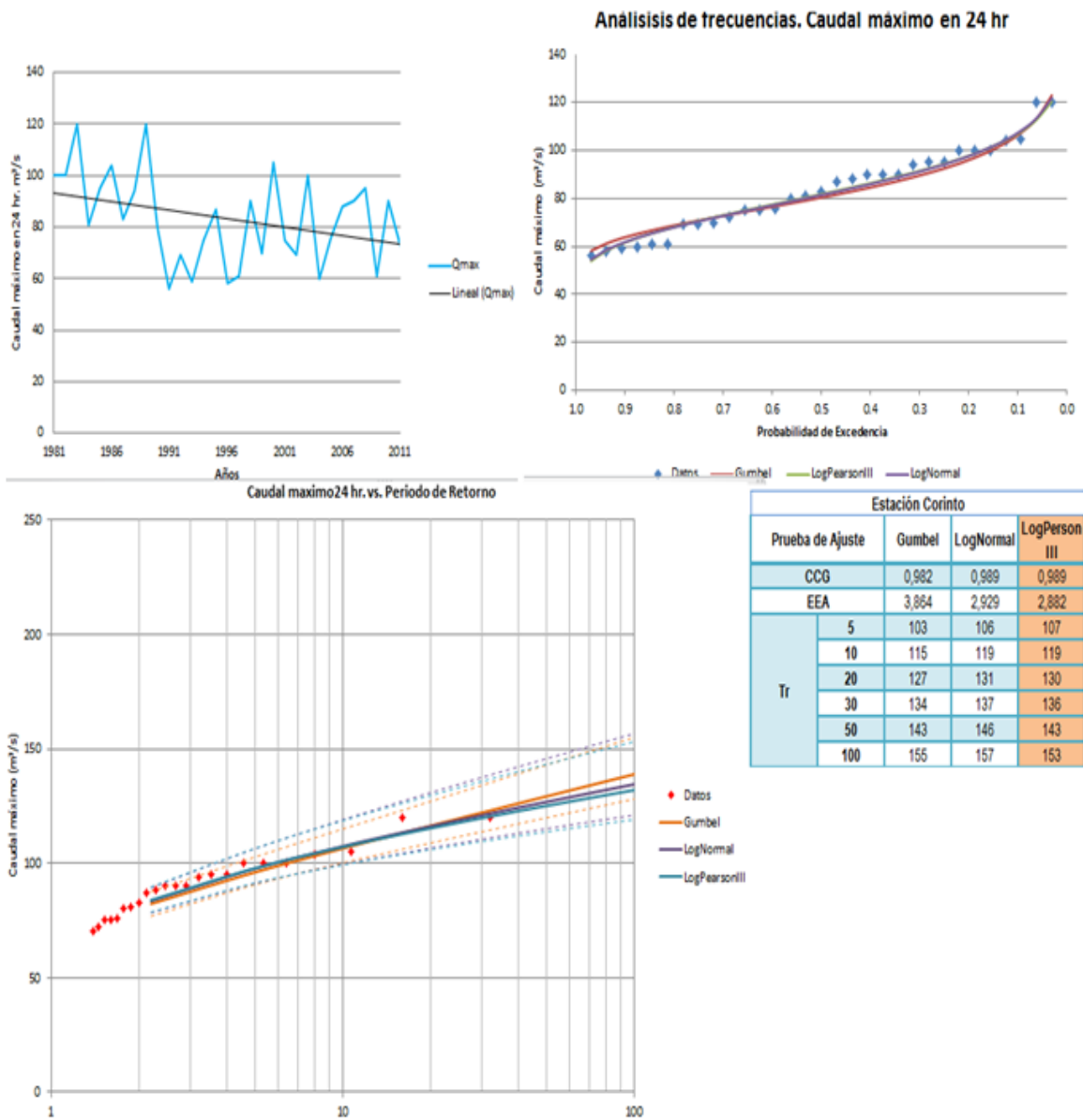
Análisis de frecuencias. Caudal máximo en 24 hr



Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)



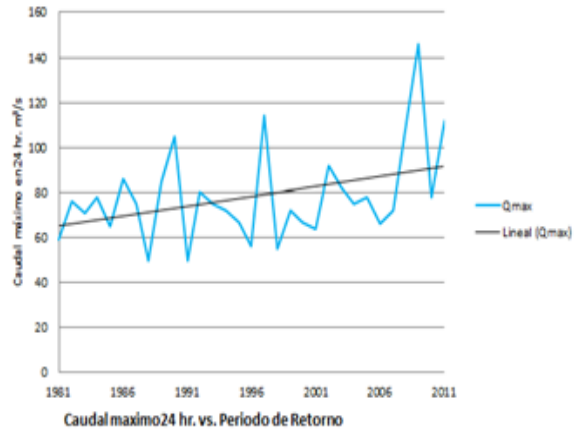
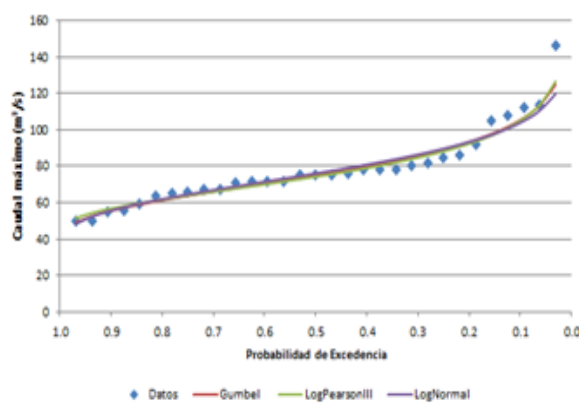
- Análisis de Frecuencia estación Corinto



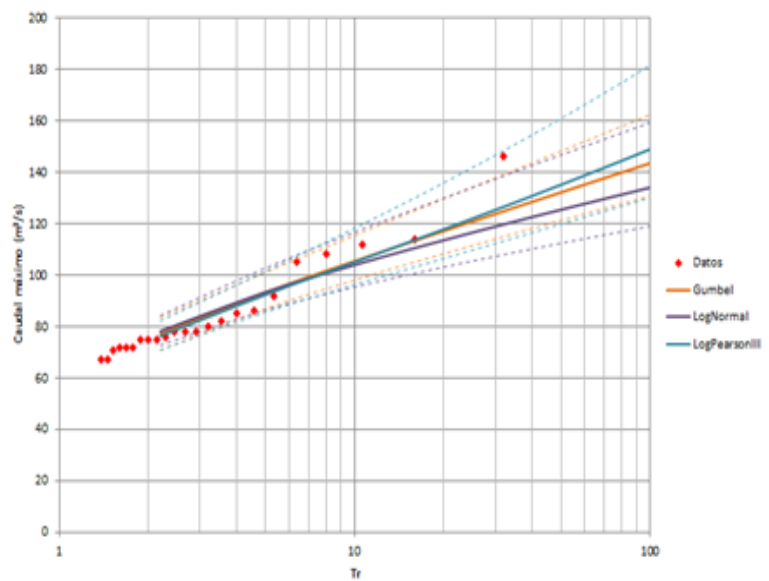
Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)

- Análisis de Frecuencia estación Florida

**Análisis de frecuencias. Caudal máximo en 24 hr**

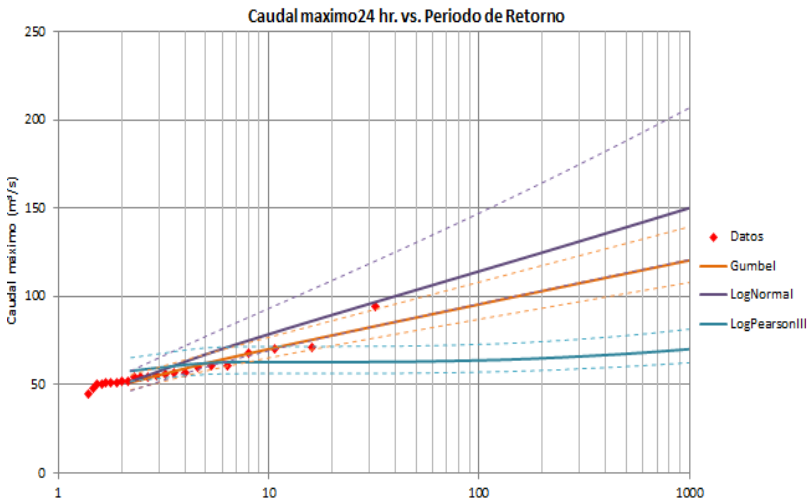
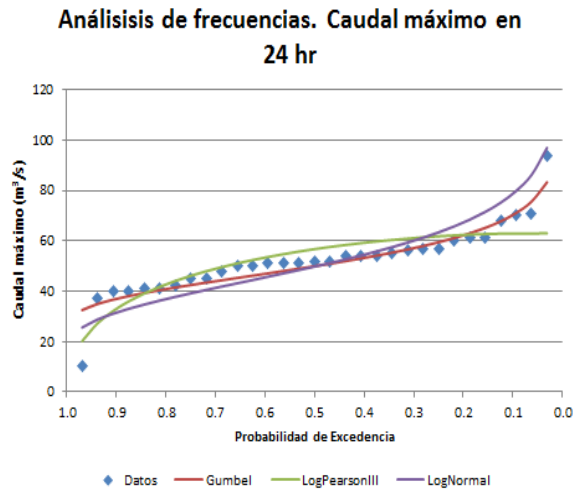
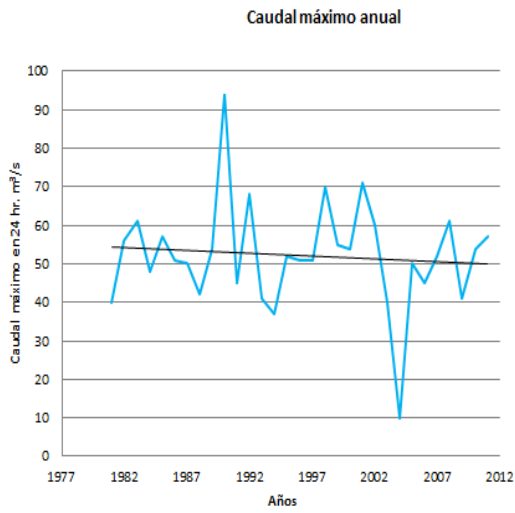


Estación Florida				
Prueba de Ajuste	Gumbel	LogNormal	LogPerson III	
CCG	0,974	0,964	0,980	
EEA	5,169	6,164	4,882	
Tr	5	101	103	102
	10	115	117	118
	20	130	130	136
	30	138	137	147
	100	148	147	161



Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)

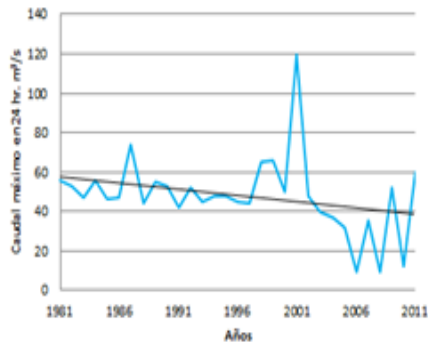
- Análisis de Frecuencia estación Jambalo



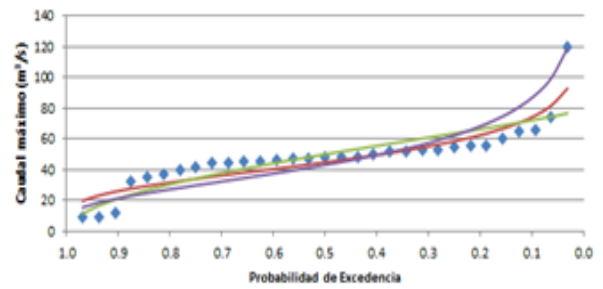
Estación Jambalo			
Prueba de Ajuste	Gumbel	LogNormal	LogPerson III
CCG	0,930	0,928	0,841
EEA	5,241	6,962	7,627
Tr	5	67	77
	10	77	93
	20	86	109
	30	92	119
	50	99	131
	100	108	147

Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)

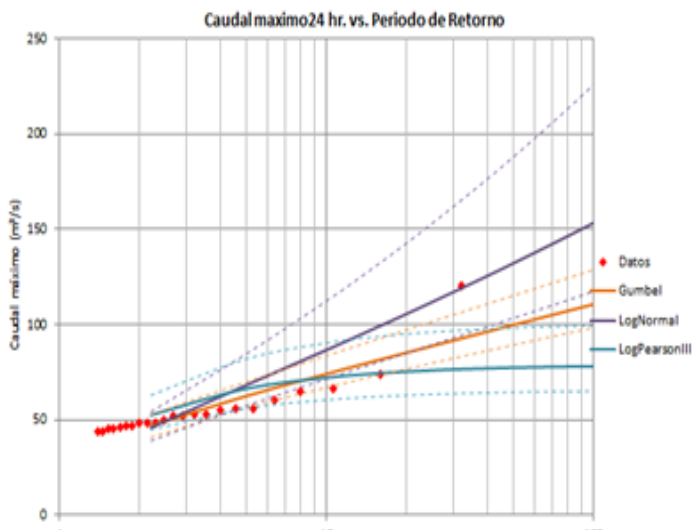
- Análisis de Frecuencia estación Silvia



Análisis de frecuencias. Caudal máximo en 24 hr



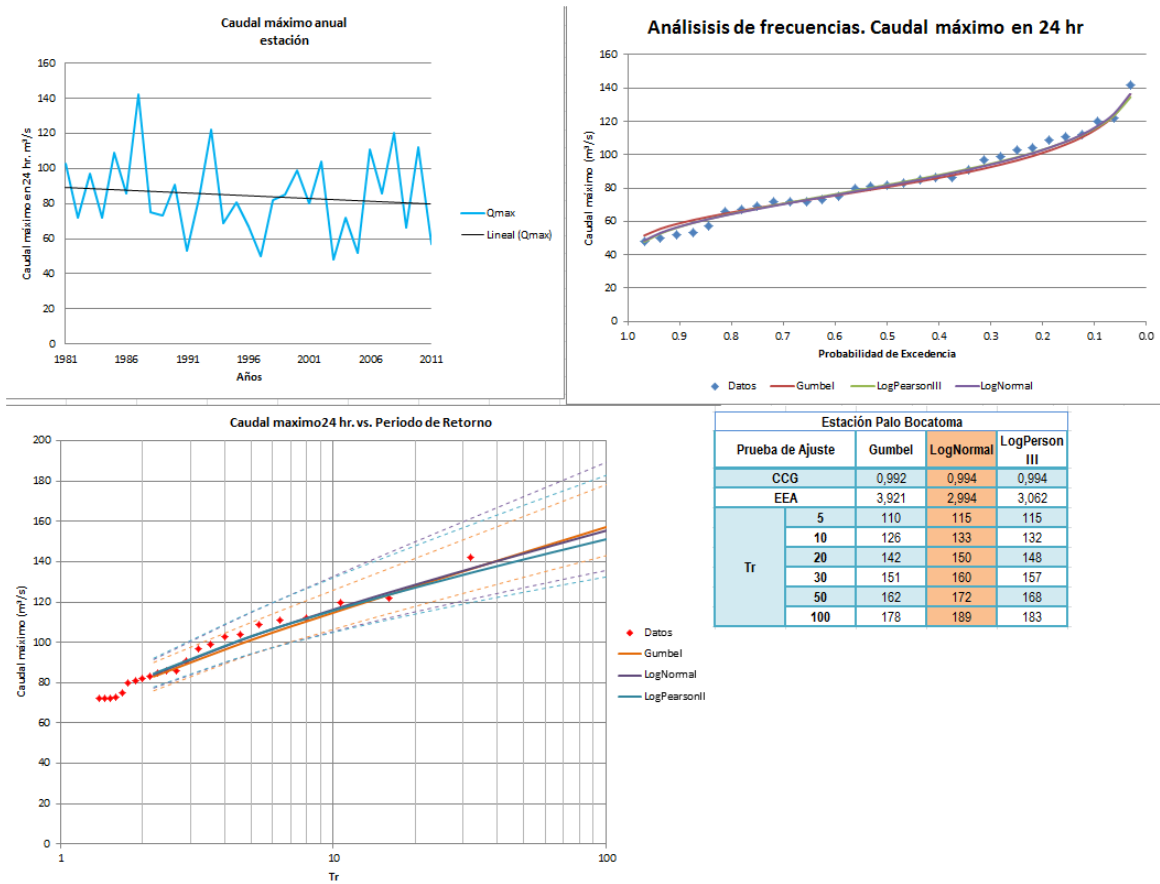
◆ Datos — Gumbel — LogPearsonIII — LogNormal



Prueba de Ajuste	Gumbel	LogNormal	LogPerson III	
CCG	0,910	0,907	0,859	
EEA	8,431	10,920	10,429	
Tr	5	70	85	82
	10	84	112	90
	20	97	143	95
	30	105	162	97
	50	115	188	98
100	129	226	99	

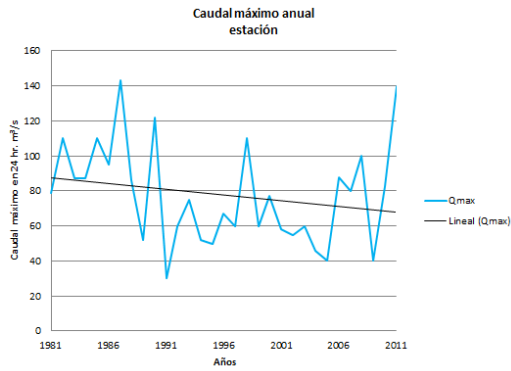
Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)

- Análisis de Frecuencia estación Palo Bocatoma

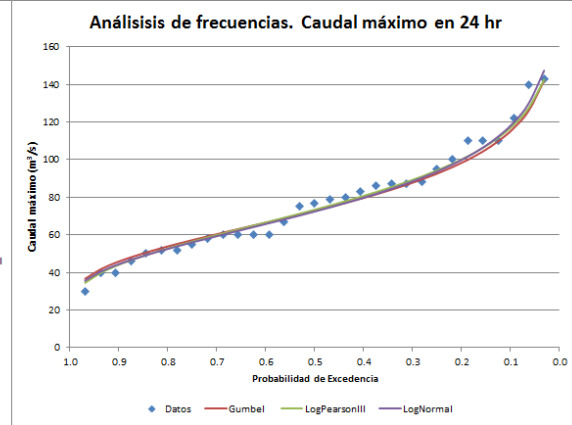
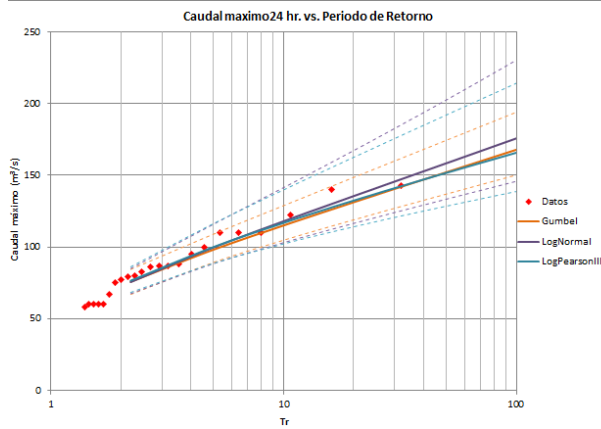


Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)

- Análisis de Frecuencia estación Palo Tacueyo

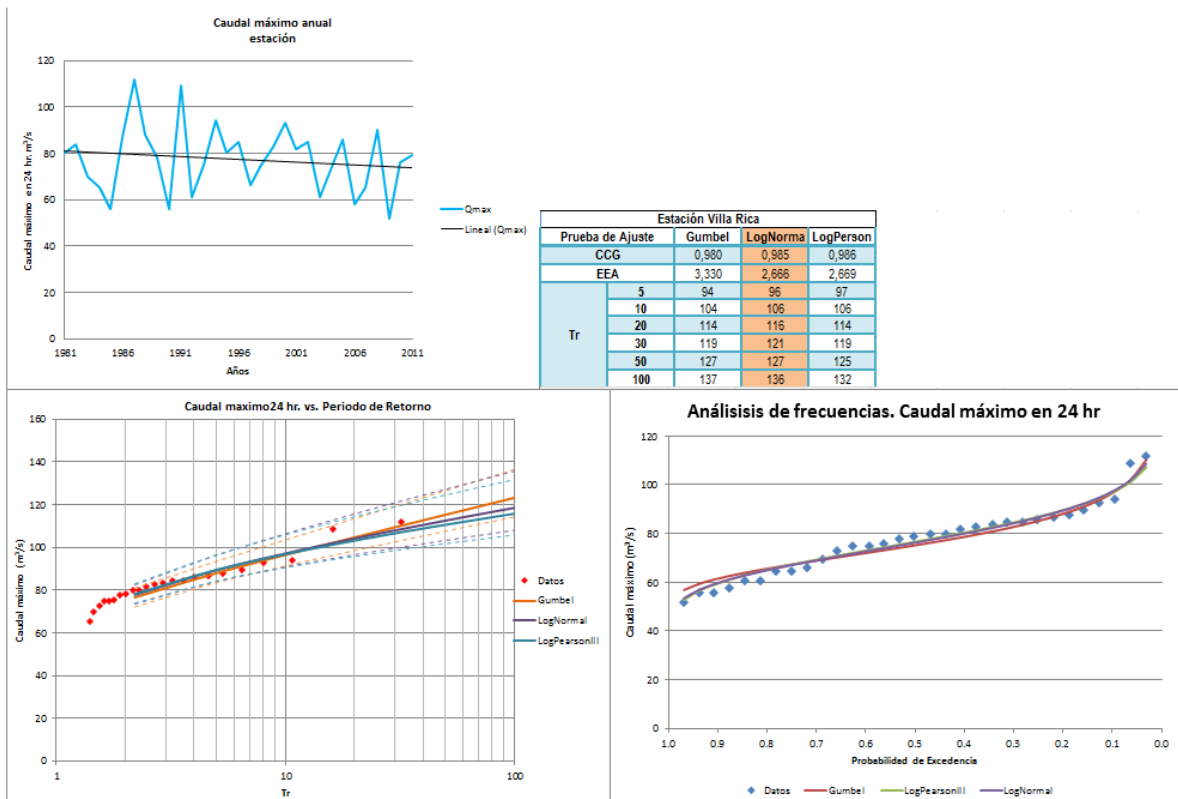


Estación Tacueyo			
Prueba de Ajuste	Gumbel	LogNormal	LogPerson
CCG	0,993	0,992	0,994
EEA	4,811	3,957	3,987
Tr	5	109	116
	10	129	141
	20	149	167
	30	160	183
	50	174	203
100	194	230	214



Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)

- Análisis de Frecuencia estación Villa Rica



Fuente: Plantilla grupo IREHISA (2014)