

**ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DEL
PARQUE NACIONAL NATURAL FARALLONES DE CALI
EN LA VERTIENTE ORIENTAL - CALI**

ELIANA CLARITZA CASTRO ARAGON

Ingeniera Sanitaria Esp.

Tesis de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

Director:

HENRY JIMENEZ ESCOBAR

Ingeniero Agrícola, 3^{er}C Hidrología, MSc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI
2022

Agradecimientos

A Dios, por concederme la fortaleza para emprender y culminar exitosamente este proyecto.

A la memoria del Ing. Julián Mauricio Alzate Cataño quien, para hacer posible el desarrollo de esta tesis, contribuyó con el producto de su trabajo en PNNFC.

Al IDEAM por el patrocinio para la realización de esta maestría.

A mi director de tesis, Profesor Henry Jiménez Escobar, por su continuo acompañamiento, su dedicación y su orientación.

Al Ing. Andrés Fabián Barrios, por compartir su experticia en el tema.

Al personal de Parques Nacionales Naturales Farallones de Cali y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por su apoyo continuo en los requerimientos de información.

A los compañeros del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, de la Oficina Central y del Área Operativa No.09, que aportaron su conocimiento y compartieron información durante la ejecución de esta tesis.

A mis compañeros de la maestría por haber compartido conmigo este proceso académico, especialmente a Diego Fernando Rivera Crespo por acompañarme en el camino de mi formación profesional.

A mis padres, hermanas y demás familiares, por entender que debía dedicar mucho tiempo al desarrollo de este documento.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	9
Introducción	11
1. Marco contextual.....	12
1.1 Generalidades.....	12
1.2. Descripción de la zona en estudio.....	15
2. Planteamiento del problema.....	18
3. Marco teórico	19
3.1 Cambio climático.....	21
3.2 Variabilidad climática	22
3.2.1 Métodos de estimación de la evapotranspiración potencial	23
3.2.1.1 Método de Thornthwaite (TW).....	23
3.2.1.2 Método de García López.....	24
3.2.2 Fenómenos del Ciclo – ENOS.....	24
3.2.2.1 Fenómeno de El Niño.....	24
3.2.2.2 Fenómeno de La Niña.....	25
3.2.3 Variables macroclimáticas.....	25
3.2.3.1 Índice de Oscilación del Sur- (Southern Oscillation Index – SOI)	26
3.2.3.2 Índices a partir de la temperatura en la superficie del mar – TSM	26
3.2.3.3. Categorización de la precipitación.....	26
3.2.4 Modelo hidrológico HEC – HMS.....	27
3.2.4.1 Esquema de la cuenca.....	28
3.2.4.2 Modelado de los componentes del proceso (datos de entrada).....	28
3.2.4.3 Análisis de los procesos meteorológicos	28
3.2.4.4 Determinación del volumen total disponible para escorrentía.....	29
4. Objetivos	29
4.1 Objetivo general.....	29
4.2 Objetivos específicos	29
5. Metodología	30
5.1 Recolección de información	30
5.1.1 Variables hidroclimatológicas.....	30
5.2 Visita de inspección al PNNFC.....	33

5.3 Análisis exploratorio de datos	34
5.3.1 Análisis gráfico	35
5.3.2 Análisis cuantitativo	35
5.4 Relación e influencia del ENSO en la hidroclimatológica de la zona en estudio	36
5.4.1 Auto correlación de las variables climáticas y macroclimáticas asociadas al ENSO	36
5.5 Modelación hidrológica para la estimación de la oferta hídrica en la zona de estudio	37
5.5.1 Datos de entrada del modelo HEC - HMS	37
5.5.2 Selección de la red hidroclimatológica	37
5.5.3 Estructuración de la base de datos de entrada al modelo hidrológico	38
5.5.3.1 Cálculo de los parámetros hidrológicos iniciales	38
5.5.3.2 Modelo de pérdidas de agua SMA	38
5.5.4 Correlación entre variables macroclimáticas asociadas al Fenómeno El Niño y variables hidrometeorológicas en la zona de estudio	40
5.5.4.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)	41
6. Resultados y discusión	42
6.1 Análisis exploratorio de datos	42
6.2 Distribución temporal de la precipitación	43
6.2.1 Curvas isoyetas.....	47
6.2.2 Polígonos de Thiessen.....	51
6.3 Comportamiento de la precipitación en eventos ENOS	55
6.3.1 Fenómeno de El Niño.....	56
6.3.1.1 Cuenca hidrográfica río Pance	56
6.3.1.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez.....	57
6.3.1.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé.....	58
6.3.1.4 Cuenca hidrográfica río Felidia.....	59
6.3.2 Fenómeno de La Niña.....	59
6.3.2.1 Cuenca hidrográfica río Pance	59
6.3.2.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez.....	60
6.3.2.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé.....	61
6.3.2.4 Cuenca hidrográfica río Felidia.....	61
6.4 Análisis de la temperatura.....	62
6.5 Análisis de la humedad relativa.....	65
6.6 Análisis del brillo solar	65
6.7 Análisis de la evapotranspiración	66

6.7.1 Cálculo de la evapotranspiración	66
6.8 Análisis de auto correlación de variables climáticas y macroclimáticas	67
6.8.1 Precipitación diaria.....	67
6.8.2 Correlación entre las variables climáticas de la zona de estudio y las variables macroclimáticas asociadas al ENSO.....	69
6.8.2.1 Precipitación diaria	69
6.8.2.1.1 Correlaciones con la TSM	70
6.8.2.1.2 Correlaciones con el SOI.....	71
6.8.2.2 Temperatura media diaria	72
6.8.2.2.1 Correlaciones con la TSM	72
6.8.2.2.2 Correlaciones con el SOI.....	73
6.9 Estimación de la oferta hídrica superficial	73
6.10 Resultados de la implementación del modelo HEC-HMS	81
6.10.1 Cuenca hidrográfica río Pance	81
6.10.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez.....	84
6.10.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé.....	87
6.10.4 Cuenca hidrográfica río Felidia.....	90
6.11 Comportamiento del caudal en eventos ENOS	92
6.11.1 Fenómeno de El Niño.....	93
6.11.1.1 Cuenca hidrográfica río Pance	93
6.11.1.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez.....	94
6.11.1.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé.....	95
6.11.2 Fenómeno de La Niña.....	96
6.11.2.1 Cuenca hidrográfica río Pance	96
6.11.2.2 Cuenca hidrográfica río Pichindé.....	97
6.12 Instrumentación del PNNFC.....	98
7. Conclusiones	99
8. Recomendaciones	100
9. Bibliografía.....	102
10. Anexos.....	106
Anexo 1. Fotografías visita de inspección a la zona en estudio.....	106
Anexo 2. Análisis exploratorio de datos y resultado de las correlaciones	108
Anexo 3. Consolidado de información empleada en la modelación con el HEC-HMS	128

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio	16
Tabla 2. Categorización de la precipitación total	27
Tabla 3. Determinación del área de las cuencas hidrográficas (hasta el punto de cierre PNNFC)	31
Tabla 4. Estaciones de referencia.....	35
Tabla 5. Capacidad máxima de almacenamiento en la vegetación	38
Tabla 6. Almacenamiento de agua en las depresiones del terreno.....	38
Tabla 7. Capacidad efectiva y porcentaje máximo de almacenamiento de agua en el suelo según la textura.....	39
Tabla 8. Máxima Capacidad de Infiltración Superficial.....	40
Tabla 9. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.....	41
Tabla 10. Resumen de promedios mensuales multianuales de precipitación total (mm)	44
Tabla 11. Ponderación porcentual de las estaciones pluviométricas en las cuencas hidrográficas de la zona - Polígonos de Thiessen	53
Tabla 12. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pance - Fenómeno El Niño.....	56
Tabla 13. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Meléndez - Fenómeno El Niño	57
Tabla 14. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pichindé - Fenómeno El Niño ..	58
Tabla 15. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Felidia - Fenómeno El Niño	59
Tabla 16. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pance - Fenómeno La Niña.....	60
Tabla 17. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Meléndez - Fenómeno La Niña	60
Tabla 18. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pichindé - Fenómeno La Niña .	61
Tabla 19. Categorización de la precipitación total mensual (mm) CH río Felidia - Fenómeno La Niña	61
Tabla 20. Resumen de los registros de temperatura (°C) – Estación La Teresita (1982 – 2019)	63
Tabla 21. Resumen de caudales específicos para las cuencas estudiadas en punto de cierre de PNNFC	81
Tabla 22. Categorización del caudal (m ³ /s) CH río Pance - Fenómeno El Niño	93
Tabla 23. Categorización del nivel (m ³ /s) CH río Meléndez - Fenómeno El Niño	94
Tabla 24. Categorización del caudal (m ³ /s) CH río Pichindé - Fenómeno El Niño	95
Tabla 25. Categorización del caudal (m ³ /s) CH río Pance - Fenómeno La Niña.....	96
Tabla 26. Categorización del caudal (m ³ /s) CH río Pichindé - Fenómeno La Niña	97
Tabla 27. Caudales específicos por cuenca hidrográfica (l/s/ Km ²)	98

INDICE DE FIGURAS

Figura No. 1. Periodos Niño, Niña y Normal (NOAA, 2021)	14
Figura No. 2. Localización Parque Nacional Natural Farallones de Cali.....	15
(Fuente PNN, 2017).....	15
Figura No. 3. Regiones del Pacífico tropical utilizadas para el análisis del ENSO y puntos de monitoreo del SOI. (Fuente NOAA).....	26
Figura No. 4. Esquema de las componentes hidrológicas e hidráulicas del modelo HEC –HMS 3.5 para representar una cuenca hidrográfica (Fuente: Adaptado de HEC, 2000)	27
Figura No. 5. Delimitación de cuencas hidrográficas con red de estaciones hidrometeorológicas.....	32
Figura No. 6. Vista desde la parte alta la cuenca del río Pichindé cobertura de bosque altoandino (Foto: Edgar Blanco, 2021).....	33
Figura No. 7. Resultado del análisis exploratorio gráfico – Est. La Teresita.....	42
Figura No. 8. Distribución altitudinal de estaciones.....	43
Figura No. 9. Promedios mensuales multianuales de precipitación total - Estaciones en zona de estudio (1982–2019)	45
Figura No. 10. Distribución temporal de la precipitación media mensual multianual en la zona de estudio (1982–2019)	46
Figura No. 11. Precipitación media mensual multianual de las estaciones por cuenca hidrográfica – Polígonos de Thiessen	47
Figura No. 12. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual (ene-abr) en la zona de estudio (1982–2019).....	48
Figura No. 13. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual (may-ago) en la zona de estudio (1982–2019).....	49
Figura No. 14. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual (sep-dic) en la zona de estudio (1982–2019)	50
Figura No. 15. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual en la zona de estudio (2018–2019)	51
Figura No. 16. Mapa de polígonos de Thiessen en la zona de estudio	52
Figura No. 17. Precipitación total anual 2018–2019.....	54
Figura No. 18. Precipitación total anual 2018-2019 (Orientación N–S)	55
Figura No. 19. Histograma de temperatura media mensual multianual – Est. La Teresita (1982–2019) 62	
Figura No. 20. Isotermas obtenidas con aplicación del modelo geoespacial.....	64
Figura No. 21. Histograma de humedad relativa media mensual multianual - Est. La Teresita (1982– 2019) 65	
Figura No. 22. Valores de brillo solar – Est. La Teresita (1982–2019)	66
Figura No. 23. Evapotranspiración de referencia ETO - Método Thornthwaite.....	66
Figura No. 24. Evapotranspiración de referencia ETO - Método García López.....	67
Figura No. 25. Funciones de autocorrelación de precipitación estaciones seleccionadas.....	68

Figura No. 26. Funciones de autocorrelación para las variables macroclimáticas SOI y TSM en la región NIÑO 3-4	69
Figura No. 27. Correlaciones cruzadas entre la variable TSM en las distintas regiones y la estación La Teresita.....	70
Figura No. 28. Correlaciones entre la temperatura diaria y TSM - Región NIÑO1-2 y NIÑO4..	72
Figura No. 29. Correlaciones entre la temperatura en la estación La Teresita y el SOI	73
Figura No. 30. Puntos de aforo PNNFC (Tomadas por Julián Mauricio Alzate Cataño - QEPD)	74
Figura No. 31. Mapa de estimación del tipo de suelo para la zona de estudio	75
Figura No. 32. Mapa de estimación del uso del suelo para la zona de estudio	76
Figura No. 33. Mapa delimitación de cuencas con cierre en PNNFC y ubicación de estaciones hidrológicas	78
Figura No. 34. Caudales específicos en la cuenca del río Meléndez Est. El Carmelo (2013-2019)	79
Figura No. 35. Caudales específicos en la cuenca del río Pance – Est. Chorrera del Indio (2010-2019)	80
Figura No. 36. Caudales específicos en la cuenca del río Pichindé –	80
Est. Pichindé (1982-2019).....	80
Figura No. 37. Esquematización utilizada en cuenca hidrográfica río Pance	82
Figura No. 38. Caudales diarios simulados cuenca río Pance (2000-2019)	82
Figura No. 39. Comparación caudal transpuesto vs caudal simulado – Cuenca río Pance Estación Chorrera del Indio (2010 - 2019).....	83
Figura No. 40. Eficiencia del modelo por el método de Nash Sutcliffe – Cuenca río Pance	84
Figura No. 41. Esquematización utilizada cuenca hidrográfica río Meléndez	85
Figura No. 42. Caudales diarios simulados cuenca río Meléndez (2000–2019)	85
Figura No. 43. Comparación caudal transpuesto vs caudal simulado – Cuenca río Meléndez Estación El Carmelo (2013–2019).....	86
Figura No. 44. Eficiencia del modelo por el método de Nash Sutcliffe – Cuenca río Meléndez	87
Figura No. 45. Esquematización utilizada cuenca del río Pichindé	88
Figura No. 46. Caudales diarios cuenca río Pichindé periodo 2000 – 2019	88
Figura No. 47. Comparación caudal transpuesto vs caudal simulado – Cuenca río Pichindé Estación Pichindé (1982–2019)	89
Figura No. 48. Eficiencia del modelo por el método de Nash Sutcliffe - Cuenca Río Pichindé	90
Figura No. 49. Esquematización utilizada cuenca Felidia	91
Figura No. 50. Caudales diarios cuenca del río Felidia (Periodo 2000–2019)	91
Figura No. 51. Caudales simulados – Cuenca río Felidia (1980–2019)	92
Figura No. 52. Curva de duración de caudales Est. Chorrera del Indio (2010-2019)	93
Figura No. 53. Curva de duración de caudales Est. El Carmelo (2013-2019)	94
Figura No. 54. Curva de duración de caudales Est. Pichindé (1969-2019)	95
Figura No. 55. Estación hidroclimatológica automática Alto del Buey – IDEAM 2020.	98

Resumen

Colombia es susceptible a los efectos de la variabilidad y al cambio climático originado principalmente por el fenómeno ENOS que en sus fases extremas genera cambio en el balance hídrico y fuertes anomalías hidrometeorológicas representadas en su fase cálida (El Niño) y en su fase fría (La Niña). El Niño en la región del estudio, se manifiesta con una disminución de la precipitación y los caudales de los ríos, aunque durante esta fase también se han presentado eventos extremos de precipitación y La Niña provoca inundaciones y movimientos en masa. Adicional a esta situación, se presenta la indebida e incontrolada ocupación de las franjas de protección ambiental y de expansión poblacional que afectan la cobertura vegetal, por la tala de árboles para acondicionar los terrenos para el desarrollo de actividades agropecuarias, viviendas y por la actividad minera, entre otras razones. Por ende, uno de los mayores efectos del cambio climático es la afectación de los ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y la degradación de los suelos con lo que se puede afectar su respuesta hidrológica.

El Parque Natural Nacional Farallones de Cali - PNNFC representa un entorno de gran importancia para el Sur Occidente Colombiano, por los diferentes servicios ambientales que ofrece en un entorno en donde habitan más de tres millones de personas, el hábitat de numerosas especies de flora y de fauna del trópico andino suramericano, muchas de ellas endémicas de la región y otras por ser identificadas, pues son escasas las investigaciones sobre esta región, siendo también la fuente de incontables ríos de aguas cristalinas que abastecen diferentes ciudades y comunidades, en sus vertientes que fluyen hacia el Océano Pacífico y hacia el Océano Atlántico. Se hace necesario estudiar el comportamiento hidrológico del PNNFC, para soportar las decisiones y programas para su manejo. En particular se estudia el comportamiento de las lluvias y caudales de los ríos, en la zona de influencia del municipio de Cali.

Con base en los registros de precipitación y de caudal y mediante los correspondientes análisis hidrológicos se determinó la oferta hídrica en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali, localizado en el Suroccidente Colombiano, hasta la franja de protección ambiental donde inicia el control de la CVC hacia la ciudad de Cali. Para esto se analizaron las series hidrometeorológicas y con ello la afectación de las variables de precipitación y caudal, durante los periodos de El Niño y de La Niña, en las cuencas hidrográficas de los ríos Pance, Meléndez, Pichindé y Felidia.

Palabras Clave: Cambio climático, Variabilidad climática, Precipitaciones, Fenómeno El Niño/Oscilación del Sur, Oferta Hídrica Cali, Parque Farallones, Producción hídrica, Fábrica de agua, Regulación hídrica, Servicios Ambientales, Efecto bosque.

Abstract

Colombia is susceptible to the effects of climate variability and change caused mainly by the ENSO phenomenon, which in its extreme phases generates changes in the water balance and strong hydrometeorological anomalies represented in its warm phase (El Niño) and cold phase (La Niña). El Niño in the study region is manifested by a decrease in precipitation and river flows, although extreme precipitation events have also occurred during this phase, and La Niña causes flooding and mass movements. In addition to this situation, there is undue and uncontrolled occupation of environmental protection and population expansion strips that affect the vegetation cover, due to the felling of trees to prepare the land for the development of agricultural activities, housing and mining activities, among other reasons. Therefore, one of the greatest effects of climate change is the impact on ecosystems, the loss of biodiversity and soil degradation, which can affect its hydrological response.

The Parque Natural Nacional Farallones de Cali - PNNFC represents an environment of great importance in the South West of Colombia, due to the different environmental services it offers in an environment inhabited by more than three million people. Is the habitat of numerous species of flora and fauna of the South American Andean tropics, many of them endemic to the region in others in to be identified, also research on this region is scarce; it is also the source of countless rivers of crystalline water that supply different cities and communities. It is necessary to study the hydrological behaviour of the PNNFC in order to support management decisions and programmes. In particular, the behaviour of rainfall and river flows in the area of influence of the municipality of Cali is studied.

Based on rainfall and flow records and by means of the corresponding hydrological analyses, the water supply in the Farallones de Cali National Natural Park, located in the southwest of Colombia, was determined up to the environmental protection strip where the CVC's control over the city of Cali begins. For this purpose, the hydro-meteorological series were analyzed and with it the effect of precipitation and flow variables during the El Niño and La Niña periods in the hydrographic basins of the Pance, Meléndez, Pichindé and Felidia rivers.

Keywords: *Climate change, Climate variability, Precipitation, El Niño/Southern Oscillation, Water supply Cali, Farallones Park, Water production, Water factory, Water regulation, Environmental services, Forest effect.*

Introducción

A través de la historia el agua ha sido un recurso de gran valor por ser un elemento fundamental en la vida de los seres vivos. Por esta razón, a nivel mundial para los diversos países, los gobiernos y la sociedad, el agua se consolida como la principal preocupación por la degradación de su calidad y la escasez de la misma para abastecer la población. También, se considera que la calidad de vida y la salud se derivan de la disponibilidad de agua y por consiguiente se considera relevante estimar la oferta hídrica para abastecimiento, encaminada a la política de conservación de los recursos naturales como fuente fundamental de vida y enmarcada en un derecho social adquirido por cada uno de los seres humanos.

Las consecuencias del cambio climático que padece el mundo, producto de las actividades humanas, han provocado variaciones en los ciclos de precipitación, en la disponibilidad de agua con calidad, en el incremento de la temperatura y de la intensidad solar, entre otros efectos, generando un impacto ambiental negativo.

En la disponibilidad del recurso hídrico juega un papel preponderante la cobertura vegetal, por su capacidad de retención y protección del suelo y por las garantías que ofrece para la conservación de ecosistemas marinos y terrestres en diversas altitudes. A escala nacional surge la política para la gestión integrada del recurso hídrico como una necesidad de estimar la oferta hídrica y administrar correctamente la demanda, producto de la variabilidad y el cambio climático. Se considera entonces un desafío la conservación del recurso hídrico dados los notables problemas de deterioro, con evidencias de contaminación y agotamiento de acuíferos.

Por lo expuesto, es útil conocer el porcentaje de reducción o aumento de la precipitación y el caudal que se presenta en una cuenca hidrográfica cuando ocurren las fases extremas de ENOS, lo que permite avanzar en el conocimiento del comportamiento de la oferta hídrica de la cuenca. La fase fría de ENOS (La Niña), en Colombia, se caracteriza por la ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies, las cuales tienen repercusiones sobre el manejo del recurso hídrico y la sociedad. Por su parte, durante la fase cálida (El Niño) ocurren sequías, incendios forestales, racionamientos de energía, etc. Estudios recientes se han centrado en analizar los impactos sobre posibles cambios futuros o proyecciones en las temperaturas, precipitaciones y caudales de los ríos como consecuencia de la variabilidad climática influenciada por el cambio climático, en estos estudios se resalta la importancia de vincular los resultados a la gestión actual del agua, en función de su déficit o exceso (Ávila et al. 2014).

Propendiendo por la disponibilidad del recurso hídrico en general y consciente que la interacción entre el suelo y la atmósfera contribuye en gran medida a la caracterización del sistema climático y en particular, la precipitación y la temperatura se convierten en variables meteorológicas principales en la determinación de la situación hídrica del suelo, se ha establecido como objetivo general de este trabajo, la estimación de la oferta hídrica

del Parque Nacional Natural Farallones de Cali (PNNFC) en la vertiente oriental, con base en las mediciones efectuadas en las estaciones instaladas en las cuencas hidrográficas de los ríos Pance, Meléndez, Pichindé y Felidia.

Este trabajo es importante para la región por el potencial hídrico del PNNFC y se considera una primera aproximación a la determinación de la oferta hídrica al interior del mismo, en razón a que no se han encontrado estudios específicos sobre esta temática en la zona seleccionada dentro del Parque.

1. Marco contextual

1.1 Generalidades

A través de la historia, se han presentado fluctuaciones del clima en escalas de tiempo que van desde años (variabilidad climática interanual) a milenios (cambios climáticos globales). Estas variaciones se han originado por cambios en la forma de interacción entre los diferentes componentes del sistema climático y en los factores forzantes (IDEAM - UNAL, 2018).

En Colombia, el clima está determinado por la ubicación del país en la zona tropical y por factores geográficos y atmosféricos como la precipitación, la intensidad de radiación solar, la temperatura, los sistemas de vientos, la altitud, la continentalidad y la humedad atmosférica. En climatología se utilizan los valores promedios para definir y comparar el clima. La normal climatológica es una medida utilizada con este propósito y representa el valor promedio de una serie continua de observaciones de una variable climática, durante un periodo de por lo menos 30 años. Es así como en diferentes años, los valores de las variables climatológicas fluctúan por encima o por debajo de la normal climatológica. La secuencia de estas oscilaciones, alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y a la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como anomalía (IDEAM, 2005).

El clima de Colombia es muy variado, tanto a lo largo de su territorio como a través del tiempo. Esta diversidad climática está determinada en gran medida por la ubicación geográfica y por las características fisiográficas del territorio colombiano (IDEAM - UNAL, 2018). La distribución espacial y temporal de la precipitación en Colombia está asociada a la época del año. Es decir, la ZCIT inicia su recorrido de sur a norte entre enero-febrero y de norte a sur entre julio-agosto. En su recorrido produce dos temporadas lluviosas en gran parte de la Región Andina (Mayorga, 2003).

El aumento en la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos asociados al cambio climático (CC) y a la variabilidad climática (VC), se ha convertido en el principal problema ambiental en el siglo XXI al hacer más vulnerables las sociedades humanas, la supervivencia de las especies y la estabilidad de los sistemas naturales; por lo tanto,

es necesario comprender, medir y reducir la vulnerabilidad al CC para construir a un mundo más sostenible y resiliente (Ávila et al., 2014, Ge et al., 2017, Runting et al., 2017).

Referente al PNNFC, se tiene que “los bosques se encuentran entre los ecosistemas más importantes para la provisión de servicios hidrológicos. Estos incluyen el suministro de agua y la mitigación de daños por agua, en las dimensiones de cantidad, tiempo y calidad. Desde una perspectiva más amplia, los bosques pueden contribuir a aumentar la cantidad de agua disponible, ya sea mejorando la infiltración, contribuyendo a la humedad atmosférica por evapotranspiración, o por interceptación de niebla. Hay una compensación entre la disminución en el rendimiento total de agua y la infiltración mejorada bajo cubierta forestal que contribuye a la ganancia de agua” (Carvalho-Santos et al, 2014).

A través del régimen hidrológico con el paso del tiempo se tiene conocimiento de las alteraciones que se han presentado en el recurso “hídrico” dentro del Parque y que existen fuentes que han sido intervenidas de manera que su régimen se encuentra notablemente alterado, comparado con su estado natural inicial. Ya se han identificado algunas razones por las cuales ha surgido afectación en el caudal a la salida del Parque, atribuido a extracciones mineras artesanales, regulación o adición de caudal y pérdida de cobertura vegetal que afectan la retención.

El IDEAM ha registrado un incremento de 0.2°C a 0.3°C por década y un decrecimiento en la precipitación mensual entre 2 y 3 mm por década entre los años de 1961 y 1990. Recientes proyecciones basadas en los cambios que, en relación con el período 1961-1990, habría en el 2070-2100 en los escenarios A2 y B2 del IPCC para las variables temperatura del aire y precipitación, indican que en el territorio colombiano y debido al cambio climático la temperatura aumentará entre 1 y 4° C y se generará una variación significativa (entre el 15-30 %) en la precipitación para el período 2070-2090 (Carvajal y Ordoñez, 2008).

Teniendo presente los servicios ambientales que ofrece el PNNFC, derivados de la cantidad de fuentes hídricas que nacen en su interior, de la variedad de ecosistemas, de la diversidad de climas a lo largo de su extensión; surgen escenarios para disfrutar de sus atributos naturales tales como: el paisaje, el ecoturismo, la recreación, la conservación de especies endémicas de flora y fauna, su función ecológica, la conservación de cobertura vegetal por ser los bosques reservorios de carbono, útiles para la investigación y para garantizar la seguridad hídrica en el abastecimiento a las comunidades de la zona de influencia.

Acudiendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se tiene que el número 6 se enfoca en “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” y el objetivo número 15 propende por “proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar los bosques de forma sostenible, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica” lo que respalda la establecida protección de los recursos naturales. Estos enfoques son de gran sustento para velar por la defensa

de los parques nacionales naturales como potentes reservas forestales que son y es evidente que preservar el PNNFC por su especial ubicación y representatividad ambiental para el suroccidente colombiano, no puede ser la excepción en razón que el agua es transversal a las actividades de subsistencia de los seres vivos.

Resulta importante resaltar que la intensidad de la fase extrema del fenómeno ENOS depende de la magnitud de las anomalías en las variables monitoreadas de dicho fenómeno, tanto en el océano como en la atmósfera. Esta intensidad, aunque influye en la formación de eventos extremos en determinadas regiones, es diferente de la magnitud y del impacto producido sobre las actividades humanas (Sedano, 2012). Teniendo en cuenta que el país está regido en la zona andina por un comportamiento bimodal de lluvias, con dos periodos húmedos y dos periodos secos durante el año, el efecto de las fases extremas en la región depende de la época del año y de las diferentes condiciones de vulnerabilidad de los sectores productivos (Inzunza, 2001). En la figura 1, se aprecian los eventos ENOS presentados desde enero de 1990 hasta enero de 2021.

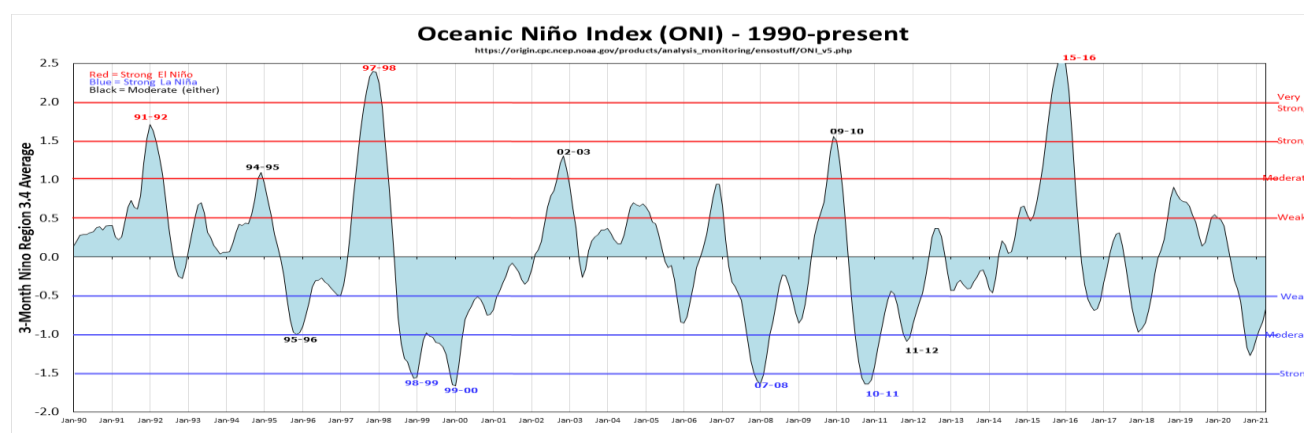


Figura No. 1. Periodos Niño, Niña y Normal (NOAA, 2021)

El evento de El Niño se puede presentar en forma recurrente, con intervalos que pueden ocurrir entre cada dos y siete años; normalmente inicia su formación entre abril y junio, y alcanza su máximo desarrollo ocho meses después, entre diciembre y febrero. Los eventos más intensos en los últimos cien años se presentaron en 1982/1983 y 1997/1998 (Jaramillo et al., 1998). De otra parte, los menores valores se presentaron en el año 2015, corroborándose lo divulgado por el IDEAM el 5 de marzo de 2015, cuando declaró “la condición débil del Fenómeno, en agosto lo actualizó a moderado y en octubre adquirió características de fuerte. Esto ante unas condiciones climáticas que predecían un “calentamiento” del Océano Pacífico y que estaría presente en el transcurso del año. Finalmente, el 13 de julio de 2016 el IDEAM reporta condiciones de neutralidad dando por finalizado el fenómeno El Niño. Sin embargo, advierte la posibilidad de ocurrencia del Fenómeno La Niña para finales del segundo semestre del 2016 (UNGRD, 2016).

Con base en los registros del IDEAM, en el año 2014 se “desarrolló unos de los Fenómenos El Niño más fuertes de la historia desde el inicio de las mediciones en el año 1950. En este año se presentó una reducción de las precipitaciones en el país, generando como expectativa la ocurrencia de un Fenómeno El Niño, el cual sólo fue

declarado por la NOAA hasta marzo de 2015, luego de reunirse una serie de condiciones océano-atmosféricas. No obstante, el IDEAM había advertido al país de la posibilidad de El Niño desde el 2014. Este fenómeno se ha considerado uno de los más fuertes, dado que la máxima anomalía de la temperatura (el máximo calentamiento) se produjo luego de mediados de noviembre cuando alcanzó un valor máximo de $+2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, de acuerdo con los registros semanales de la NOAA” (UNGRD, 2016).

1.2. Descripción de la zona en estudio

Dada la extensión del PNNFC, la zona en estudio se define en la vertiente oriental de esta reserva forestal con influencia directa sobre la ciudad de Santiago de Cali, departamento del Valle del Cauca, ubicado en el Suroccidente Colombiano (Suramérica), entre las cuencas hidrográficas de los ríos Pance, Meléndez, Pichindé y Felidia, específicamente en la zona que drena hacia el río Cauca, ver la figura 2.

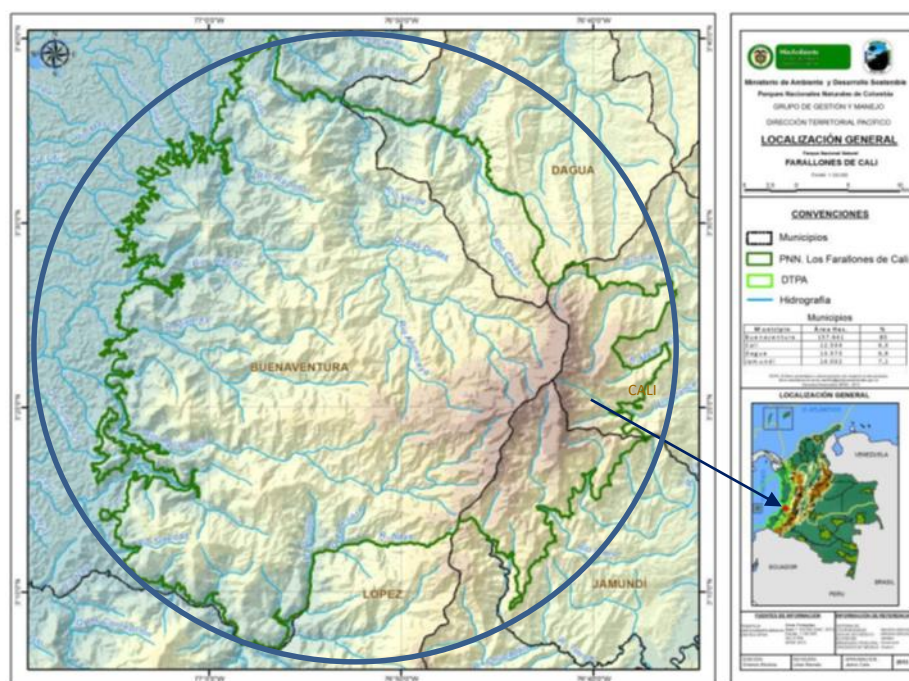


Figura No. 2. Localización Parque Nacional Natural Farallones de Cali
(Fuente PNN, 2017)

El PNNFC, “tiene una altura entre los 200 y los 4.100 msnm, una variedad de climas, la temperatura que oscila entre 5°C y 25°C y una precipitación del orden de 3600 mm/año. Está conformado por selva húmeda tropical (entre 200 y 1.200 msnm), bosque sub andino húmedo (1.200 – 2.000 msnm), bosque alto andino húmedo (2.000 – 3.500 msnm) y páramo (superior a 3.500 msnm). El PNNFC es el área protegida más grande en el departamento del Valle del Cauca (196.429,9 ha) donde nacen más de 30 ríos que abastecen el suroccidente colombiano (DAGMA, 2017).

El PNNFC “está ubicado sobre la Cordillera Occidental, hacia la parte suroccidental del departamento del Valle del Cauca, en jurisdicción de los municipios de Cali, Jamundí, Dagua y Buenaventura, las coordenadas geográficas son 3° 39′ 55,5” - 3° 6′ 56,7” de latitud norte y entre 77° 6′ 6.69” - 76° 35′ 43.6” de longitud oeste. La extensión del área protegida es de 196429,914 hectáreas” (PNN, 2014).

Por sus características de relieve, el Parque está dividido en dos vertientes: la cuenca andina del Alto-Cauca y la cuenca del Pacífico. Al interior del Parque existen ocho sub-cuencas que corresponden a la formación de varios ríos, entre ellos, los ríos Jamundí, Claro y Timba que se encuentran en el municipio de Jamundí, mientras que los ríos Cali, Meléndez y Pánce están en el municipio de Santiago de Cali. Hacia la vertiente del Pacífico, se encuentran los ríos Dagua, Dagua, Anchicayá, Naya, Cajambre, Raposo y Yurumanguí que recorren los municipios de Dagua y Buenaventura (Carvajal et al., 2016).

Por otro lado y aunque es necesario profundizar más el tema con investigaciones científicas específicas, es evidente que la altura de la formación Farallones, que alcanza los 4.100 msnm en su parte más alta en Pico Pance, genera una regulación climática importante que puede verse representada en la disminución de la temperatura incluso en varios grados centígrados para toda la región andina del Parque, en especial para los municipios de Santiago de Cali y Jamundí dado que dicha altura hace que las corrientes cálidas provenientes del Océano Pacífico por conexión, deban elevarse, de forma tal que cuando pasan los Farallones presenten una temperatura mucho menor que la inicial, irrigando ésta sensación térmica más fría en la ladera adyacente que justamente corresponde a la parte occidental de los municipios de Cali y Jamundí haciendo que el clima sea mucho más benévolo en este sector, situación sea mucho más favorable máxime si este aspecto se analiza en un contexto de calentamiento global como el que vive nuestro planeta en la actualidad” (PNN, 2017).

La red de estaciones en el PNNFC y zona circundante pertenece a varias entidades y la gran mayoría es de tipo convencional ya que las únicas estaciones automáticas son: la estación hidrológica Chorrera del Indio de propiedad de la CVC y las climatológicas Siloé, Farallones y Universidad del Valle del IDEAM. En la tabla 1, se listan las estaciones.

Tabla 1. Relación de estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio

No.	Estación	Entidad Operadora	Categoría	Cuenca hidrográfica	Altitud (m.s.n.m.)	Parámetros	
						Precipitación	Caudal
1	Peña Mona	CVC	PM	Jamundí	2100	1972 – 2019	
2	El Topacio	CVC	CP	Jamundí	1676	1965 – 2019	
3	San Vicente	CVC	PM	Jamundí	1442	1972 – 2018	
4	Minas del Socorro	IDEAM - PNNFC	PM	Pance	3184	2018 – 2019	
5	Farallones	IDEAM	CP	Pance	2275	2007 – 2019	
6	La Argentina	CVC	PG	Pance	1794	1971 – 2019	
7	Limite PNNFC Pance	PNNFC	LM	Pance	1617		2016 – 2019
8	Chorrera del Indio	CVC	LG	Pance	1417		2008 - 2019

No.	Estación	Entidad Operadora	Categoría	Cuenca hidrográfica	Altitud (m.s.n.m.)	Parámetros	
						Precipitación	Caudal
9	Pance Chorrera	CVC	PG	Pance	1386	2007 – 2019	
10	La Vorágine	IDEAM	PG	Pance	1246	2017 – 2019	2017-2019
11	Alto de las Iglesias	CVC	PG	Meléndez	1705	1982 – 2019	
12	El Carmelo	CVC	LG – PG	Lili, Meléndez, Cañaveralejo	1550	2013 – 2019	2013 – 2019
13	Corea	CVC	PM	Lili, Meléndez, Cañaveralejo	2580	1964 - 1986	
14	El Descanso	CVC	PM	Lili, Meléndez, Cañaveralejo	1172	1969 - 1991	
15	Las Brisas	CVC	PM	Lili, Meléndez, Cañaveralejo	1228	1969 - 2019	
16	Los Cristales	CVC	PM	Lili, Meléndez, Cañaveralejo	1312	1969 - 2019	
17	Límite PNNFC Meléndez	PNNFC	LM	Meléndez	1430		2016 – 2019
18	La Fonda	CVC	PM	Meléndez	1298	1965 – 2019	
19	La Teresita	CVC	CO	Cali	1950	1965 – 2019	
20	La Margarita	CVC	CO	Cali	2053	1965 - 1978	
21	San Pablo	CVC	PM	Cali	1871	1970 – 2019	
22	La Leonera	CVC	PM	Cali	1869	1953 – 1991	
23	Brasilia	CVC	PG	Cali	1864	1966 – 2019	
24	Felidia	CVC	PG	Cali	1682	2014 – 2019	
25	Aguacatal	CVC	PG	Cali	1649	1971 – 2019	
26	Pichindé	CVC - IDEAM	LG - PM	Cali	1640	1982 – 2019	1969 - 2019
27	Siloé	IDEAM	CO AUT	Cali	1234	2006 – 2019	
28	Bocatoma	CVC	LG	Cali	1074 997	1951 – 2019	1951 – 2019
29	Univalle	IDEAM	CP CONV - AUT	Cali	985	1963 - 2019	
30	Peñas Blancas	CVC	PG	Pichindé	2158	1965 – 2019	
31	Yanaconas	CVC	PM	Pichindé	1730	1939 – 2019	
32	Límite PNNFC Pichindé	PNNFC	LM	Pichindé	1415		2016 – 2019
33	Límite PNNFC Felidia	PNNFC	LM	Felidia	2082		2016 – 2019

Fuente: elaboración propia

Con respecto a la cobertura vegetal, afortunadamente la reserva forestal se conserva como reserva forestal y el personal de PNNFC está trabajando intensamente para recuperar las zonas afectadas, sin dejar de reconocer el valioso acompañamiento del Ejército Nacional. Los recorridos por la extensión del Parque son continuos y las actividades de gran impacto están siendo minimizadas, situación que ha permitido recuperar la fauna que se consideraba extinta.

Referente a los servicios ambientales, “el PNNFC agrupa diversidad de climas y ecosistemas que le confieren una singularidad especial posicionándolo como un importante productor de bienes y servicios para la comunidad vallecaucana, el nacimiento de numerosos cuerpos de agua lo posiciona como un área estratégica en abastecimiento de recursos hídricos esenciales para el desarrollo y la competitividad del Valle del Cauca, en la economía nacional y la supervivencia de las comunidades que habitan su zona de influencia. Esta área protegida ofrece escenarios paisajísticos y de

recreación para la sociedad (especialmente del Valle del Cauca), contribuye a la preservación de especies de plantas y animales endémicos mediante la protección de sus hábitats, sus características le confieren especial interés para la investigación. La conservación de sus bosques le otorga una posición especial como reservorios de carbono ya que aproximadamente el 95% (186.608,405 ha) del área mantiene sus coberturas naturales, esto le otorga condiciones importantes en procesos de mitigación y adaptación (PNN, 2017).

2. Planteamiento del problema

“La riqueza que ofrece el Sistema de Parques Nacionales Naturales se vuelve cada vez más vulnerable en la medida en que en la organización y manejo de estas áreas naturales intervienen factores de alta complejidad. La tenencia y ocupación de la tierra, el desarrollo de actividades como la minería ilegal, la extracción incontrolada de los recursos naturales, el continuo desarrollo de cultivos ilícitos, acompañado de situaciones de orden público son sólo algunas de las actividades que reflejan la difícil situación por la que pasan algunas áreas protegidas en el país y que demuestran a su vez que la intervención de las autoridades ambientales competentes en materia de formulación y puesta en marcha de programas y proyectos que contribuyan al mejoramiento del SPNN, es inminente” (Casallas, 2016).

Debido a la posición geográfica del PNNFC, catalogado como la reserva forestal más extensa e importante del Suroccidente Colombiano, a su trascendencia como fuente potencial de oferta hídrica, de biodiversidad, por ser una zona productora de oxígeno y de agua, por albergar asentamientos humanos y por el interés de contribuir a la valoración y a la conservación de la riqueza de flora y la fauna, surgió la necesidad de determinar la oferta hídrica al interior del mismo por su vulnerabilidad ante las afectaciones de la variabilidad y el cambio climático.

El PNNFC, se considera deficitario de estaciones hidrometeorológicas, específicamente en la zona alta y en la vertiente Pacífica, en vista que sólo se cuenta con las estaciones instaladas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, lo que permitió hacer una primera aproximación a la estimación de la oferta hídrica disponible, especialmente en la franja de protección ambiental donde termina la responsabilidad de conservación de PNNFC e inicia la de la CVC. De otra parte, la incontrolada explotación minera y el incremento en el consumo de agua para este fin, han generado fuertes alteraciones en el régimen de los ríos que nacen al interior del Parque, impactando negativamente los ecosistemas fluviales y comprometiendo la sostenibilidad del recurso hídrico por disponibilidad y calidad del mismo.

Conforme consulta bibliográfica, es escaso el trabajo de investigación efectuado en el PNNFC sobre la determinación de la oferta hídrica, lo que coincide con lo expuesto por los funcionarios del Parque que tienen a cargo la custodia del mismo y consideran preponderante trabajar en la gestión integrada de los recursos hídricos.

La existencia de las Minas del Socorro, localizadas en la vereda Peñas Blancas del corregimiento de Pichindé, afecta 189.2 Ha (el 4.16% del ecosistema de Páramo), 7.0 ha (0.007% de Bosque Sub Andino) y 480.5 Ha (0.64% de Bosque Alto Andino). Está estimado que, de la extensión del Parque, por actividad minera ilegal se encuentran afectadas 622 ha y del área de interés, en el corregimiento de Felidia han sido afectadas por ésta actividad 211.9 ha equivalente al 34.0% y en Pichindé 48.8 ha para un 7.8% del total de hectáreas afectadas por esta actividad (PNN, 2017).

Estas minas son de extracción ilegal de oro y para la realización de la actividad se han talado notables hectáreas de bosque y construido un centenar de socavones que atraviesan las montañas, suscitando preocupación por el riesgo de exposición si se presentan en el agua concentraciones de los insumos empleados durante el desarrollo de la actividad extractiva.

En lo referente a la conformación de los suelos de la zona en estudio, se encontró un proyecto de exploración del suelo y subsuelo efectuado por Diconsultoría Ingenieros S.A. para el tramo Ventiaderos – Pichindé - La Leonera, encontrándose que la caracterización geotécnica del suelo radica en: un relleno conformado por roca muerta y arcilla limosa bien compactada, seguido de material limoso de alta plasticidad con resistencia media a baja. Los estratos presentan humedad variable, conformados por materiales granulares arcillosos (MADS, 2015).

El tema tratado en esta tesis es un acercamiento inicial a la estimación de la oferta hídrica del parque natural y por ello se definió la zona de estudio identificando los sitios de mediciones hidrometeorológicas de la CVC, del IDEAM y de PNNFC, en el origen de la franja de protección ambiental a cargo de la corporación y en su área circundante, específicamente sobre las cuencas hidrográficas de los ríos Pance, Meléndez, Pichindé y Felidia.

3. Marco teórico

La variación de los periodos de lluvia y tiempo seco en una localidad dada en el país, está asociada a características físicas (altura sobre el nivel del mar, cercanía al mar, grado de exposición a los vientos locales, latitud geográfica) a la influencia de sistemas meteorológicos de escala sinóptica y a oscilaciones climáticas (como los fenómenos La Niña y El Niño) que acentúan o debilitan, retrasan o inician más temprano la sucesión de periodos secos y húmedos. (Mayorga, 2003). En la búsqueda de información de la zona en estudio, se encontró que en esta se presentan los tipos de precipitación convectiva y orográfica.

Respecto a la relación de la precipitación con la altitud, es pertinente prestar mayor atención a la influencia de la precipitación orográfica. Cuando el aire en movimiento encuentra una barrera montañosa y se ve obligado a elevarse, se enfría adiabáticamente (sin intercambio de calor); si la humedad es suficiente, puede darse la condensación y formación de nubes, proceso en el cual se libera calor latente. Esta liberación es la

esencia de un proceso que se da en las laderas, el cual es conocido como “Foehn” y se caracteriza por la formación de un viento con características cálidas y secas que se da sobre las pendientes a sotavento (Mayorga, 2003). A barlovento de la montaña pueden caer precipitaciones, las cuales reducen la cantidad de agua que queda en el aire, y se produce la liberación de calor latente que es cedido al aire que asciende. Del otro lado de la montaña, el aire en su descenso se recalienta, las gotitas de agua que contiene la nube se evaporan y enfrían, por lo tanto, en general la base de la nube está más alta a sotavento que a barlovento (Mayorga, 2003).

En los páramos la evapotranspiración es baja y la capacidad de retención de agua de las plantas es alta. Además de la lluvia, en los páramos la precipitación horizontal es un factor determinante en el importante rendimiento hídrico presente en estos hidrosistemas. Debido a las bajas temperaturas y alta humedad relativa, la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo a tasas muy bajas, por lo cual los suelos tienen altos contenidos de materia orgánica, alta porosidad y buena conductividad hidráulica (Díaz Granados et al., 2005).

Una de las características más importantes que diferencian el bosque de niebla de otros bosques de montaña es la “captura” de agua proveniente de las nubes que hace su vegetación asociada. Esta captura de agua y el posterior goteo de la misma al suelo del bosque, se conocen como precipitación o lluvia horizontal y es de gran valor porque durante las épocas de baja precipitación, la presencia de nubes se mantiene. Adicional a esta característica, diversos estudios han sugerido que la cantidad de agua producida en los bosques de niebla es mayor comparada con otros bosques de montaña porque en aquellos, la pérdida y el uso de agua por vegetación es menor (Armenteras et al., 2007).

El comportamiento de la precipitación tiene relación con el relieve, algunos parámetros fisiográficos de las cuencas como la elevación media resultan de gran utilidad en la determinación de la variación territorial de los elementos hidrológicos, como la precipitación. Los valores de precipitación media crecen con la altitud, hasta un cierto nivel denominado “plafón promedio de las nubes”, por encima del cual comienza a disminuir. Esta variación de la precipitación con la altura en regiones montañosas varía según la cuenca (Mayorga, 2003). Por el contrario, el valle geográfico y la ladera oriental de la Cordillera Occidental son considerablemente secos por la abrupta pendiente que caracteriza esta vertiente y por el paso de masas de aire provenientes del Pacífico, desprovistas de humedad que ya ha sido descargada a barlovento (Hurtado, 2000).

La región andina presenta un efecto latitudinal, según el cual se incrementan las lluvias de inicio de año, hacia el norte siguiendo el movimiento de la ZCIT, dado que el norte de la región muestra pendientes más suaves y menos elevadas que en el sur, las masas húmedas del Pacífico alcanzan a influir en el régimen de esta región (Guzmán et al., 2014). La precipitación en esta región de Colombia “es modulada temporalmente por ZCIT, pero factores orográficos como la elevación y orientación de las pendientes determinan la circulación de los vientos, formación de nubes y finalmente la distribución espacial de las lluvias” (Mesa et al., 1997).

La oferta hídrica de una cuenca, es el volumen disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre. Al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma. El conocimiento del caudal del río, su confiabilidad y extensión de la serie del registro histórico son variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial. El escurrimiento como elemento generador de la oferta hídrica se define “como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada, sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca” (Pérez & Quispe, 2017).

En lo que respecta al escurrimiento, de acuerdo a la consulta realizada en el Estudio Nacional del Agua (ENA), del año 2014, el agua superficial está representada por el nivel de agua o altura de la superficie de cuerpos de agua tales como ríos, lagos y embalses y la medición del agua superficial se asocia a la resolución de problemáticas tales como predicción de crecidas, predicción de flujos, diseño de estructuras para diversos usos en los cuerpos de agua y la ubicación de los puntos de medición depende en gran medida de los requerimientos de información y el uso al que se destinará. En el mismo estudio se precisa que las características del régimen hidrológico están determinadas por factores meteorológicos, bióticos, asociados con la cobertura de la superficie terrestre y los propios de la dinámica del agua en el suelo y subsuelo, que el régimen hidrológico se aborda desde la estimación de las condiciones de aridez y la capacidad de almacenar y retener agua representados en los índices de aridez y regulación.

La cuenca constituye una unidad adecuada para la planificación ambiental del territorio, dado que sus límites fisiográficos se mantienen en un tiempo considerablemente mayor a otras unidades de análisis, además involucra una serie de factores y elementos tanto espaciales como sociales, que permiten una comprensión integral de la realidad del territorio” (MADS, 2014). Estudios de investigación previos, se han adelantado con base en el análisis de las diferentes cuencas hidrográficas de la zona, pero no se han hecho evaluaciones para la el PNNFC en su conjunto. Por acción del cambio climático y la variabilidad climática, se presentan modificaciones en la precipitación y por ello es importante analizar la afectación del caudal de los ríos de la zona de estudio, bajo la acción de los fenómenos El Niño y La Niña.

3.1 Cambio climático

El cambio climático se entiende como la modificación a largo plazo de las condiciones meteorológicas medias a escala del planeta que pueden tener variaciones en múltiples escalas temporales (días, meses, años, etc.) y espaciales (regional o local) y pueden constituirse en una amenaza natural como sequías, inundaciones, olas de frío, o de calor, tormentas, entre otros (Bedoya et al., 2010). Por su parte, el entendimiento de la variabilidad climática (VC) en un amplio rango de escalas espaciales y temporales es uno de los temas más relevantes en ciencias geofísicas (Poveda, 2004). Estos

impulsores del clima podrían estar arraigados en zonas tropicales y extender su influencia a latitudes extra tropicales; o bien estar restringidos a latitudes medias y altas en ambos hemisferios (Bridgman and Oliver, 2014).

3.2 Variabilidad climática

ENOS es uno de los fenómenos climáticos más importantes que resulta de las interacciones océano-atmósfera a gran escala sobre el Pacífico Ecuatorial (Trenberth y Stepaniak, 2001). Este evento presenta dos componentes esenciales para su desarrollo e intensidad: la componente oceánica y la componente atmosférica. El Niño generalmente se usa para describir la aparición de una corriente oceánica cálida a lo largo del Océano Pacífico central y oriental, y La Niña se refiere a una anomalía de la temperatura en la superficie del mar (TSM) inusualmente fría en el Pacífico tropical.

Durante El Niño, la presión del nivel del mar tiende a ser más baja en el Pacífico oriental y más alta en el Pacífico occidental, mientras que lo contrario ocurre durante La Niña. La oscilación en la presión atmosférica entre el Pacífico tropical oriental y occidental se llama Oscilación del Sur, lo que podría influir en el transporte de humedad desde los océanos a los continentes. Por lo tanto, ENOS se genera principalmente a través del movimiento de la Zona de Convergencia Tropical, causando anomalías climáticas en todo el mundo. (Glantz et al., 1991, Boulanger et al., 2005, Cai et al., 2012, Ni et al., 2018).

A través del tiempo (meses, años, siglos, milenios) el clima presenta ciclos o fluctuaciones de diversa duración. En diferentes años, los valores de las variables climatológicas (temperatura del aire, precipitación, etc.) fluctúan por encima o por debajo de lo normal (condición generalmente representada por el valor promedio de una variable climatológica en un período de por lo menos 30 años); la secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías (la diferencia resultante entre el valor de la variable climatológica y su valor promedio). Al analizar las secuencias históricas de anomalías de una variable climatológica determinada para un lugar dado es posible observar una serie de ciclos interpuestos que tienen períodos de meses, años y decenios, los que evidencian la variabilidad climática en las escalas intraestacional, interanual e interdecadal, respectivamente. Tales fluctuaciones se originan, generalmente, por procesos en los distintos componentes del sistema climático (especialmente en el océano y en la atmósfera) y por oscilaciones en la radiación solar incidente (IDEAM, 2018).

La VC, se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias, y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas y los fenómenos extremos, entre otras), en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La VC, es manifestada, por ejemplo, por fenómenos naturales como el evento cálido de El Niño y su contraparte fría, La Niña, conocidos conjuntamente como El Niño Oscilación Sur (ENOS) (Carvajal y Ordoñez, 2008).

3.2.1 Métodos de estimación de la evapotranspiración potencial

Para la estimación de la evapotranspiración potencial se emplearon los siguientes métodos:

3.2.1.1 Método de Thornthwaite (TW)

Se trata de una ecuación empírica para el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual de una superficie de referencia cubierta de césped, con base en la temperatura media mensual. El método fue desarrollado utilizando lecturas de lisímetros y balances hídricos realizados en cuencas pequeñas de diferentes zonas de Estados Unidos. Thornthwaite asegura que su método no es preciso en zonas áridas pues emplea la temperatura en lugar de la radiación neta, que tiene una relación física más directa con la evapotranspiración potencial. La ET_i en mm/mes se obtiene según la ecuación:

$$ET_i = K_i 16 (10 T_i / J)^a$$

Donde:

T_i: es la temperatura media mensual del aire para el mes *i* (°C).

K_i es un factor de corrección mensual que depende de la latitud. Se aplica debido a que el método fue desarrollado suponiendo un mes de 30 días con 12 horas de luz solar diarias.

J: Representa el índice de calor anual, se calcula a partir de las temperaturas medias de los doce meses, así:

$$J = \sum_{i=1}^{12} (J_i)$$

En donde J_i representa el índice de calor mensual, se halla:

$$J_i = \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$$

El exponente **a** se obtiene como función del índice de calor anual y está definido por la siguiente expresión:

$$a = 0.49239 + 0.01795 * J - 7.71 * 10^{-5} * J^2 + 6.75 * 10^{-7} * J^3$$

(Marín, 2010)

3.2.1.2 Método de García López

Es una fórmula adaptada al trópico que permite estimar la evapotranspiración potencial diaria, entre latitud 15°N y 15°S. Desarrollada a partir de la correlación de los datos de temperatura y déficit de saturación con los de la evapotranspiración potencial medidos en seis estaciones tropicales. La ecuación se presenta a continuación:

$$ETP = 1.21 \cdot 10^{F_t} (1 - 0.01 HR_D) + 0.21t - 2.3$$

Donde F_t es el factor de temperatura el cual se define con la ecuación:

$$F_t = \frac{7.45t}{234.7 + t}$$

Donde t es la temperatura media mensual del aire en °C y HR_D es la humedad relativa media diurna que se define con la siguiente expresión:

$$HR_D = \frac{HR_{8:00am} + HR_{2:00pm}}{2}$$

(Marín, 2010)

3.2.2 Fenómenos del Ciclo – ENOS

Los fenómenos del ciclo ENOS, de interés en esta tesis son:

3.2.2.1 Fenómeno de El Niño

El Fenómeno de El Niño se refiere a temperaturas oceánicas por encima del promedio a lo largo de las costas del Ecuador, Perú y Norte de Chile, así como a lo largo de la zona ecuatorial del Pacífico Oriental, que persiste en promedio 12 meses, con una recurrencia de 2 a 7 años. En condiciones normales, la superficie del océano en la zona oeste del Pacífico Tropical usualmente es caliente, la presión atmosférica es baja y las precipitaciones son frecuentes e intensas. Mientras que en el extremo opuesto del Pacífico (cerca de Suramérica), el agua es relativamente fría, la presión atmosférica es alta y hay poca lluvia. Cuando se presenta El Niño, las aguas cálidas de Asia se dispersan hacia el Este (Suramérica). Las regiones de baja presión y las lluvias torrenciales también migran hacia el Este por la incidencia de los vientos alisios en Colombia. En consecuencia, la zona central y oriental del Pacífico se calienta y se torna más lluviosa, mientras que en el extremo occidental del Pacífico las condiciones son más secas y frescas (Bedoya et al., 2010).

Colombia se localiza en el trópico americano "como una isla entre tres océanos" (Snow, 1976) citada por (Poveda, 2004) considerando que además del Caribe y del Pacífico, también recibe la influencia de la circulación atmosférica de la cuenca Amazónica y que la hidroclimatología del país está fuertemente influenciada por los fenómenos de variabilidad climática y el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur.

Respecto a los efectos e impactos en el sector ambiente por efecto del fenómeno El Niño, existe una relación directa entre las condiciones atmosféricas, tales como la persistencia de días sin lluvia, escasa nubosidad diurna y nocturna, radiación solar intensa y duradera, presencia de vientos fuertes, y la ocurrencia de incendios en la cobertura vegetal. Al incrementarse la temperatura del aire, la radiación y el viento, la humedad desciende, la vegetación se seca y se calienta, alcanzando temperaturas próximas a su ignición (UNGRD, 2016).

Con la presencia del Fenómeno El Niño, se origina una reducción de las lluvias con la consecuente disminución en los caudales de los ríos, con impactos notorios en las temporadas secas por el aumento de la frecuencia de incendios de la cobertura vegetal, problemas de "déficit hídrico" que afectan a los acueductos municipales y veredales, racionamiento en el sector energético e impactos en la agricultura, salud y ambiente. La reducción de las lluvias se hace notoria en la región Andina en los trimestres de: marzo–mayo y septiembre–noviembre, creando una sensación de "alargue" de las temporadas secas y/o de bajos volúmenes de lluvia en los trimestres de: junio–agosto y diciembre–febrero, cuando al mismo tiempo se hace mayor la frecuencia de los incendios en las coberturas vegetales (UNGRD, 2016).

3.2.2.2 Fenómeno de La Niña

La Niña se usa para designar el evento extremo opuesto a El Niño. Se refiere, al enfriamiento más allá de lo normal, de la temperatura del océano tropical. Las características de La Niña son más frías que las condiciones normales del Pacífico Oriental y más húmedas y cálidas que las condiciones normales en el Pacífico de la zona oeste (Bedoya et al., 2010).

Esta variación que se superpone a los periodos secos y lluviosos regionales del país, conduce a la nación a planificar y avanzar más rápidamente en las políticas y estrategias de corto y mediano plazo para ser más resiliente y poder enfrentar con el fortalecimiento de las capacidades locales, los impactos de la variabilidad climática (UNGRD, 2016).

3.2.3 Variables macroclimáticas

Dentro de las variables macroclimáticas, se citan las siguientes:

3.2.3.1 Índice de Oscilación del Sur- (Southern Oscillation Index – SOI)

El índice se define como la diferencia de las anomalías mensuales de presión atmosférica estandarizadas por sus correspondientes desviaciones típicas entre un centro de alta presión que se localiza en Tahití (17° S, 150° O) y un centro de baja presión que se localiza entre Indonesia y el norte de Australia cerca de Darwin (12° S, 131° E). El índice es positivo cuando la diferencia entre este y oeste es más alta de lo normal, y negativo cuando es inferior a lo habitual. La fase cálida del ENSO (El Niño) está asociada a un índice bajo o negativo y la fase fría (La Niña), a un índice alto o positivo (Fernández, 2003). Este índice ha sido tomado por el Climatic Analysis Center (CAC). La figura 3, señala los puntos (Tahití y Darwin) de monitoreo de este índice.

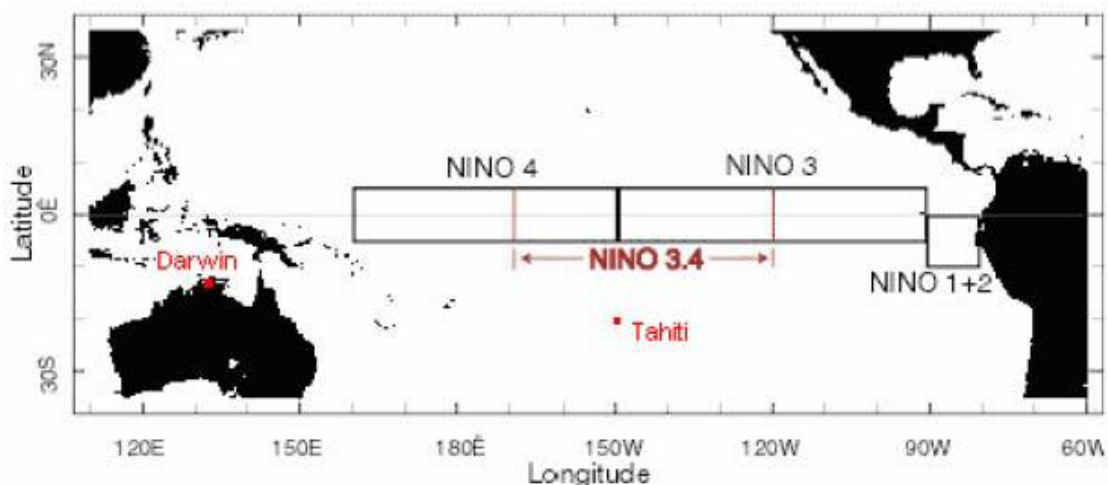


Figura No. 3. Regiones del Pacífico tropical utilizadas para el análisis del ENSO y puntos de monitoreo del SOI. (Fuente NOAA)

3.2.3.2 Índices a partir de la temperatura en la superficie del mar – TSM

Se definen como la anomalía mensual respecto a la temperatura media superficial del mar en cuatro sectores del Océano Pacífico, usadas para monitorear el fenómeno ENSO. La figura 3 también indica cada región y el nombre asignado a cada una de ellas.

3.2.3.3. Categorización de la precipitación

El IDEAM ha definido la categorización de la precipitación total, basada en los promedios climatológicos standard (1981-2010) y estos se encuentran publicados en el portal institucional de la CVC y del Instituto. Los rangos de categoría, se definen a partir de la estimación del 20% del valor promedio mensual multianual (PMM), ver tabla 2.

Tabla 2. Categorización de la precipitación total

PORCENTAJE	CLASIFICACION
>160%	Excedente severo
120 -160%	Excedente
80 -120%	Normal
40 - 80%	Déficit
<40%	Déficit severo

Fuente: IDEAM, 2018

3.2.4 Modelo hidrológico HEC – HMS

Dentro de los modelos de simulación hidrológica usados a nivel mundial, se encuentra el HEC-HMS 4.3 desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del *United States Corps of Engineers*, el cual ha diseñado los modelos hidráulicos e hidrológicos con mayor reconocimiento y aceptación internacional; el HEC-HMS 4.3 (Hydrologic Model System versión 4.3), diseñado para simular la escorrentía superficial de respuesta de una cuenca a la precipitación mediante la representación de la misma como un sistema interconectado de componentes hidrológicas e hidráulicas, cada una de las cuales refleja un aspecto del proceso precipitación-escorrentía dentro de cada subcuenca, a partir de variables, parámetros físicos e hidrológicos los cuales se pueden ver en la figura 4.

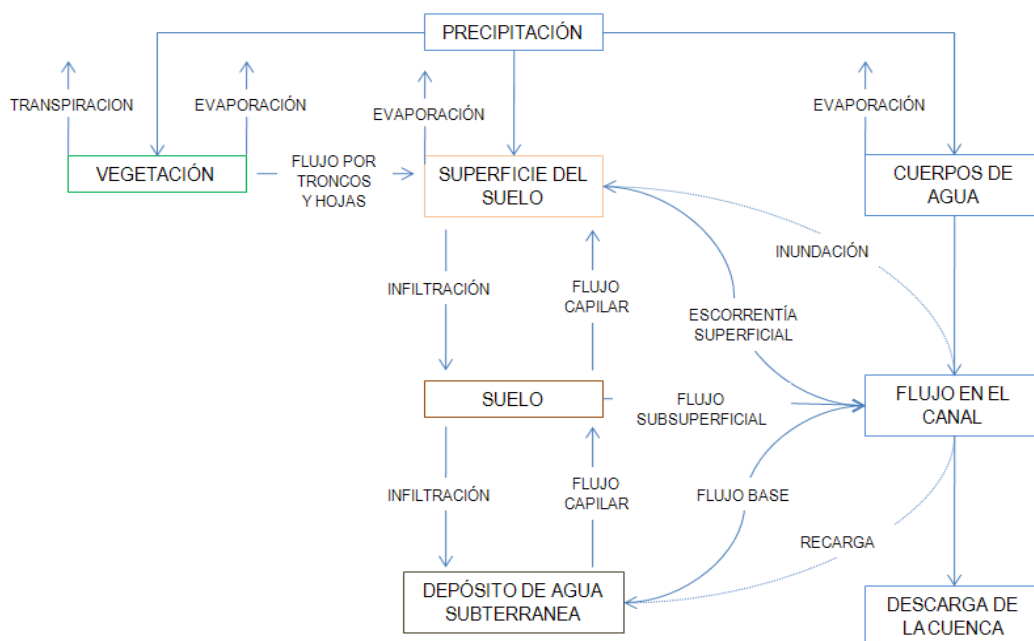


Figura No. 4. Esquema de las componentes hidrológicas e hidráulicas del modelo HEC – HMS 3.5 para representar una cuenca hidrográfica (Fuente: Adaptado de HEC, 2000)

El modelo hidrológico permite calcular los hidrogramas producidos en una cuenca empleando los datos físicos de la cuenca y los datos hidrometeorológicos de las estaciones ubicadas dentro de la misma, aunque los resultados dependen del tipo de metodología que se use para la modelación. Hay metodologías que sirven para la determinación de eventos específicos como aguaceros de corta duración, pero si se desea conocer el comportamiento de las hidrógrafas de forma continua es necesario aplicar el Modelo SMA (Continuous Soil-moisture Accounting), que permite simular el movimiento del agua a través del suelo, del subsuelo, su intercepción, su almacenamiento en diferentes zonas y el escurrimiento superficial del exceso.

3.2.4.1 Esquema de la cuenca

Para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de determinada cuenca es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma, tal y como se presenta en el ítem de esquematización de las cuencas. En dicha representación esquemática se utilizan generalmente diversos tipos de elementos, dentro de los cuales se desarrollan los procesos hidrológicos. En este sentido, el programa incluye diferentes tipos de elementos, como subcuencas, tramos de cauce, embalses, confluencias, derivaciones, fuentes y sumideros, que permiten con las adecuadas conexiones entre ellos, constituir finalmente la representación esquemática de la cuenca (HEC, 2000). Por otra parte, hay que tener en cuenta que el modelado de la cuenca y algunas de las características morfométricas son generados con el HEC-GeoHMS, lo que facilita este proceso. (Gesha, 2004).

3.2.4.2 Modelado de los componentes del proceso (datos de entrada)

Ante la imposibilidad de abordar de manera global la modelación del proceso de transferencia lluvia-caudal, se suele optar generalmente por analizar, de manera individualizada, diferentes aspectos parciales del proceso.

3.2.4.3 Análisis de los procesos meteorológicos

Dentro de este análisis es necesario el estudio de las entradas y salidas del balance hidrológico que estén vinculadas con los procesos meteorológicos, por lo que el software HEC-HMS 4.3 considera dos esenciales, siendo estas la precipitación y la evapotranspiración.

3.2.4.4 Determinación del volumen total disponible para escorrentía

El volumen total disponible para escorrentía, surge al descontar a la precipitación el agua interceptada por la vegetación, infiltrada en el suelo, almacenada en la superficie del mismo, evaporada desde diferentes superficies o transpirada a través de las plantas. Para cuantificar estas pérdidas de agua, el modelo dispone de las siguientes metodologías: Initial and Constant-rate and Deficit and Constant-rate Loss Models, SCS Curve Number Loss Model, Green and Ampt Loss Model y el Continuous Soil-moisture Accounting (SMA) Model. Cabe señalar, que el modelo SMA está especialmente indicado para emplear en los casos de simulación continua, mientras que los tres restantes son apropiados para los casos en que se presenten aguaceros de corta duración.

Cuando es necesario conocer la variación que experimentan los caudales en periodos largos de tiempo, lo que incluye periodos lluviosos como otros de ausencia de precipitaciones, la modelación continua es la única forma que contempla el modelo hidrológico HEC – HMS 4.3, para satisfacer esta necesidad siendo obligatorio aplicar el modelo SMA. Este modelo representa la cuenca mediante un conjunto de capas o depósitos, el primero incorpora la parte de precipitación que es interceptada por la vegetación, el siguiente constituye el almacenamiento de agua en la superficie del terreno o depresiones. Luego, pasando al interior del suelo, hay un depósito que trata de representar el almacenamiento en la capa superior del suelo que se divide en dos zonas: la zona superior (upper zone), que es la parte del suelo que puede perder agua por evapotranspiración y/o percolación, y la zona de tensión (tension zone) que constituye la parte del suelo que pierde agua sólo por evapotranspiración. La división de este depósito en dos zonas trata de diferenciar la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del mismo.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Determinar la variación de la oferta hídrica del Parque Nacional Natural Farallones de Cali, en la vertiente oriental del municipio de Santiago de Cali, por efecto de los Fenómenos El Niño y La Niña.

4.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos planteados son:

- Caracterizar la hidrometeorología en la vertiente oriental del Parque Nacional Natural Farallones de Cali.

- Correlacionar las variables macroclimáticas de precipitación y temperatura en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali, con los periodos secos y húmedos del ENSO.
- Determinar el caudal producido a la salida del Parque Nacional Natural Farallones de Cali, vertiente oriental, correspondiente al municipio de Cali (Colombia) en la franja de protección ambiental.

5. Metodología

5.1 Recolección de información

Para la determinación de la oferta hídrica del PNNFC, se recopilaron estudios ejecutados en la zona de estudio, específicamente bases de datos hidroclimatológicos y estudios técnicos, cartografía digital local, actualizaciones de cobertura vegetal para conformar una base de datos y analizar la respuesta que el área estudiada del Parque tiene (escurrimiento) ante la pluviosidad, conforme a la cobertura, a los tipos y a los usos del suelo existentes en el mismo.

Para la evaluación del caudal, se recopiló datos de caudal para el periodo disponible en cada una de las estaciones de medición emplazadas dentro del PNNFC y sus alrededores, cuya red hídrica drena hacia la ciudad de Cali.

El personal del PNNFC, en el año 2016, definió cuatro (4) puntos temporales para la realización de actividad foronómica mensual en un determinado punto de cada una de las cuencas hidrográficas seleccionadas, en razón a que no existen estaciones hidrológicas a nivel del cierre de la franja de protección ambiental donde inicia la injerencia de la CVC, sin embargo no se conservó la periodicidad en la realización de los aforos en todos los puntos y por dicha razón se dificultó el empleo de la información porque no fue posible establecer la calidad de los datos, ni comprobar el tirante en cada uno de los aforos líquidos.

5.1.1 Variables hidroclimatológicas

De acuerdo a la revisión de información hidroclimatológica existente en la zona de estudio y circundante a esta, se encontró que las estaciones de la red disponible son las relacionadas en la tabla 1, que en buen número operan en promedio hace más de treinta y cinco (35) años.

Teniendo en cuenta la implicación de los fenómenos de El Niño y de La Niña sobre el PNNFC, se revisó la información disponible en cada una de las estaciones seleccionadas para los años en los cuales se han presentado cada uno de estos, durante el periodo 1982 – 2019.

Para la estimación de la oferta hídrica, se seleccionaron las cuencas hidrográficas: Pance, Meléndez, Pichindé y Felidia, cuyas áreas de incidencia en la zona de estudio se definen en la tabla 3 y la delimitación de cada una de ellas se muestra en la figura 5, donde de igual forma se incluyen las estaciones hidrometeorológicas y los puntos de cierre correspondientes a los sitios de medición de caudal por parte del personal de PNNFC, en la franja de protección ambiental donde inicia la jurisdicción de la CVC.

Tabla 3. Determinación del área de las cuencas hidrográficas (hasta el punto de cierre PNNFC)

CUENCA HIDROGRAFICA	AREA (Km²)	EQUIVALENCIA DEL AREATOTAL (%)
PANCE	25,64	18,9
MELENDEZ	30,86	22,7
PICHINDÉ	57,17	42,0
FELIDIA	22,36	16,4

Fuente: elaboración propia

Estos puntos de cierre están ubicados aguas arriba de las estaciones hidrológicas convencionales a excepción de la estación hidrológica Pichindé, que se encuentra aguas arriba del inicio de la franja de protección ambiental donde termina la jurisdicción del PNNFC (ver figura 5).

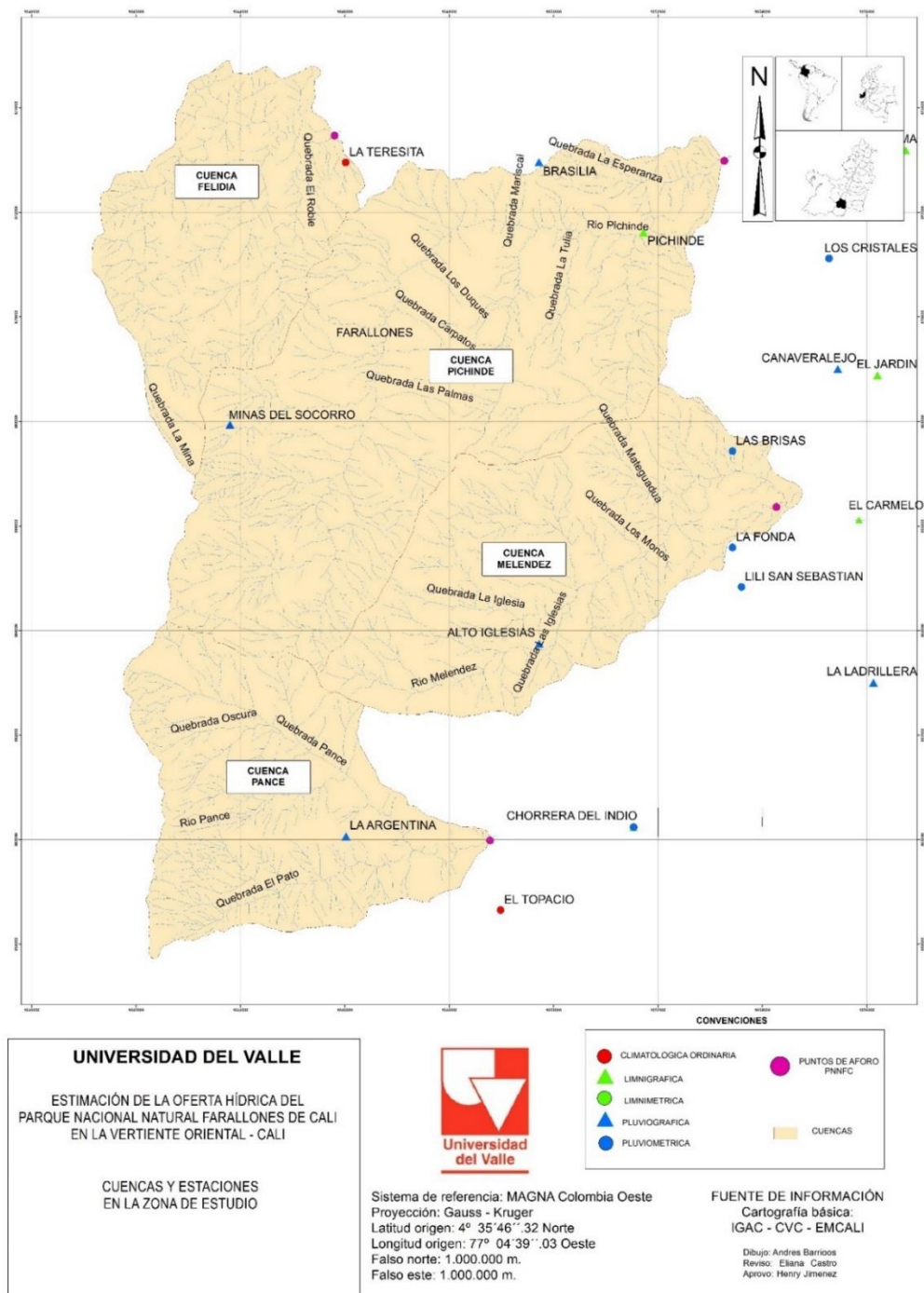


Figura No. 5. Delimitación de cuencas hidrográficas con red de estaciones hidrometeorológicas

5.2 Visita de inspección al PNNFC

Como reconocimiento de la zona, en marzo de 2021 se llevó a cabo la visita al campamento de PNNFC en el sector de Minas del Socorro, con el acompañamiento de personal de Parques Nacionales y bajo el control del Ejército Nacional. El ascenso se efectuó por la vereda Peñas Blancas, corregimiento de Pichindé (occidente del municipio de Santiago de Cali) en caballo, con la finalidad de tener una óptica de la situación ambiental del Parque y conocer las formas de distribución del recurso involucrado en la estimación de la oferta hídrica. Se recorrió una distancia de 10 km durante un periodo aproximado de 3.5 horas (por camino de herradura), se llegó hasta el campamento de PNN en el sector Alto del Buey donde se encuentra emplazada la estación pluviométrica Minas del Socorro. El recorrido se realizó hasta el parteaguas de las cuencas de los ríos Pichindé y Felidia en cercanía del Alto del Buey (3491.1 msnm).

Los sectores visitados fueron: **La Cancha** 3°24.0'8.1"N - 76°41.0'0.4"W (3198 msnm); **Las Rocas** 3°24.0'30.3"N - 76°41.0'21.2"W (3402 msnm); **Helipuerto** 3°24.0'21.9"N - 76°41.0'28.0"W (3419 msnm) y **Alto del Buey** 3°24.0'24.0"N - 76°41.0'17.4"W (3470 msnm).

En el anexo 1, se incluyen fotografías de las coberturas observadas al interior del Parque, correspondientes a bosque altoandino, subpáramo y páramo, con predominio de vegetación herbácea y arbustiva bien conservada en concordancia con la reserva forestal. Específicamente, el campamento de Parques se encuentra en una pradera con presencia de chusque.

Es relevante anotar la importancia de monitorear esta zona ya que en este páramo se identifica la zona de recarga hídrica de la quebrada La Mina y del río Pichindé. Por parte, de personal del Parques, se recibió información sobre la no existencia de frailejones en el páramo. Con la visita se corroboró la deficiencia de estaciones y por ende la insuficiencia de datos, por lo que se debió modelar y se recomendó la instalación de una estación hidrometeorológica en el sector Alto del Buey.



Figura No. 6.

Vista desde la parte alta la cuenca del río Pichindé cobertura de bosque altoandino (Foto: Edgar Blanco, 2021)

5.3 Análisis exploratorio de datos

Para la planeación y el diseño de muchos proyectos relacionados con el agua es necesario el uso de información climatológica proveniente de eventos meteorológicos gobernados por las leyes del azar (Mesa et al., 1997). Luego, las predicciones dependen de la calidad y cantidad de información, además de la correcta aplicación de los métodos estadísticos disponibles, pues se pretende realizar inferencias a partir de una muestra. Para el uso correcto de la información climatológica en la ingeniería de los recursos hídricos, esta debe cumplir con el supuesto de estacionariedad, consistencia y homogeneidad, sin dejar aparte la independencia.

Antes de realizar cualquier tipo de análisis climatológico, la información debe ser ampliamente explorada usando métodos gráficos y estadísticos (cuantitativos); si ello no se realiza se pueden hacer suposiciones que no son ciertas (independencia, normalidad, homocedasticidad, entre otras) y modelar las series meteorológicas de forma incorrecta. Los métodos gráficos, como herramienta exploratoria de los datos, se usan con dos propósitos: revelar las características de una distribución o las relaciones que existen entre las variables que de otra manera no podrían ser descubiertas (Maidment, 1993).

Dentro de los métodos cuantitativos se encuentran las pruebas paramétricas y no paramétricas, para determinar la estacionariedad en la varianza y en la media de las series, además de su consistencia y homogeneidad. Las pruebas paramétricas son usadas indiscriminadamente sin hacer ni siquiera un análisis de normalidad antes de su aplicación; en muchas ocasiones esa suposición no es válida y en otras la sospecha de que no sea adecuada no resulta fácil de comprobar, por tratarse de muestras pequeñas. En estos casos se dispone de dos posibles mecanismos: los datos se pueden transformar de tal manera que sigan una distribución normal, o bien se puede acudir a pruebas estadísticas que no se basan en ninguna suposición en cuanto a la distribución de probabilidad que siguen los datos, y por ello se denominan pruebas no paramétricas (o de distribución libre) (Castro & Carvajal, 2006).

Así las cosas, la información de estaciones hidrometeorológicas convencionales fue útil para la elaboración de gráficas de precipitación y temperatura que facilitaron la estimación del comportamiento de los parámetros y para la obtención de mejores resultados, se complementó con la modelación.

De las estaciones disponibles, para el análisis de la precipitación, se seleccionaron aquellas con un porcentaje de datos faltantes menor al 10% del total de años de funcionamiento y en consecuencia se empleó primordialmente la información de quince (15) estaciones entre pluviométricas y climatológicas por la historicidad de las mismas, teniendo en cuenta los años calendario hasta el 2019, año de corte del análisis (ver tabla 4).

Los métodos utilizados para la complementación de datos fueron: el aritmético y el de las proporciones y el área de influencia de cada una de las estaciones, dentro de las cuencas estudiadas, se estimó mediante la herramienta ArcGIS.

Tabla 4. Estaciones de referencia

ESTACION	CUENCA	CATEGORIA	ALTITUD (msnm)
<i>Pichindé</i>	<i>Pichindé</i>	<i>Pluviométrica</i>	<i>1640</i>
<i>Yanaconas</i>	<i>Cali</i>	<i>Pluviométrica</i>	<i>1730</i>
<i>Brasilia</i>	<i>Cali</i>	<i>Pluviométrica</i>	<i>1864</i>
<i>Aguacatal</i>	<i>Cali</i>	<i>Pluviográfica</i>	<i>1649</i>
<i>La Fonda</i>	<i>Meléndez</i>	<i>Pluviométrica</i>	<i>1298</i>
<i>San Pablo</i>	<i>Cali</i>	<i>Pluviométrica</i>	<i>1871</i>
<i>La Teresita</i>	<i>Cali</i>	<i>Climatológica</i>	<i>1950</i>
<i>El Topacio</i>	<i>Jamundí</i>	<i>Climatológica</i>	<i>1676</i>
<i>La Argentina</i>	<i>Jamundí</i>	<i>Pluviográfica</i>	<i>1794</i>
<i>Samarkanda</i>	<i>Timba</i>	<i>Evaporimétrica</i>	<i>1527</i>
<i>Peña Mona</i>	<i>Jamundí</i>	<i>Pluviométrica</i>	<i>2100</i>
<i>Peñas Blancas</i>	<i>Cali</i>	<i>Pluviográfica</i>	<i>2158</i>
<i>Felidia</i>	<i>Cali</i>	<i>Pluviográfica</i>	<i>1682</i>
<i>Minas del Socorro</i>	<i>Pance</i>	<i>Pluviométrica</i>	<i>3184</i>
<i>Farallones</i>	<i>Pance</i>	<i>Climatológica</i>	<i>2275</i>
<i>Chorrera del Indio</i>	<i>Pance</i>	<i>Hidrológica</i>	<i>1417</i>
<i>El Carmelo</i>	<i>Meléndez</i>	<i>Hidrológica</i>	<i>1550</i>

Fuente: elaboración propia

5.3.1 Análisis gráfico

El análisis exploratorio de los datos (EDA) por medio gráfico, se realiza con el fin de comprobar tendencias y cambios en la serie de tiempo por medio visual. Es considerado como el primer análisis a realizar antes de cualquier análisis confirmatorio (cuantitativo) y más aún, antes de modelar con esos datos meteorológicos. Dentro del análisis exploratorio se pueden mencionar las pruebas gráficas de serie de tiempo, el histograma, la gráfica de tallos y hojas, el diagrama de cajas la gráfica S-S, la gráfica Q-Q y las pruebas de normalidad, consultada en (Behar, 1997); (Carvajal, 2004) y (Castro & Carvajal, 2006).

5.3.2 Análisis cuantitativo

Luego de realizar el EDA por medio gráfico conviene realizar un análisis a partir de modelos estadísticos, con el fin de determinar si la serie es consistente y homogénea de forma numérica. Para realizar esto, existen numerosas pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas, el uso de la una o la otra depende de distribución de la información (normal o no) (Castro & Carvajal, 2006).

Las pruebas paramétricas suponen que los datos siguen una distribución normal, que son sensibles a la cantidad de datos, a las asimétricas y a la presencia de información inconsistente o atípica. Las pruebas no paramétricas no requieren de ningún supuesto

de normalidad, lo que indica que son útiles bajo un amplio rango de distribuciones de la población; además en la mayoría de los casos los resultados estadísticos se derivan únicamente a partir de procedimientos de ordenación y recuento, por lo que su base lógica es de fácil comprensión. Cuando se trabaja con muestras pequeñas ($n \leq 10$) en las que se desconoce si es válido suponer la normalidad de los datos, conviene utilizar pruebas no paramétricas, al menos para corroborar los resultados obtenidos a partir de la utilización de la teoría basada en la normal.

Con la revisión de la consistencia de los datos se procedió a realizar los cálculos de precipitación media, de caudal específico y los respectivos análisis de resultados teniendo presente la variación temporal.

Con los datos de las estaciones hidrometeorológicas convencionales se efectuaron gráficas que permitieron definir tendencias de los parámetros, no obstante, se complementó el análisis con la modelación hidrológica debido a que los puntos de cierre de las cuencas se encuentran emplazadas aguas arriba de las estaciones con información histórica, a excepción de la estación Pichindé. Adicionalmente, la cuenca hidrográfica del río Felidia infortunadamente sólo cuenta con datos de precipitación.

5.4 Relación e influencia del ENSO en la hidroclimatológica de la zona en estudio

Con el fin de identificar la influencia y relación del ENSO, se recopiló información pertinente para el estudio de la variabilidad climática y sus teleconexiones con el fenómeno ENSO en la región, efectuando la revisión de estudios antecedentes relacionados con la temática a nivel regional y local.

Se conformaron bases de datos climatológicas teniendo en cuenta los registros de precipitación, temperatura y caudal de las estaciones en la zona de estudio y aledañas. Además, se conformó una base de datos con variables macroclimáticas asociadas al comportamiento del ENSO. Se han encontrado variables hidrometeorológicas a partir de fenómenos de gran escala que pueden ser correlacionadas con este fenómeno.

5.4.1 Auto correlación de las variables climáticas y macroclimáticas asociadas al ENSO

Se estimaron funciones de auto correlación parcial a las variables precipitación y temperatura; así mismo, a las variables macroclimáticas asociadas al fenómeno ENSO. El análisis se realizó en un periodo de estudio común de las variables, entre 1980 y 2019; los límites se estimaron con un 95% de significancia utilizando del Test de Box-Pierce de ruido blanco, asumiendo que todas las medidas son independientes. La variabilidad de la hidrometeorología de la región involucra la influencia de diversas variables macroclimáticas, por lo cual es útil cuantificar el grado de dependencia lineal entre las mismas, a través de coeficientes de correlación cruzada a diferentes rezagos en el tiempo. Por tal motivo, se calcularon las funciones de correlación cruzada entre

las variables de precipitación, temperatura y el caudal con respecto a las variables macroclimáticas.

5.5 Modelación hidrológica para la estimación de la oferta hídrica en la zona de estudio

En vista de la discontinuidad de las campañas foronómicas de Parques Nacionales y de la falta de tramos de limnómetro para confirmar el nivel de los ríos durante los aforos en las secciones transversales seleccionadas, en la determinación de la oferta hídrica se optó por emplear como herramienta el modelo hidrológico HEC–HMS, fundamentado en la relación lluvia-escorrentía, empleando la información registrada en las estaciones convencionales: Chorrera del Indio, El Carmelo y Pichindé para realizar el proceso de ajuste y calibración del modelo.

Teniendo en cuenta que la estación Pichindé produce datos desde el año 1969, que la estación Chorrera del Indio posee información desde el año 2010 y que la estación El Carmelo tiene datos desde el año 2013, se analizaron los periodos en los cuales se han presentado los fenómenos El Niño y La Niña, desde 1982 hasta el año 2019.

5.5.1 Datos de entrada del modelo HEC - HMS

Dentro de los requerimientos de información o datos de entrada del modelo hidrológico HEC - HMS se empleó la siguiente información:

- Cartografía básica (red hídrica, curvas de nivel subcuencas, parteaguas).
- Cartografía temática (uso actual del suelo, tipo de suelos).
- Información precipitación total diaria de las estaciones más cercanas.
- Hietogramas de precipitación.
- Información de caudales medios diarios y de caudales máximos mensuales de las estaciones.

En el modelo de cuenca, se seleccionó el hidrograma unitario del Soil Conservation Service (SCS) para transformar la precipitación neta en caudal y el método con el cual se trabajó el flujo base fue el del reservorio lineal.

5.5.2 Selección de la red hidroclimatológica

Para determinar la red hidroclimatológica se analizó el estado actual de las estaciones climatológicas (CO), pluviométricas (PM), pluviográficas (PG) y limnigráficas (LM) de la cuenca y sus áreas aledañas teniendo en cuenta los siguientes factores: localización, fecha de instalación, años de registro y estado actual de funcionamiento. Para la investigación se escogió un periodo común de registros. Para el caso de modelación se consideraron los datos de las estaciones automáticas en la cuenca y zonas aledañas.

5.5.3 Estructuración de la base de datos de entrada al modelo hidrológico

5.5.3.1 Cálculo de los parámetros hidrológicos iniciales

Inicialmente se calcularon los parámetros hidrológicos requeridos por los modelos internos del HEC-HMS, para representar del proceso de transferencia lluvia-caudal de forma continua. Entre estos modelos se encuentran, el SMA.

5.5.3.2 Modelo de pérdidas de agua SMA

El cálculo de la mayor parte de los parámetros iniciales que representan las pérdidas de agua en la cuenca se desarrolló a partir de la metodología planteada por GESHA et al., (2004); ya que posteriormente se corregirán en proceso de calibración.

A continuación, se citan los parámetros que representan las pérdidas de agua en el modelo SMA. Se calculó la capacidad máxima de almacenamiento en la vegetación que cubre la superficie del suelo de la cuenca (Canopy Storage) a partir de la Tabla 5.

Tabla 5. Capacidad máxima de almacenamiento en la vegetación

Tipo de vegetación	Intercepción (mm)
Matorral	4
Herbazal	3
Urbano y baldío	0
Desnudo	0
Plantación Forestal	9
Bosques Urbanos	3
Cultivos Agrícolas	1

Fuente: Gesha et al.,2004

Se calcularon las pérdidas en las depresiones del suelo - Surface Storage (SuS), representadas en la Tabla 6, donde según la pendiente de la subcuenca, se considera un valor para el almacenamiento en las depresiones.

Tabla 6. Almacenamiento de agua en las depresiones del terreno

Descripción	Pendiente (%)	Almacenamiento superficial (mm)
Pendientes	>30%	1
Pendientes	10 – 30%	12.7 – 6.4
Zonas Planas	0 – 5%	51

Fuente: Gesha et al.,2004

Para representar el comportamiento del agua en la capa superior del suelo, el modelo SMA, considera la máxima capacidad de infiltración del suelo ó “Maximun Infiltration”, la capacidad de almacenamiento del suelo o “Soil Storage”, la capacidad de almacenamiento en la zona de tensión del suelo o “Tension Storage” y la máxima

capacidad de percolación a través del lecho del suelo o Soil Percolation.

Se calculó la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (SS), donde fue necesario conocer la profundidad y la porosidad del mismo.

$$SS \text{ (mm)} = E * P$$

donde:

E: Profundidad de los suelos (mm).

P: Porcentaje de porosidad.

Se consideraron valores de capacidad efectiva de almacenamiento de agua en el suelo, en relación con su textura. Esta capacidad efectiva también se puede considerar como el agua libre disponible para pasar a los depósitos inferiores, para flujo subsuperficial y para evapotranspiración. Estos valores incluyen en la Tabla 7 el porcentaje máximo de almacenamiento de agua en la Tension Zone del suelo, utilizado para determinar la máxima capacidad de almacenamiento de agua en la zona de tensión del suelo (Tension Storage), para las diferentes texturas de suelo.

Tabla 7. Capacidad efectiva y porcentaje máximo de almacenamiento de agua en el suelo según la textura

Textura	Capacidad efectiva	% Máximo de almacenamiento en la (TS) del suelo
Arenosa	0.35	0.65
Arenosa - Franca	0.31	0.69
Franco - Arenosa	0.25	0.75
Franca	0.19	0.81
Franca - Limosa	0.17	0.83
Franca – Arcillo - Arenosa	0.14	0.86
Franco - Arcillosa	0.14	0.86
Franca – Arcillo - Limosa	0.11	0.89
Arcillo – Arenosa	0.09	0.91
Arcillo – Limosa	0.09	0.91
Arcillosa	0.08	0.92

Fuente: Gesha et al.,2004

En cuanto a la máxima capacidad de almacenamiento de agua en la Tension Zone del suelo se utilizó la fórmula:

$$TS \text{ (Tension Storage) (mm)} = \%TS * S$$

donde:

%TS: Porcentaje máximo de almacenamiento en la Tension Storage del suelo.

S: Capacidad de almacenamiento de agua del suelo (mm).

Hay que tener en cuenta que el valor de SS, es la suma del agua almacenada en la Tension Zone y la Upper Zone (capacidad efectiva), este último indica el agua disponible para pasar a los depósitos inferiores, para evapotranspiración y para flujo subsuperficial.

A partir de las texturas, se empleó la velocidad de infiltración del suelo calculada por personal de la CVC (tabla 8).

El análisis de cada uno de los parámetros hidrológicos anteriores, se basó en la información de suelos de la base de datos de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC).

Tabla 8. Máxima Capacidad de Infiltración Superficial

Textura	MI (cm/h)
Arenosa	7.6-11.4
Arenosa - Franca	7.6-11.4
Franco - Arenosa	7.6-11.4
Franca	3.8-7.6
Franca - Limosa	3.8-7.6
Franca – Arcillo - Arenosa	1.3-3.8
Franco - Arcillosa	0.0-1.3
Franco – Arcillo – Limosa	0.0-1.3
Arcillo – Arenosa	0.0-1.3
Arcillo – Limosa	0.0-1.3
Arcillosa	0.0-1.3

Fuente: CRC, 2018

* MI: Máxima capacidad de infiltración superficial

El valor de percolación hacia capas más profundas (Soil Percolation), se supone como el mismo de la Máxima Capacidad de Infiltración Superficial puesto que en el proceso de calibración, se ajustan todos los parámetros hidrológicos a la respuesta real de la cuenca.

5.5.4 Correlación entre variables macroclimáticas asociadas al Fenómeno El Niño y variables hidrometeorológicas en la zona de estudio

El análisis de correlación cruzada es usado para medir el grado de asociación lineal entre dos variables y se refiere al grado de variación conjunta que existe entre las variables relacionadas (Carvajal, 2007). Se estimaron coeficientes de correlación, por ser el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal que existe entre variables cuantitativas (Puertas y Carvajal, 2008), relacionando las variables meteorológicas asociadas al ENOS con las variables climáticas de las cuencas hidrográficas.

Para determinar si los coeficientes de correlación obtenidos tienen un valor estadísticamente significativo, se determinó el valor de significancia de los resultados con la probabilidad (S) de obtener un valor para el estadístico tan extremo como el

realmente observado si la hipótesis nula fuera cierta; para este caso de estudio, se rechazó la hipótesis nula de independencia lineal, es decir, la hipótesis de que el coeficiente de correlación vale cero en la población, y se determinó que existe relación lineal significativa cuando el nivel crítico fue menor que el nivel de significancia establecido en 5 % (Puertas y Carvajal, 2008).

5.5.4.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

La eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE es utilizado como criterio para evaluar el poder reproductivo del modelo hidrológico, que consiste en la comparación de la magnitud relativa de la varianza residual (“caudal simulado”) con la variación de los datos de medición (“caudal observado”), el cual se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{Observado} - Q_i^{Simulado})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{Observado} - Q^{Promedio})^2} \right]$$

El criterio de Nash-Sutcliffe es importante ya que es uno de los más usados en modelos hidrológicos porque expresa un criterio de ajuste de acuerdo al valor referencial obtenido y así mismo de acuerdo a su variabilidad se puede igualmente ir calibrando, es decir, modificando los parámetros significativos en el modelo para que los resultados arrojados se parezcan a los observados y así optimizar el modelo (Coy, 2017).

El criterio mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, E=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: Molnar, 2011

6. Resultados y discusión

6.1 Análisis exploratorio de datos

En el análisis exploratorio se definió el periodo de datos de las estaciones, se revisó que no hubiese menos del 10 % de datos faltantes; se efectuó la complementación de datos empleando la información de las estaciones aledañas; se realizaron pruebas gráficas con el fin de identificar datos atípicos, anómalos o espurios; se realizaron pruebas de normalidad, y de acuerdo a los resultados de estas últimas se llevaron a cabo pruebas cuantitativas, paramétricas y no paramétricas con el fin de identificar las tendencias en la media y en la varianza de las series de datos. Como ilustración del análisis gráfico con datos de la estación La Teresita, se obtuvo la figura 7, y en el anexo 2 se incluyeron los demás resultados.

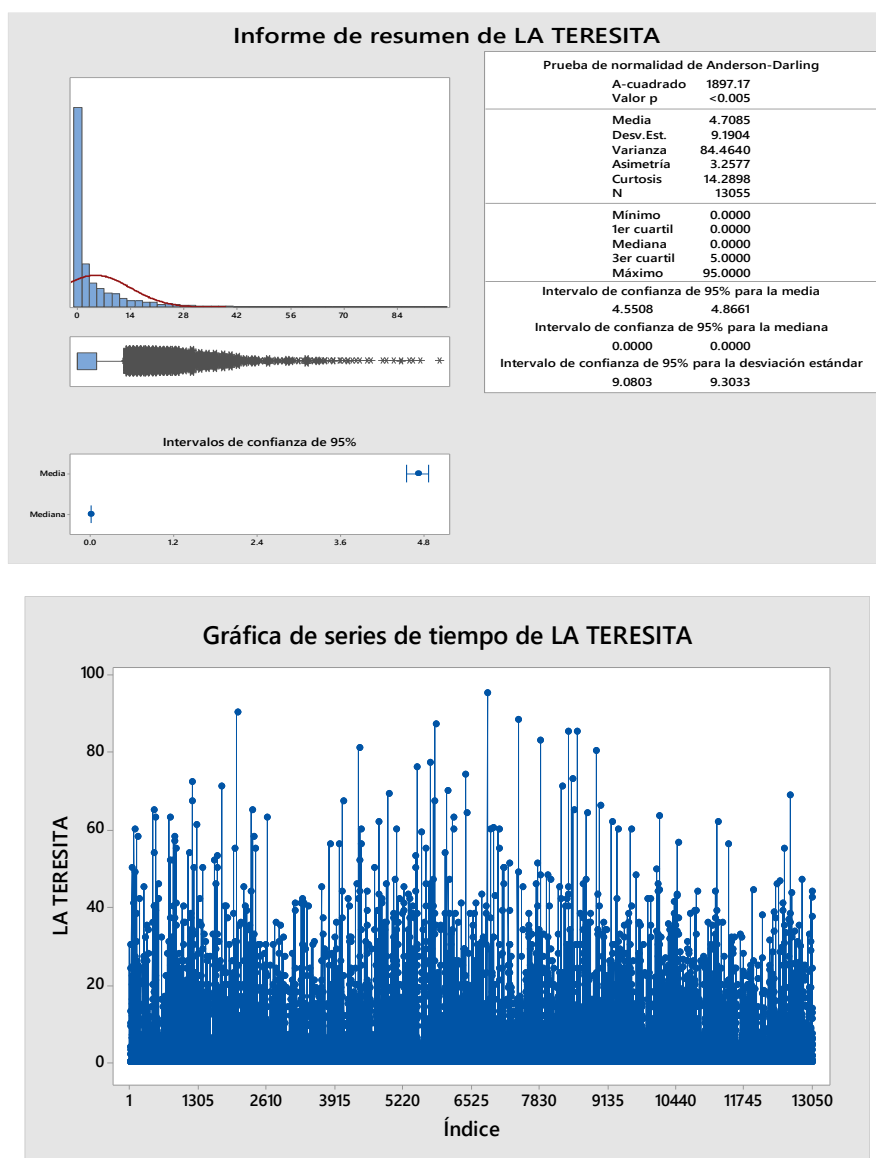


Figura No. 7. Resultado del análisis exploratorio gráfico – Est. La Teresita

A partir de los resultados del análisis exploratorio, se encontró que la base de datos conformada por las estaciones no presenta tendencia en la media y la varianza, lo que garantiza que los datos pueden ser utilizados en la tesis.

6.2 Distribución temporal de la precipitación

Como punto de partida para el análisis de la información pluviométrica y frente a la ausencia de estaciones a una altitud superior a los 2600 msnm en zona de bosque alto andino o de páramo, en diciembre de 2017 se instaló una estación pluviométrica del IDEAM a 3184 msnm en el campamento de PNNFC, sector Minas del Socorro (Alto del Buey). En consecuencia, e incluyendo los datos de los años 2018 y 2019, para apreciar el comportamiento de la precipitación se ordenaron por altitud las quince (15) estaciones seleccionadas y en la figura 8 se observa la distribución de las mismas.

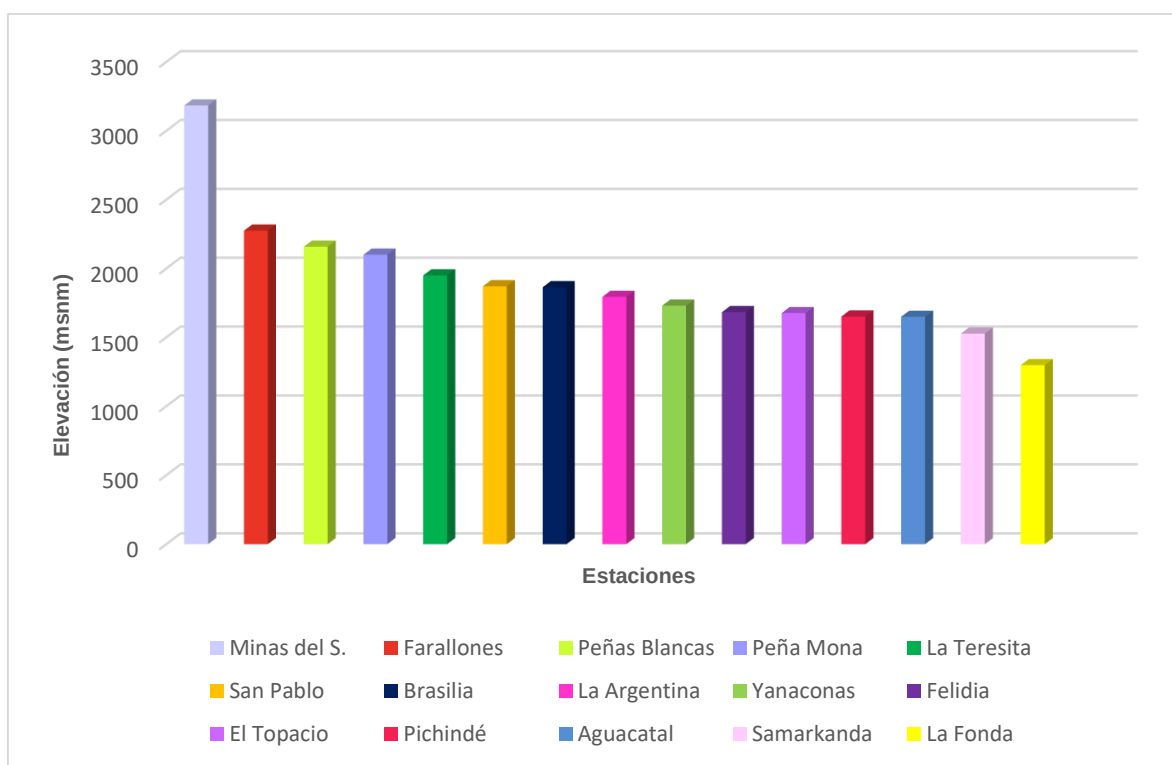


Figura No. 8. Distribución altitudinal de estaciones

En la tabla 10, se presenta la precipitación media mensual multianual de las estaciones que cuentan con registros desde 1982 y se emplearon para analizar el parámetro en la zona de estudio y en la que se encuentra aledaña a la misma.

**Tabla 10. Resumen de promedios mensuales multianuales de precipitación total (mm)
Estaciones seleccionadas (1982–2019)**

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pichindé	124,7	116,5	161,0	230,3	224,2	130,7	75,7	62,6	121,3	185,2	182,7	136,7	1751,6
Yanaconas	125,0	118,6	159,2	238,2	214,7	129,9	74,3	62,2	121,4	185,2	182,3	136,0	1746,8
Brasilia	94,4	98,2	139,5	200,2	195,0	111,9	67,1	63,7	101,4	144,0	145,0	98,3	1458,5
Aguacatal	83,7	75,9	119,0	178,9	148,7	81,2	49,5	45,3	101,1	130,6	137,1	86,3	1237,3
La Fonda	140,4	145,6	191,6	251,2	226,9	123,2	70,1	55,5	126,0	207,7	215,9	177,8	1931,8
San Pablo	91,1	98,7	125,2	198,1	181,9	106,5	70,5	74,1	116,4	175,6	176,9	107,1	1522,1
La Teresita	113,7	113,6	151,9	220,3	208,1	127,2	79,3	78,0	129,9	173,4	169,4	114,7	1679,4
El Topacio	223,6	209,9	270,5	352,2	303,6	168,0	112,0	91,7	184,9	320,0	338,9	236,9	2812,2
La Argentina	236,1	208,8	290,8	373,5	316,8	181,1	119,4	103,5	190,3	342,0	347,6	253,0	2962,8
Samarkanda	254,6	244,4	319,2	393,2	377,4	231,9	137,2	122,9	240,2	372,6	401,7	309,7	3404,9
Peña Mona	301,5	311,7	371,3	443,0	382,4	221,2	141,4	116,3	244,9	445,8	510,7	393,1	3883,3
Peñas Blancas	147,8	145,1	204,0	267,4	268,4	152,3	92,1	82,2	150,8	217,8	189,7	143,6	2061,0

Fuente: elaboración propia

En la tabla anterior, no se relacionó las estaciones: Felidia, Farallones y Minas del Socorro debido a que fueron instaladas después del año 2000. En términos generales, todas las estaciones analizadas tienen comportamiento de tipo bimodal y se observa que las estaciones con los valores más altos y bajos de precipitación son: Peña Mona y Aguacatal, respectivamente.

Para el caso de la estación Peña Mona, los máximos valores se presentan en el periodo octubre-diciembre, siendo el mes de noviembre el más lluvioso con un valor de precipitación total de 510,7 mm y el periodo más seco se identifica entre junio y agosto, siendo el más bajo este último con una precipitación total de 116,3 mm. El valor promedio mensual de precipitación de esta estación es de 323,8 mm.

En la estación pluviométrica Aguacatal los valores más altos de precipitación se presentan entre marzo y mayo, siendo el mes de abril el más lluvioso con un valor de 178,9 mm; el periodo más seco se define entre los meses de junio y agosto, pues el valor más bajo de precipitación corresponde al mes de agosto con 45,3 mm/mes. Esta estación presenta un valor promedio mensual de precipitación de 103,1 mm.

En la figura 9, se aprecia la distribución espacial de la precipitación media mensual multianual de las estaciones seleccionadas para estimar la oferta hídrica, las cuales fueron agrupadas por cuenca hidrográfica de norte a sur, así: cuenca del río Felidia (est. San Pablo y La Teresita), cuenca del río Pichindé (est. Pichindé, Yanaconas, Brasilia y Peñas Blancas), cuenca del río Meléndez (est. La Fonda) y cuenca del río Pance (est. El Topacio, La Argentina, Samarkanda y Peña Mona) mostrándose que los mayores valores de precipitación se presentan en esta última, donde sobresale que la estación con el mayor reporte de precipitación es Peña Mona y por el contrario la estación con el menor valor es Aguacatal.

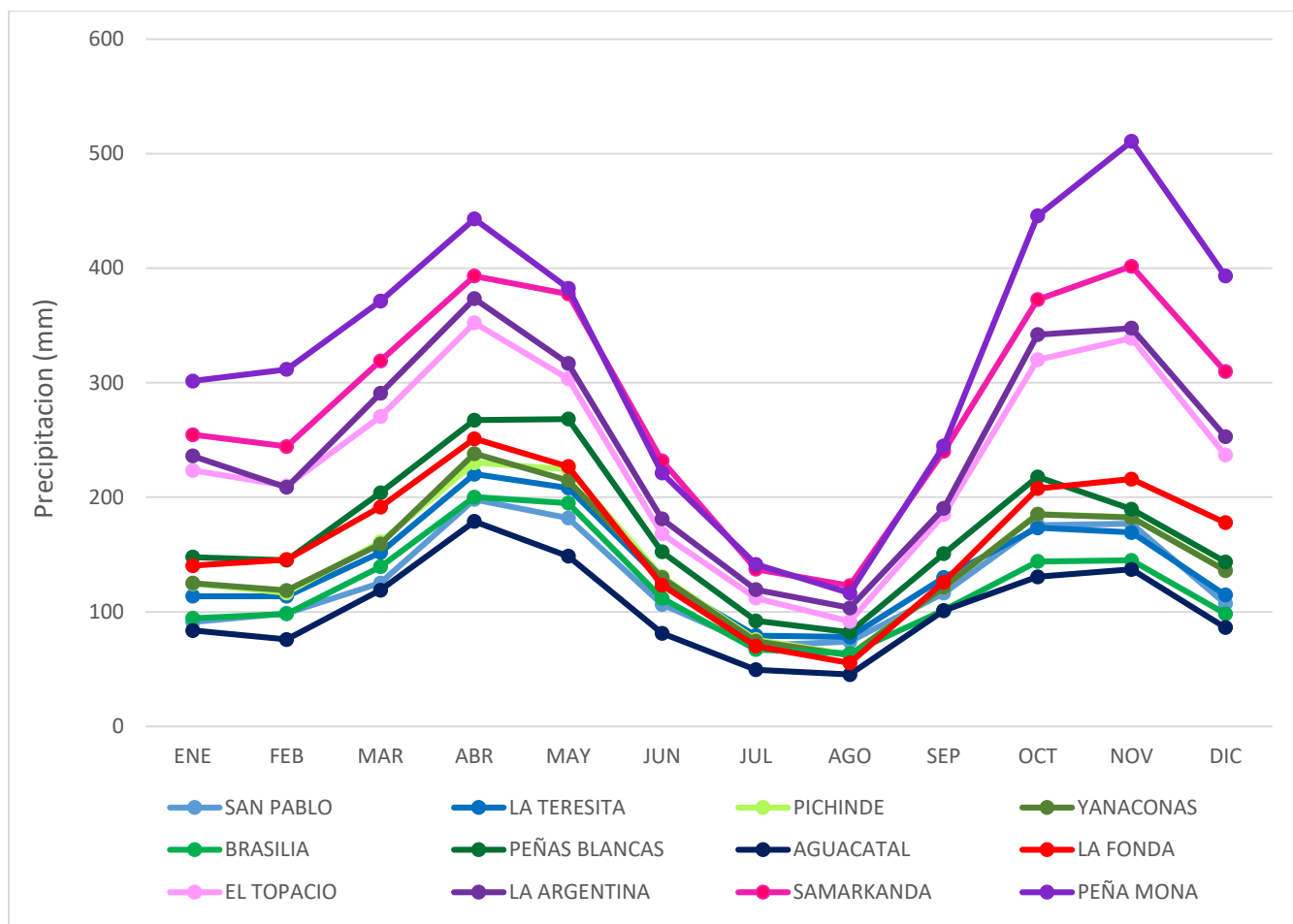


Figura No. 9. Promedios mensuales multianuales de precipitación total - Estaciones en zona de estudio (1982–2019)

Posteriormente se procedió a definir, por promedio aritmético, el valor mensual multianual de precipitación de la zona de estudio, correspondiente a 219 mm y la media anual en la región se estableció en 2630 mm. Los valores se visualizan en la figura 10.

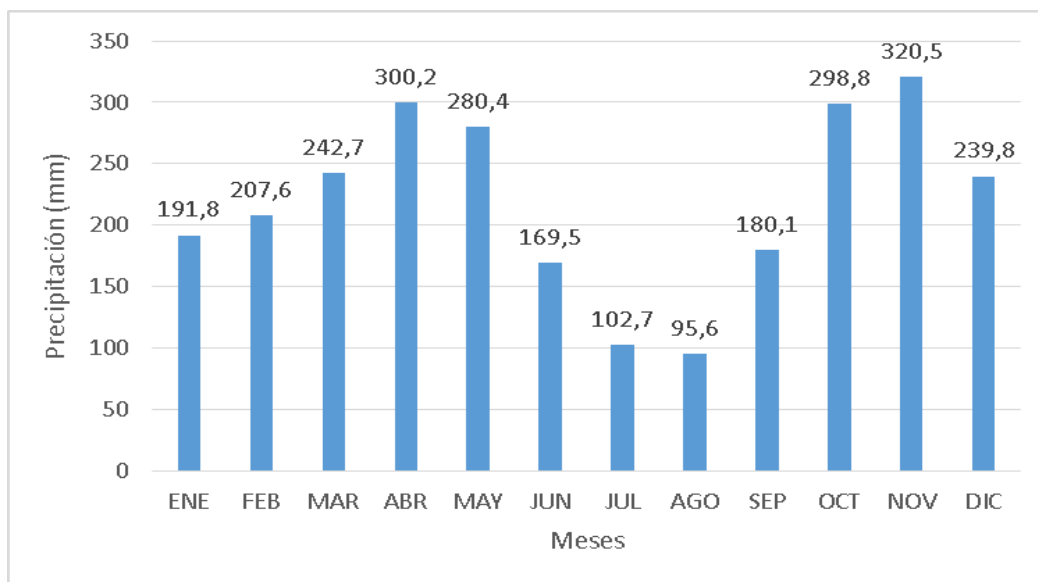


Figura No. 10. Distribución temporal de la precipitación media mensual multianual en la zona de estudio (1982–2019)

Con base en la gráfica anterior, se confirma que la zona de estudio presenta un régimen de precipitación de tipo bimodal conforme está definido para las regiones Andina y Pacífico. La precipitación mensual multianual define cuatro (4) periodos, dos (2) de estiaje (diciembre-febrero y junio-agosto) y dos (2) de invierno (marzo-mayo y septiembre-noviembre). Los valores máximos se presentan en abril y en noviembre, en tanto que la mínima pluviosidad se registra siempre en agosto.

El mes más lluvioso es noviembre con un valor de 320,5 mm y las precipitaciones más bajas se registran entre los meses de junio a agosto y diciembre a febrero, lo que confirma el comportamiento bimodal del parámetro en las estaciones seleccionadas. El mes con menor precipitación es agosto con un valor de 95,6 mm

También, se graficaron los valores de precipitación media mensual con base en los datos de estaciones de influencia en cada una de las cuencas hidrográficas de interés: Pance, Meléndez, Pichindé y Felidia, para los años calendario 2018 y 2019 con el propósito de incluir los datos de la estación Minas del Socorro, y el resultado se visualiza en la figura 11.

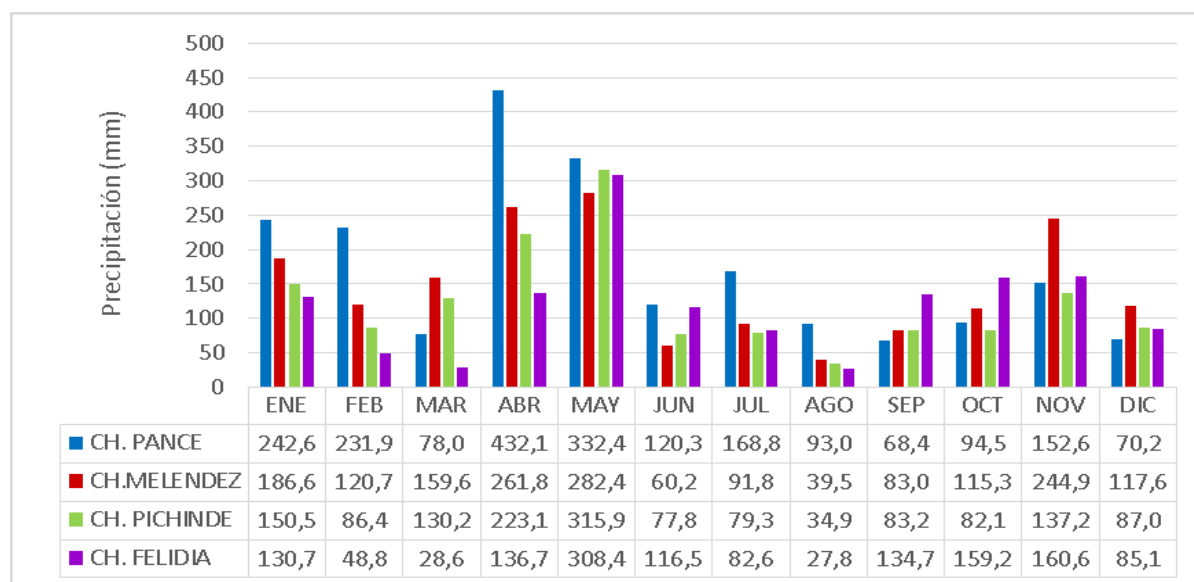


Figura No. 11. Precipitación media mensual multianual de las estaciones por cuenca hidrográfica – Polígonos de Thiessen

6.2.1 Curvas isoyetas

Con los datos obtenidos en las estaciones: Minas del Socorro, Farallones, Peñas Blancas, Peña Mona, La Teresita, San Pablo, Brasília, La Argentina, Yanaconas, Felidia, El Topacio, Pichindé, Aguacatal, Samarkanda y La Fonda, entre los años 1982–2019 se elaboraron las curvas isoyetas utilizando el método IDW (por ser el que mejor representa la distribución espacial de la precipitación en el departamento del Valle del Cauca) en la herramienta computacional ArcGIS para analizar la distribución de la precipitación y la coherencia en los datos mensuales de este parámetro en cada estación. El resultado también permitió verificar el comportamiento bimodal de la precipitación en el PNNFC (ver figuras 12 a 14).

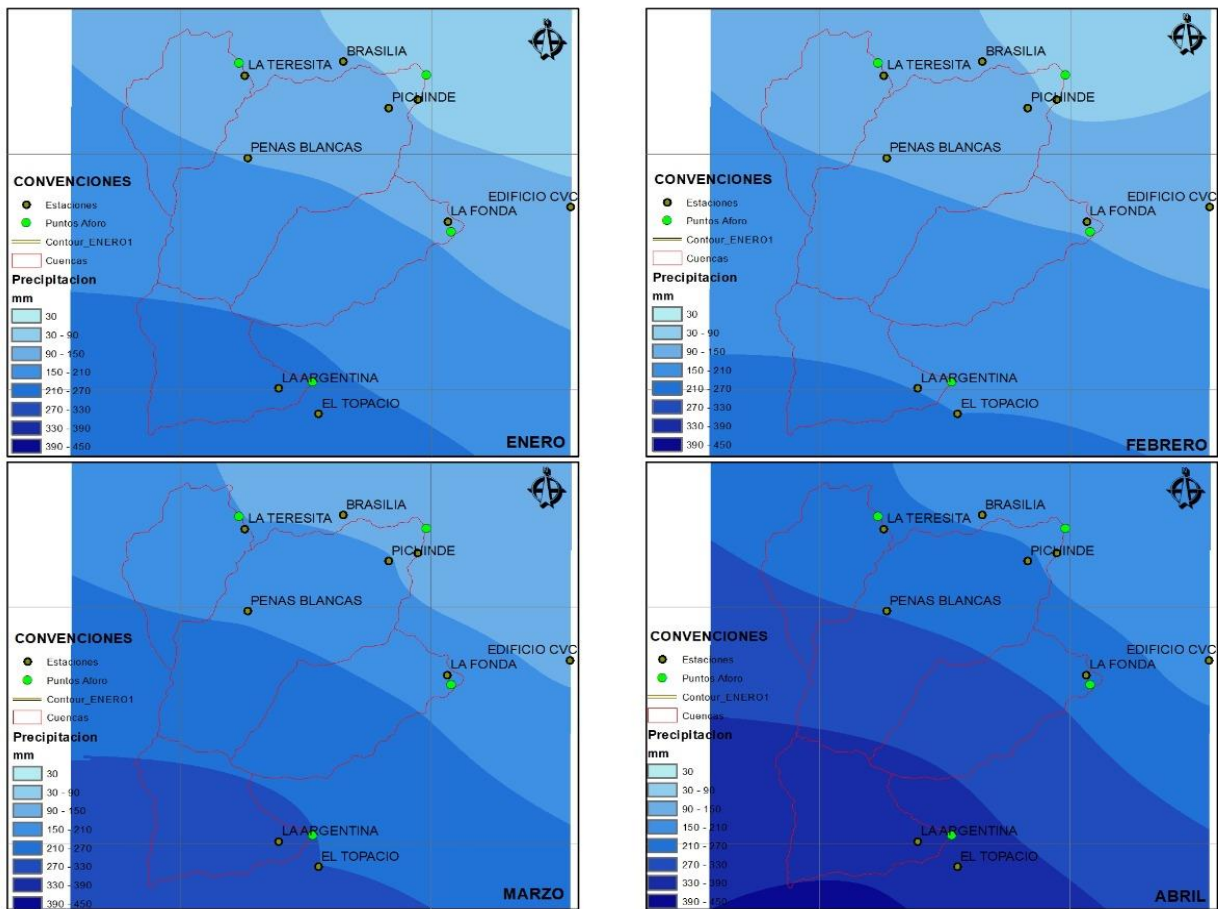


Figura No. 12. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual (ene-abr) en la zona de estudio (1982–2019)

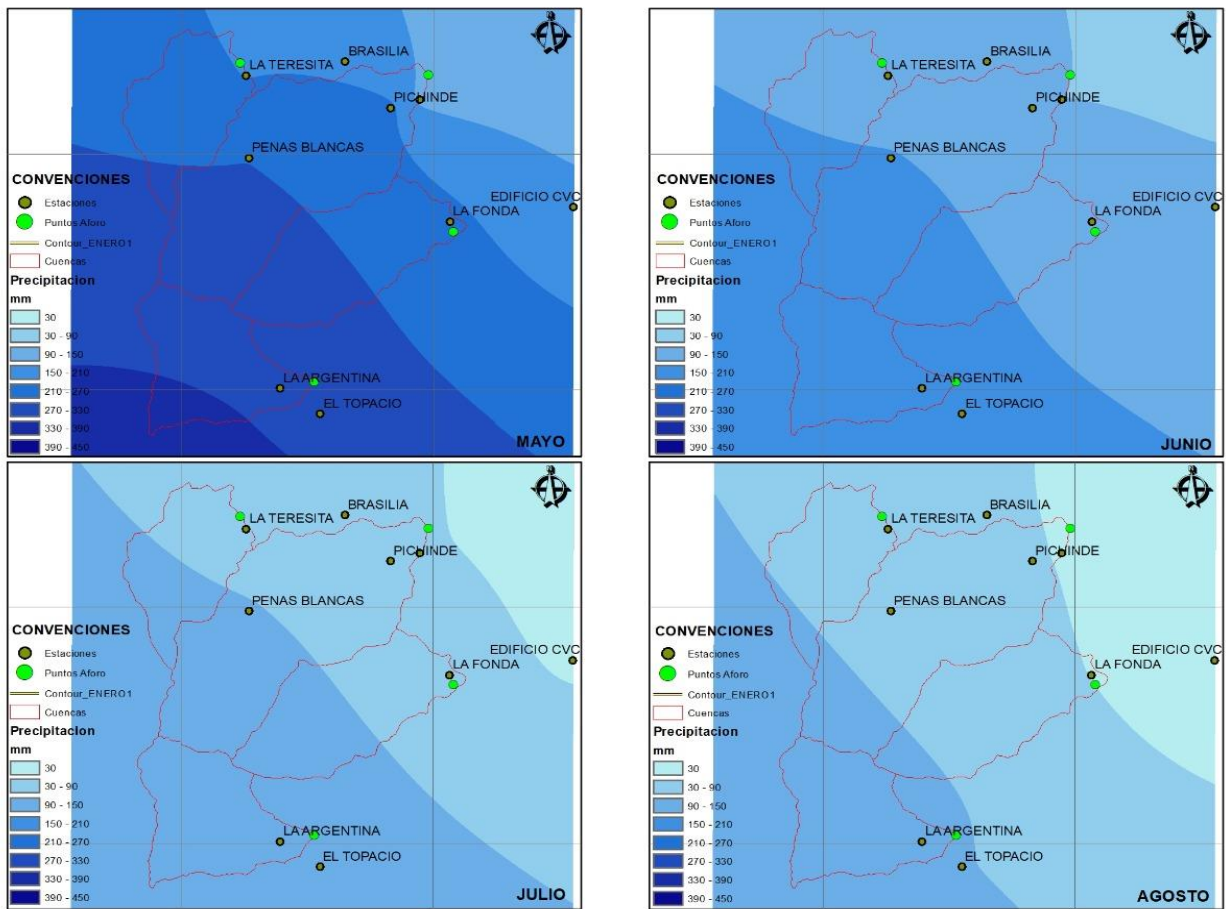


Figura No. 13. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual (may-ago) en la zona de estudio (1982–2019)

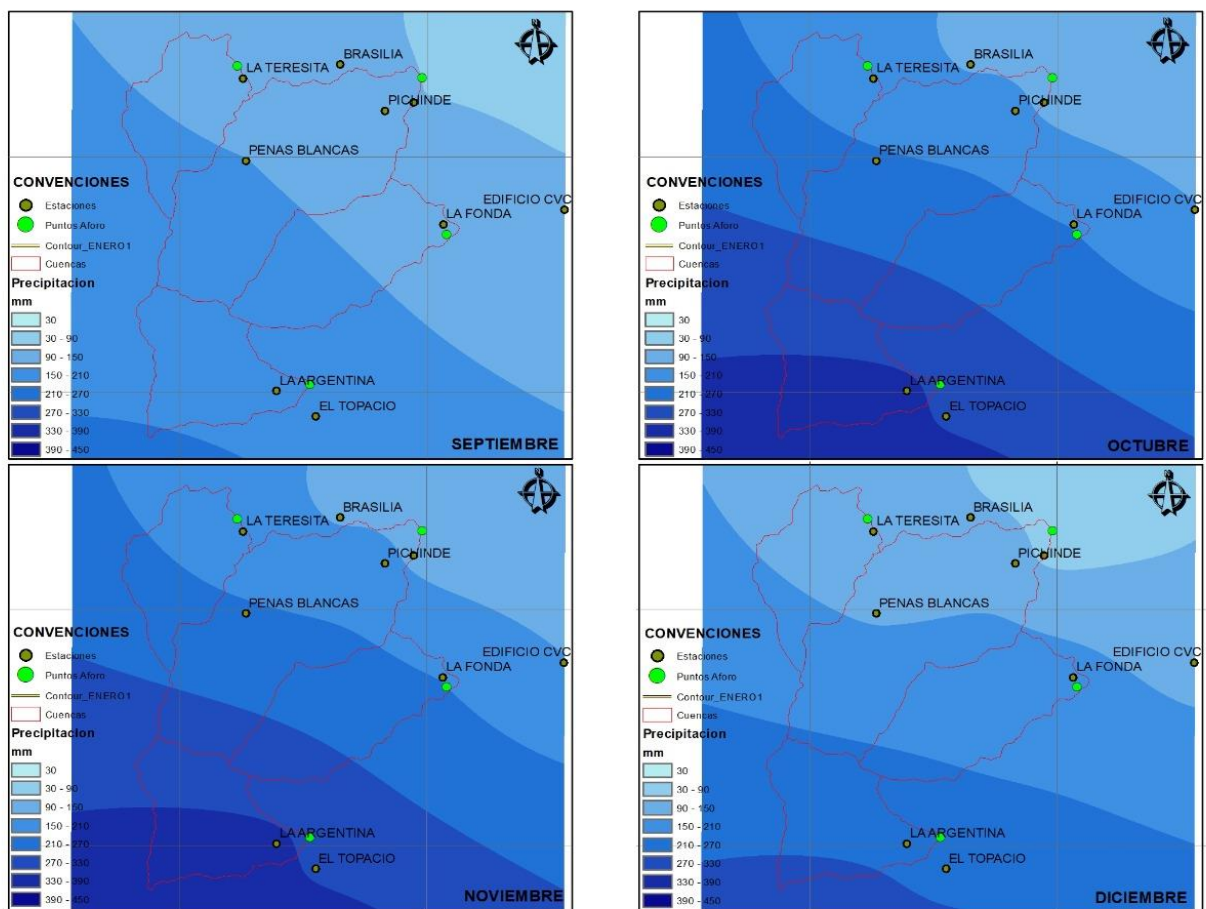


Figura No. 14. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual (sep-dic) en la zona de estudio (1982–2019)

De la igual forma, se realizaron cálculos con los datos obtenidos en la estación temporal Minas del Socorro y se construyeron las curvas correspondientes a los años 2018 y 2019 para revisar el comportamiento de la precipitación a dicha altitud (figura 15).

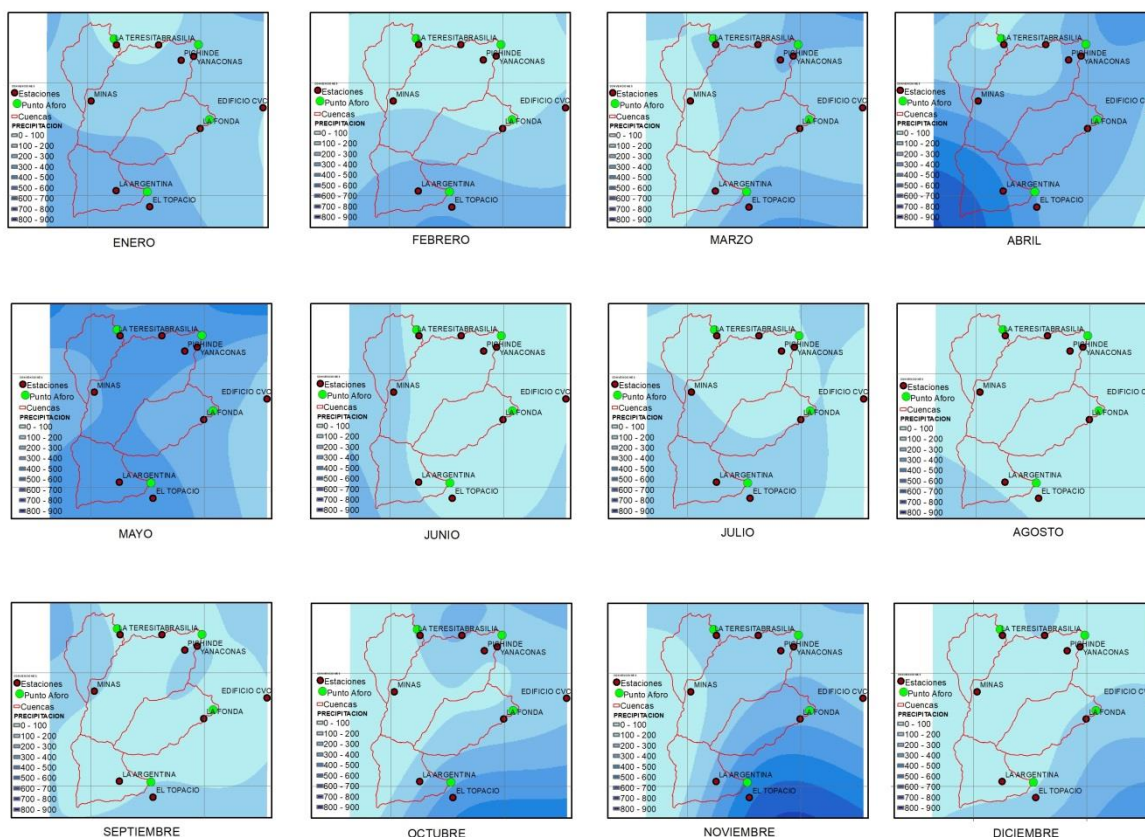


Figura No. 15. Distribución espacial de la precipitación mensual multianual en la zona de estudio (2018–2019)

De las curvas isoyetas, se puede aducir que es influyente el efecto del sistema montañoso del Parque y el comportamiento del viento sobre la precipitación medida en el pluviómetro de Minas del Socorro, debido a que se suavizan las tonalidades con los registros cercanos a los 3000 msnm frente al comportamiento del parámetro en las estaciones por debajo de los 2300 msnm, a pesar que en el sector no existen estaciones que permitan establecer el comportamiento del viento (velocidad y dirección).

6.2.2 Polígonos de Thiessen

Con el propósito de identificar la influencia específica de cada estación dentro de las cuencas analizadas, se elaboró los polígonos de Thiessen que se muestran en la figura 16, y con este insumo se ponderó la cobertura por estación y se logró confirmar la necesidad de fortalecer o complementar la red de estaciones.

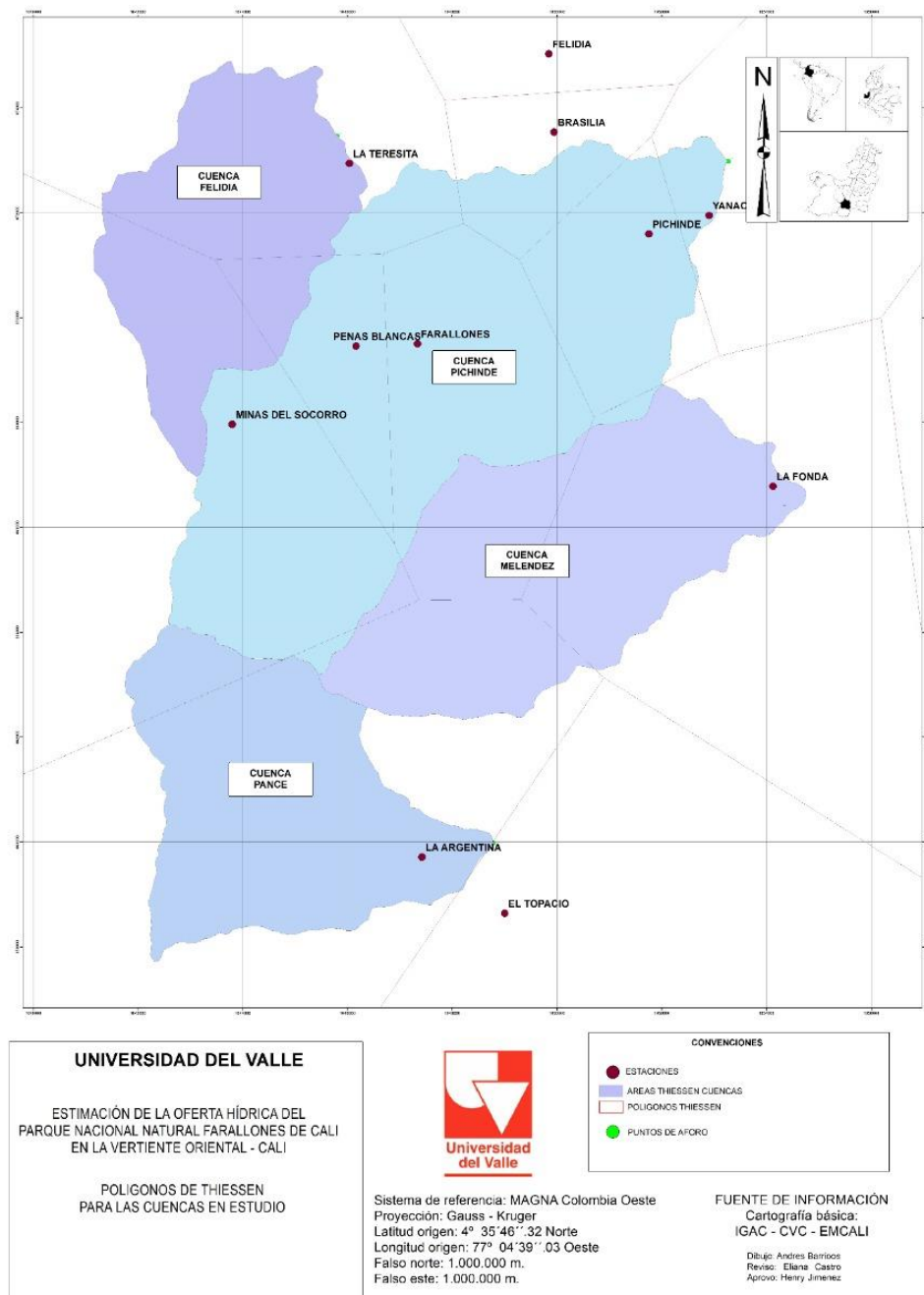


Figura No. 16. Mapa de polígonos de Thiessen en la zona de estudio

En la tabla 11 se aprecia el resultado del peso de cada una de las estaciones empleadas en el desarrollo de la tesis.

Tabla 11. Ponderación porcentual de las estaciones pluviométricas en las cuencas hidrográficas de la zona - Polígonos de Thiessen

ESTACION	PICHINDÉ	MELENDEZ	FELIDIA	PANCE
La Argentina	1.0	27.0	-	89.0
Minas del Socorro	28.0	2.0	54.0	11.0
El Topacio	-	-	-	-
Farallones	26.0	21.0	-	-
Peñas Blancas	12.0	-	17.0	-
La Fonda	1.0	50.0	-	-
Pichindé	18.0	-	-	-
Yanaconas	3.0	-	-	-
Brasilia	6.0	-	-	-
La Teresita	5.0	-	29.0	-

Fuente: elaboración propia

Con base en la ponderación definida, se determina que la cuenca hidrográfica mejor instrumentada es la del río Pichindé.

De acuerdo al objetivo general y por la disparidad en el periodo de datos de las estaciones al interior PNNFC y circundantes a este, se estimó importante analizar exclusivamente los años 2018 y 2019, para incluir los datos de la estación Minas del Socorro, considerándose importante para la oferta hídrica cuantificar la cantidad de precipitación diaria medida a dicha altitud.

Sin embargo, se logró corroborar que la estación Minas del Socorro no arroja los máximos valores de precipitación, atribuible a que se encuentra emplazada en zona de páramo donde se presenta una sustancial disminución de la pluviosidad y puede haber mayor efecto de la precipitación horizontal (niebla) y por dicha situación, para lograr un análisis más detallado y ajustado a la realidad, es relevante contribuir a la instrumentación del Parque mediante la instalación de neblinómetros y la construcción e instalación de estaciones hidrometeorológicas automáticas.

Con base en las estaciones convencionales empleadas, se observó que el mayor valor de precipitación se mantuvo aproximadamente hasta los 2300 msnm y a partir de dicha altitud, los datos de este parámetro empezaron a disminuir por la proximidad a la zona de páramo.

En las figuras 17 y 18, se muestran los datos de precipitación mensual para los años 2018 y 2019, en orden decreciente de altitud, incluyendo la estación Minas del Socorro.

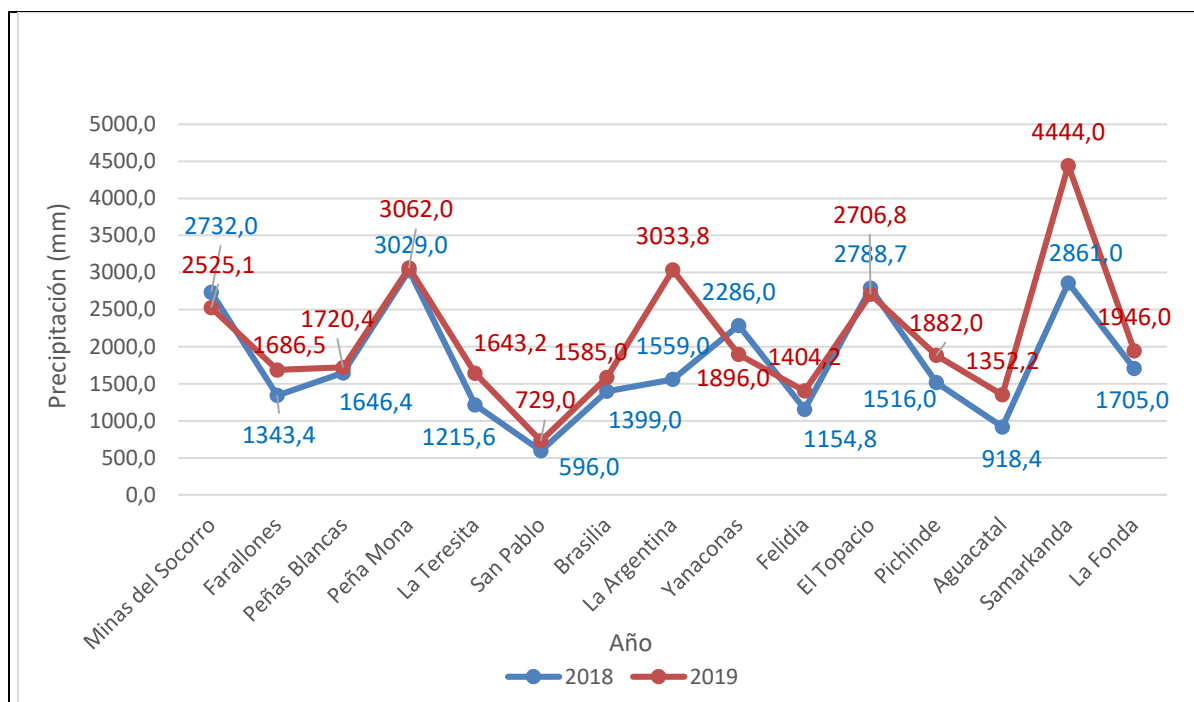


Figura No. 17. Precipitación total anual 2018–2019

Ante la respuesta obtenida en el análisis por orden decreciente de altitud, referido a que las estaciones cercanas a los 2100 msnm registran mayores datos de precipitación que las que superan este límite, no fue concordante el resultado con este planteamiento puesto que gráficamente no se pudo comprobar el incremento de la precipitación con la disminución de la altitud y son evidentes las oscilaciones en los resultados mensuales.

Para procurar obtener una respuesta más acertada sobre el comportamiento de la precipitación, se graficaron los datos totales anuales de las estaciones con orientación norte–sur, notándose un comportamiento más acorde a la altitud, como se aprecia en la figura 18.

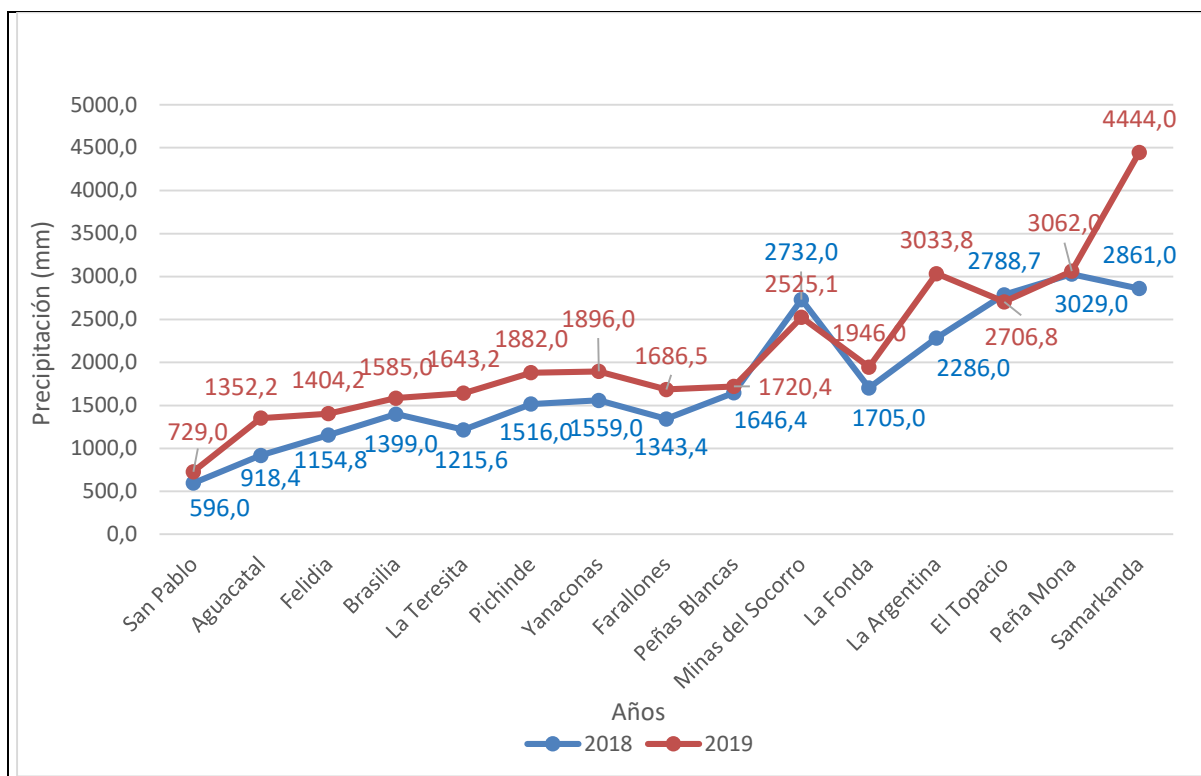


Figura No. 18. Precipitación total anual 2018-2019 (Orientación N-S)

Por efecto orográfico, se detectó que a pesar de encontrarse en altitudes cercanas las estaciones Peñas Blancas (2158 msnm) y Peña Mona (2100 msnm) registran un valor total anual de precipitación muy diferente: 1646,6 mm y 3029 mm para el año 2018 y 1720.4 mm y 3062 mm para el año 2019, respectivamente.

Por citar un ejemplo, los mayores valores de precipitación se presentan en la estación Peña Mona, a 2100 msnm en la cuenca del río Jamundí y a pesar que la estación Peñas Blancas se encuentra a 2158 msnm en la cuenca del río Pichindé, es aplicable “que la disminución en la precipitación se atribuye al hecho que el movimiento de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) es el factor que determina el régimen bimodal de la precipitación y también domina los procesos orográficos y convectivos” (Guzmán et al., 2014).

6.3 Comportamiento de la precipitación en eventos ENOS

Con los datos de precipitación de las estaciones seleccionadas se procedió a categorizar los valores mensuales con base en la clasificación establecida por el IDEAM (tabla 2). Se identificó el grado de alteración de la precipitación por cuenca hidrográfica, conforme las mediciones realizadas en las estaciones representativas de cada cuenca durante los meses que se presentaron los fenómenos de El Niño y de La Niña. A partir de los datos promedios mensuales de precipitación se definió si en los meses en que se presentaron los eventos, hubo exceso o déficit de precipitación.

6.3.1 Fenómeno de El Niño

Para analizar los efectos mensuales del fenómeno de El Niño, en los periodos: 1982-1983, 1997-1998 y 2015-2016, se procedió a determinar el comportamiento de la precipitación de las estaciones emplazadas en las cuencas hidrográficas de los ríos Pance, Meléndez, Pichindé y Felidia, a partir de los promedios mensuales multianuales de cada estación, acorde a los datos publicados en el portal de la CVC.

6.3.1.1 Cuenca hidrográfica río Pance

Para analizar el comportamiento en la cuenca hidrográfica se emplearon los datos mensuales recolectados en las estaciones de incidencia, con las cuales se construyeron las curvas isoyetas. A partir de estas se aplicaron los respectivos porcentajes para determinar los intervalos mes a mes y clasificar el dato obtenido. Los datos se extrajeron de la información consultada en el portal de la CVC y con ellos se efectuaron los respectivos cálculos. A manera de ilustración, se presentan los cálculos efectuados para definir los intervalos para el mes de mayo de 1982 de la tabla 12, teniendo en cuenta la normal climatológica.

Precipitación total mayo 1982 = 227 mm

Precipitación media mensual multianual de mayo **PMM** = 314.75 mm

20% PMM = 62.95 mm

Definición **rango normal**

314.75 mm + 62.95 mm = 377.7 mm

314.75 mm – 62.95 mm = 251.8 mm

Definición límite superior **rango excedente**

314.75 mm + (62.95 mm *3) = 503.6 mm

Definición límite inferior **rango déficit**

314.75 mm - (62.95 mm *3) = 125.9 mm

Tabla 12. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pance - Fenómeno El Niño

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982 – 1983					227,0	133,5	37,0	6,5	219,0	385,5	304,0	258,0
	82,5	11,5	357,5	353,0	393,0	201,0	49,0	43,5				
1997 - 1998					247,5	183,0	11,5	6,0	291,5	305,0	483,5	53,0
	36,5	252,0	305,0	471,0	372,5							
2015 - 2016											294,3	69,4
	93,3	124,5	324,2									

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PMM (Standard 1981-2010)	232,9	212,7	286,4	360,0	314,7	189,4	122,1	110,6	200,0	333,2	355,1	251,3
EXC SEVERO	>372,6	>340,2	>458,3	>576,0	>503,6	>303,1	>195,3	>176,9	>320,0	>533,2	>568,2	>402,1
EXCEDENTE	372,6	340,2	458,3	576,0	503,6	303,1	195,3	176,9	320,0	533,2	568,2	402,1
	279,6	255,3	343,8	432,1	377,8	227,4	146,6	132,8	240,1	400,0	426,2	301,7
NORMAL	279,5	255,2	343,7	432,0	377,7	227,3	146,5	132,7	240,0	399,9	426,1	301,6
	186,3	170,1	229,2	288,0	251,8	151,6	97,6	88,5	160,0	266,6	284,1	201,0
DEFICIT	186,2	170,0	229,1	287,9	251,7	151,5	97,5	88,4	159,9	266,5	284,0	200,9
	93,2	85,1	114,6	144,0	125,9	75,8	48,8	44,2	80,0	133,3	142,0	100,5
DEF SEVERO	<93,2	<85,1	<114,6	<144,0	<125,9	<75,8	<48,8	<44,2	<80,0	<133,3	<142,0	<100,5

Fuente: elaboración propia

Por los totales de precipitación presentados durante la duración del fenómeno en el periodo 1982-1983, se puede aseverar que en la cuenca del río Pance se presentó en la mayoría de los meses déficit de precipitación, con respecto a los valores promedios normales, especialmente entre mayo y agosto de 1982 y enero y febrero de 1983, en vista de la reducción de la precipitación entre un 40 y 80% de lo normal. Los meses de julio, agosto y diciembre de 1997 y enero de 1998, también presentaron una condición severa de reducción de la precipitación y en el periodo 2015-2016, la condición más grave se presentó en el bimestre diciembre-enero, catalogándose como déficit severo.

6.3.1.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez

Para el análisis en esta cuenca, de igual manera se emplearon las estaciones con incidencia dentro del área de estudio (ver tabla 13).

Tabla 13. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Meléndez - Fenómeno El Niño

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982 - 1983					228,0	69,0	77,0	12,0	170,0	371,0	228,0	253,0
	53,0	24,0	341,0	308,0	185,0	194,0	67,0	35,0				
1997 - 1998					201,0	218,0	7,0	3,0	173,0	133,0	330,0	12,0
	11,0	125,0	117,0	222,0	320,0							
2015 - 2016											105,0	8,0
	84,0	26,0	259,0									
PMM (Standard 1981-2010)	141,9	147,7	196,4	239,7	239,9	133,7	76,2	64,6	132,8	209,3	230,3	178,4
EXC SEVERO	>227,0	>236,3	>314,2	>383,5	>383,9	>213,9	>121,9	>103,4	>212,5	>334,9	>368,4	>285,4
EXCEDENTE	227,0	236,3	314,2	383,5	383,9	213,9	121,9	103,4	212,5	334,9	368,4	285,4
	170,4	177,3	235,8	287,7	288,0	160,5	91,5	77,6	159,5	251,3	276,4	214,2
NORMAL	170,3	177,2	235,7	287,6	287,9	160,4	91,4	77,5	159,4	251,2	276,3	214,1
	113,5	118,2	157,1	191,8	191,9	107,0	61,0	51,7	106,2	167,5	184,2	142,7
DEFICIT	113,4	118,1	157,0	191,7	191,8	106,9	60,9	51,6	106,1	167,4	184,1	142,6
	56,8	59,1	78,6	95,9	96,0	53,5	30,5	25,8	53,1	83,7	92,1	71,4
DEF SEVERO	<56,8	<59,1	<78,6	<95,9	<96,0	<53,5	<30,5	<25,8	<53,1	<83,7	<92,1	<71,4

Fuente: elaboración propia

En la cuenca del río Meléndez, no se apreció tan marcado el déficit de precipitación entre los años 1982-1983, aunque los dos primeros meses de 1983, permitieron catalogar el valor mensual total como déficit severo.

Los meses de julio, agosto y diciembre de 1997 y enero de 1998, a pesar de pertenecer a la temporada seca, se presentaron valores de precipitación muy por debajo de lo normal (una reducción menor al 40% del rango estimado).

En el evento de 2017-2018, la afectación estuvo muy marcada debido a que la mayor parte del periodo, arrojó valores deficitarios de precipitación.

6.3.1.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé

En la cuenca hidrográfica del río Pichindé, para la revisión de los efectos del Fenómeno de El niño, se emplearon las estaciones de incidencia y la categorización se observa en la tabla 14.

Tabla 14. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pichindé - Fenómeno El Niño

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982 - 1983					253,5	91,8	76,3	23,5	167,5	198,8	145,3	97,0
	26,5	14,8	256,0	202,8	199,5	145,8	47,5	23,8				
1997 - 1998					276,3	178,3	5,0	2,5	169,5	137,0	344,9	23,5
	41,3	163,0	199,8	399,0	287,0							
2015 - 2016											171,5	27,5
	96,3	68,7	176,5									
PMM (Standard 1981-2010)	123,7	120,3	162,5	227,2	227,2	139,1	80,0	74,1	124,7	185,0	177,6	130,1
EXC SEVERO	>198,0	>192,4	>260,0	>363,5	>363,6	>222,6	>128,0	>118,5	>199,4	>295,9	>284,2	>208,1
EXCEDENTE	198,0	192,4	260,0	363,5	363,6	222,6	128,0	118,5	199,4	295,9	284,2	208,1
	148,6	144,4	195,1	272,8	272,8	167,1	96,1	89,0	149,7	222,0	213,3	156,2
NORMAL	148,5	144,3	195,0	272,7	272,7	167,0	96,0	88,9	149,6	221,9	213,2	156,1
	99,0	96,2	130,0	181,8	181,8	111,3	64,0	59,2	99,7	148,0	142,1	104,0
DEFICIT	98,9	96,1	129,9	181,7	181,7	111,2	63,9	59,1	99,6	147,9	142,0	103,9
	49,5	48,1	65,0	90,9	90,9	55,7	32,0	29,6	49,9	74,0	71,1	52,0
DEF SEVERO	<49,5	<48,1	<65,0	<90,9	<90,9	<55,7	<32,0	<29,6	<49,9	<74,0	<71,1	<52,0

Fuente: elaboración propia

En lo referente a la cuenca hidrográfica del río Pichindé, de acuerdo a las cuatro estaciones analizadas, se nota la marcada reducción de la precipitación en la temporada seca entre los años 1982 y 1983, catalogándose deficitaria con respecto al rango normal.

El mismo comportamiento se aprecia en los periodos 1997-1998 y 2015-2016, porque en la temporada seca los valores totales de precipitación se clasificaron deficitarios, evidenciándose la concordancia en los datos contabilizados en las estaciones.

6.3.1.4 Cuenca hidrográfica río Felidia

Para lo concerniente a la cuenca del río Felidia, se utilizaron los datos de las estaciones de referencia y en la tabla 15 se muestra la clasificación realizada.

Tabla 15. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Felidia - Fenómeno El Niño

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982 - 1983					242,0	85,5	108,0	17,0	185,0	212,5	130,0	143,0
	38,5	10,0	234,0	204,5	190,5	92,5	75,0	25,0				
1997 - 1998					244,0	167,0	15,5	2,0	186,5	138,0	328,5	41,0
	23,5	149,5	213,5	256,0	319,0							
2015 - 2016											123,9	24,1
	22,6	49,8	153,3									
PMM (Standard 1981-2010)	101,9	107,7	138,8	210,8	194,3	126,0	79,5	84,7	132,6	182,1	177,0	107,3
EXC SEVERO	>163,1	>172,4	>222,1	>337,3	>310,9	>201,6	>127,2	>135,5	>212,1	>291,3	>283,3	>171,7
EXCEDENTE	163,1	172,4	222,1	337,3	310,9	201,6	127,2	135,5	212,1	291,3	283,3	171,7
	122,4	129,4	166,7	253,1	233,3	151,3	95,5	101,8	159,2	218,6	212,6	128,9
NORMAL	122,3	129,3	166,6	253,0	233,2	151,2	95,4	101,7	159,1	218,5	212,5	128,8
	81,5	86,2	111,0	168,7	155,5	100,8	63,6	67,8	106,1	145,6	141,6	85,8
DEFICIT	81,4	86,1	110,9	168,6	155,4	100,7	63,5	67,7	106,0	145,5	141,5	85,7
	40,8	43,1	55,5	84,3	77,7	50,4	31,8	33,9	53,0	72,8	70,8	42,9
DEF SEVERO	<40,8	<43,1	<55,5	<84,3	<77,7	<50,4	<31,8	<33,9	<53,0	<72,8	<70,8	<42,9

Fuente: elaboración propia

En esta cuenca, las estaciones seleccionadas arrojaron totales de precipitación muy inferiores a lo normal en el primer bimestre de los años 1983, 2016 y en enero de 1998 con cuantificación menor al 40% de los valores normales. Además, el mes de agosto produjo un déficit severo de la precipitación, lo que demuestra el gran impacto que produjo el fenómeno.

6.3.2 Fenómeno de La Niña

Con respecto a la categorización de la precipitación para este fenómeno, en las figuras precedentes se aprecia el comportamiento de la misma en cada una de las cuencas hidrográficas, teniendo presente que los rangos de clasificación ya se referenciaron en las tablas utilizadas para la determinación del efecto del Fenómeno El Niño. En este caso, los periodos analizados fueron: 1988–1989, 2007–2008 y 2010–2011.

6.3.2.1 Cuenca hidrográfica río Pance

Para la cuenca hidrográfica del río Pance se categorizó la precipitación total mensual y el resultado fue consignado en la tabla 16.

Tabla 16. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pance - Fenómeno La Niña

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1988 - 1989	279,5	213,0	232,0		289,5	280,5	304,0	247,0	378,5	348,0	625,5	335,0
2007 - 2008	283,6	394,5					109,5	197,1	85,0	542,5	282,5	399,4
2010 - 2011	110,0	376,5	225,6	533,3	240,6		281,4	172,2	218,4	340,3	637,4	452,9
PMM (Standard 1981-2010)	232,9	212,7	286,4	360,0	314,7	189,4	122,1	110,6	200,0	333,2	355,1	251,3

Fuente: elaboración propia

En esta cuenca las excesivas lluvias presentadas a mitad del año 1988, se superpusieron a la temporada seca característica de esta época, como también se visualiza en las implicaciones del evento expresado durante el año 2010, en cuyo año se presentó un invierno de gran magnitud, definido por especialistas como uno de los más fuertes en la región Andina. La acción del fenómeno de La Niña se prolongó hasta febrero de 2011, mes en el cual también se presentaron excesos severos de precipitación.

En lo que respecta al fenómeno correspondiente al periodo 2007-2008, los excesos de precipitación se obtuvieron en agosto, octubre y diciembre de 2007 y enero y febrero de 2008, periodo definido para la época de estiaje.

6.3.2.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez

Para el análisis en esta cuenca también se emplearon las estaciones con incidencia en la cuenca y la categorización se aprecia en la tabla 17.

Tabla 17. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Meléndez - Fenómeno La Niña

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1988 - 1989	221,0	173,0	147,0		265,0	226,0	161,0	163,0	244,0	159,0	408,0	208,0
2007 - 2008	165,0	360,0					80,0	123,0	46,0	236,0	171,0	248,0
2010 - 2011	104,0	341,0	65,0	543,0	105,0		188,0	137,0	116,0	161,0	348,0	183,0
PMM (Standard 1981-2010)	141,9	147,7	196,4	239,7	239,9	133,7	76,2	64,6	132,8	209,3	230,3	178,4

Fuente: elaboración propia

En esta cuenca se aprecia el mismo comportamiento que en la cuenca del río Pance, con el gran incremento de la precipitación entre junio y septiembre, además de noviembre de 1988.

En los años 2007 y 2008 se contabilizaron los mayores acumulados, muy por encima del promedio normal en los meses de agosto, diciembre y febrero, característicos de

temporada seca. Sin embargo, durante el año 2010, los grandes excesos se reportaron entre julio y agosto y en febrero y abril de 2011.

6.3.2.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé

En alusión a la cuenca hidrográfica del río Pichindé, los resultados constituyen la tabla 18.

Tabla 18. Categorización de la precipitación total (mm) CH río Pichindé - Fenómeno La Niña

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1988 - 1989					174,8	221,3	111,8	121,3	117,0	183,3	243,0	192,3
	159,5	156,3	94,3									
2007 - 2008							55,3	153,5	99,8	233,8	136,1	128,3
	213,3	253,0										
2010 - 2011							264,8	83,0	143,8	172,0	313,3	193,5
	76,8	203,3	89,3	260,5	192,0							
PMM (Standard 1981-2010)	123,7	120,3	162,5	227,2	227,2	139,1	80,0	74,1	124,7	185,0	177,6	130,1

Fuente: elaboración propia

En la cuenca hidrográfica del río Pichindé, de igual forma se nota el comportamiento atípico de la precipitación en los meses de temporada seca, de los años 1988 y 1989.

Para el periodo 2007-2008, el comportamiento del segundo semestre del año 2007 fue más ajustado a los valores normales de lluvia y el año 2008 arrancó con algunos excesos.

En el evento del 2010-2011, el comportamiento predominante fue de precipitaciones con valores próximos al rango normal, a excepción de los meses de julio y noviembre de 2010 y febrero de 2011.

6.3.2.4 Cuenca hidrográfica río Felidia

Con respecto a la cuenca del río Felidia, el resultado se detalla en la tabla 19.

Tabla 19. Categorización de la precipitación total mensual (mm) CH río Felidia - Fenómeno La Niña

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1988 - 1989					137,0	235,5	131,5	169,0	118,5	192,0	229,0	109,0
	149,5	122,5	110,0									
2007 - 2008							55,0	141,0	91,0	212,5	91,0	104,5
	155,0	155,5										
2010 - 2011							194,3	91,5	112,6	176,3	361,8	141,6
	78,2	213,3	113,9	333,9	235,8							
PMM (Standard 1981-2010)	101,9	107,7	138,8	210,8	194,3	126,0	79,5	84,7	132,6	182,1	177,0	107,3

Fuente: elaboración propia

En esta cuenca se presenta la misma situación de las anteriores, donde se aprecia que durante la temporada seca de medio año, los valores de precipitación fueron superiores a los valores promedios mensuales multianuales en los meses definidos como temporada seca.

6.4 Análisis de la temperatura

Para el análisis de algunas variables climatológicas como son la temperatura y la humedad relativa; se utilizaron las series de registros de las estaciones La Teresita (1950 msnm), El Topacio (1676 msnm), Edificio CVC (985 msnm) y Universidad del Valle (985 msnm), además de la precipitación mensual de las estaciones pluviométricas y pluviográficas de la red de la CVC.

Los valores de temperatura en la zona de influencia de la estación La Teresita, de acuerdo con los promedios anuales, oscilan entre 15.8°C y 18.8°C coincidiendo el período más caliente con más seco y el periodo más frío con el de mayor pluviosidad. En la figura 19, se presentan los valores promedios mensuales de temperaturas máximas, medias y mínimas de la estación La Teresita, en la cual se registra una temperatura media de 16.8°C, con mínimos de 15.4°C y máximos de 19.6°C.

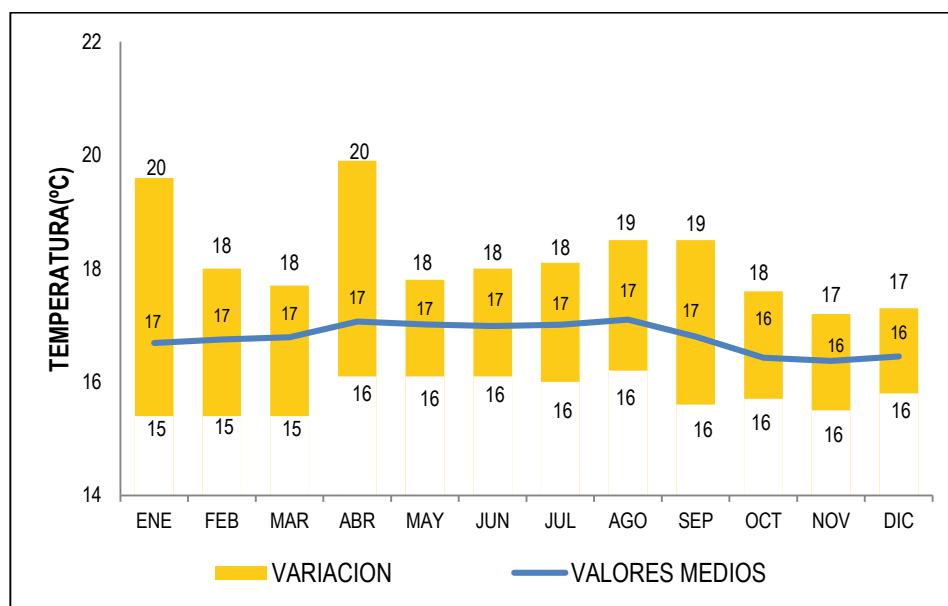


Figura No. 19. Histograma de temperatura media mensual multianual – Est. La Teresita (1982–2019)

Con la información del histograma se elaboró la tabla 20.

Tabla 20. Resumen de los registros de temperatura (°C) – Estación La Teresita (1982 – 2019)

VALOR	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Máximo	19.6	18.0	17.7	19.9	17.8	18.0	18.1	18.5	18.5	17.6	17.2	17.3
Medio	16.7	16.7	16.8	17.1	17.0	17.0	17.0	17.1	16.8	16.4	16.4	16.4
Mínimo	15.4	15.4	15.4	16.1	16.1	16.1	16.0	16.2	15.6	15.7	15.5	15.8

Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, se llevó a cabo la espacialización de la temperatura en las cuatro (4) cuencas seleccionadas, pero ante la insuficiencia de mediciones de temperatura a más de 2800 msnm, fue necesario implementar un modelo geoespacial que relacionara el gradiente altitudinal (1°C por cada 100m de elevación) con la temperatura, para lo cual se emplearon las ecuaciones de temperatura promedio mensuales definidas por AQUA RISC en el 2018 producto de la ejecución del proyecto “vulnerabilidad y riesgo en sistemas de agua potable en el Cauca” y con ese insumo se generó el mapa de temperatura para el Parque (ver figura 20).

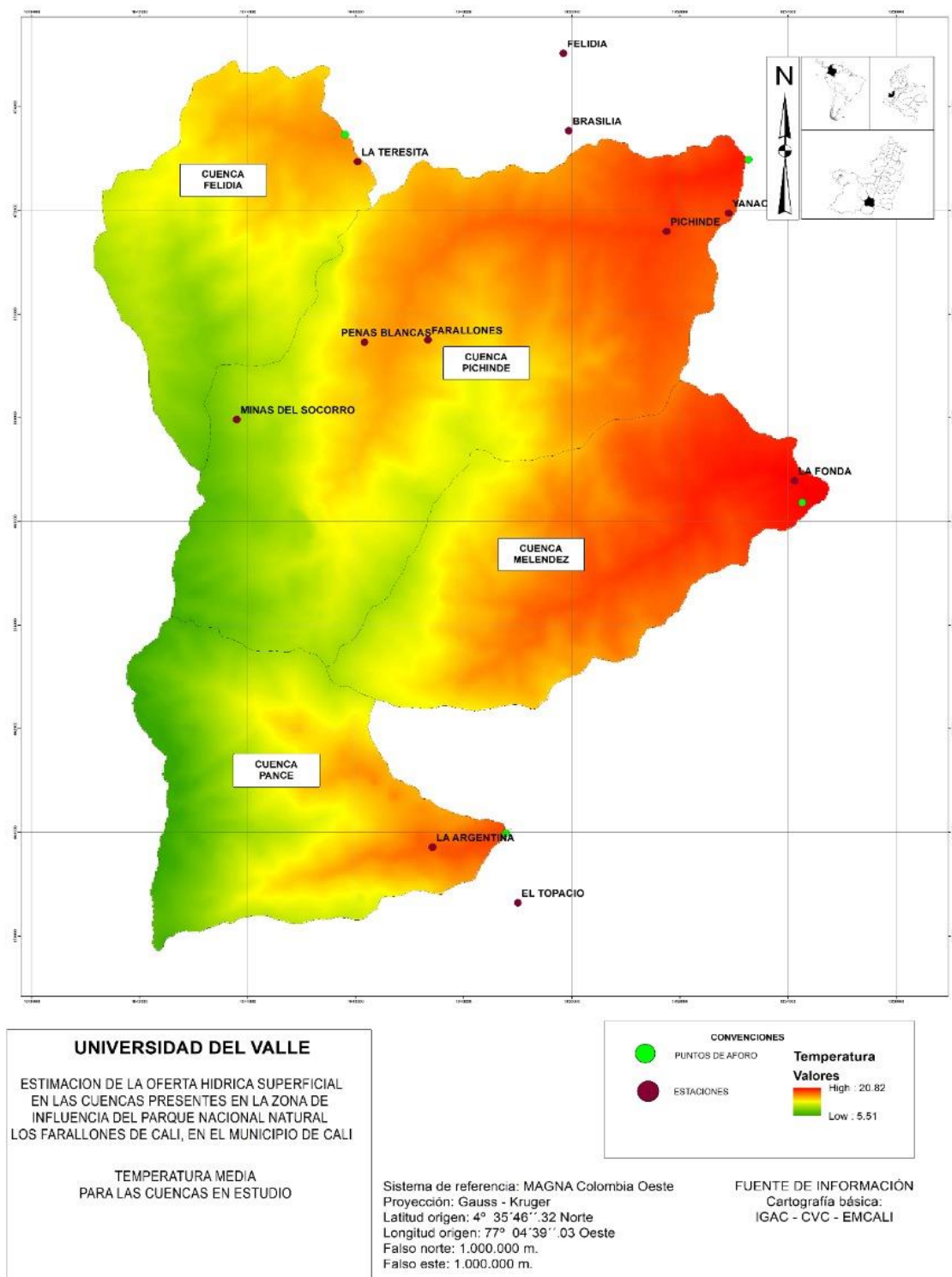


Figura No. 20. Isotermas obtenidas con aplicación del modelo geoespacial

6.5 Análisis de la humedad relativa

La humedad relativa en el área de influencia varía a lo largo del año; en la figura 21, se muestran los valores promedios mensuales máximos, medios y mínimos de humedad relativa registrados en la estación La Teresita; nótese que en el mes de octubre se presentan los registros más bajos, con un valor medio mensual del 81,2 % y los registros más altos se muestran en el mes de noviembre con un valor medio mensual de 98,4%.

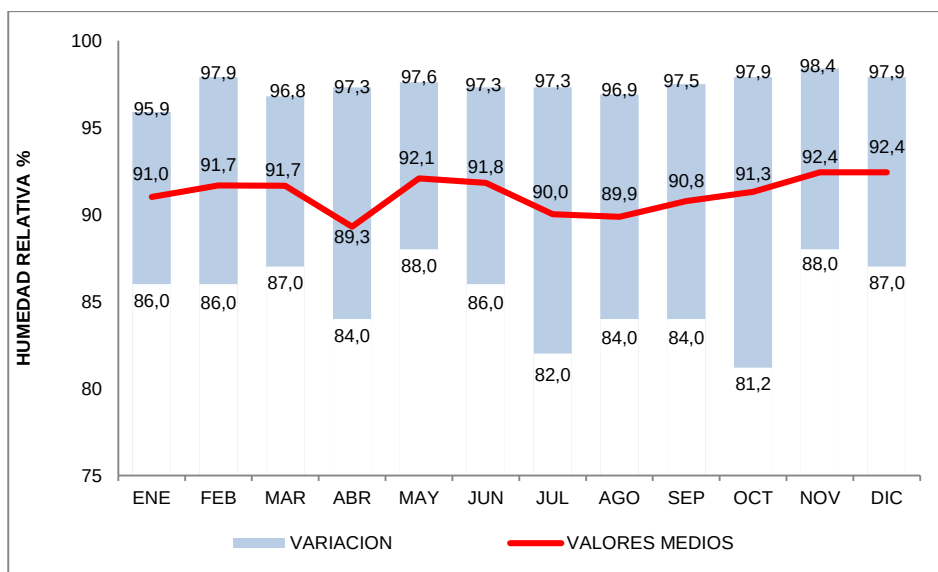


Figura No. 21. Histograma de humedad relativa media mensual multianual - Est. La Teresita (1982–2019)

6.6 Análisis del brillo solar

En la figura 22, se presenta el histograma de brillo solar, obtenido con información de la estación La Teresita, la cual muestra en general una distribución monomodal, con un período de mayor brillo solar en los meses de junio a septiembre y menor brillo de enero a mayo y de octubre a diciembre. De acuerdo a la información de la estación, a lo largo del año las horas de sol oscilan entre 65,9 h y 138,7 h por mes, con valores extremos mínimos de 40,9 h en noviembre y valores máximos de 171,0 h en agosto.

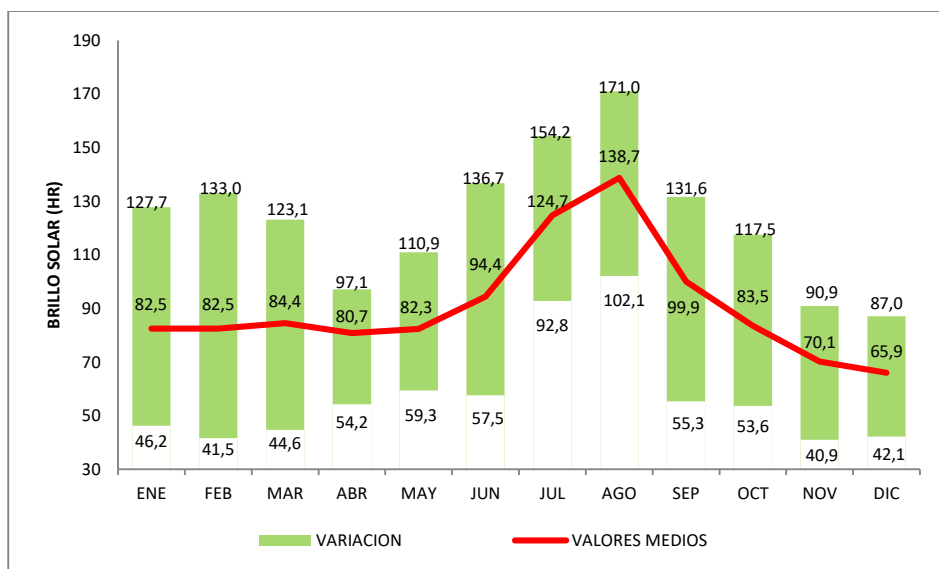


Figura No. 22. Valores de brillo solar – Est. La Teresita (1982–2019)

6.7 Análisis de la evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) tiene gran efecto en la estimación de la oferta hídrica, teniendo presente el efecto de la vegetación, la humedad del suelo y la circulación del agua superficial.

6.7.1 Cálculo de la evapotranspiración

Conforme a la información meteorológica disponible, se decidió emplear como métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial, el de Thornthwaite y el de García López por ser los que más se acondicionaban a los datos disponibles en la zona de estudio. Los resultados se incluyeron en las figuras 23 y 24.

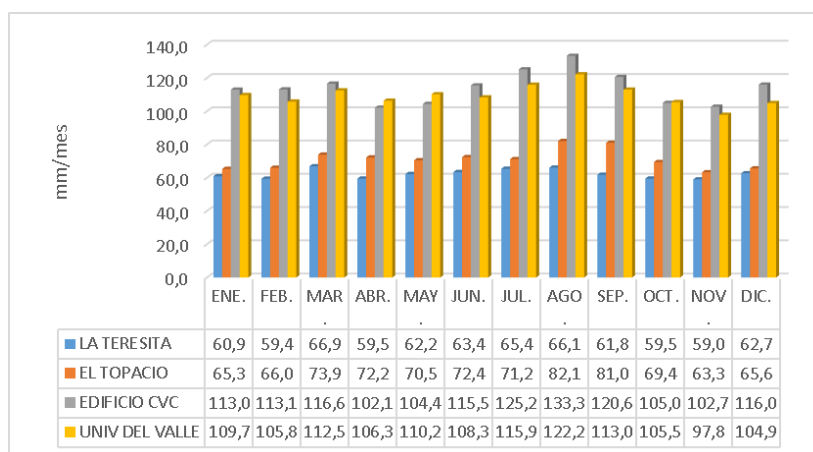


Figura No. 23. Evapotranspiración de referencia ETO - Método Thornthwaite

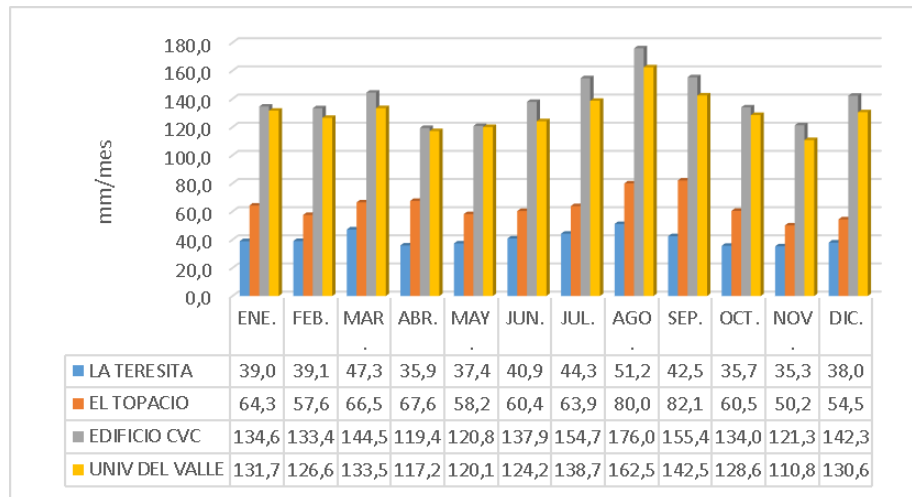


Figura No. 24. Evapotranspiración de referencia ETO - Método García López

De los valores de evapotranspiración estimados por los métodos de Thornthwaite y García López, el primero presentó los valores más altos en las estaciones a mayor altitud y el segundo presentó los mayores valores para las estaciones ubicadas en la zona plana. De acuerdo a los resultados obtenidos, la evapotranspiración para la zona varía entre 35.3 mm/mes (noviembre) y 176.0 mm/mes (agosto), ambos valores obtenidos mediante la aplicación del método de García López.

6.8 Análisis de auto correlación de variables climáticas y macroclimáticas

6.8.1 Precipitación diaria

A continuación, se presenta la auto correlación de la precipitación diaria; se observa que hay una estructura de auto correlación débil con una memoria diaria promedio de 0.012, valor cercano al límite de independencia (§ 0.110). Este parámetro es el de auto correlación entre el valor de la precipitación de un día y el precedente.

El análisis de auto correlación de la serie de precipitación (figura 25), refleja dos comportamientos en las funciones exploradas principalmente por el régimen de la precipitación en la zona de estudio, donde las estaciones tienen funciones de auto correlación muy similares en las cuales ésta desciende de manera acelerada después del 9 rezago. Las similitudes entre las funciones de auto correlación de las estaciones reflejan la consistencia geográfica de ella, presentando valores similares en la precipitación. Los resultados estadísticos se presentan en el anexo 2.

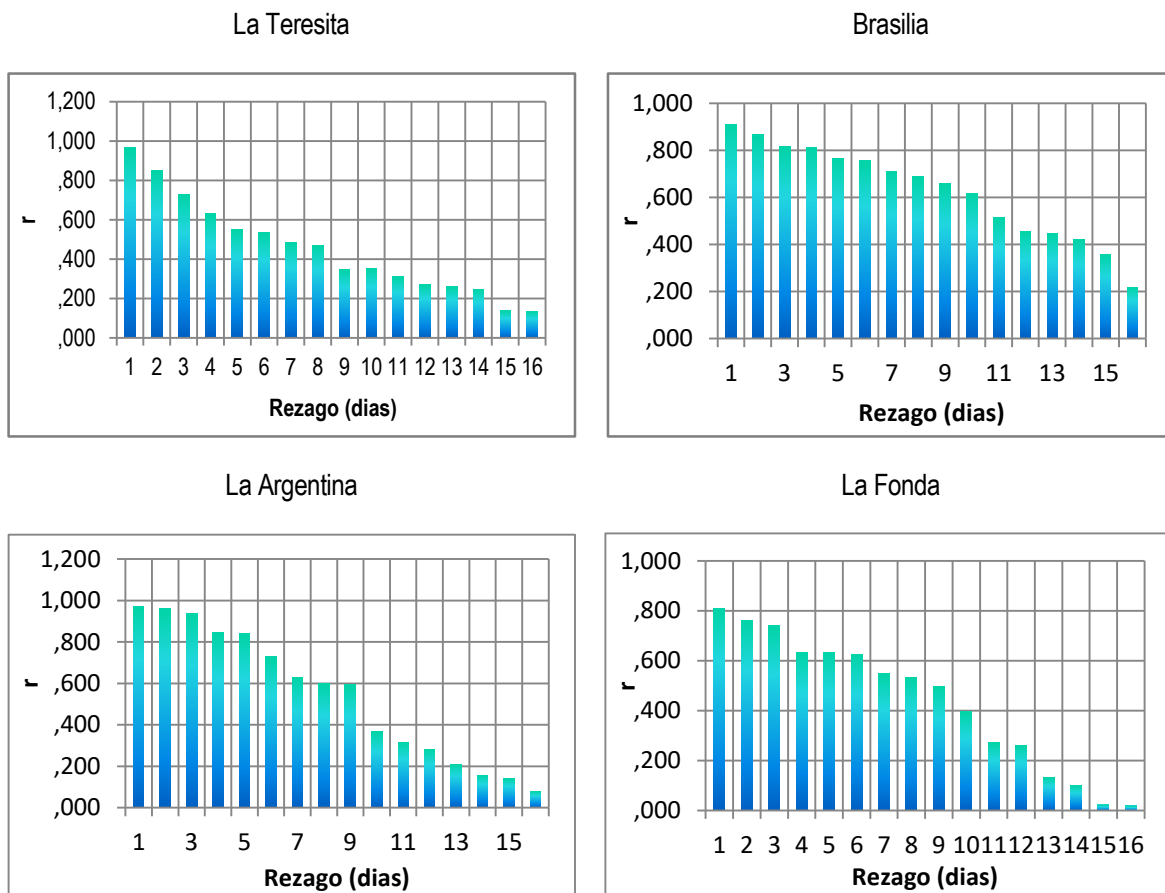


Figura No. 25. Funciones de autocorrelación de precipitación estaciones seleccionadas

La figura 26, presenta la autocorrelación de los índices asociados a ENSO, donde se observa que las variables SOI y NIÑO 3-4 no muestran significancia de la función principalmente, porque la memoria de estas variables se atribuye a su comportamiento como fenómenos interanuales de gran escala, los cuáles suceden de manera periódica anualmente con anomalías de carácter intranual cuando sucede un evento ENSO. Cabe destacar que las demás variables de la TSM presentaron un patrón similar a la de NIÑO 3-4.

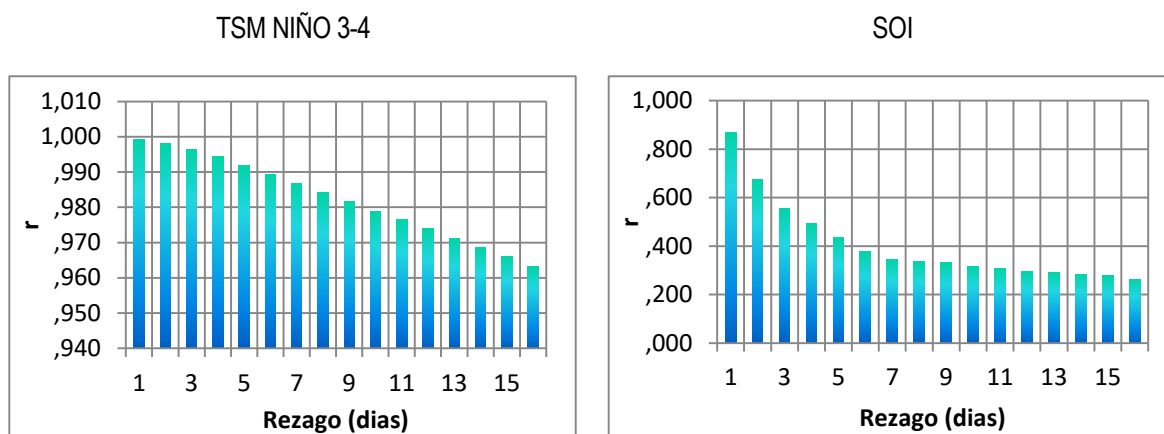


Figura No. 26. Funciones de autocorrelación para las variables macroclimáticas SOI y TSM en la región NIÑO 3-4

6.8.2 Correlación entre las variables climáticas de la zona de estudio y las variables macroclimáticas asociadas al ENSO

En esta sección se presentan los resultados de la estimación de las correlaciones cruzadas de las variables macroclimáticas con la precipitación y el caudal diario.

Esta información permite identificar el grado de correlación y el rezago o anticipación en días que se presentan con las variables hidrometeorológicas de la región.

Se estimaron funciones de correlación cruzada entre variables macroclimáticas asociadas al fenómeno ENSO con la precipitación y la temperatura media del aire para los periodos de registros comprendidos entre los años 1980 y 2019. Se identificaron coeficientes de correlación para diferentes rezagos y periodos de tiempo con nivel crítico de significancia establecido en 0.05 (expresados por $p < 0.05$), las correlaciones temporales por estaciones se estimaron con Intervalos de Confianza (IC).

6.8.2.1 Precipitación diaria

Las estimaciones de coeficientes de correlación entre la precipitación con los registros de las regiones NIÑO 1-2, NIÑO 3-4, NIÑO 3 y NIÑO 4 para diferentes rezagos y periodos de tiempo presentaron valores de correlación significativos, principalmente para las variables NIÑO 3-4 y NIÑO 4 con rezagos alrededor de cero (meses) y las correlaciones son similares en significancia al utilizar la precipitación acumulada, aunque las anomalías son mayores en el último caso.

6.8.2.1.1 Correlaciones con la TSM

Se observaron diferentes patrones y rangos de correlación de la precipitación acumulada y las anomalías anuales en la precipitación con la TSM para las estaciones representativas a diferentes rezagos de tiempo.

Las correlaciones más significativas se obtuvieron con rezagos a medida que se alejaban de cero y en la región Niño 3 y 3-4, esto coincide con estudios preliminares realizados por Carvajal (2004). La figura 27, presenta las correlaciones de la TSM en sus distintas regiones con la estación La Teresita, a diferentes rezagos de tiempo. Las principales observaciones para cada región de monitoreo de la TSM, fueron:

Niño 1-2: en general se presentan correlaciones que varían entre -0.558 y 0.01. La estación que presentó mayores correlaciones es la estación La Teresita, las cuales se encuentran entre -0.558 y -0.331. Por el contrario, las menores correlaciones se presentaron en la estación Brasilia las cuales estuvieron entre -0.001 y -0.05. Se encontró que en general hay una consistencia en las correlaciones de las estaciones porque presentan sus valores más altos para un periodo de -4 días de rezago que, en promedio, son de -0.01.

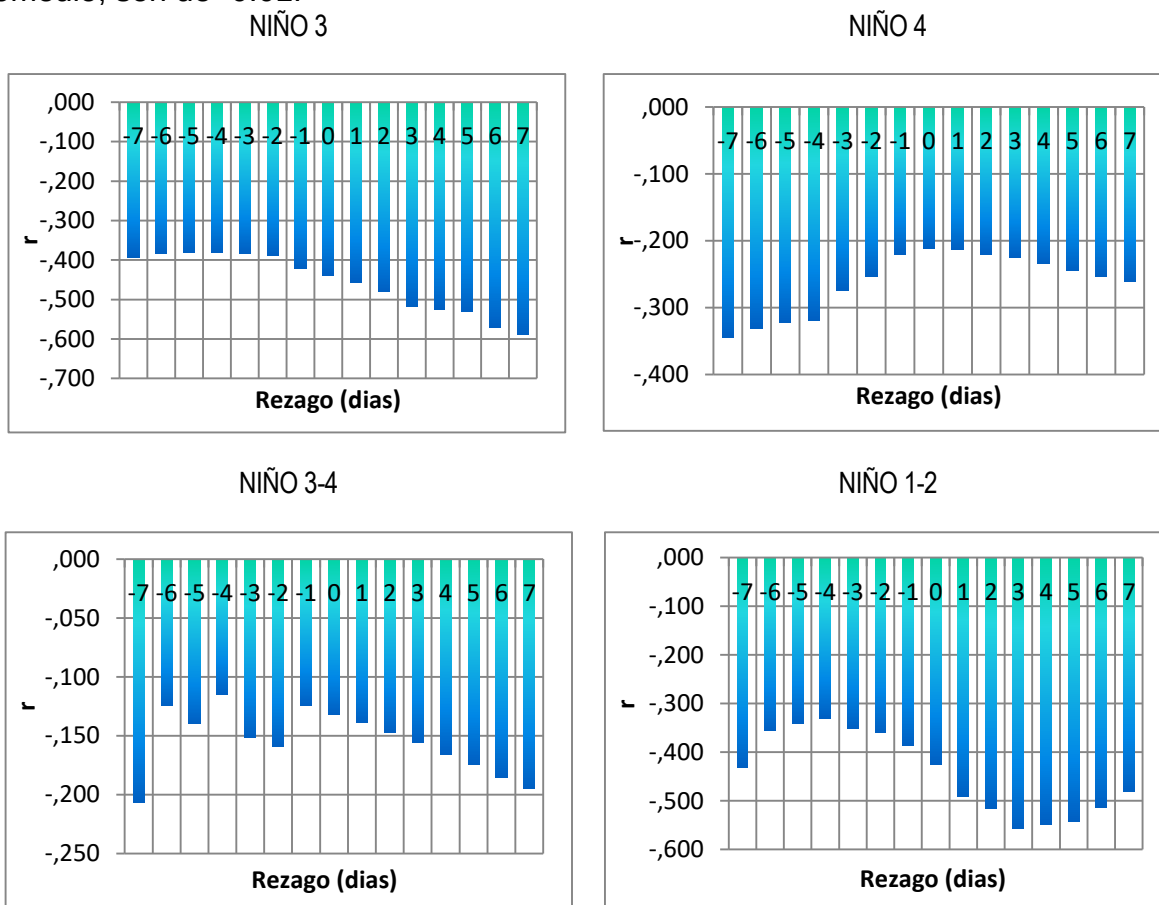


Figura No. 27. Correlaciones cruzadas entre la variable TSM en las distintas regiones y la estación La Teresita

Niño 3-4: se observa mayor correlación para rezagos negativos, igualmente a medida que incrementa el rezago también aumenta el coeficiente de correlación.

Se vieron los mayores $r = -0.51$ y $r = -0.50$ para rezagos de 7 días en las estaciones Yanaconas y Peñas Blancas, respectivamente.

Niño 3: esta región presenta los mayores coeficientes de correlación con respecto a la precipitación, en las estaciones La Teresita y Yanaconas se presentaron las mayores correlaciones $r = -0.589$ y $r = -0.370$, respectivamente, para 7 días de rezago en ambos casos.

Niño 4: para la estación La Teresita se encontró que la correlación aumenta a medida que el rezago disminuye y para las demás estaciones sucede lo contrario, la correlación aumenta a medida que aumenta el rezago. Las mayores correlaciones fueron de -0.37 y se presentaron en la estación La Argentina.

Se obtuvo en general, para todas las estaciones coeficientes de correlación cruzada negativos en su mayoría. Los resultados coinciden con otros estudios realizados sobre la relación del fenómeno ENSO con la variabilidad de la precipitación en Colombia, principalmente sobre la región Andina, según se ha registrado en otros estudios como el de Poveda & Mesa (1996); de esta manera, un incremento de la temperatura en la superficie del Océano Pacífico (fase cálida de ENSO, El Niño) se relaciona con la disminución de la precipitación en zona de estudio y viceversa durante La Niña (fase fría), según lo indican los coeficientes de correlación negativos.

6.8.2.1.2 Correlaciones con el SOI

Se correlacionó la precipitación acumulada con el SOI, se obtuvo diferentes patrones y rangos de correlación en las estaciones analizadas para rezagos de tiempo entre -7 y 7 días. En general se observó un decrecimiento de los coeficientes de correlación a medida que “incrementa” el rezago, se obtuvo el mayor $r = 0.49$ en la estación La Argentina y el menor $r = -0.03$ en la estación La Fonda, resultados que se incluyeron en el anexo 2.

Existe una relación lineal proporcional entre las variables correlacionadas, explicando que cuando el SOI decrece, se presenta fase cálida de ENSO (El Niño) y en la zona disminuye la precipitación, lo opuesto sucede durante la fase de La Niña; estos resultados están conformes a estudios preliminares de la incidencia de ENSO en Colombia, como son los de Poveda & Jaramillo (2000); Pabón, Eslava & Gómez (2001) y Poveda et al. (2003).

6.8.2.2 Temperatura media diaria

6.8.2.2.1 Correlaciones con la TSM

La temperatura media presenta amplias correlaciones con la TSM en las regiones NIÑO 1-2, NIÑO 3, NIÑO 3-4 y NIÑO 4 en orden ascendente, es decir, las mayores correlaciones se presentaron en la región NIÑO 4 y las menores en NIÑO 1-2. La figura 28 presenta las correlaciones representativas en la estación la Teresita.

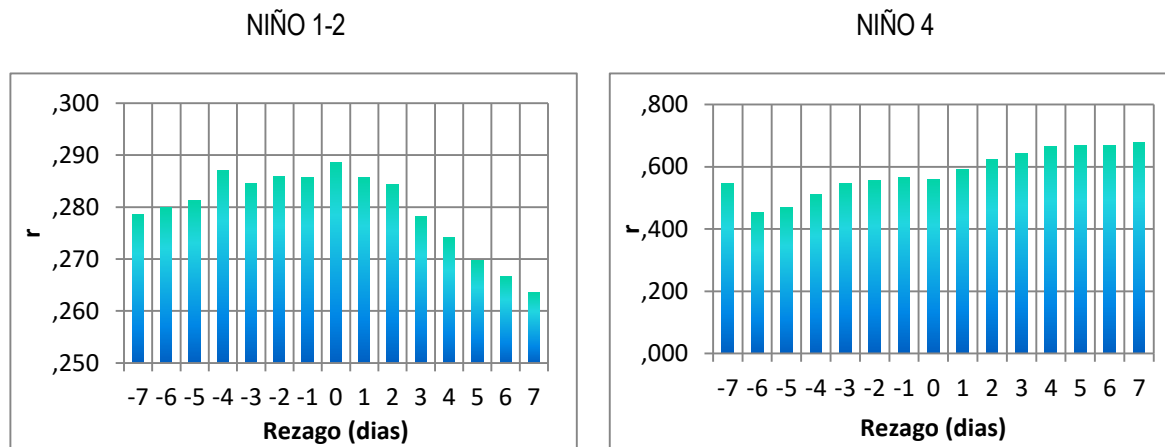


Figura No. 28. Correlaciones entre la temperatura diaria y TSM - Región NIÑO1-2 y NIÑO4

En general, se observó que las mayores correlaciones significativas se presentan a medida que se aproxima el rezago a 7 días. Las correlaciones decrecen para los rezagos negativos. La estación La Teresita presentó el mayor $r = 0.68$ con NIÑO 4 para 7 días de rezago.

También, se observó una incidencia muy similar de la TSM en la temperatura diaria con la precipitación y una menor escala de variación en las correlaciones con la temperatura; en la cual, contrario a lo encontrado en la precipitación, se presentan patrones similares en las funciones de correlación con la TSM entre las estaciones climáticas estudiadas.

Las mayores correlaciones se obtuvieron con la variable NIÑO 4 con un promedio de $r=0.58$ y el 96% de correlaciones significativas. Por su parte, las correlaciones con la variable NIÑO 1-2 presentaron un promedio de $r=0.28$, como el más bajo de las correlaciones obtenidas. En orden decreciente del promedio de correlaciones obtenidas de la temperatura del aire con las variables de TSM fueron NIÑO 4, NIÑO 3, NIÑO 3-4 y NIÑO 1-2, la significancia se mantuvo con un promedio del 98% de correlaciones significativas.

6.8.2.2.2 Correlaciones con el SOI

La correlación de la temperatura con el SOI, presentó amplias correlaciones negativas, la figura 29 presenta los patrones representativos y se observó que las correlaciones disminuyen a medida que incrementa el rezago. La mayor correlación $r = -0.94$ se obtuvo para -7 días de rezago.

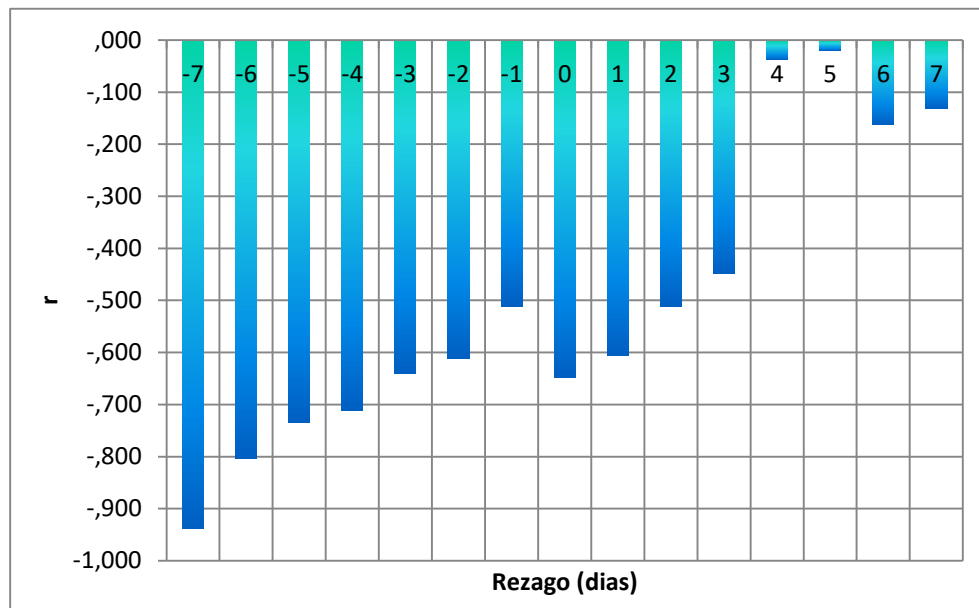


Figura No. 29. Correlaciones entre la temperatura en la estación La Teresita y el SOI

Se obtuvieron coeficientes de correlación negativos, mostrando una relación inversa entre las variables de estudio, explicando que cuando ocurre un descenso del SOI, propio de una fase cálida de ENSO (El Niño), en la zona de estudio se presenta un incremento en la temperatura del aire, lo opuesto sucede durante un evento de La Niña.

Se comprobó que durante la ocurrencia del Fenómeno de El Niño se presenta una disminución de la precipitación, lo que disminuye el escurrimiento y la disponibilidad hídrica. La fase cálida de ENSO se caracteriza por el incremento de la TSM y el IMENSO, así como la disminución del SOI; en la zona de estudio ocasiona la disminución de la precipitación e incremento de la temperatura.

6.9 Estimación de la oferta hídrica superficial

Para la estimación de la oferta hídrica superficial, se revisaron los aforos líquidos generados por el personal de PNNFC y por la falta de continuidad en la realización mensual de los mismos entre 2016-2019, no resultó consistente la revisión de la lluvia antecedente a los días en los que se desarrolló la actividad foronómica y por consiguiente se decidió no utilizar la información y proceder con la modelación.

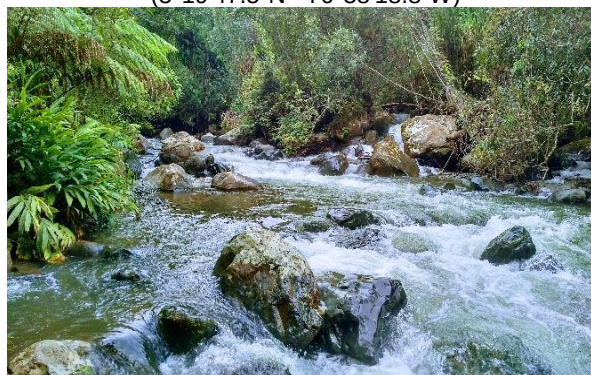
En la figura 30, se muestran las fotografías de las secciones definidas por el personal de PNNFC para la realización de la actividad foronómica, pero no se logró hacer efectiva la instalación de tramos de limnímetros para poder establecer los niveles del agua al momento de realizar los aforos y por consiguiente hacer efectiva la construcción de las respectivas curvas de gasto.



Punto de aforo río Pance – PNNFC
(3°19'47.5"N - 76°38'18.8"W)



Punto de aforo río Meléndez – PNNFC
(3°23'15.2"N - 76°35' 21.0"W)



Punto de aforo río Pichindé – PNNF
3°26'50.9"N - 76°35'53.2"W



Punto de aforo río Felidia – PNNF
3°27'06.8" N - 76°39' 55.2"W

Figura No. 30. Puntos de aforo PNNFC (Tomadas por Julián Mauricio Alzate Cataño - QEPD)

Como ya se había consignado, estos son los puntos de cierre de las cuencas hidrográficas de interés.

En la figura 31, se define el tipo de suelo del área en estudio y en la figura 32 el uso del mismo, lo que permitirá a través del tiempo revisar la conservación de la cobertura vegetal, su recuperación o su afectación, pensando en el efecto de la intervención antrópica o en la respuesta que pueda emitir el parque ante un clima cambiante o frente a eventos climáticos extremos. Es de anotar que los mapas se construyeron porque no fue posible utilizar los resultados de las mediciones que se llevaron a cabo en las estaciones temporales de aforo y en consecuencia la información se requería para ejecutar la modelación.

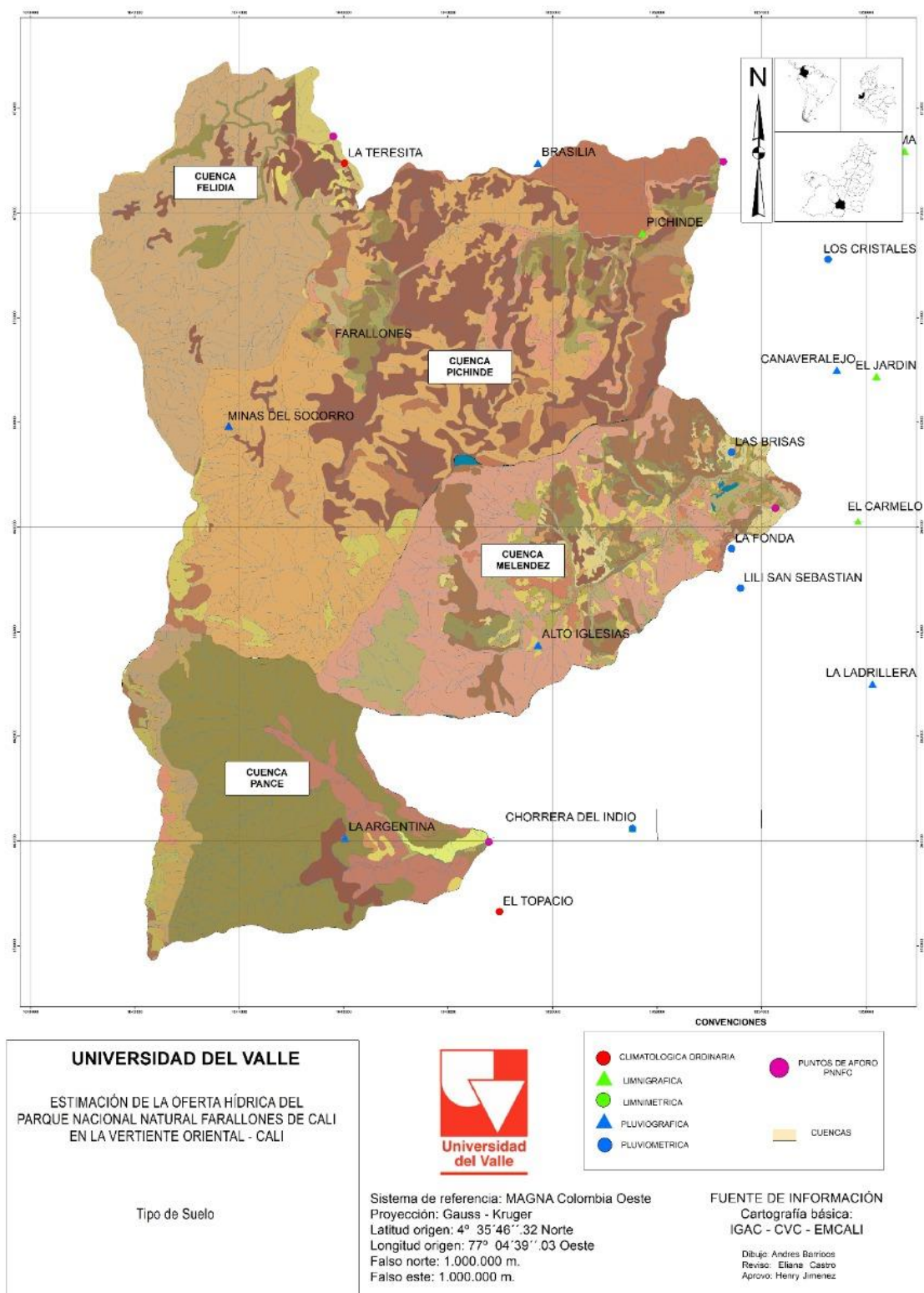


Figura No. 31. Mapa de estimación del tipo de suelo para la zona de estudio

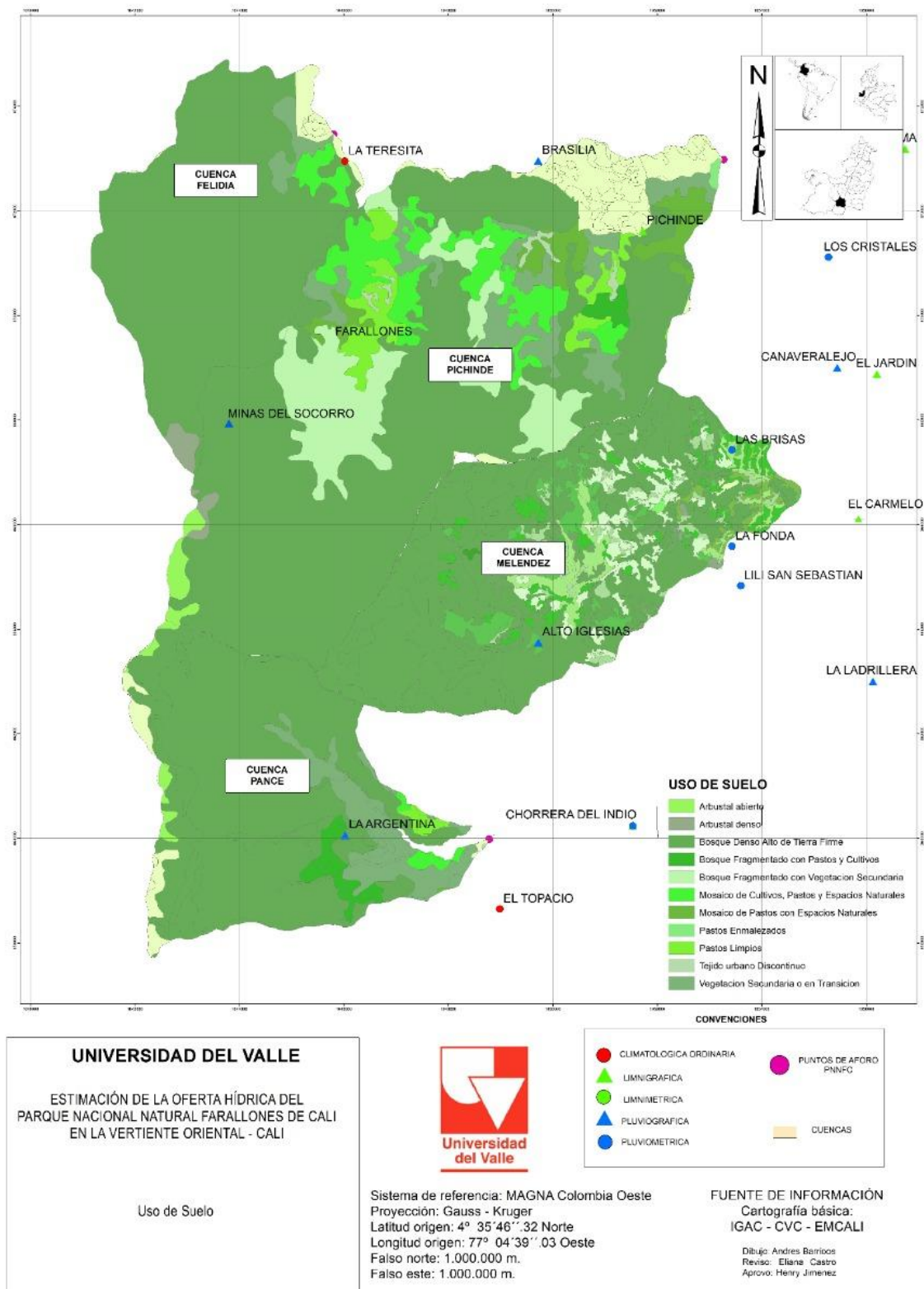


Figura No. 32. Mapa de estimación del uso del suelo para la zona de estudio

Como producto de la delimitación de cada cuenca hidrográfica, incluyendo el punto de cierre de la jurisdicción de PNNFC y la ubicación de las estaciones hidrométricas seleccionadas en cada una de ellas se elaboró la figura 33, definiendo como punto de cierre el emplazamiento de las estaciones con registro de datos. Es importante consignar que en la figura se ha identificado la estación Chorrera del Indio con su componente hidrometeorológico.

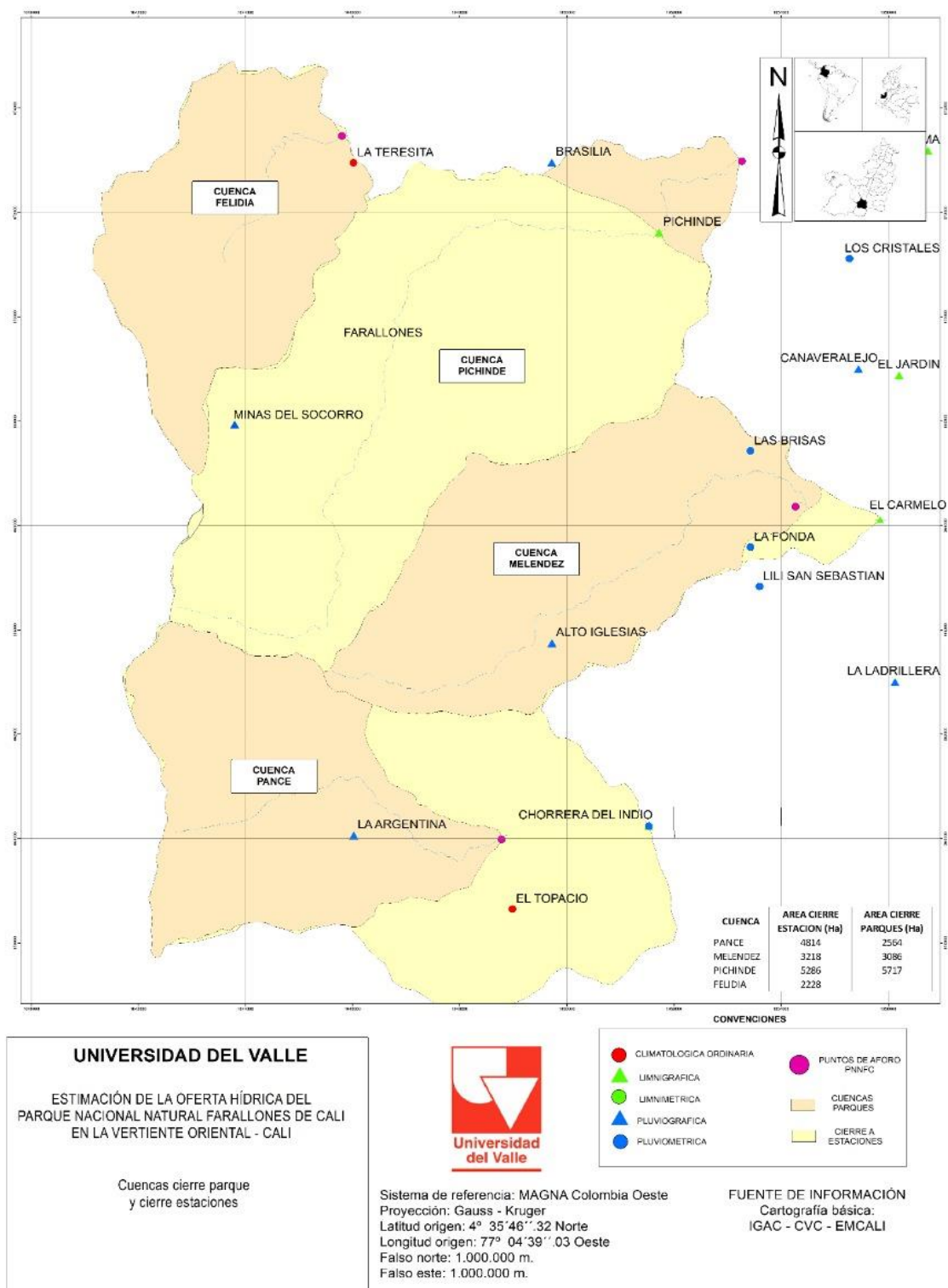


Figura No. 33. Mapa delimitación de cuencas con cierre en PNNFC y ubicación de estaciones hidrológicas

Los caudales específicos (caudal por unidad de superficie) se calcularon a partir de las series de caudales disponibles en las estaciones Chorrera del Indio, Pichindé y El Carmelo, para las cuencas hidrográficas de los ríos Pance, Pichindé y Meléndez, respectivamente. Infortunadamente, no existe estación hidrológica en la cuenca del río Felidia y por consiguiente los datos se generaron con el modelo HEC-HMS, una vez calibrado, en vista de los buenos resultados que arrojó su aplicación en las demás estaciones.

En las figuras 34 a 36 se presentan los caudales específicos calculados para cada una de las cuencas estudiadas:

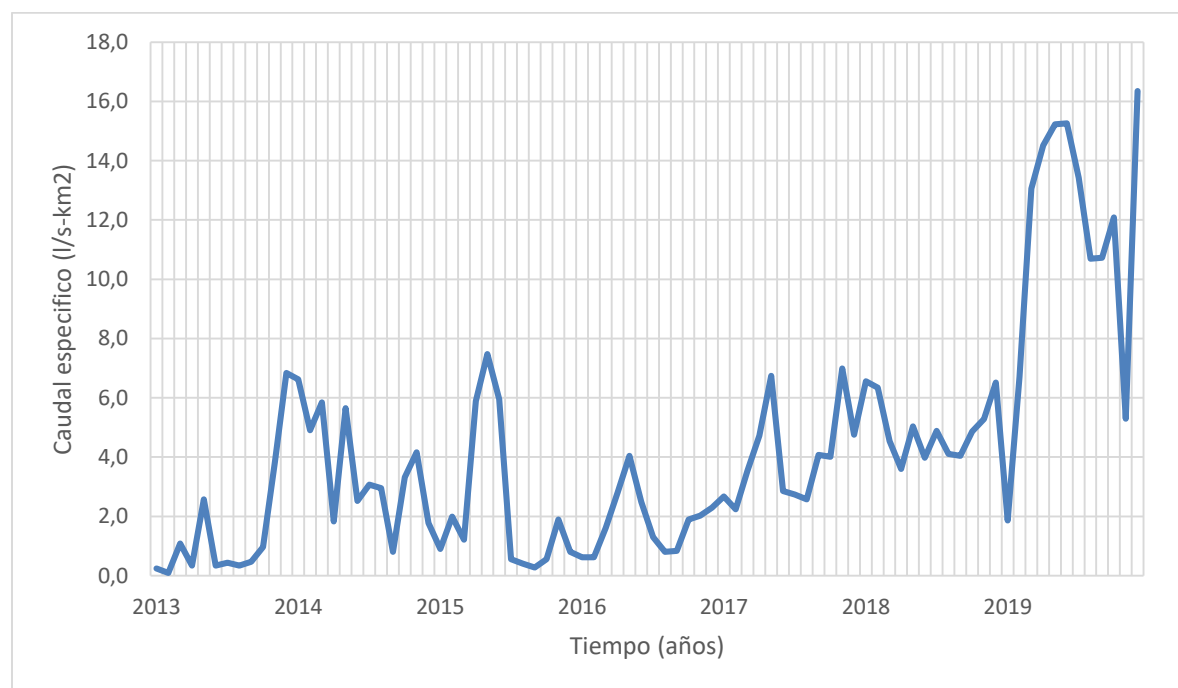


Figura No. 34. Caudales específicos en la cuenca del río Meléndez Est. El Carmelo (2013-2019)

El cambio drástico presentado en el comportamiento de los caudales registrados en la estación El Carmelo, a partir del año 2019, puede atribuirse a un error de lectura en campo o de captura en la base de datos, lo que redundaría en la calidad de la información y en el resultado de los análisis. Sin embargo, existe evidencia del proceso de urbanización de la parte baja de la cuenca, lo que genera impermeabilización de los suelos y en consecuencia una respuesta más rápida por pérdida de retención.

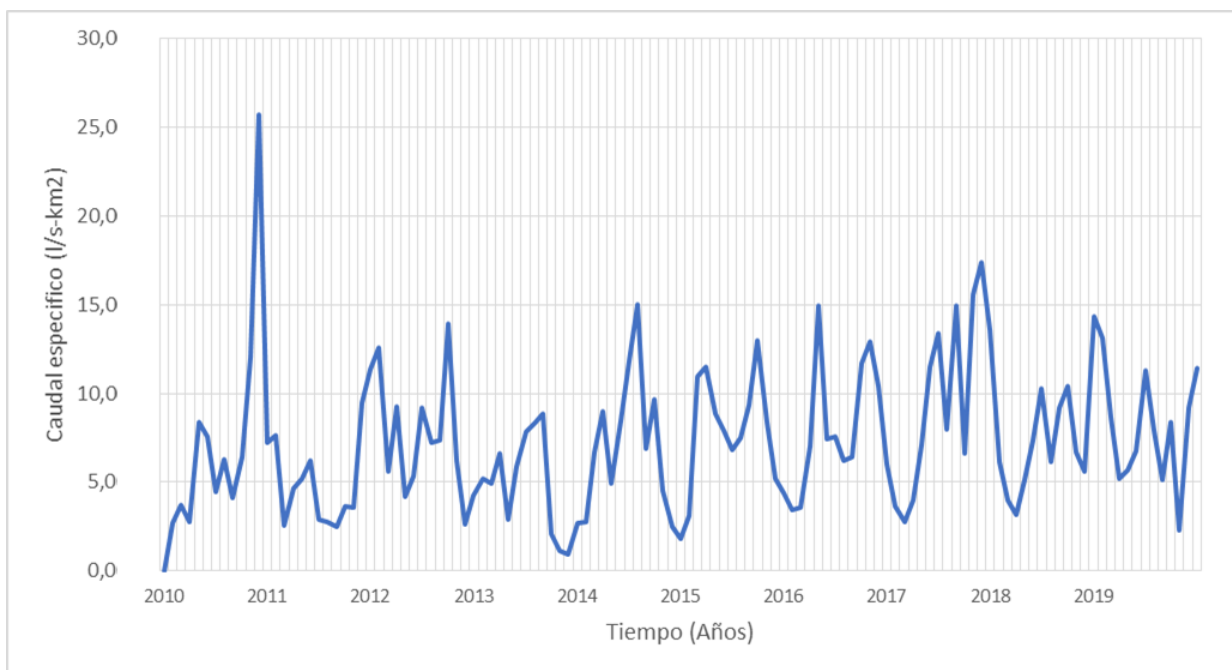


Figura No. 35. Caudales específicos en la cuenca del río Pance – Est. Chorrera del Indio (2010-2019)

En la gráfica 35, se observa claramente el efecto tan drástico que tuvo el evento de La Niña entre los años 2010-2011 sobre la cuenca del río Pance.

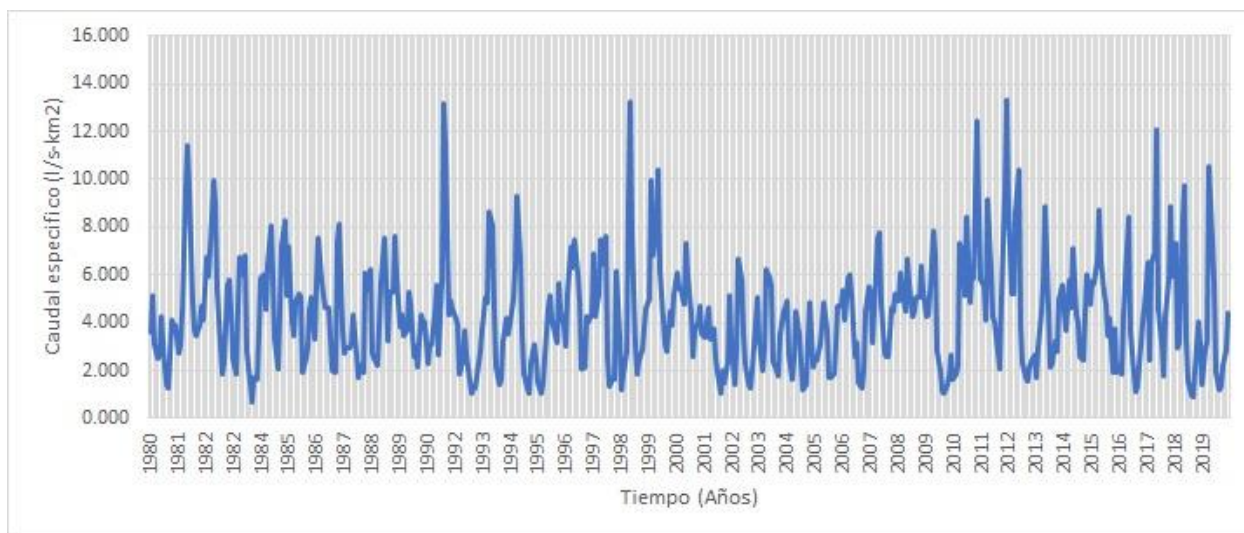


Figura No. 36. Caudales específicos en la cuenca del río Pichindé – Est. Pichindé (1982-2019)

En la gráfica 36, resalta que los mayores valores de caudal se presentaron durante los años 1991, 1998, 2011, 2012 y 2017.

En resumen, los valores de caudal específico para cada una de las cuencas hidrográficas durante el periodo normal, y para los meses en que se presentaron los fenómenos de El Niño y de La Niña, soportados en los datos de las estaciones convencionales, se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. Resumen de caudales específicos para las cuencas estudiadas en punto de cierre de PNNFC

CUENCA	CAUDAL ESPECIFICO (l/s/Km ²)		
	NORMAL	NIÑO	NIÑA
PICHINDÉ	43.7	38.5	54.5
PANCE	124.8	113.1	136.5
MELENDEZ	49.4	29.2	123.4

Fuente: elaboración propia

La falta de estaciones hidrológicas en la cuenca del río Felidia, imposibilita la determinación del caudal específico y por consiguiente no existe la posibilidad de comparar el resultado de la modelación.

6.10 Resultados de la implementación del modelo HEC-HMS

Como complemento de la estimación de la oferta hídrica, se empleó el modelo HEC-HMS para la complementación de datos en vista que ofrece procedimientos de análisis hidrológico tradicional, como eventos de infiltración, hidrogramas unitarios, y enrutamiento hidrológico.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación para cada una de las cuatro (4) cuencas hidrográficas, teniendo presente la generación de datos diarios de caudal entre los años 2000 y 2019 y las tablas con los valores de entrada y calibración del modelo se presentan en el anexo 3.

6.10.1 Cuenca hidrográfica río Pance

En el caso de la cuenca del río Pance se utilizaron 18 unidades de cuenca (W) en el proceso de la modelación y para cada una de ellas se estimaron los parámetros morfométricos, a partir de las estaciones localizadas en su interior (ver la figura 37).

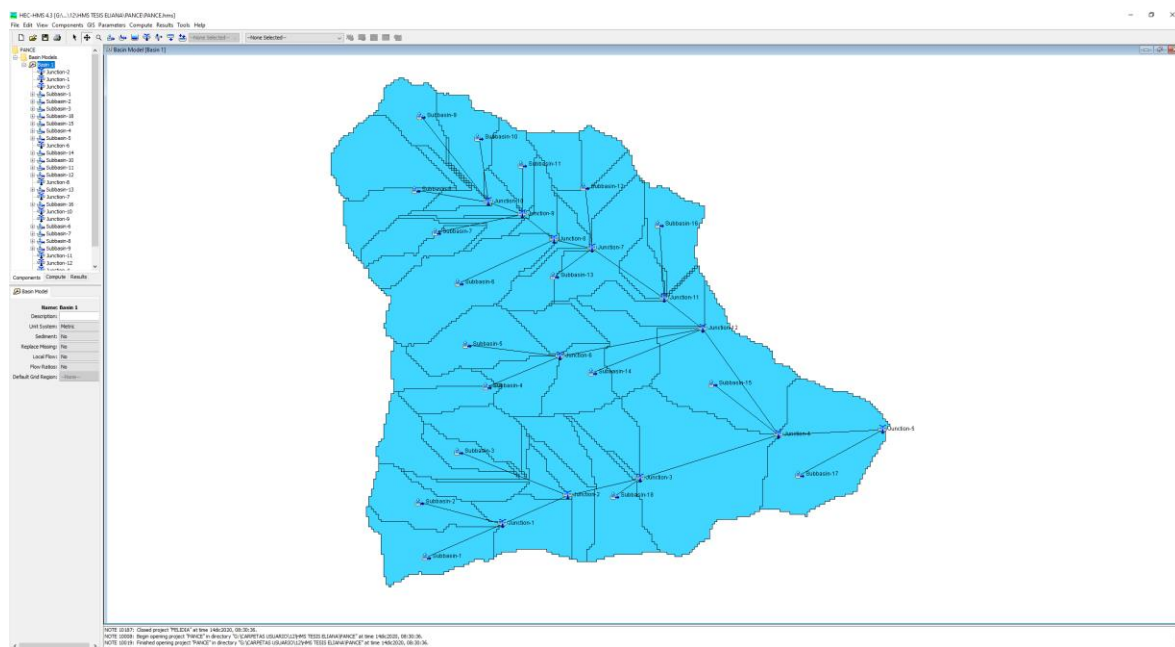


Figura No. 37. Esquematación utilizada en cuenca hidrográfica río Pance

En el anexo 3, se incluyen los resultados de modelación concernientes a los parámetros morfométricos de la cuenca y al resumen de los parámetros SMA.

Los caudales diarios simulados para la cuenca del río Pance se presentan en la figura 38.

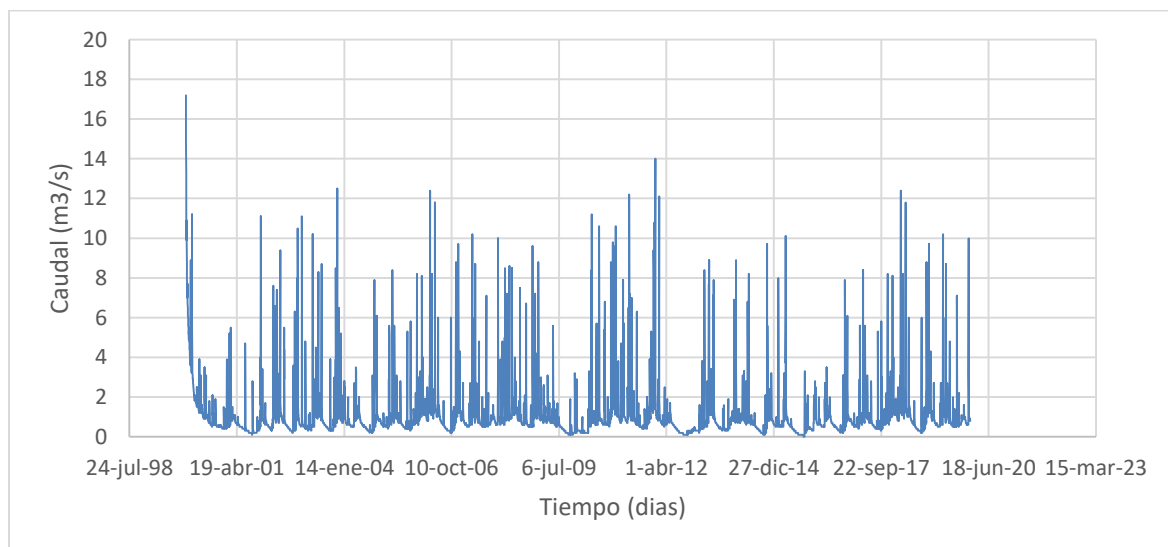


Figura No. 38. Caudales diarios simulados cuenca río Pance (2000-2019)

Los caudales diarios en la cuenca del río Pance varían a lo largo de todo el período analizado, presentando valores máximos de 17.2 m³/s y valores medios de 1.01 m³/s. Para verificar la validez de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, se realizó la comparación de los caudales modelados con los caudales transpuestos (caudales de la estación Chorrera del Indio afectados por el área hasta el punto de cierre) de la cuenca.

Es decir, los caudales específicos obtenidos en las estaciones fueron multiplicados por el área hasta el punto de cierre de las cuencas modeladas para así efectuar la comparación entre los caudales simulados y los caudales transpuestos.

Como se observa en la figura 39, generalmente los caudales transpuestos son mayores a los simulados y en el mes de septiembre la diferencia fue de 0.35 m³/s (60%), aunque en los meses de enero, julio y octubre (0.26 y 0.25 m³/s) la diferencia osciló entre el 17 y el 35%. La menor variación se encontró en febrero (0.06 m³/s).

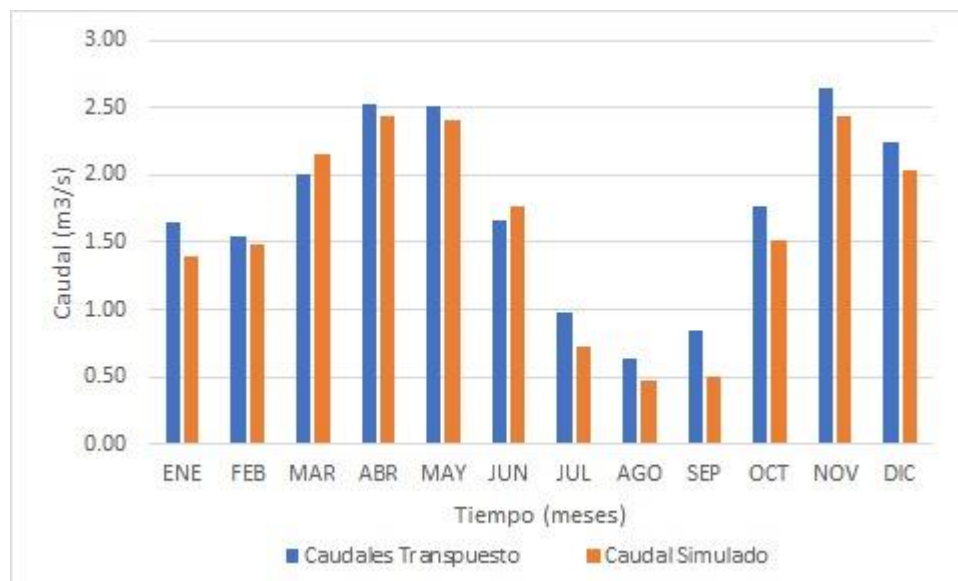


Figura No. 39. Comparación caudal transpuesto vs caudal simulado – Cuenca río Pance Estación Chorrera del Indio (2010 - 2019)

Con el fin de determinar la calidad y la proporción de variación de los datos simulados con el modelo implementado en la cuenca del río Pance, se calculó el coeficiente de determinación (R^2), obteniendo un valor 0.90, con lo que se concluye que los datos simulados con el modelo hidrológico se aproximan en gran medida a la realidad y son representativos para estudiar y predecir el comportamiento de la cuenca.

Adicionalmente, se utilizó del coeficiente de Nash Sutcliffe con el objeto de estimar la eficiencia de la modelación realizada (figura 40).

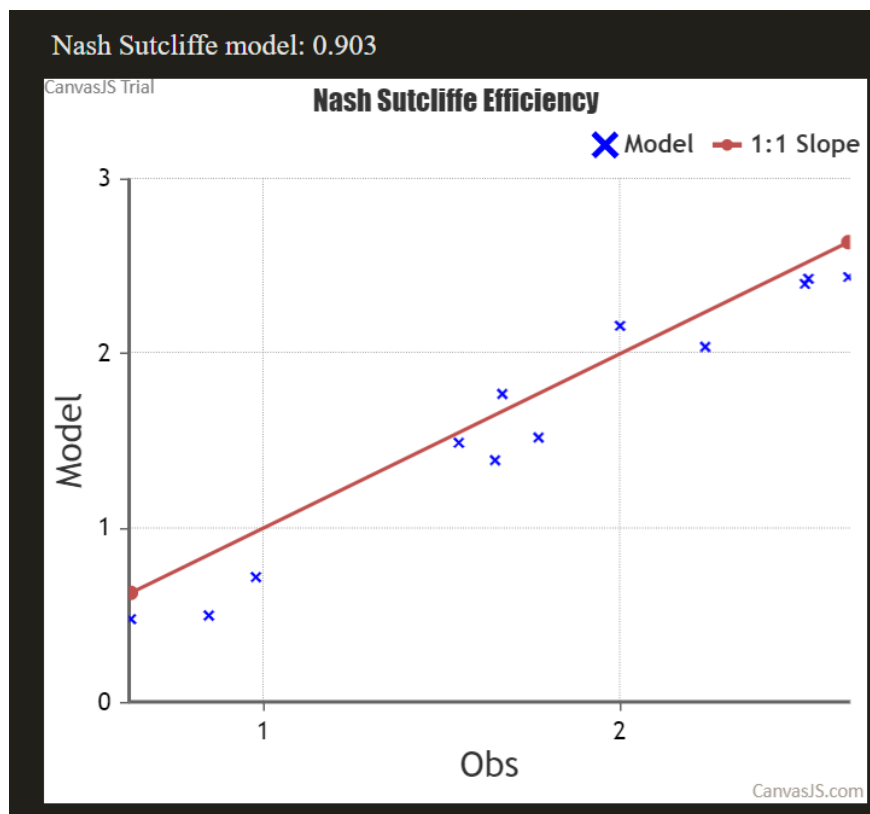


Figura No. 40. Eficiencia del modelo por el método de Nash Sutcliffe – Cuenca río Pance

De acuerdo a la tabla 9, el valor de 0.903 se referencia como un excelente ajuste del resultado entre lo observado y lo simulado.

6.10.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez

En el caso de la cuenca del río Meléndez se utilizaron 25 unidades de cuenca en la modelación, y se siguió el mismo procedimiento de la cuenca del río Pance (ver figura 41).

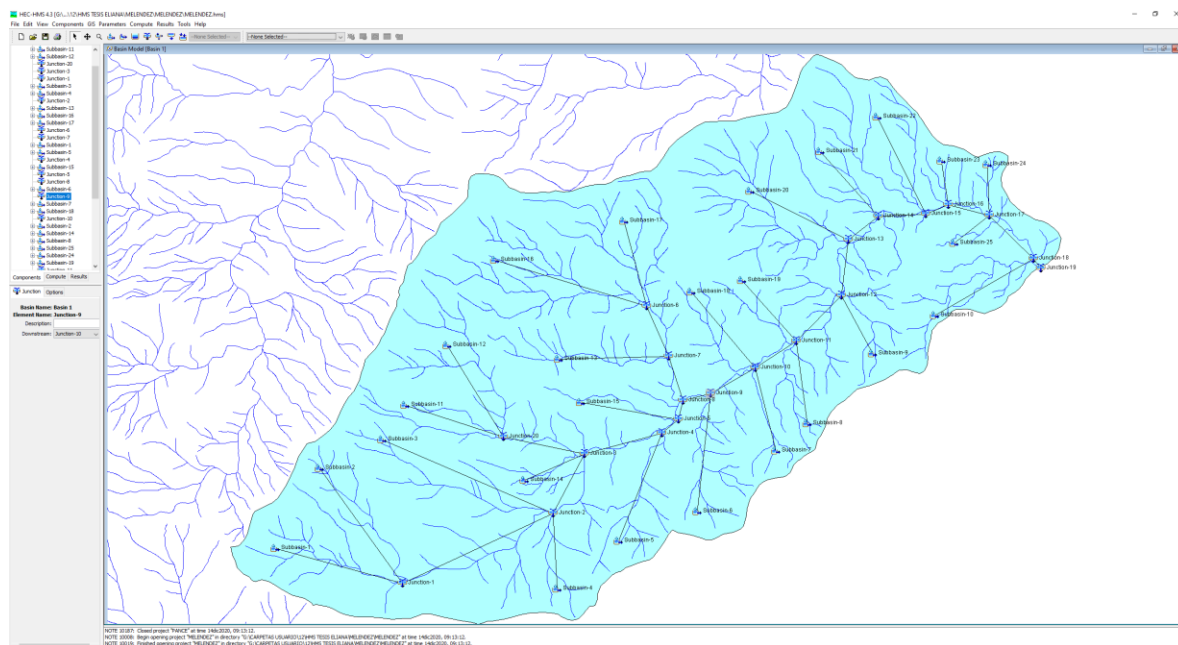


Figura No. 41. Esquematización utilizada cuenca hidrográfica río Meléndez

En el anexo 3, se incluyen los resultados de modelación concernientes a los parámetros morfométricos de la cuenca y el resumen de los parámetros SMA.

Los caudales diarios simulados para la cuenca del río Meléndez se presentan en la figura 42.

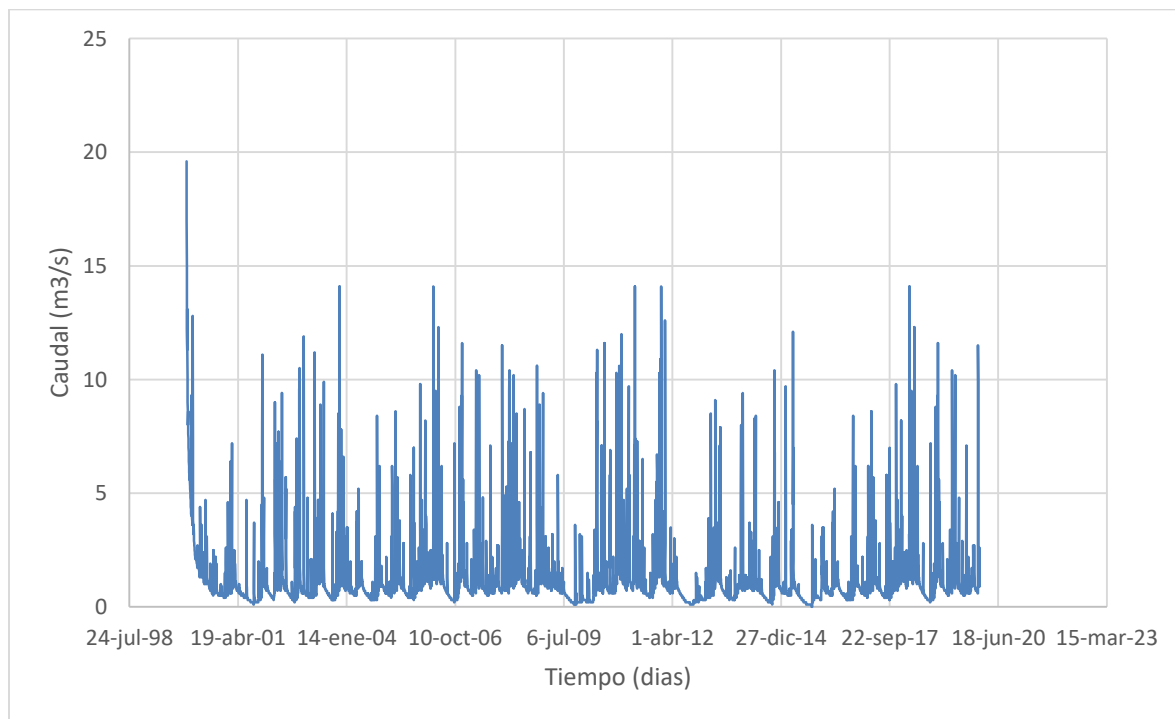


Figura No. 42. Caudales diarios simulados cuenca río Meléndez (2000–2019)

Los caudales diarios en la cuenca del río Meléndez varían a lo largo de todo el período analizado, presentando valores máximos de $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$ y medios de $1.13 \text{ m}^3/\text{s}$. Con el fin de verificar la validez de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, se realizó la comparación de los caudales simulados con los caudales transpuestos de la cuenca.

En la figura 43 se aprecia que, entre los caudales modelados y los caudales específicos, se presentaron las mayores variaciones (entre 14 y 22%) en abril y diciembre ($0.21 \text{ m}^3/\text{s}$), octubre ($0.20 \text{ m}^3/\text{s}$) y noviembre ($0.46 \text{ m}^3/\text{s}$) y las menores diferencias se encontraron en junio ($0.02 \text{ m}^3/\text{s}$). En general, los caudales de referencia son un poco mayores a los caudales modelados. La comparación se realizó con los valores promedios mensuales multianuales de la serie de caudales simulados.

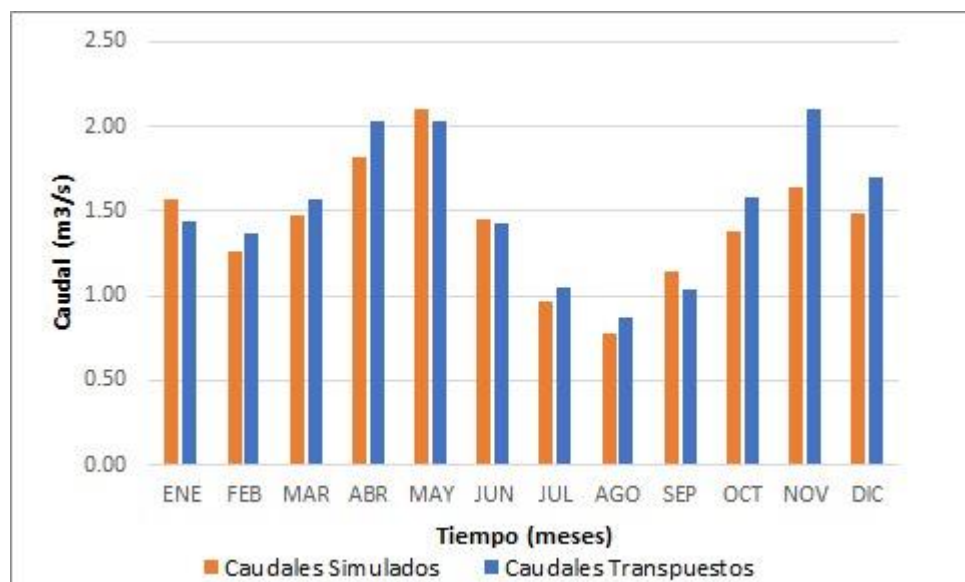


Figura No. 43. Comparación caudal transpuesto vs caudal simulado – Cuenca río Meléndez Estación El Carmelo (2013–2019)

El coeficiente de determinación (R^2), obtenido en este caso fue de 0.83, con lo cual se concluye que los datos simulados con el modelo hidrológico se aproximan a la realidad y son representativos para analizar el comportamiento de la cuenca.

En la figura 44, se muestra el resultado del coeficiente de Nash Sutcliffe para verificar la eficiencia de la modelación efectuada.

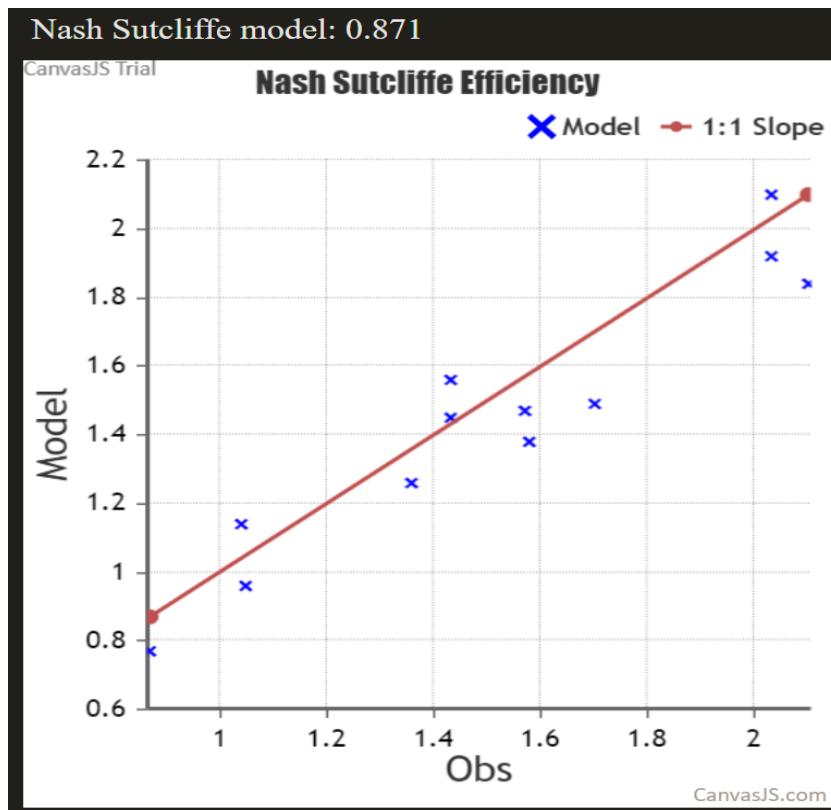


Figura No. 44. Eficiencia del modelo por el método de Nash Sutcliffe – Cuenca río Meléndez

Como el valor del coeficiente de Nash Sutcliffe fue de 0.871 para la cuenca del río Meléndez, de acuerdo a la categorización de este coeficiente se concluye que el proceso de calibración fue excelente.

6.10.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé

En el caso de la cuenca del río Pichindé, también se utilizaron 26 unidades de cuenca en el proceso de la (ver figura 45).

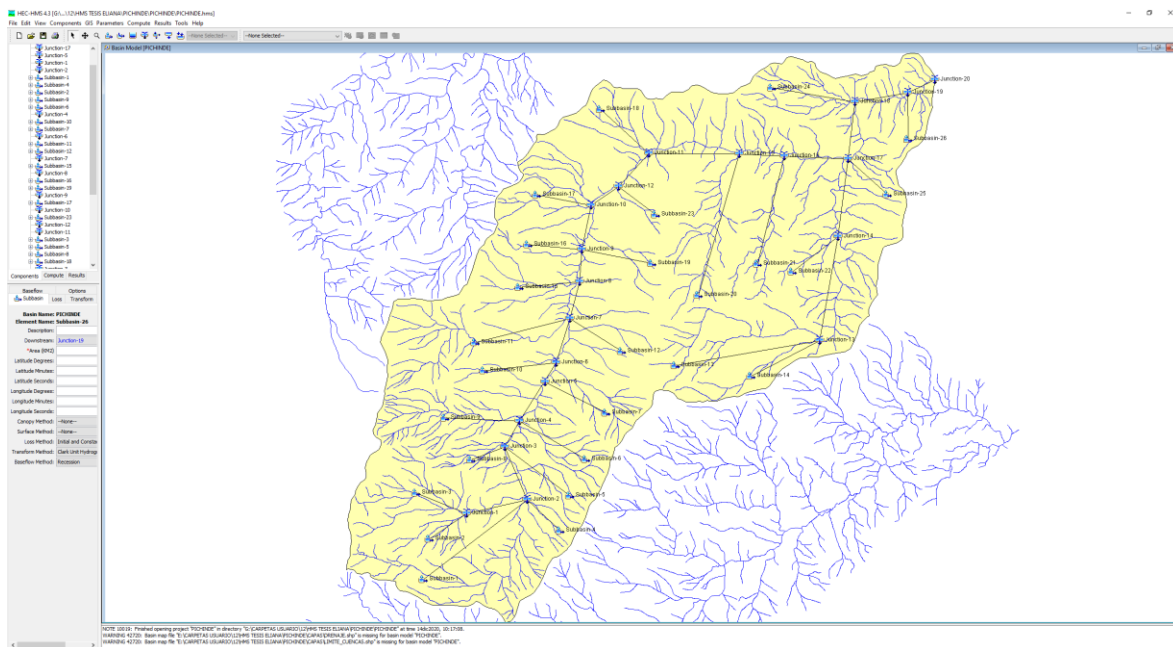


Figura No. 45. Esquemización utilizada cuenca del río Pichindé

En el anexo 3, se incluyen los resultados de modelación concernientes a los parámetros morfométricos de la cuenca y el resumen de los parámetros SMA.

Los caudales diarios simulados para la cuenca del río Pichindé se presentan en la figura 46.

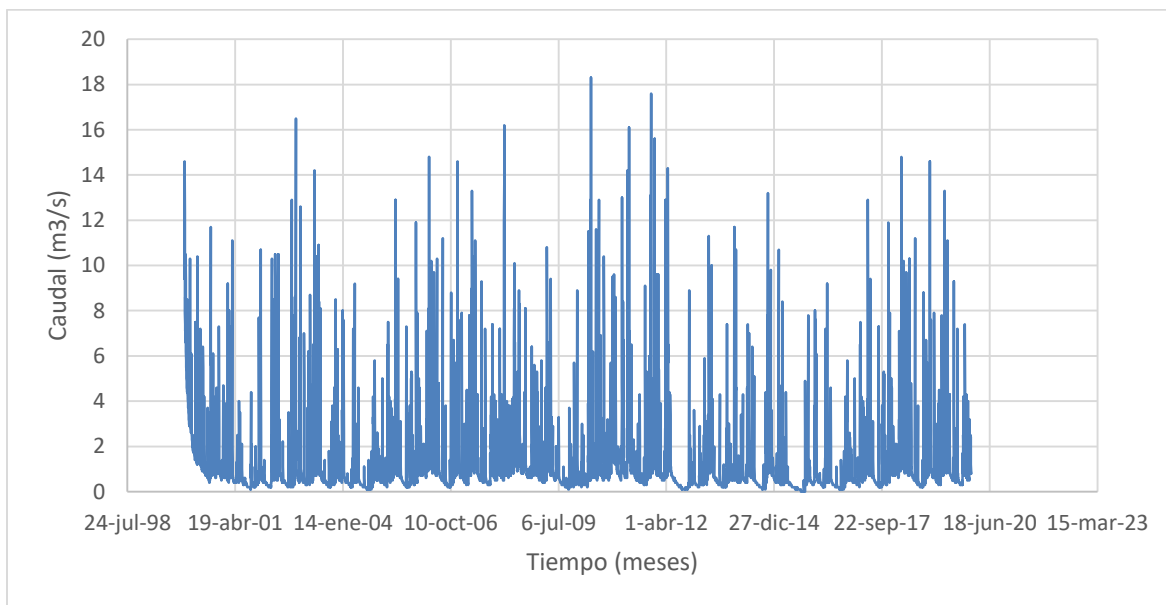


Figura No. 46. Caudales diarios cuenca río Pichindé periodo 2000 – 2019

Los caudales diarios en la cuenca del río Pichindé varían a lo largo de todo el período analizado, presentando valores máximos de $18.3 \text{ m}^3/\text{s}$ y valores medios de $1.21 \text{ m}^3/\text{s}$. Para

verificar la validez de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, se realizó la comparación de los caudales medidos con los caudales de referencia de la cuenca.

Como se observa en la figura 47, entre los caudales simulados y los caudales transpuestos existen variaciones significativas en meses como mayo (42%). Las mayores diferencias se presentaron en los meses de mayo, junio y noviembre (0.89 y 0.82 y 0.63 m³/s, respectivamente) y la menor en agosto (0.02 m³/s). En general los caudales específicos son significativamente mayores a los caudales modelados.



Figura No. 47. Comparación caudal transpuesto vs caudal simulado – Cuenca río Pichindé Estación Pichindé (1982–2019)

El coeficiente de determinación (R^2), fue 0.86, con lo permite definir que los datos simulados con el modelo hidrológico se aproximan a los datos reales.

En la figura 48, se muestra el resultado del coeficiente de Nash Sutcliffe con valor de 0.805, cuyo resultado de calibración se define como excelente de acuerdo a la tabla 9.

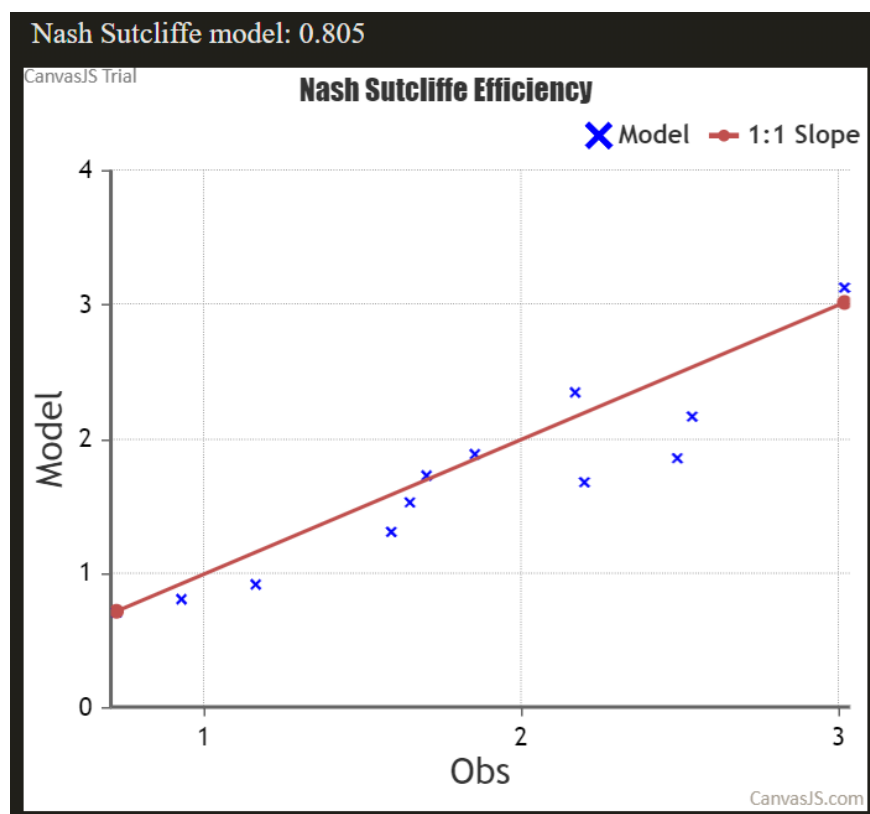


Figura No. 48. Eficiencia del modelo por el método de Nash Sutcliffe - Cuenca Río Pichindé

En vista de la eficiencia del modelo para las tres (3) cuencas hidrográficas, derivado de los buenos resultados que se obtuvieron con los datos de las estaciones, se favoreció la comparación de los caudales y se procedió a aplicar el modelo en la cuenca del río Felidia a raíz de la carencia de estaciones hidrológicas en la misma.

6.10.4 Cuenca hidrográfica río Felidia

En la cuenca del río Felidia se utilizaron 22 unidades en el proceso de la modelación con el HEC HMS y para cada una de ellas se estimaron los parámetros morfométricos, a partir de la información de precipitaciones diarias en la zona de estudio y se generaron caudales diarios para el periodo comprendido entre los años 2000 al 2019 (Ver figura 49).

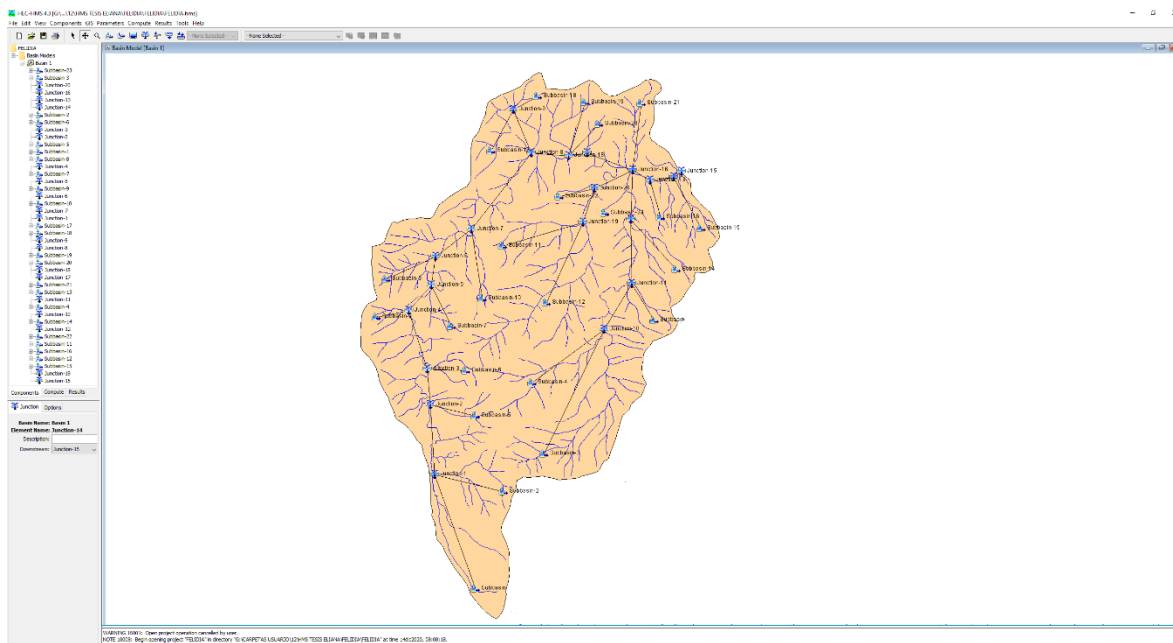


Figura No. 49. Esquematzación utilizada cuenca Felidia

En el anexo 3, se incluyen los resultados de modelación concernientes a los parámetros morfométricos de la cuenca y al resumen de los parámetros SMA.

Los caudales diarios para la cuenca del río Felidia se presentan en la figura 50.

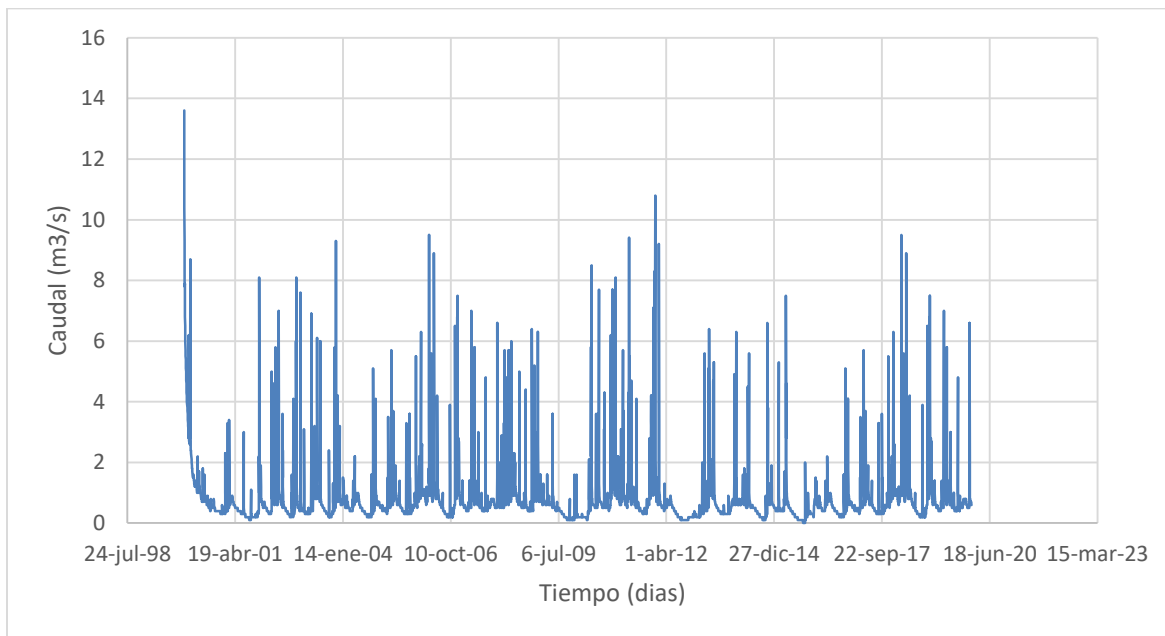


Figura No. 50. Caudales diarios cuenca del río Felidia (Periodo 2000–2019)

Los caudales diarios en la cuenca del río Felidia varían a lo largo de todo el período analizando, presentando valores máximos de 13.6 m³/s y valores medios de 0.75 m³/s.

Para verificar la validez de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, también se realizó la comparación de los caudales medios con los caudales extrapolados de la cuenca y el resultado se presenta en la figura 51.

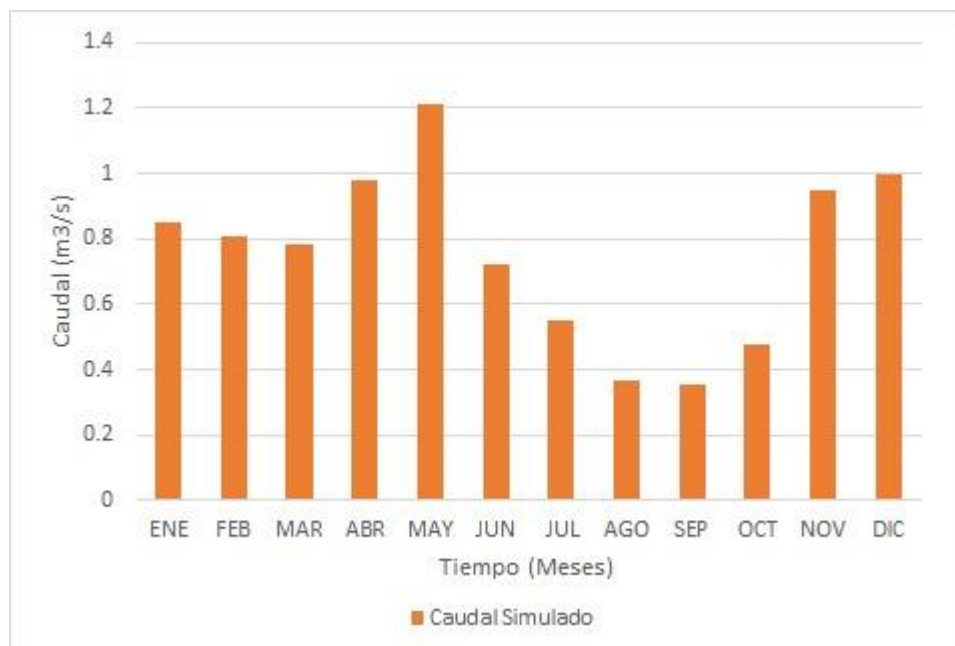


Figura No. 51. Caudales simulados – Cuenca río Felidia (1980–2019)

Con la información disponible de las estaciones emplazadas en el área de estudio, con la complementación de la información mediante el empleo del modelo HEC-HMS, se logró efectuar el análisis hidrometeorológico detallado, permitiendo efectuar la estimación de la oferta hídrica del PNNFC, no obstante se debe continuar con el estudio de las condiciones ambientales e hidrológicas de la reserva forestal para contribuir a la preservación del recurso hídrico ante los efectos del cambio climático, de la variabilidad climática y del patrón ENOS.

6.11 Comportamiento del caudal en eventos ENOS

A continuación, se presenta el análisis del comportamiento de los caudales durante los eventos ENOS (a nivel mensual) para las cuencas estudiadas, basado en el periodo de registro de cada una de las estaciones hidrológicas con información disponible. Se contempló que los caudales promedios mensuales en presencia de los fenómenos, serían deficitarios en los casos en que resultaran inferiores a los caudales mínimos mensuales multianuales medios, determinados con toda la historicidad de datos de las estaciones. Lo anterior, en vista que por la variedad de composición de las cuencas hidrográficas (referente a la cobertura vegetal) ha sido muy difícil categorizar los caudales y en consecuencia se acogió la recomendación efectuada en la Subdirección de Hidrología del IDEAM sobre trabajar con los caudales mínimos mensuales promedio.

6.11.1 Fenómeno de El Niño

6.11.1.1 Cuenca hidrográfica río Pance

Para el análisis en esta cuenca se contó con los registros de la estación Chorrera del Indio (2008-2019), pero es una estación reciente y sólo se tiene información para el periodo niño fuerte, que es el ocurrido entre 2015 y 2016. La figura 52 corresponde a la curva de duración de caudales elaborada con los datos de la estación.

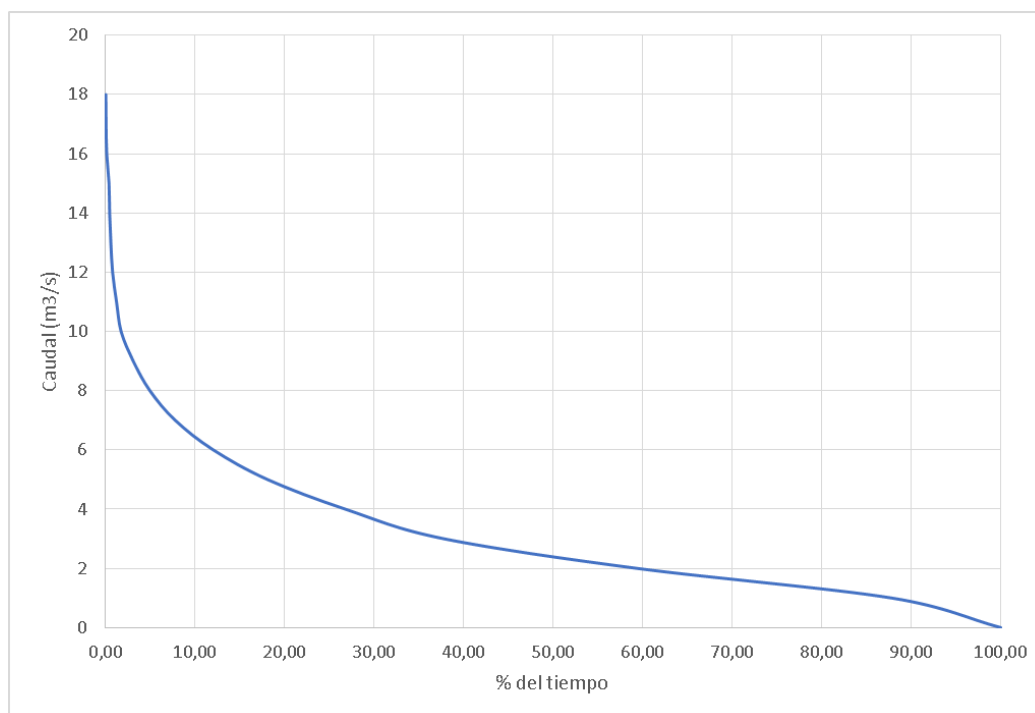


Figura No. 52. Curva de duración de caudales Est. Chorrera del Indio (2010-2019)

Para poder definir el efecto de los caudales medidos en la estación Chorrera del Indio se elaboró la tabla 22 y se trabajó con los caudales mínimos mensuales multianuales medio; además de definieron los porcentajes de ocurrencia de los caudales durante la existencia de la estación.

Tabla 22. Categorización del caudal (m³/s) CH río Pance - Fenómeno El Niño

ESTACION: Chorrera del Indio	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015											7,19	3,57
2016	3,00	3,09	5,64									
QMinMMM (2010-2019)	1,62	1,56	2,16	2,62	2,10	1,39	1,50	1,18	1,07	1,58	2,53	1,94
CDC (%)	37,80	36,60	14,30								7.80	32,20

Fuente: elaboración propia

En la cuenca del río Pance, con base en los registros de la estación Chorrera del Indio, se puede observar que los caudales medios con respecto a los caudales mínimos mensuales multianuales son superiores y la cuenca no se afectó sustancialmente en este periodo, atribuible al buen estado de su cobertura vegetal, a su conservación y al hecho que durante los meses que se presentó el fenómeno el valor total de la precipitación sólo estuvo severo en diciembre de 2015 y deficitario en enero de 2016; los demás meses mostró un comportamiento normal.

6.11.1.2 Cuenca hidrográfica río Meléndez

Para el análisis en esta cuenca se trabajó con la información de la estación El Carmelo (2013-2019), a pesar de ser una estación relativamente nueva pues sólo se tienen registros para un periodo El Niño fuerte, que fue el ocurrido entre 2015 y 2016. La figura 53 muestra la curva de variación estacional para la estación mencionada.

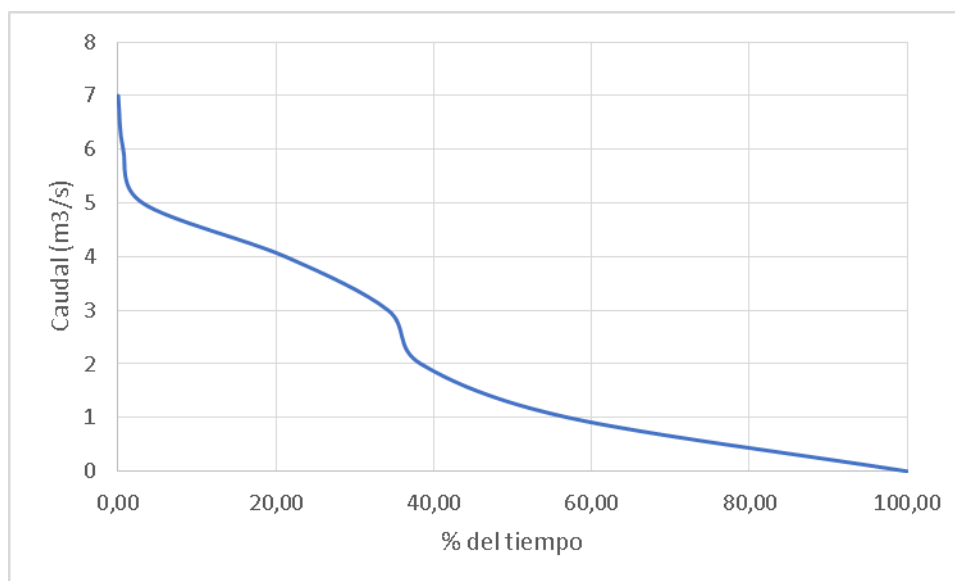


Figura No. 53. Curva de duración de caudales Est. El Carmelo (2013-2019)

En la tabla 23, se categorizaron los caudales y con la información de la curva de duración de caudales se determinaron los porcentajes en los que se han presentado los valores mensuales durante todos los años de existencia de la estación.

Tabla 23. Categorización del nivel (m³/s) CH río Meléndez - Fenómeno El Niño

ESTACION: El Carmelo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015											0,61	0,26
2016	0,20	0,20	0,52									
QMinMMM (2013-2019)	0,48	0,41	0,39	0,54	0,73	0,78	0,59	0,35	0,63	0,79	0,57	0,78
CDC (%)	98,0	98,0	95,5								93,0	97,5

Fuente: elaboración propia

En la cuenca del río Meléndez, se aprecia un déficit marcado en el periodo comprendido entre diciembre de 2015 y febrero de 2016, situación derivada de la escasa precipitación que se presentó en el mismo trimestre pues dicha información permitió catalogar el valor mensual total como déficit severo y la afectación estuvo muy marcada, debido a que la mayor parte del periodo se presentaron valores deficitarios de precipitación.

6.11.1.3 Cuenca hidrográfica río Pichindé

Para el análisis en esta cuenca sólo se emplearos los datos de la estación Pichindé, ya que es la única instalada dentro de la cuenca hidrográfica, información que permitió elaborar la figura 54.

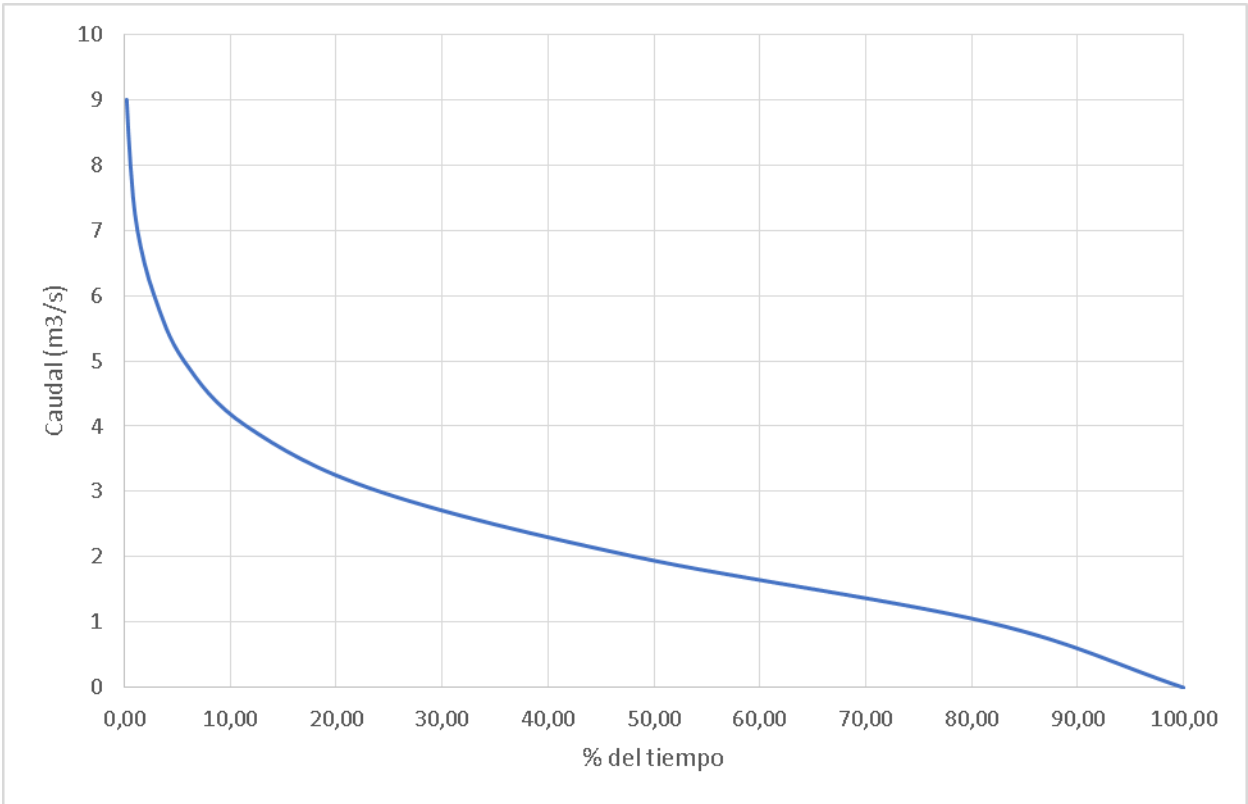


Figura No. 54. Curva de duración de caudales Est. Pichindé (1969-2019)

En la tabla 24, se consignan y categorizan los datos mensuales del caudal definiendo con base en la curva de variación estacional el porcentaje en que se han presentado los mismos caudales durante la historicidad de la estación.

Tabla 24. Categorización del caudal (m³/s) CH río Pichindé - Fenómeno El Niño

ESTACION: Pichindé	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982					4,73	2,83	1,54	0,96	1,26	2,94	3,08	2,33
1983	1,34	0,96	2,53	3,57	3,17	3,60	1,48	0,77				

ESTACION: Pichindé	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1997					3,42	4,03	1,38	0,72	0,90	0,85	3,27	1,78
1998	0,64	0,98	1,50	4,79	6,99							
2015 - 2016											2,12	2,50
	3,45	1,28	3,44									
QMinMMM (1969-2019)	1,31	1,31	1,34	1,73	2,00	1,54	1,05	0,83	0,84	1,21	1,56	1,47
CDC (%)	92,6-95,5 35,5	94-93,9 93,6	68-92 36	34 13,5	15,4-42,1 35-2,82	54-32 24,1	90,5-93,0 93,4	94,0-94,4 95,0	93,6 94,1	48,3 94,3	48,3-42,5 77,0	72,0-86,0 68,0

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los caudales medios obtenidos en el periodo 1982-1983, se puede apreciar que en la cuenca del río Pichindé se presentaron valores muy deficitarios con una reducción del caudal en los meses definidos de estiaje, siendo estos: enero (51%), febrero (25%) y agosto (7%), con respecto a los valores mínimos mensuales multianuales. Esta condición concuerda con los valores totales de precipitación obtenidos en los mismos meses, categorizados como severamente deficitarios en vista que fueron inferiores al 40% del PMM. El mismo comportamiento se presentó en el mes de enero de 1998 sin embargo, en febrero del mismo año la precipitación fue excedente a pesar que el caudal se puede definir como deficitario, probablemente por la retención de la cuenca o por el efecto localizado de la precipitación.

6.11.2 Fenómeno de La Niña

Con respecto al comportamiento de los caudales en presencia de este fenómeno, se emplearon los caudales promedios mensuales del histórico de datos de las estaciones con información en la zona de estudio y con la determinación del percentil 85 se buscó definir el efecto de los caudales en los meses que estuvo presente La Niña de los periodos: 1988–1989, 2007–2008 y 2010–2011.

6.11.2.1 Cuenca hidrográfica río Pance

Para la cuenca hidrográfica del río Pance se relacionó el caudal total mensual de la estación Chorrera del Indio y el resultado fue consignado en la tabla 25:

Tabla 25. Categorización del caudal (m³/s) CH río Pance - Fenómeno La Niña

ESTACION: Chorrera del indio	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2010 - 2011							3,03	1,98	3,08	5,81	12,39	3,47
	1,22	2,24	2,49	3,00	1,38							
Q medio (m3/s)	3,20	3,21	4,32	5,25	4,39	2,64	2,28	1,66	1,95	3,69	5,27	3,84
Percentil 85	5,03	4,44	7,24	6,89	6,31	3,73	3,03	2,74	3,08	5,45	7,19	6,06

Fuente: elaboración propia

Para el periodo comprendido entre la segunda temporada de lluvias del año 2010, se presentaron caudales que exceden los promedios mensuales multianuales en octubre y noviembre en el que los registros se excedieron en más del 60%, al igual que excede los valores de percentil 85 para ambos meses, lo que es concordante con la precipitación presentada en la cuenca en el mes de noviembre, catalogada de excedencia severa.

6.11.2.2 Cuenca hidrográfica río Pichindé

Para la cuenca hidrográfica del río Pichindé se categorizó la precipitación total mensual y el resultado fue consignado en la tabla 26:

Tabla 26. Categorización del caudal (m³/s) CH río Pichindé - Fenómeno La Niña

ESTACION: Pichindé	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1988 - 1989					3,04	3,99	2,99	1,70	2,81	2,81	4,01	3,12
	2,04	2,29	1,82									
2007 - 2008								1,46	1,37	1,36	2,43	2,36
	2,59	3,22										2,77
2010 - 2011								4,47	2,57	3,24	3,12	6,57
	3,05	2,96	2,19	4,84	3,32							4,49
Qmedio (1969-2019)	2,15	2,09	2,31	3,24	3,64	2,56	1,68	1,31	1,49	2,38	2,70	2,45
Percentil 85	3,23	3,00	3,44	4,60	5,16	3,24	2,34	1,74	2,39	3,14	3,88	3,12

Fuente: elaboración propia

En esta cuenca las excesivas lluvias presentadas a mitad del año 1988, se superpusieron a la temporada seca característica de esta época y como consecuencia se presentó un incremento en los caudales de la misma.

En lo que respecta al fenómeno correspondiente al periodo 2007-2008, los mayores valores de caudal se registraron en agosto, octubre y diciembre de 2007 y enero y febrero de 2008, periodo definido de estiaje. Un gran efecto, también se visualiza en las implicaciones del evento expresado durante el año 2010, en cuyo año se presentó un invierno de gran magnitud, definido por especialistas como uno de los más fuertes en la región Andina.

La categorización de los caudales efectuada en cada una de las cuencas hidrográficas, permitió definir el grado de afectación, por defecto o por exceso, en algunos de los meses en que se presentaron los eventos ENOS.

Para efecto de tener un mejor análisis en la tabla 27 se definen los caudales específicos en cada una de las cuencas hidrográficas analizadas, determinados a partir de los datos de caudales medios mensuales multianuales de las estaciones hidrológicas localizadas en la zona estudiada.

Tabla 27. Caudales específicos por cuenca hidrográfica (l/s/ Km²)

CUENCA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pance	124,80	125,20	168,49	204,76	171,22	102,96	88,92	64,74	76,05	143,92	205,54	149,77
Meléndez	28,84	34,02	46,01	48,28	68,37	47,63	37,27	30,78	29,81	35,64	33,05	49,25
Pichindé	37,61	36,56	40,41	56,67	63,67	44,78	29,39	22,91	26,06	41,63	47,23	42,85

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia en la tabla 27, los meses más críticos en cuanto a caudal específico son en el área de interés: agosto y septiembre en las cuencas de los ríos Pance y Pichindé; y enero y septiembre en la cuenca del río Meléndez. Por el contrario, se observa que los meses con mayor precipitación son abril y noviembre en la cuenca del río Pance; y abril y mayo en las cuencas de los ríos Meléndez y Pichindé, resultado concordante con el régimen bimodal de la zona.

Estos valores guardan alguna similitud con los consignados en el informe final de “Caudales específicos para las cuencas en el departamento del Valle del Cauca” (CVC, 2018).

6.12 Instrumentación del PNNFC

A finales del año 2017, se decidió instalar el pluviómetro en el sector Alto del Buey y a la estación se le denominó Minas del Socorro. A finales del 2021, producto del Programa de Alta Montaña del IDEAM, se construyó e instaló la estación hidroclimatológica automática a 3181,2 msnm, la cual se puso en marcha a mediados de febrero de 2022. El sensor de nivel se instaló en la quebrada Las Juntas cercana a la estación climatológica.



Figura No. 55. Estación hidroclimatológica automática Alto del Buey – IDEAM 2020

7. Conclusiones

- Con base en el área de estudio y en la representatividad de las cuencas hidrográficas analizadas, se encontró que la oferta hídrica en la **CH del río Pance** en presencia del Fenómeno de El Niño genera un caudal específico aproximado a 113.1 l/s/km^2 y durante el Fenómeno de La Niña a 136.5 l/s/km^2 . Para la **CH del río Meléndez** el caudal se estima en 29.2 l/s/km^2 durante el fenómeno de El Niño y en 123.4 l/s/km^2 durante La Niña. Por último, los caudales específicos de la **CH del río Pichindé**, se definieron en 38.5 l/s/km^2 para el Fenómeno de El Niño y en 54.5 l/s/km^2 para el Fenómeno de La Niña. Los mayores valores se generaron en la cuenca hidrográfica del río Pance, atribuible al estado de conservación de la cobertura vegetal, al hecho que registra mayor precipitación y tiene menor afectación por intervención antrópica.
- En las cuencas hidrográficas analizadas, con respecto al caudal específico, se encontró que el déficit se presenta en septiembre y el exceso en noviembre para el caso de la cuenca del río Pance. Para las cuencas de los ríos Meléndez y Pichindé, el mes que produce mayor impacto en las cuencas es agosto y el de los excesos es mayo.
- La ejecución de esta tesis y la gestión técnico administrativa entre el personal del IDEAM y de PNNFC, permitió la instalación de la estación pluviométrica en sector de Minas del Socorro a 3184 msnm, a finales del año 2017 y contribuyó a la construcción y puesta en marcha de la estación hidroclimatológica automática en el sector Alto del Buey (con recursos propios del IDEAM a 3181.2 msnm), como avance importante en el programa de monitoreo de Alta Montaña. Esto permitirá disponer de información en la zona de paramo y hacer seguimiento a la respuesta del PNNFC al cambio climático.
- Se evidenció que, en la zona de estudio, por efecto orográfico del PNNFC y por comportamiento de las corrientes, la precipitación es mayor en la zona sur y por ello el resultado del análisis efectuado con la información de las estaciones posicionadas en sentido norte a sur.
- La temperatura del aire y el caudal presentaron menor variación en los patrones de correlación con la TSM y el SOI comparado con la precipitación y con respecto a la correlación, se comprobó que el mayor valor se obtuvo en la región 3-4 y el menor valor con la variable NIÑO 4.
- El índice de oscilación del sur (SOI) está directamente relacionado con la precipitación; debido a que cuando el SOI se hace más negativo, la precipitación en la zona disminuye, y viceversa. La explicación física del proceso está dada por el establecimiento de una celda anómala de Hadley sobre el norte de Suramérica, cuya componente descendente previene el ascenso convectivo sobre la región y contribuye a la disminución de la precipitación.

- Al realizar la validación de los resultados de la modelación hidrológica, generalmente no existen diferencias significativas entre lo observado y lo simulado. En general los caudales extrapolados son ligeramente mayores a los caudales simulados pero el resultado de la calibración se define como excelente, de acuerdo a los valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.
- En lo que, respecto a la cobertura vegetal, afortunadamente el PNNFC se conserva como reserva forestal y el personal de PNN está trabajando intensamente para recuperar las zonas afectadas, sin dejar de reconocer el valioso acompañamiento del Ejército Nacional. Los recorridos por la extensión del parque son continuos y las actividades de gran impacto están siendo minimizadas, situación que ha permitido recuperar la fauna que se consideraba extinta.
- El PNNFC es una gran fuente productora de agua para la ciudad de Cali, por las múltiples corrientes que nacen en su interior y sustentan su potencial hídrico y por consiguiente debe respetarse la actividad ambiental para la cual está destinada la reserva natural.

8. Recomendaciones

- Ante la imperante necesidad de obtener datos completos y confiables de las entidades que con su red de estaciones producen información, se recomienda el desarrollo de un trabajo interdisciplinario e interinstitucional que garantice la continua evaluación estadística de los datos que se ponen a disposición de los usuarios. Es trascendental garantizar la calidad de la información para que los resultados de los trabajos de investigación sean cada vez más ajustados a la realidad.
- Es relevante que la información hidrometeorológica disponible en los portales de las diferentes entidades, sea validada antes de ponerla a disposición de los usuarios, que se actualice con mayor periodicidad y que se garantice la calidad de la misma desde su producción en campo (calibración del instrumental, reinducción de los observadores voluntarios en la toma de lecturas y consignación de datos en los diarios de observaciones) hasta el trabajo en oficina (revisión, validación, captura y verificación de datos).
- Es pertinente instrumentar el PNNFC con estaciones hidrometeorológicas automáticas, especialmente en Alta Montaña, para hacer seguimiento a la afectación de los diferentes parámetros por acción de los fenómenos ENOS. La información es útil para sustentar el efecto del cambio climático y la respuesta del Parque ante eventos extremos, de gran incidencia en la oferta hídrica.

- Se requiere instalar una estación limnigráfica en la cuenca del río Felidia y desarrollar la actividad foronómica en variados puntos del PNNFC, para garantizar un adecuado seguimiento al comportamiento de la oferta hídrica en diferentes épocas del año y facilitar la construcción de las curvas de gasto en las diversas cuencas hidrográficas que drenan hacia la ciudad de Cali.
- Es pertinente orientar la investigación a la dinámica de comportamiento hidrológico del PNNFC, para ajustar los valores de la oferta hídrica obtenidos en esta tesis, teniendo en cuenta el abastecimiento de los asentamientos poblacionales y las diferentes concesiones de agua, ante los cambios globales y el comportamiento del clima.
- Con el uso de información satelital, es recomendable la puesta en marcha de un sistema de alertas tempranas dentro del PNNFC y su zona de influencia, atendiendo la variación altitudinal y la respuesta hidrológica por la variedad de pendientes que, ante un evento de movimientos en masa o arrastre de materiales, ponen en riesgo por exposición a diferentes usuarios y afectan los servicios ecosistémicos o ambientales. Es imperante que se haga seguimiento a la regulación de los fenómenos hidrometeorológicos.
- La educación ambiental y la cultura hídrica deben ser reforzados a todo nivel para hacer efectiva la valoración del recurso hídrico. El cambio de mentalidad o paradigma es un reto para que la gobernanza y la gobernabilidad permitan asumir los roles de los diferentes actores y así hacer posible una gestión integral del recurso hídrico de calidad. Es trascendental que haya una concientización o una reflexión de los efectos que se producen a lo largo de las cuencas hidrográficas del PNNFC cuando se contribuye a la contaminación de las mismas y por consiguiente a la afectación de la flora y de la fauna, de los servicios ecosistémicos y ambientales que tanto inciden en la seguridad hídrica. Todas las acciones sobre el recurso hídrico deben ser transparentes, por ello es crucial ejercer la gobernanza del agua como bien común.
- Urge desarrollar estudios y programas que permitan cuantificar la amenaza del PNNFC ante el impacto de los diferentes eventos: movimientos en masa, inundaciones, incendios forestales y minería artesanal entre otros, para que se logre emitir alertas tempranas que hagan efectiva la mitigación de los efectos a todo nivel, máxime cuando los ecosistemas responden al cambio climático.
- La gobernanza local es definitiva para hacer efectivo el control de acceso de visitantes con fines diferentes a la conservación ambiental y así fortalecer la ejecución de actividades de remediación ambiental al interior del PNNFC. Es procedente la revisión de las políticas ambientales pues quizás la problemática radica en la deficiente gestión del recurso hídrico.

9. Bibliografía

Aqua Risc. (2018). Vulnerabilidad climática en las diferentes cuencas de estudio bajo escenarios de variabilidad climática y tendencias de cambio climático.

Armenteras, D., Cadena, V C., Moreno, R.P. (2007). Evaluación del estado de los bosques de niebla y de la meta 2010 en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá, D.C. – Colombia. 72 p.

Auto 36 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por medio del cual se requiere información adicional. 23 de febrero de 2015.

Ávila, A., Carvajal, Y. & Gutiérrez, S. 2014. Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18, 120-133.

Bedoya, M., Contreras, C. & Ruiz, F. 2014. Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático. *Estudio Nacional del Agua 2010*, 282-320.

Behar, R. (1997). Comprendiendo la Estadística: Usando el sentido común. Universidad Del Valle.

Boulanger, J.-P, Leloup, J., Penalba, O., Rusticucci, M., Lafon, F. & Vargas, W. (2005). Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate dynamics*, 24, 393-413.

Bridgam, H. A. & Oliver, J. E. (2014). *The global climate system: patterns, processes, and teleconnections*, Cambridge University Press.

Cai, W., Van Rensch, P., Cowan, T. & Hendon, H. (2012). An asymmetry in the IOD and ENSO teleconnection pathway and its impact on Australian Climate. *Journal of Climate*, 25, 6318-6329.

Carvajal, Y. (2004). *Uso de Métodos Funciones Ortogonales Empíricas y Análisis de Correlación Canónica en el Estudio de la Variabilidad Hidrometeorológica. Caso de aplicación al Valle del Cauca-Colombia*. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia.

Castro, L. Carvajal, Y. (2006). Análisis Exploratorio y Cuantitativo para Determinar la Estacionariedad de las Series Hidrometeorológicas. XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.

Carvajal, Y., Peña, E., Cantera, J. (2016). Parque Nacional Natural Farallones. Un tesoro hídrico de Colombia. Cap.2 77-95.

Carvalho-Santos, C., et al. (2014). Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale. *Ecological Complexity*, 20, 69-80.

Casallas, E. (2016). *Caracterización de usos del Recurso Hídrico en el Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2018). Caudales específicos para las cuencas del departamento del Valle del Cauca.

Coy, L. (2017). *Ajuste y validación del modelo Precipitación - Escorrentía GR2M aplicado a la Subcuenca Nevado*. [Tesis de pregrado]. Universidad Santo Tomas.

Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente. (13 de diciembre de 2017). Por qué conservar los ecosistemas del Parque Nacional Natural Farallones de Cali? http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/115091/por_que_conservar_los_ecosistemas_del_parque_nacional_natural_farallones_de_cali/

Díaz-Granados, M., Navarrete, J., Suarez, T. Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de ingeniería*, (22). 64-75.

Glantz, M. H., Katz, R. W. & Nicholls, N. (1991). *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*, Cambridge University Press Cambridge.

Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental – GESHA. (2004). Estudio de Recursos Hídricos: Plan de Investigación Integral para la Caracterización y Diagnóstico Ambiental de los Sistemas Acuáticos de Cantabria. Consejería de Medio Ambiente; Empresa de Residuos de Cantabria.

Guzmán, D., Ruiz, J., Cadena, M. (2014). Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual a través de análisis de componentes principales (ACP).

Hurtado, G., (2000). La precipitación en Colombia. Nota Técnica IDEAM, IDEAM - METEO/006-00.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2005). Atlas Climatológico de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Universidad Nacional de Colombia. (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia. Imprenta Nacional de Colombia. ISBN: 978-958-8067-97-1.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). Estudio Nacional del Agua. Panamericana Formas e Impresos S.A. ISBN: 978-958-8067-70-4.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). *Cambio climático*. Ministerio de Ambiente. http://www.ideam.gov.co/web/atencion_y_participación_ciudadana/cambio-climático).

Marín, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*. [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana.

Mayorga, R. (2003). *Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

Mesa, O., Poveda, G., & Carvajal, L. (1997). Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCA.

Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Ni, S., Chen, J., Wilson, C. R., Li, J., Hu, X. & Fu, R. 2018. Global Terrestrial Water Storage Changes and Connections to ENSO Events. *Surveys in Geophysics*, 39, 1-22.

Parques Nacionales Naturales. Portal Institucional. (25 de mayo 2019). http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/region-pacifico/parque_nacional-natural-farallones-de-cali/

Parques Nacionales Naturales. (2017). Presentación Informe: Explotación Ilícita de Yacimientos Auríferos en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali en jurisdicción del municipio de Santiago de Cali.

Pérez, M., & Quispe, P. (2017). *Estimación de volumen de agua superficial en las cuencas de los ríos Totaré, Coello y Totaré-Coello en el municipio de Ibagué, departamento de Tolima Aplicando el modelo hidrológico Disapro I*. [Tesis de especialización]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28, 201-222.

Trenberth, K. E. & Stepaniak, D. P. 2001. Indices of El Niño Evolution. *Journal of climate*, 14, 1697-1701.

Unidad Nacional Para La Gestión Del Riesgo De Desastres – COLOMBIA. (2016). Fenómeno El Niño, Análisis Comparativo 1997 – 1998 // 2014 – 2016.

10. Anexos

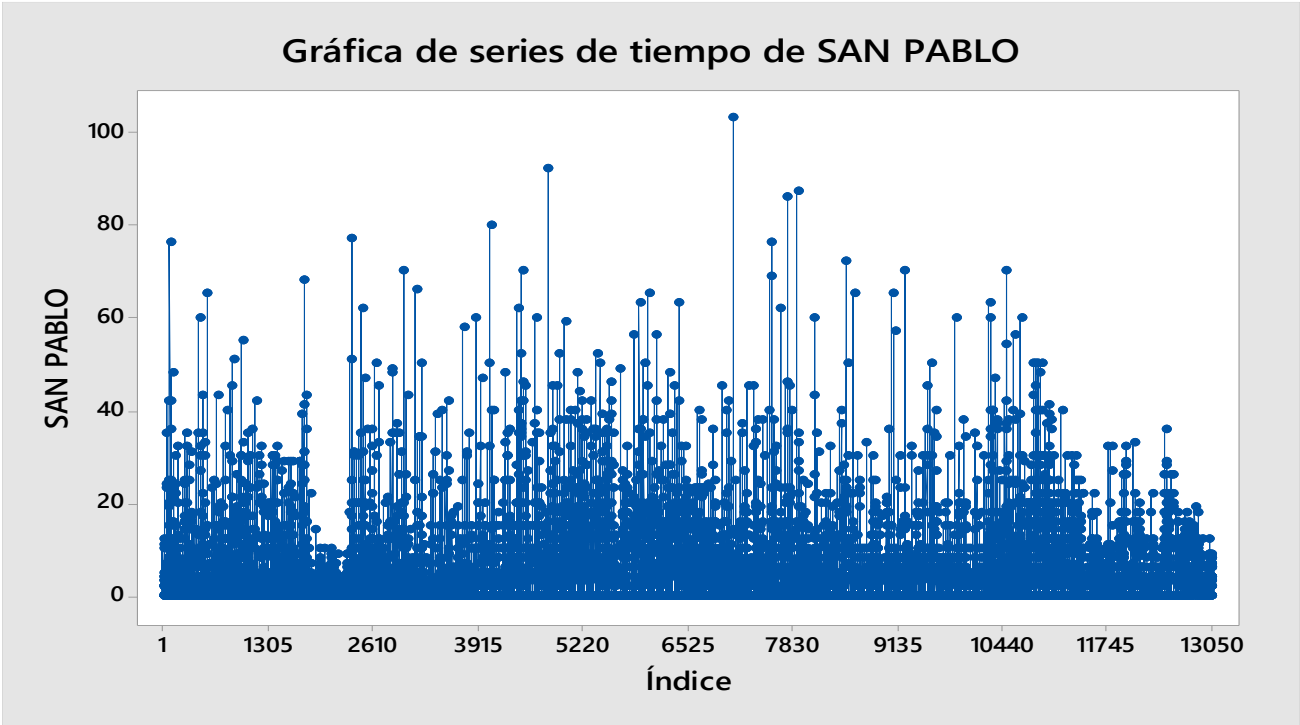
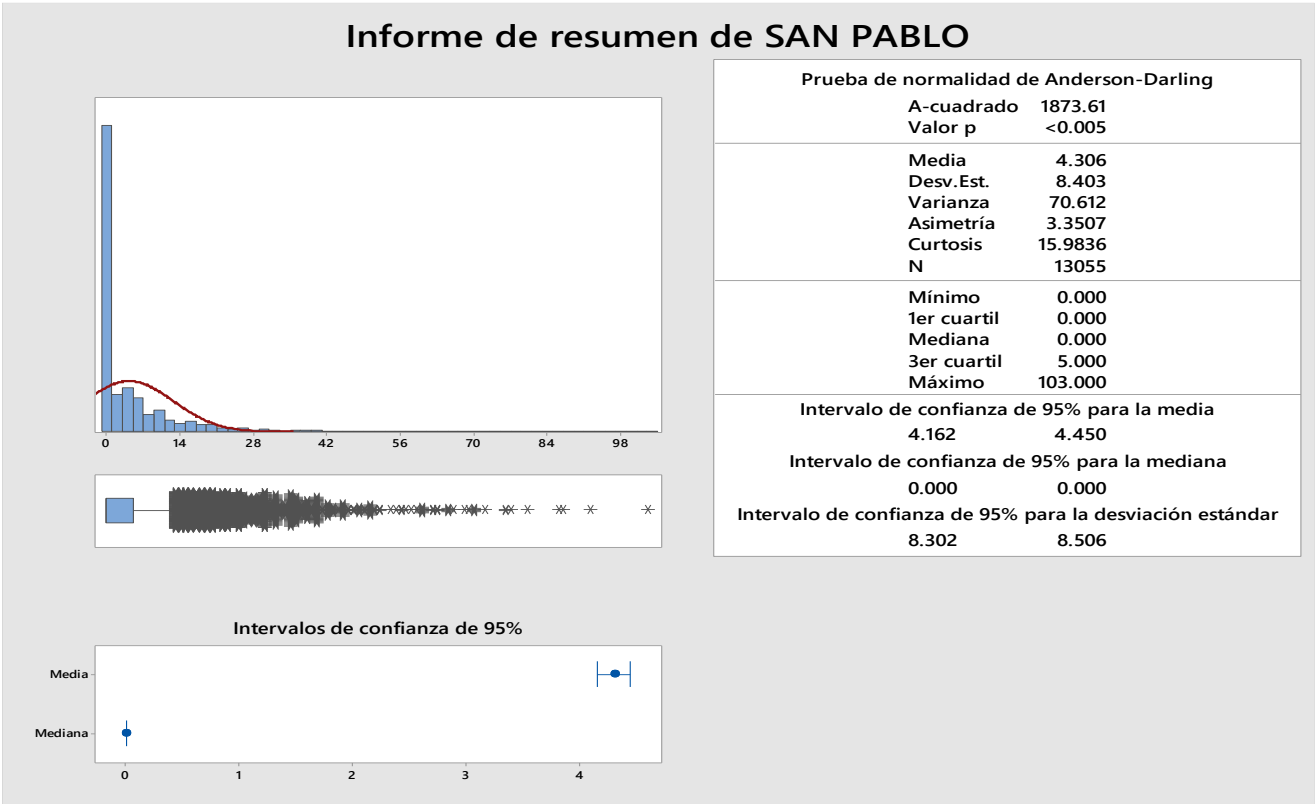
Anexo 1. Fotografías visita de inspección a la zona en estudio



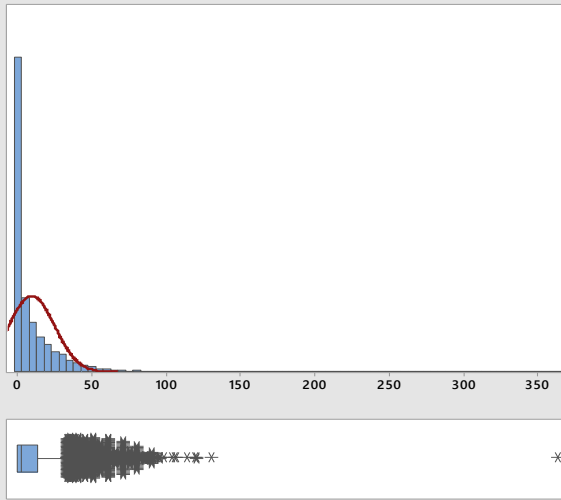


Fotografías de los lugares visitados para la instalación de la estación climatológica automática y panorámicas tomadas durante el recorrido.

Anexo 2. Análisis exploratorio de datos y resultado de las correlaciones



Informe de resumen de SAMARKANDA



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 1484.72
Valor p <0.005

Media 9.317
Desv.Est. 15.454
Varianza 238.831
Asimetría 3.1341
Curtosis 26.8852
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 2.000
3er cuartil 13.000
Máximo 363.000

Intervalo de confianza de 95% para la media

9.052 9.583

Intervalo de confianza de 95% para la mediana

1.000 2.000

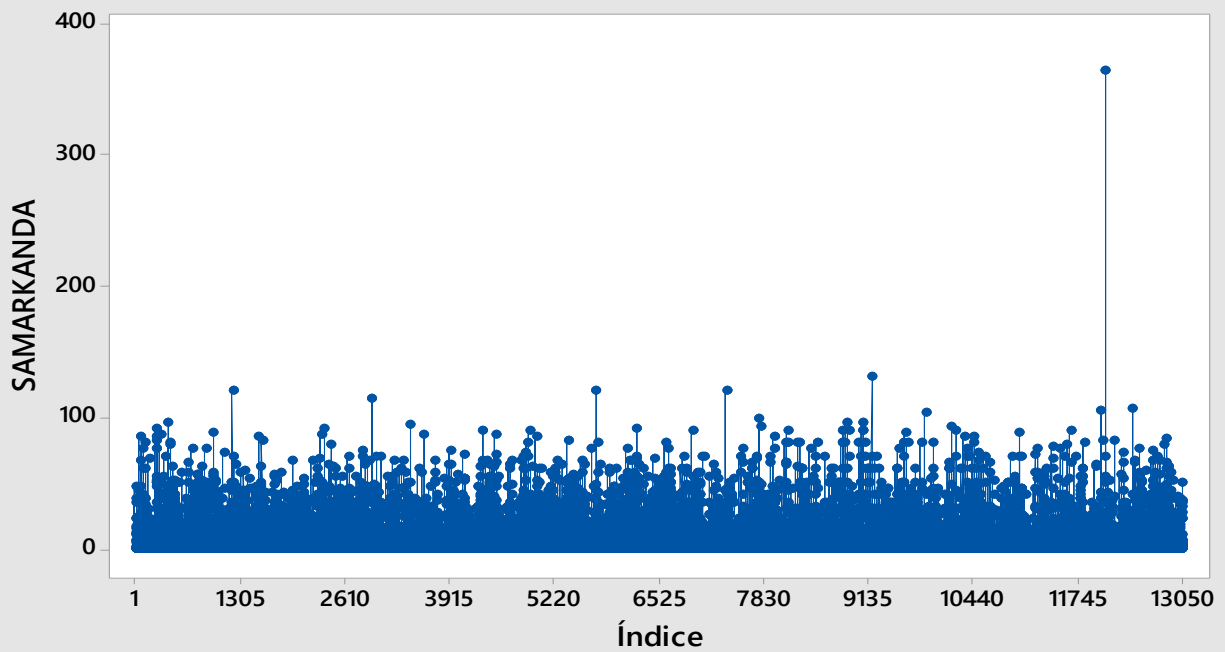
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

15.269 15.644

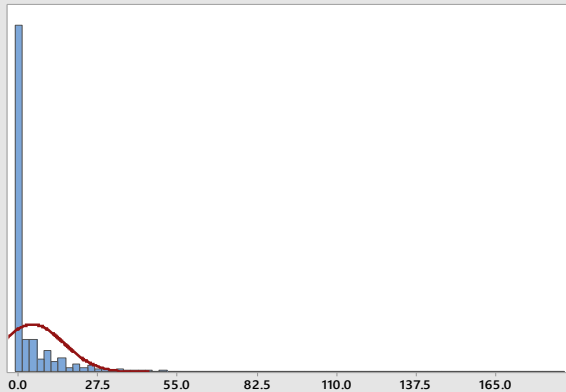
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de SAMARKANDA



Informe de resumen de YANACONAS



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 2315.52
Valor p <0.005

Media 4.797
Desv.Est. 10.868
Varianza 118.104
Asimetría 3.9585
Curtosis 24.5025
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 0.000
3er cuartil 4.000
Máximo 188.000

Intervalo de confianza de 95% para la media

4.611 4.984

Intervalo de confianza de 95% para la mediana

0.000 0.000

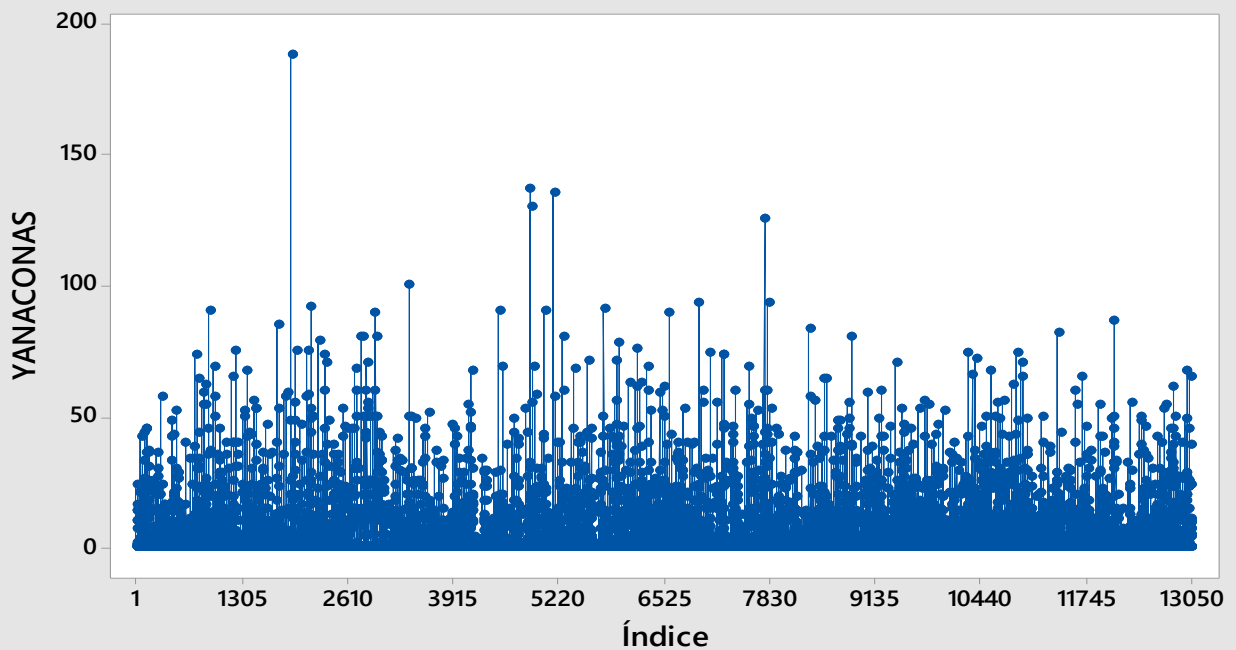
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

10.737 11.001

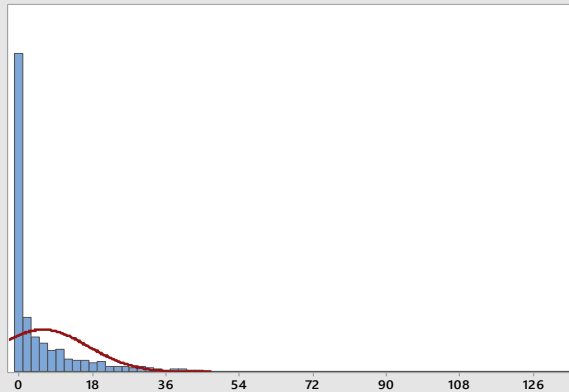
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de YANACONAS



Informe de resumen de PENAS BLANCAS



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 1846.96
Valor p <0.005

Media 5.812
Desv.Est. 11.085
Varianza 122.875
Asimetría 3.2419
Curtosis 15.8410
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 0.000
3er cuartil 7.000
Máximo 134.000

Intervalo de confianza de 95% para la media
5.622 6.002

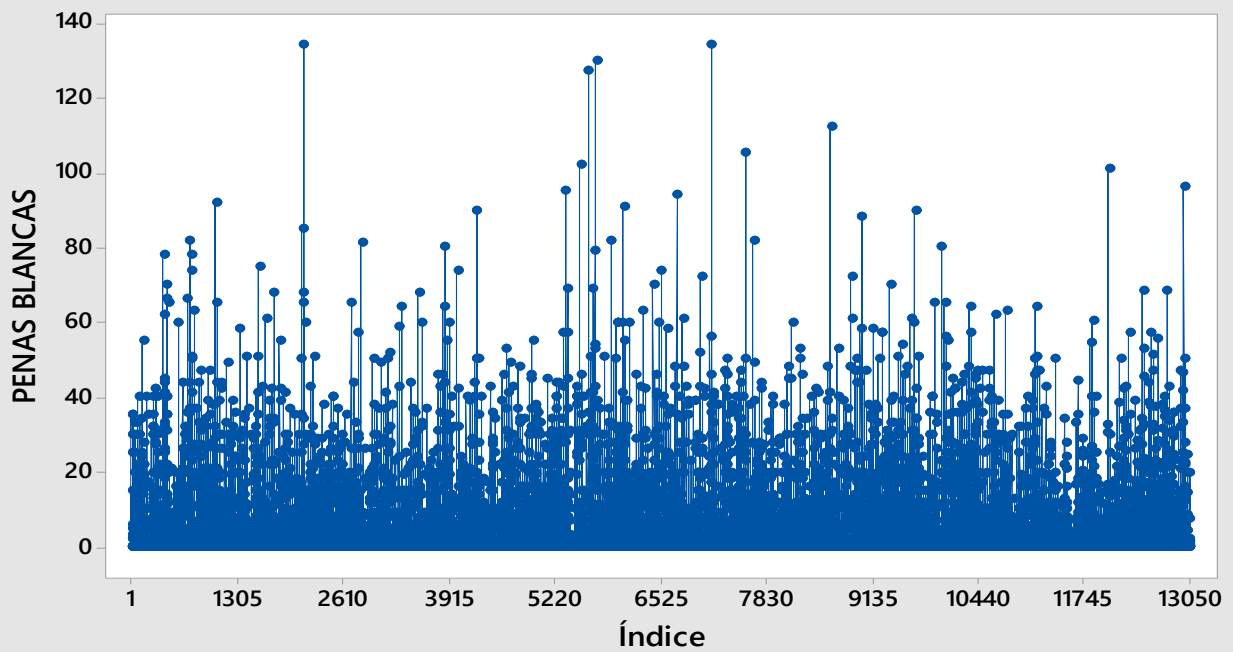
Intervalo de confianza de 95% para la mediana
0.000 0.000

Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar
10.952 11.221

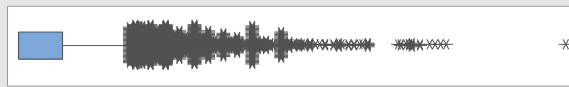
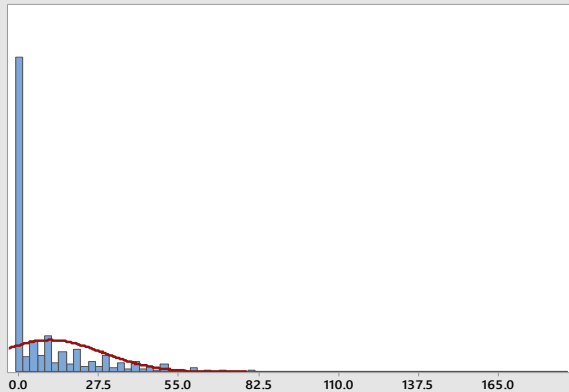
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de PENAS BLANCAS



Informe de resumen de PENA MONA

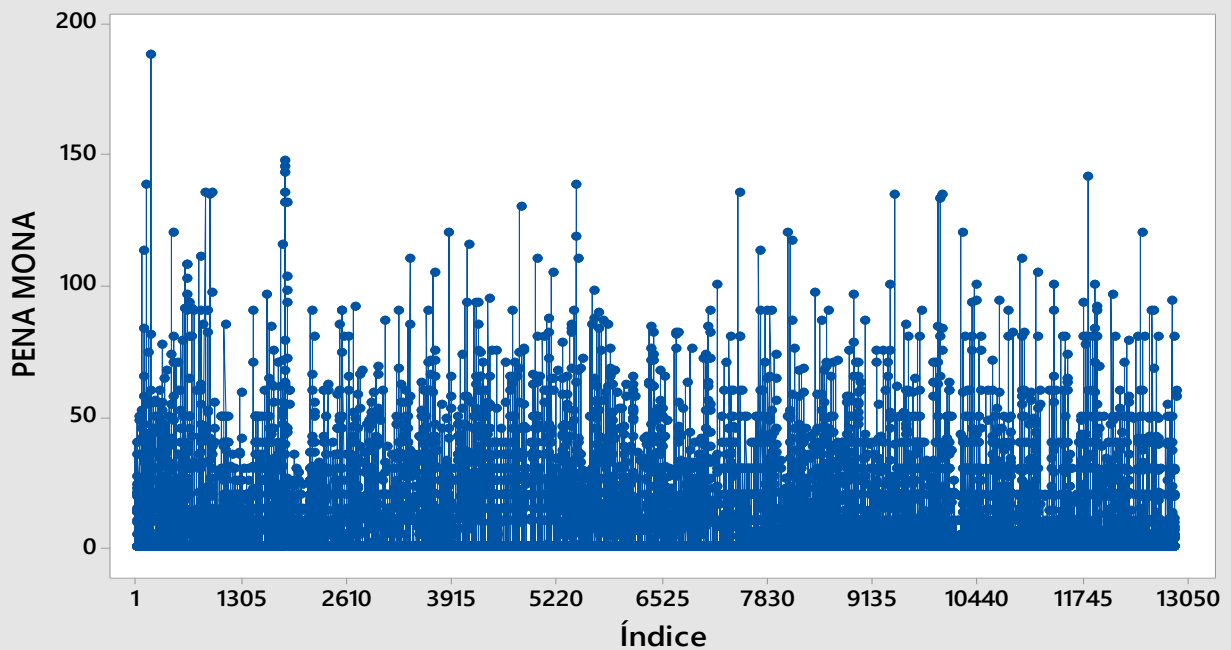


Prueba de normalidad de Anderson-Darling	
A-cuadrado	1561.26
Valor p	<0.005
Media	10.700
Desv. Est.	18.155
Varianza	329.591
Asimetría	2.50891
Curtosis	8.30933
N	12889
Mínimo	0.000
1er cuartil	0.000
Mediana	0.000
3er cuartil	15.000
Máximo	188.000
Intervalo de confianza de 95% para la media	
10.386	11.013
Intervalo de confianza de 95% para la mediana	
0.000	0.000
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar	
17.936	18.379

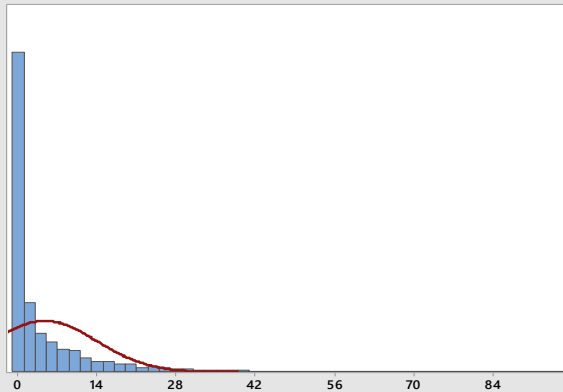
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de PENA MONA



Informe de resumen de LA TERESITA



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 1897.17
Valor p <0.005

Media 4.7085
Desv.Est. 9.1904
Varianza 84.4640
Asimetría 3.2577
Curtosis 14.2898
N 13055

Mínimo 0.0000
1er cuartil 0.0000
Mediana 0.0000
3er cuartil 5.0000
Máximo 95.0000

Intervalo de confianza de 95% para la media

4.5508 4.8661

Intervalo de confianza de 95% para la mediana

0.0000 0.0000

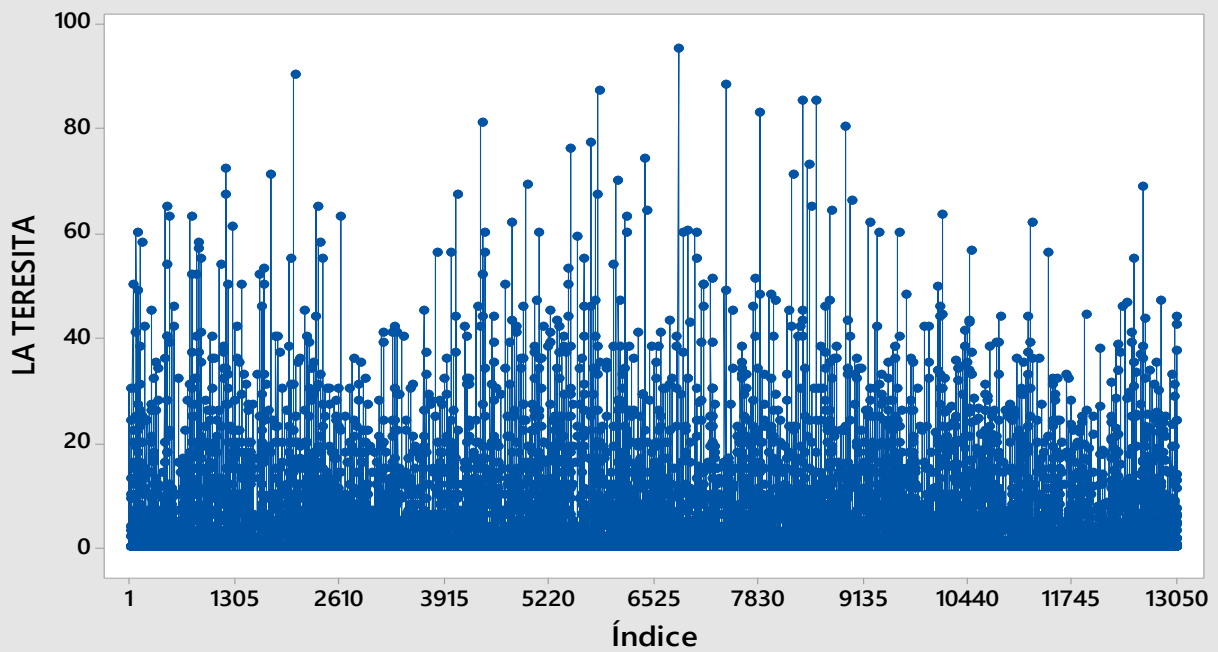
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

9.0803 9.3033

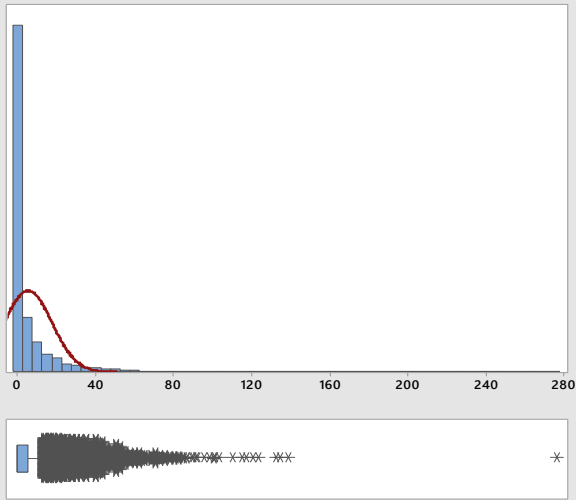
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de LA TERESITA



Informe de resumen de LA FONDA



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 2345.09
Valor p <0.005

Media 5.347
Desv.Est. 12.269
Varianza 150.534
Asimetría 4.2559
Curtosis 34.0638
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 0.000
3er cuartil 5.000
Máximo 276.000

Intervalo de confianza de 95% para la media

5.137 5.558

Intervalo de confianza de 95% para la mediana

0.000 0.000

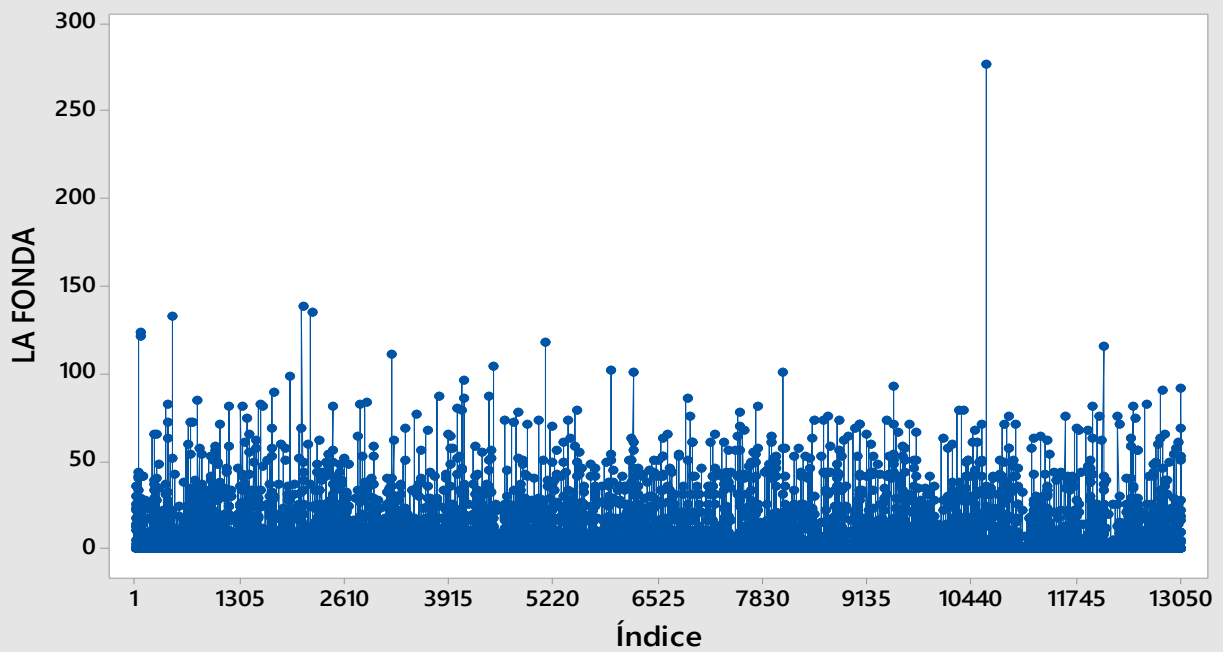
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

12.122 12.420

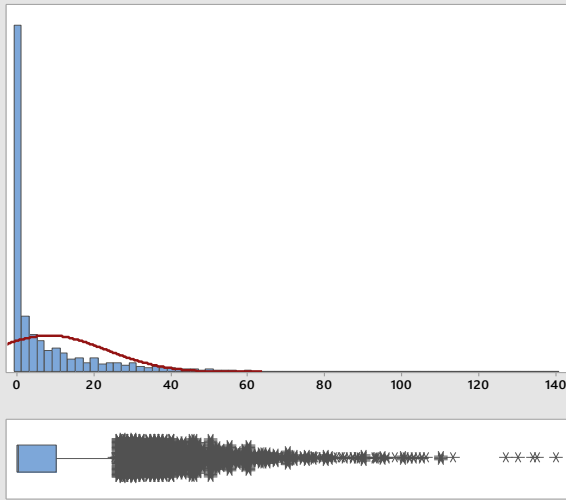
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de LA FONDA



Informe de resumen de LA ARGENTINA



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 1767.66
Valor p <0.005

Media 8.226
Desv. Est. 14.916
Varianza 222.474
Asimetría 2.74149
Curtosis 9.54492
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 0.200
3er cuartil 10.000
Máximo 140.000

Intervalo de confianza de 95% para la media

7.970 8.482

Intervalo de confianza de 95% para la mediana

0.000 1.000

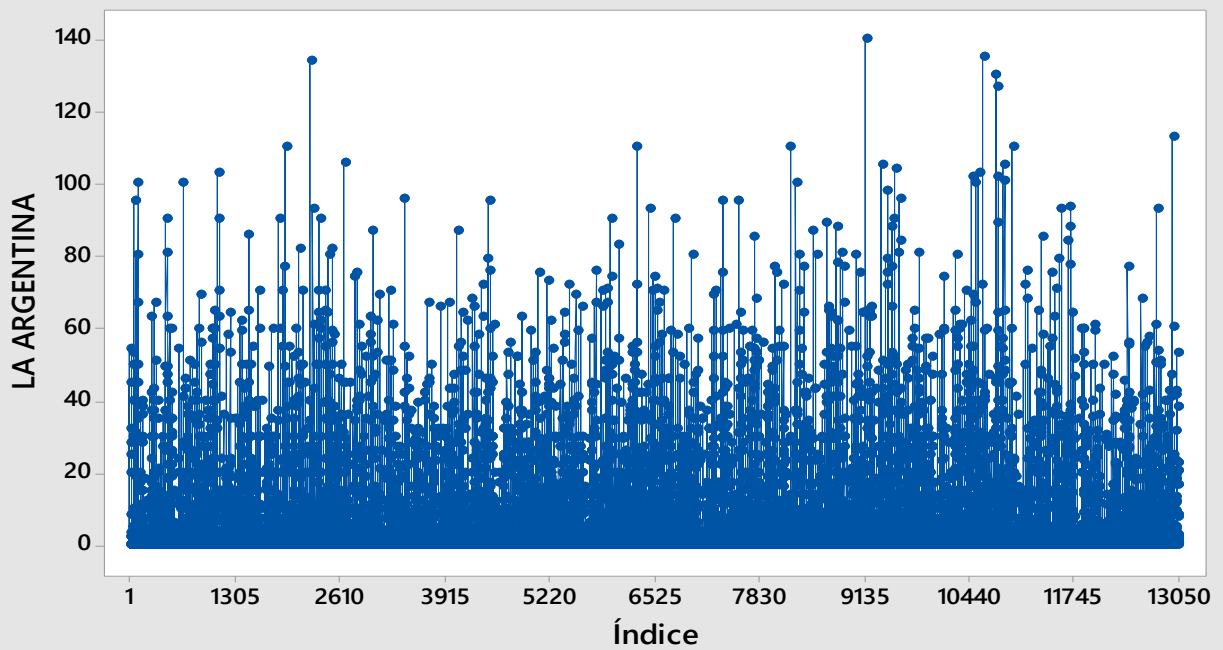
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

14.737 15.099

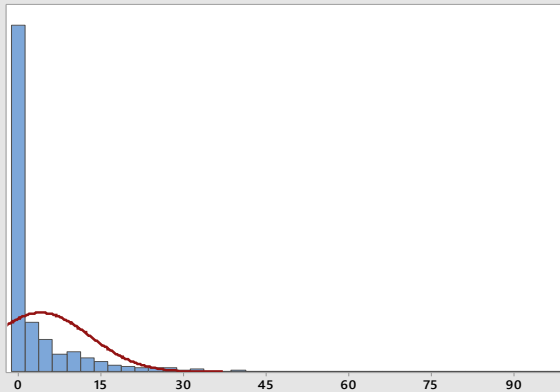
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de LA ARGENTINA



Informe de resumen de FELIDIA



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 292.02
Valor p <0.005

Media 4.0991
Desv.Est. 8.9264
Varianza 79.6810
Asimetría 3.8191
Curtosis 20.1196
N 1758

Mínimo 0.0000
1er cuartil 0.0000
Mediana 0.2000
3er cuartil 4.0000
Máximo 97.6000

Intervalo de confianza de 95% para la media

3.6816 4.5167

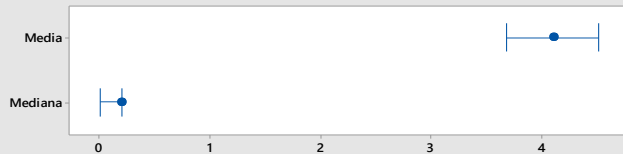
Intervalo de confianza de 95% para la mediana

0.0000 0.2000

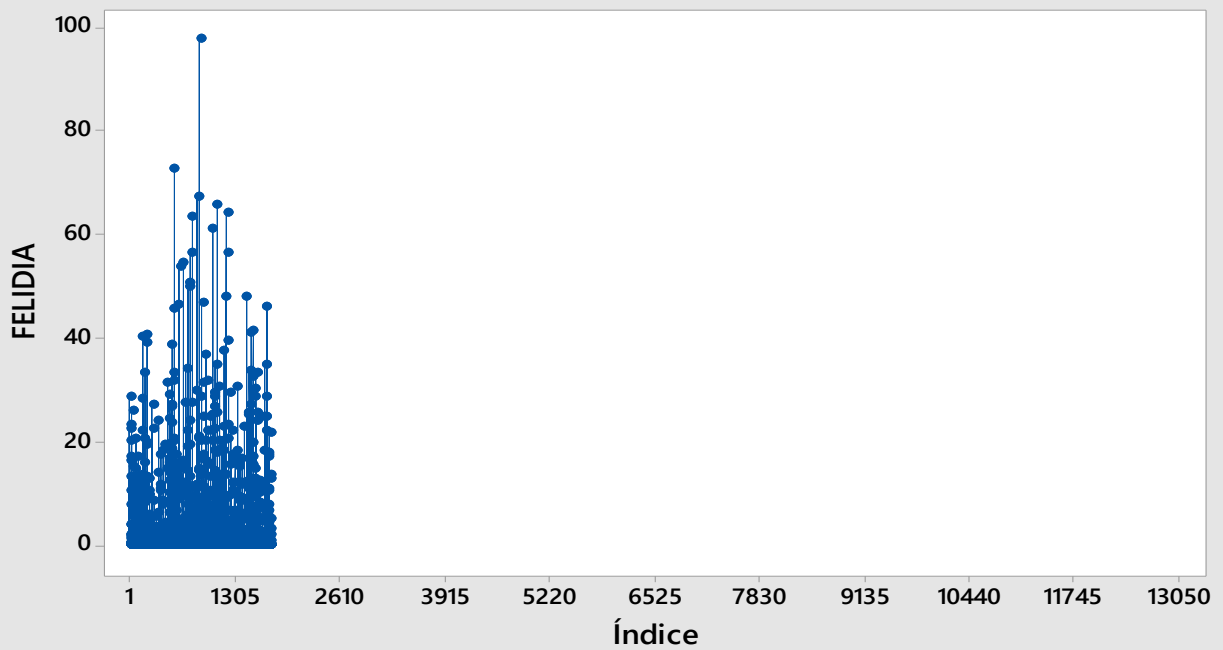
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

8.6408 9.2317

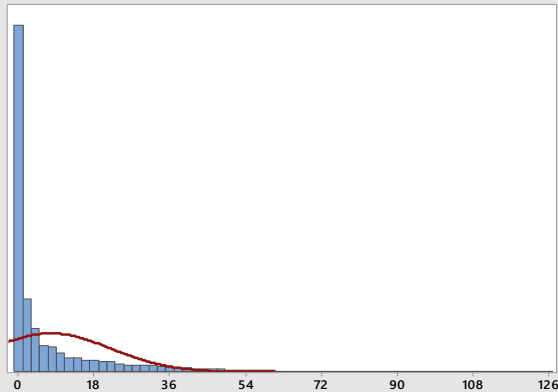
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de FELIDIA



Informe de resumen de EL TOPACIO



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 1850.29
Valor p <0.005

Media 7.706
Desv.Est. 14.220
Varianza 202.212
Asimetría 2.69396
Curtosis 8.68993
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 0.800
3er cuartil 9.000
Máximo 125.000

Intervalo de confianza de 95% para la media
7.462 7.950

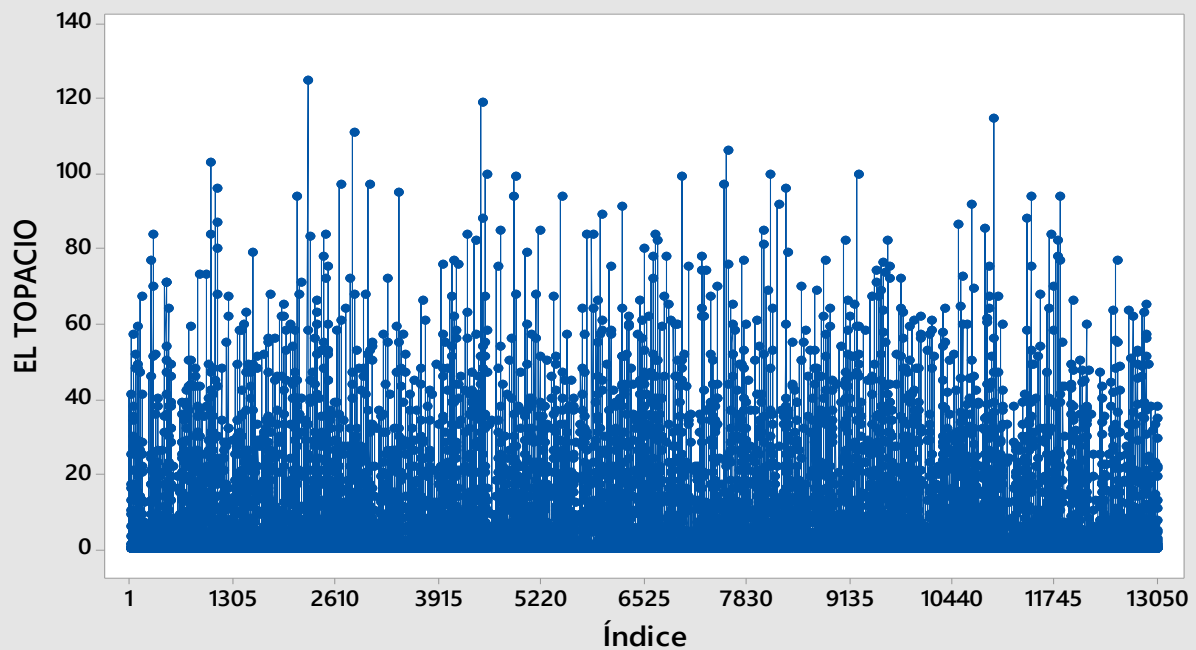
Intervalo de confianza de 95% para la mediana
0.300 1.000

Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar
14.050 14.395

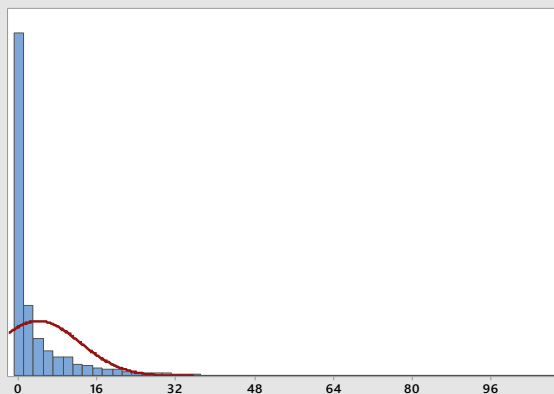
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de EL TOPACIO



Informe de resumen de BRASILIA



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 2141.64
Valor p <0.005

Media 3.987
Desv.Est. 8.516
Varianza 72.530
Asimetría 3.6587
Curtosis 18.7747
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 0.000
3er cuartil 4.000
Máximo 107.000

Intervalo de confianza de 95% para la media

3.841 4.133

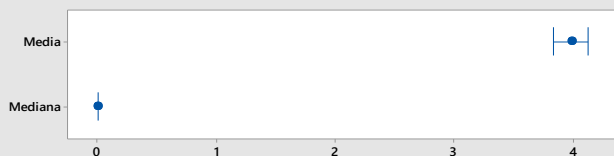
Intervalo de confianza de 95% para la mediana

0.000 0.000

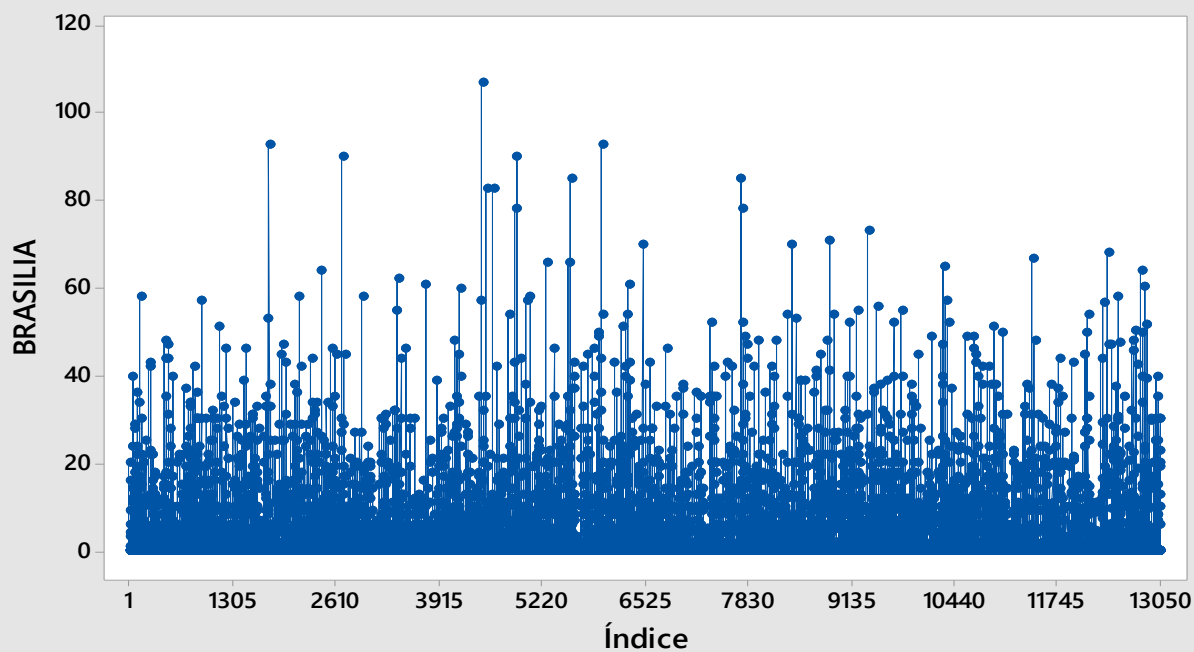
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

8.414 8.621

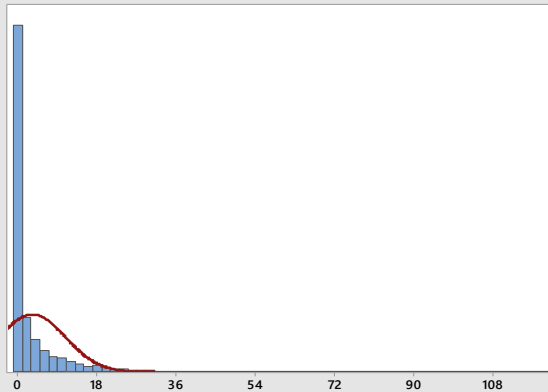
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de BRASILIA



Informe de resumen de AGUACATAL



Prueba de normalidad de Anderson-Darling

A-cuadrado 2331.89
Valor p <0.005

Media 3.260
Desv.Est. 7.521
Varianza 56.560
Asimetría 4.2026
Curtosis 27.3790
N 13055

Mínimo 0.000
1er cuartil 0.000
Mediana 0.000
3er cuartil 3.000
Máximo 119.000

Intervalo de confianza de 95% para la media

3.131 3.389

Intervalo de confianza de 95% para la mediana

0.000 0.000

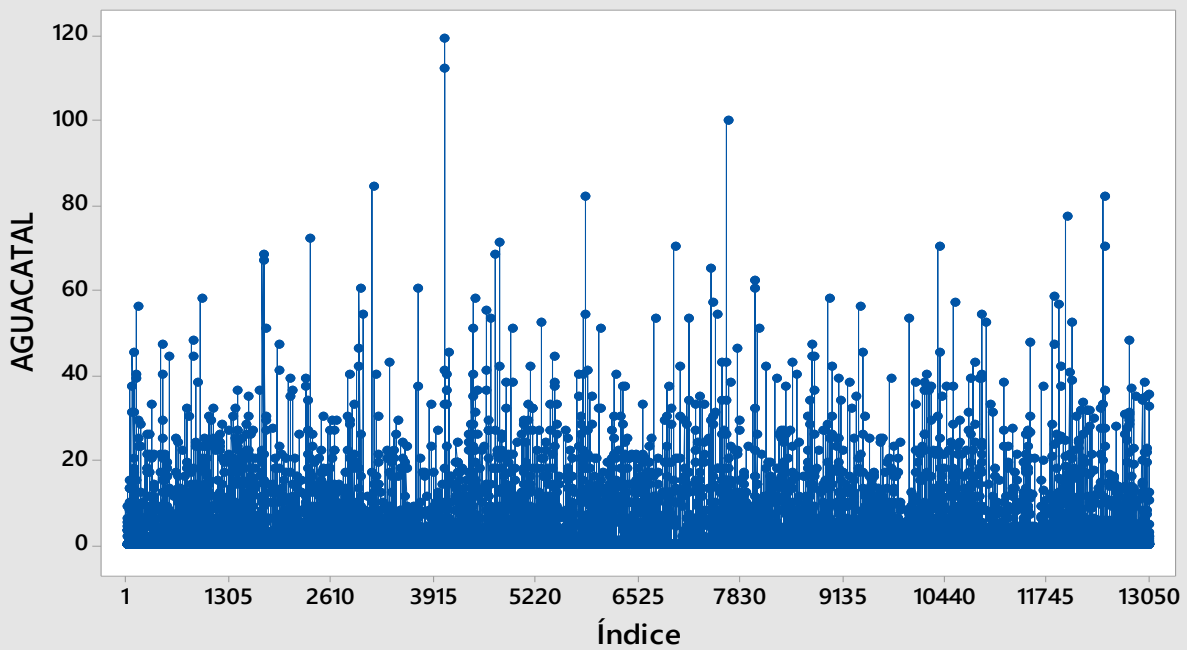
Intervalo de confianza de 95% para la desviación estándar

7.430 7.613

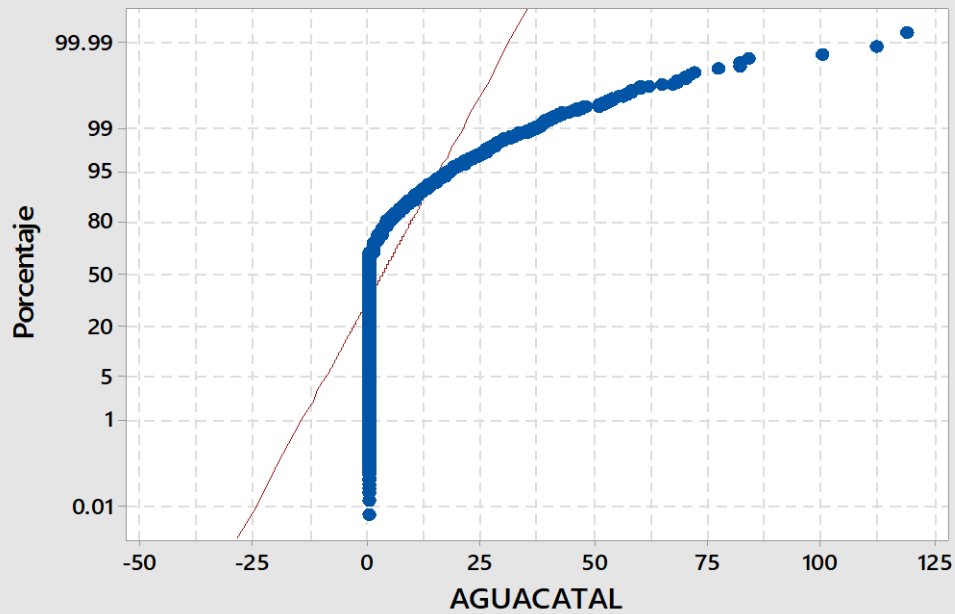
Intervalos de confianza de 95%



Gráfica de series de tiempo de AGUACATAL

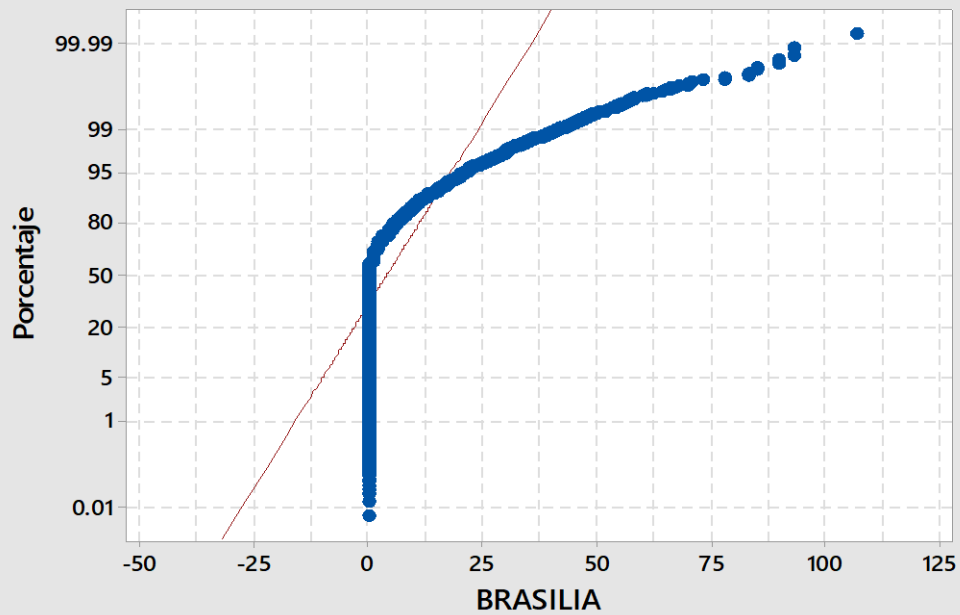


Gráfica de probabilidad de AGUACATAL
Normal

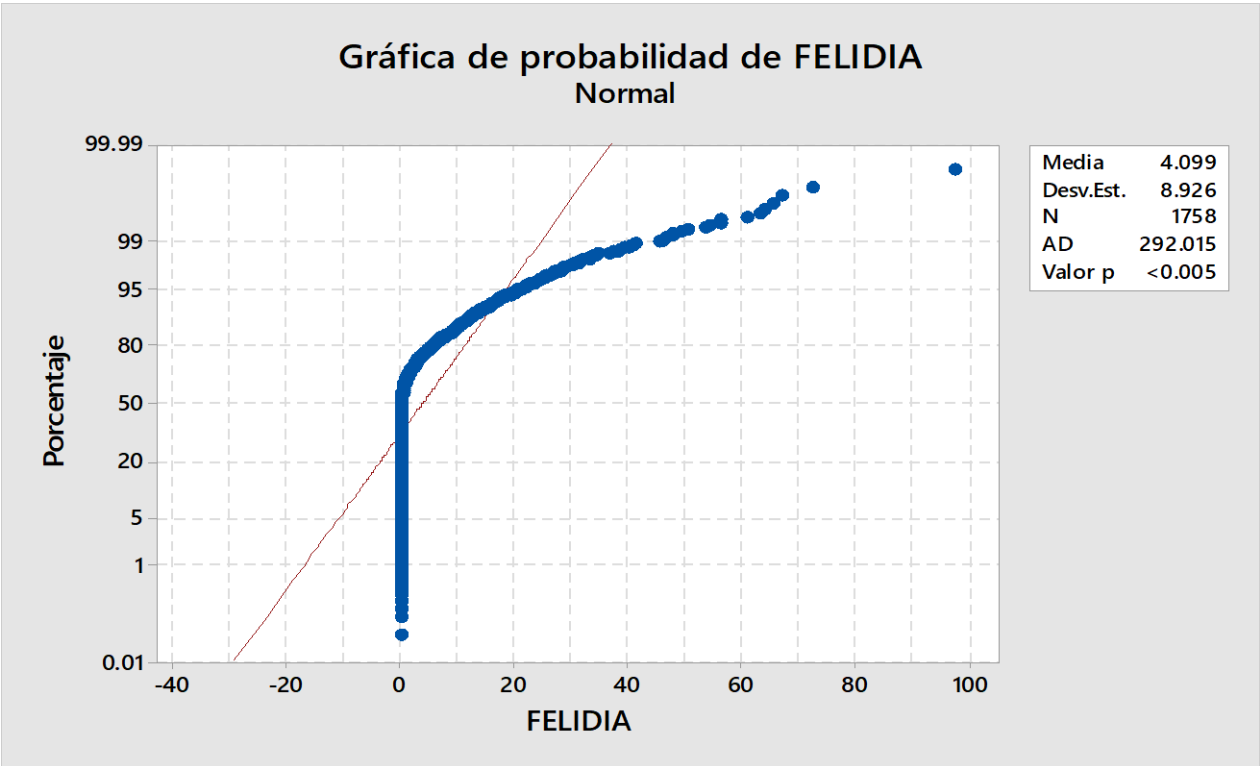
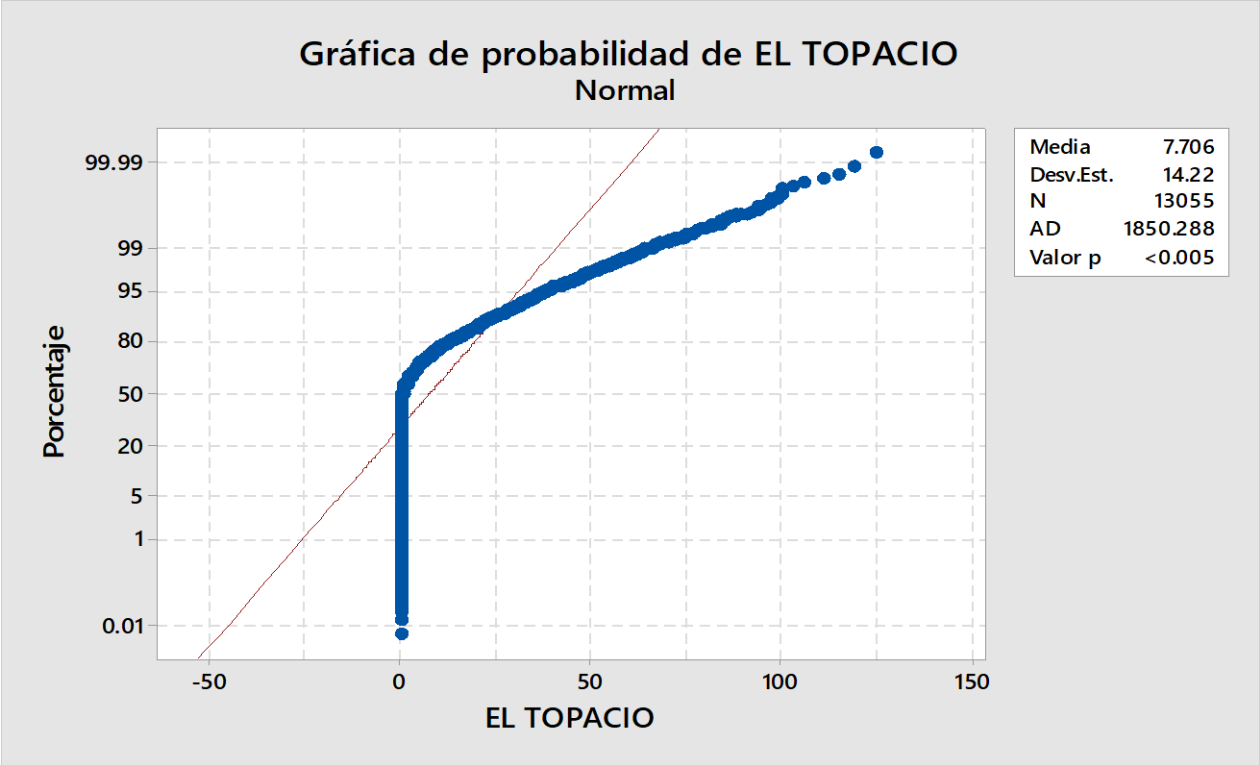


Media	3.260
Desv.Est.	7.521
N	13055
AD	2331.890
Valor p	<0.005

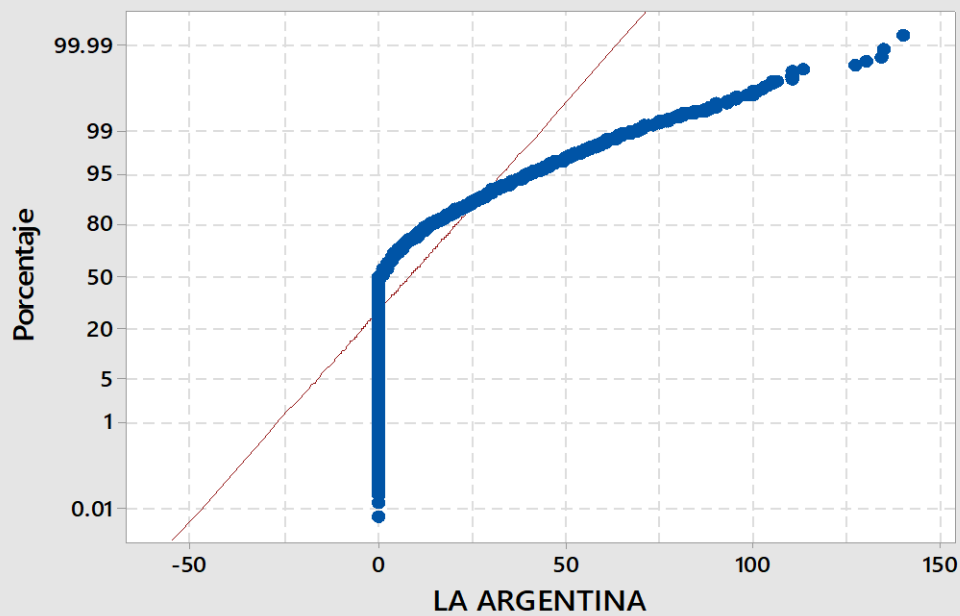
Gráfica de probabilidad de BRASILIA
Normal



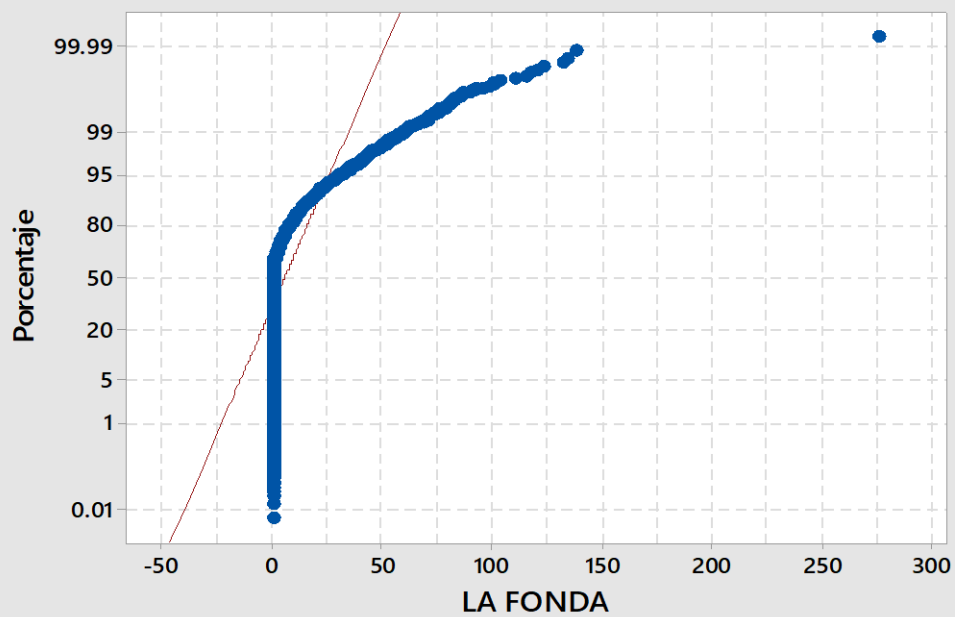
Media	3.987
Desv.Est.	8.516
N	13055
AD	2141.644
Valor p	<0.005



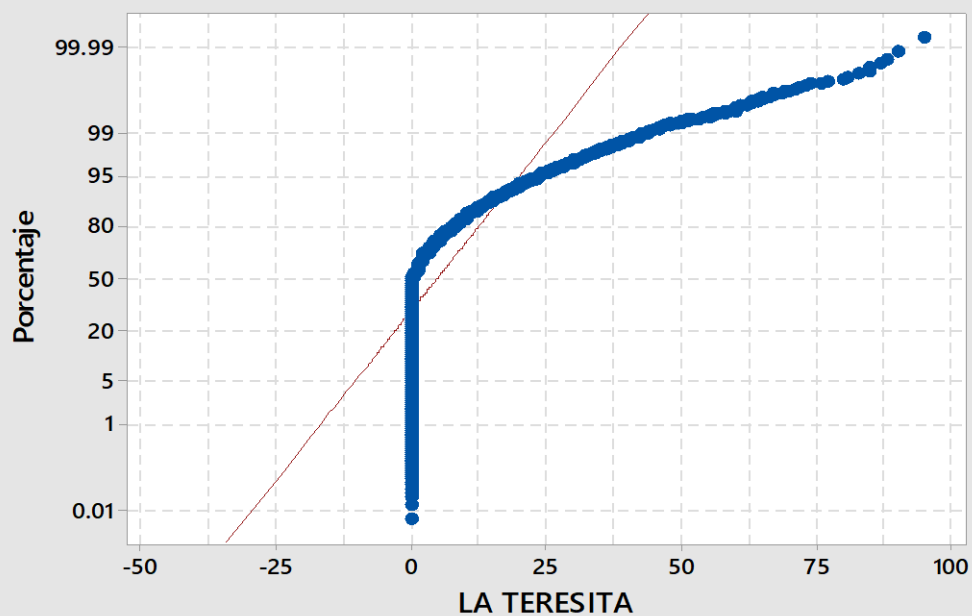
Gráfica de probabilidad de LA ARGENTINA
Normal



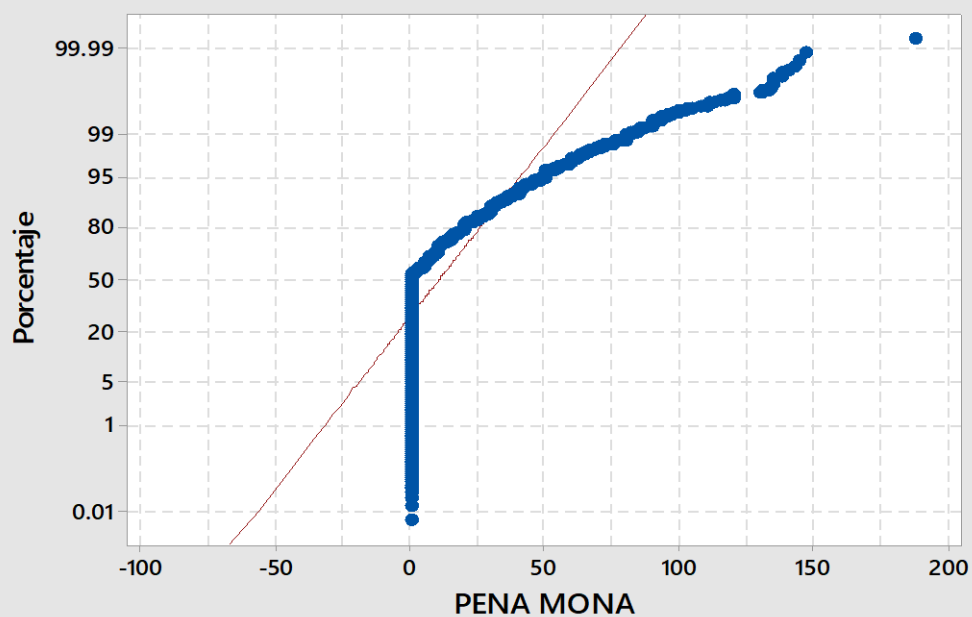
Gráfica de probabilidad de LA FONDA
Normal



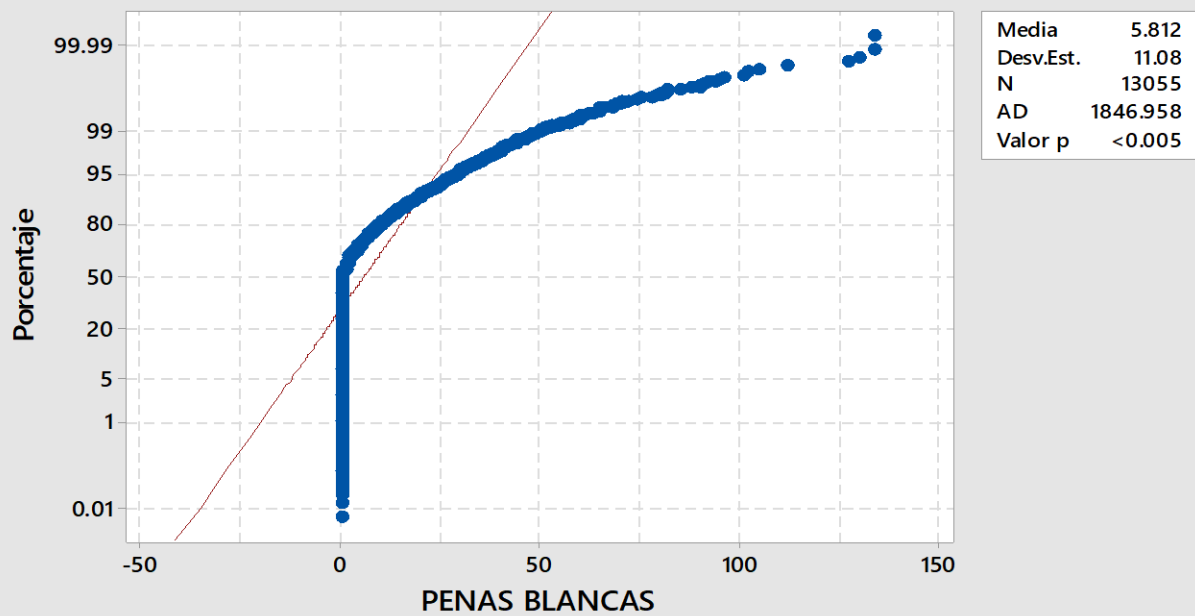
Gráfica de probabilidad de LA TERESITA
Normal



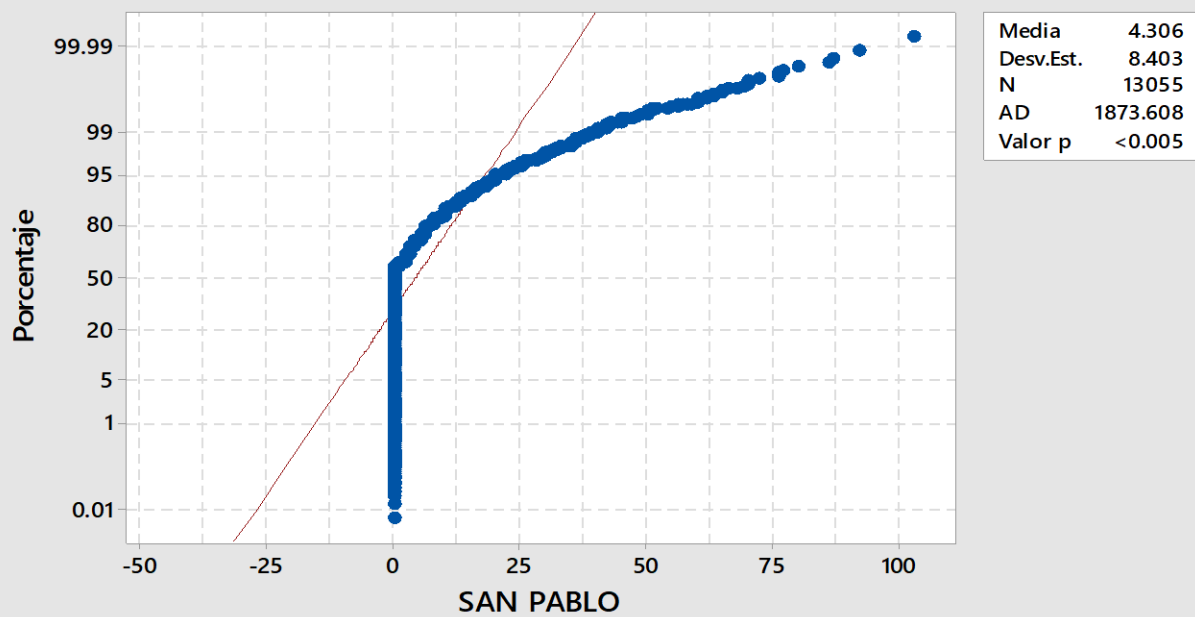
Gráfica de probabilidad de PENA MONA
Normal



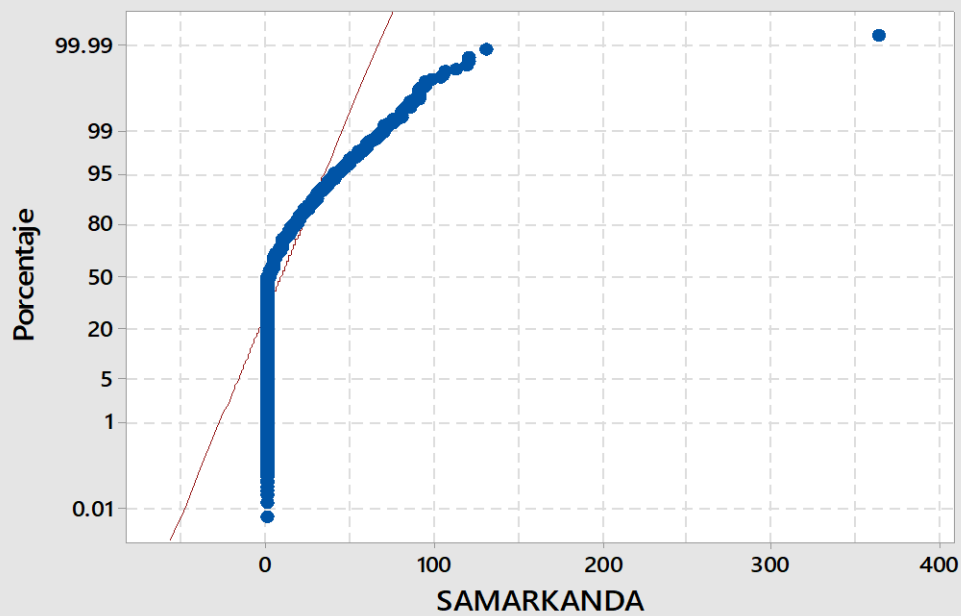
Gráfica de probabilidad de PENAS BLANCAS
Normal



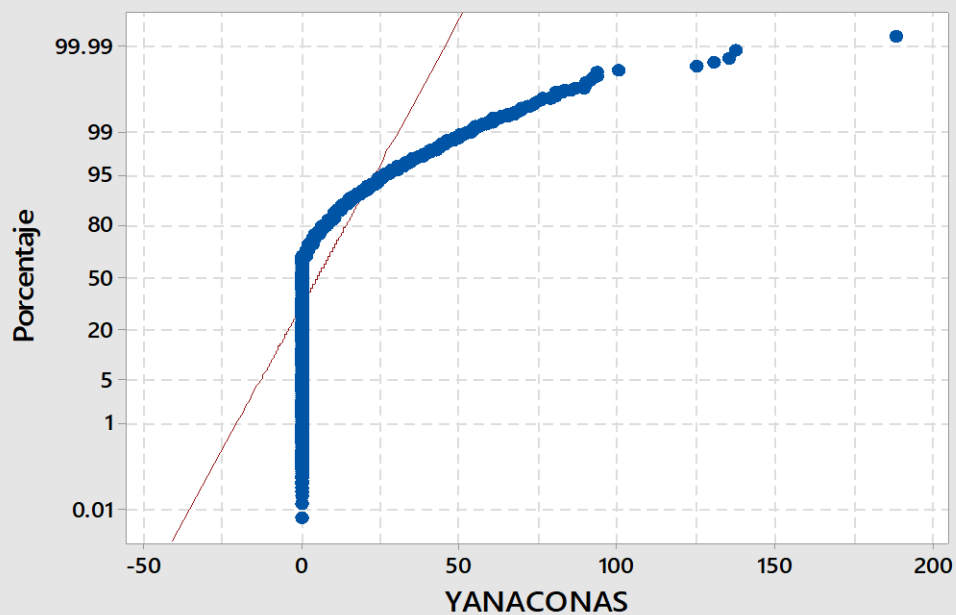
Gráfica de probabilidad de SAN PABLO
Normal



Gráfica de probabilidad de SAMARKANDA
Normal



Gráfica de probabilidad de YANACONAS
Normal



Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Mediana
AGUACATAL	13055	0.0
BRASILIA	13055	0.0
EL TOPACIO	13055	0.8
FELIDIA	1758	0.2
LA ARGENTINA	13055	0.2
LA FONDA	13055	0.0
LA TERESITA	13055	0.0
PENA MONA	12889	0.0
PENAS BLANCAS	13055	0.0
SAN PABLO	13055	0.0
SAMARKANDA	13055	2.0
YANACONAS	13055	0.0

Intervalo de confianza de 95% para η

Muestra	IC para η	Confianza lograda	Posición
AGUACATAL	(0; 0)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.01%	(6416; 6640)
BRASILIA	(0; 0)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.01%	(6416; 6640)
EL TOPACIO	(0.3; 1)	94.80%	(6417; 6639)
	(0.3; 1)	95.00%	Interpolación
	(0.3; 1)	95.01%	(6416; 6640)
FELIDIA	(0; 0.2)	94.66%	(839; 920)
	(0; 0.2)	95.00%	Interpolación
	(0; 0.2)	95.22%	(838; 921)
LA ARGENTINA	(0; 1)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 1)	95.00%	Interpolación
	(0; 1)	95.01%	(6416; 6640)

Muestra	IC para η	Confianza lograda	Posición
LA FONDA	(0; 0)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.01%	(6416; 6640)
LA TERESITA	(0; 0)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.01%	(6416; 6640)
PENA MONA	(0; 0)	94.95%	(6334; 6556)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.15%	(6333; 6557)
PENAS BLANCAS	(0; 0)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.01%	(6416; 6640)
SAN PABLO	(0; 0)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.01%	(6416; 6640)
SAMARKANDA	(1; 2)	94.80%	(6417; 6639)
	(1; 2)	95.00%	Interpolación
	(1; 2)	95.01%	(6416; 6640)
YANACONAS	(0; 0)	94.80%	(6417; 6639)
	(0; 0)	95.00%	Interpolación
	(0; 0)	95.01%	(6416; 6640)

Anexo 3. Consolidado de información empleada en la modelación con el HEC-HMS

Parámetros morfométricos - Cuenca hidrográfica río Pance

Corriente	Área Km ²	Longitud del cauce principal (m)	Hmax (m.s.n.m.)	Hmin (m.s.n.m.)	So (m/m)	Tc Formula Temez (min)	Tlag	CN
W490	0.50	1135	3750	3300	0.396	23.63	14.18	64
W500	0.82	1391	3700	2850	0.611	25.40	15.24	70
W510	1.67	2040	3800	2750	0.515	35.11	21.06	61
W520	0.96	1358	3050	2450	0.442	26.53	15.92	45
W580	0.46	1158	3250	2500	0.648	21.85	13.11	45
W610	0.89	2308	3950	2600	0.585	37.63	22.58	46
W620	0.47	677	2500	2300	0.295	16.87	10.12	49
W650	1.78	2382	3900	2400	0.630	38.01	22.81	43
W680	0.86	1360	2950	2150	0.588	25.15	15.09	45
W690	0.90	1741	2800	2200	0.345	33.59	20.15	45
W720	0.56	1025	2450	2000	0.439	21.45	12.87	60
W730	1.64	1213	3850	2600	1.031	20.73	12.44	62
W740	1.73	1825	2000	1800	0.110	43.28	25.97	45
W750	0.87	1645	3900	2600	0.790	27.48	16.49	45
W780	1.10	2115	3850	2600	0.591	35.15	21.09	45
W810	1.73	2361	1750	1650	0.042	63.05	37.83	45
W820	2.79	2827	2150	1750	0.141	57.50	34.50	76
W830	1.97	2710	3850	2350	0.554	42.97	25.78	75

Convenciones

Hmax: altura máxima

Hmin: altura mínima

So: pendiente

Tc: tiempo de concentración

Tlag: tiempo que transcurre desde el centro de gravedad de la P neta hasta la punta del hidrograma

CN: número de curva

Resumen parámetros calibrables SMA - Cuenca hidrográfica río Pance

Corriente	CS (mm)	Su S (mm)	MI (mm/h)	SS (mm)	TS (mm)	SP (mm/h)	GW1S (mm)	GW1P (mm/h)	GW1C (h)	GW2S (mm)	GW2P (mm/h)	GW2C (h)
W490	13.38	8.27	5.62	27.48	22.81	5.05	50	3.08	400	200	0.20	1300
W500	7.40	12.89	3.85	18.78	15.58	3.47	50	2.11	400	200	0.20	1300
W510	3.56	15.74	11.31	66.26	55.00	10.18	50	6.21	400	200	0.20	1300
W520	5.63	10.87	3.85	18.78	15.58	3.47	50	2.11	400	200	0.20	1300
W580	6.59	10.19	3.85	18.80	15.60	3.47	50	2.12	400	200	0.20	1300
W610	3.56	15.63	13.44	92.40	76.69	12.10	50	7.38	400	200	0.20	1300
W620	3.56	15.78	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W650	9.94	10.41	2.57	18.78	15.58	2.31	50	1.41	400	200	0.20	1300
W680	9.23	10.68	2.80	22.03	18.28	2.52	50	1.54	400	200	0.20	1300
W690	10.27	10.40	2.95	23.63	19.61	2.65	50	1.62	400	200	0.20	1300
W720	7.10	11.87	2.57	18.78	15.58	2.31	50	1.41	400	200	0.20	1300
W730	3.56	15.72	6.34	92.23	76.55	5.71	50	3.48	400	200	0.20	1300
W740	3.55	14.31	4.91	63.33	52.57	4.42	50	2.70	400	200	0.20	1300
W750	3.56	15.81	6.54	92.24	76.56	5.88	50	3.59	400	200	0.20	1300
W780	3.56	15.78	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W810	3.56	15.66	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W820	3.56	15.64	4.54	80.76	67.03	4.09	50	2.49	400	200	0.20	1300
W830	3.56	15.63	5.23	85.12	70.65	4.70	50	2.87	400	200	0.20	1300

Convenciones:

Nombre HMS

Descripción y Unidad

Canopy Storage (CS):	Cap. de almacenamiento por intercepción de vegetación (mm)
Surface Storage (Su S):	Cap. de almacenamiento por retención en depresiones (mm)
Max. Infiltration (MI):	Máxima cap. de infiltración en el suelo (mm/h)
Soil Storage (SS):	Cap. de almacenamiento del suelo (mm)
Tension Storage (TS):	Cap. de almacenamiento en zona de tensión del suelo (mm)
Soil Percolation (SP):	Máxima cap. de percolación del suelo (mm/h)
GW1 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Coefficient	Coef. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (h)
GW2 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 2 (mm)
GW2 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 2 (mm/h)
GW2 Coefficient	Coef. de almacenamiento del depósito subterráneo 2 (h)

Información del caudal base por el método del reservorio lineal - CH río Pance

Corriente	GW 1 Initial	GW 1 Fraction	GW 1 Coef	GW2 Initial	GW2 Fraction	GW 2 Coef
W490	0,018	0,370	24	0,152	0,630	48
W500	0,029	0,330	24	0,250	0,670	48
W510	0,060	0,390	24	0,509	0,610	48
W520	0,034	0,400	24	0,292	0,600	48
W580	0,016	0,420	24	0,140	0,580	48
W610	0,032	0,390	24	0,271	0,610	48
W620	0,017	0,330	24	0,143	0,670	48
W650	0,064	0,360	24	0,542	0,640	48
W680	0,031	0,410	24	0,262	0,590	48
W690	0,032	0,370	24	0,274	0,630	48
W720	0,020	0,440	24	0,171	0,560	48
W730	0,059	0,510	24	0,500	0,490	48
W740	0,062	0,430	24	0,527	0,570	48
W750	0,031	0,320	24	0,265	0,680	48
W780	0,039	0,360	24	0,335	0,640	48
W810	0,062	0,480	24	0,527	0,520	48
W820	0,100	0,450	24	0,850	0,550	48
W830	0,820	0,380	24	0,790	0,620	48

Parámetros morfométricos - Cuenca hidrográfica río Meléndez

Corriente	Área Km ²	Longitud del cauce principal (m)	Hmax (msnm)	Hmin (msnm)	So (m/m)	Tc Formula Temez (min)	Tlag	CN
W1010	1.166	1360.492	982.000	974.000	0.006	36.21	21.73	72.00
W1050	3.817	4783.163	989.000	957.000	0.007	91.87	55.12	75.89
W1080	1.517	2104.046	990.000	975.000	0.007	48.63	29.18	75.11
W1100	9.798	5031.250	2808.000	1546.000	0.251	47.95	28.77	43.89
W1320	9.950	4887.083	3040.000	1750.000	0.264	46.45	27.87	31.86
W1360	5.762	3553.689	1981.000	1418.000	0.158	40.18	24.11	55.71
W1420	2.981	2471.202	1857.000	1341.000	0.209	28.93	17.36	55.87
W1470	1.220	1724.107	1637.000	1283.000	0.205	22.07	13.24	58.58
W2120	5.724	6842.082	1710.000	1074.000	0.093	73.15	43.89	45.71
W2170	2.121	5126.261	1174.000	989.000	0.036	70.30	42.18	58.97
W2220	0.483	1710.776	1004.000	980.000	0.014	36.54	21.92	72.00
W970	2.848	2631.044	1193.000	982.000	0.080	36.39	21.83	59.63
W960	0.360	1610.776	1004.000	970.000	0.021	32.29	19.38	45.00
W940	0.870	345.000	1637.000	850.000	2.281	4.11	2.47	58.58

Convenciones

Hmax: altura máxima

Hmin: altura mínima

So: pendiente

Tc: tiempo de concentración

Tlag: tiempo que transcurre desde el centro de gravedad de la P neta hasta la punta del hidrograma

CN: número de curva

Resumen parámetros calibrables SMA - Cuenca hidrográfica río Meléndez

Corriente	CS (mm)	Su S (mm)	MI (mm/h)	SS (mm)	TS (mm)	SP (mm/h)	GW1S (mm)	GW1P (mm/h)	GW1C (h)	GW2S (mm)	GW2P (mm/h)	GW2C (h)
W1010	3.56	15.66	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W1050	3.56	15.64	4.54	80.76	67.03	4.09	50	2.49	400	200	0.20	1300
W1080	3.56	15.63	5.23	85.12	70.65	4.70	50	2.87	400	200	0.20	1300
W1100	14.11	7.95	8.04	26.96	22.38	7.23	50	4.41	400	200	0.20	1300
W1320	16.32	7.54	11.92	26.48	21.98	10.73	50	6.54	400	200	0.20	1300
W1360	13.99	10.86	3.88	27.47	22.80	3.49	50	2.13	400	200	0.20	1300
W1420	15.01	9.27	3.47	27.52	22.84	3.12	50	1.90	400	200	0.20	1300
W1470	12.97	9.38	3.20	27.55	22.87	2.88	50	1.76	400	200	0.20	1300
W2120	9.00	12.92	5.00	26.22	21.76	4.50	50	2.75	400	200	0.20	1300
W2170	6.30	14.71	7.44	33.85	28.09	6.69	50	4.08	400	200	0.20	1300
W2220	3.56	15.41	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W970	3.56	13.32	3.55	37.83	31.40	3.19	50	1.95	400	200	0.20	1300
W960	3.56	15.41	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W940	12.97	9.38	3.20	27.55	22.87	2.88	50	1.76	400	200	0.20	1300

Convenciones:

Nombre HMS	Descripción y Unidad
Canopy Storage (CS):	Cap. de almacenamiento por intercepción de vegetación (mm)
Surface Storage (Su S):	Cap. de almacenamiento por retención en depresiones (mm)
Max. Infiltration (MI):	Máxima cap. de infiltración en el suelo (mm/h)
Soil Storage (SS):	Cap. de almacenamiento del suelo (mm)
Tension Storage (TS):	Cap. de almacenamiento en zona de tensión del suelo (mm)
Soil Percolation (SP):	Máxima cap. de percolación del suelo (mm/h)
GW1 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Coefficient	Coef. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (h)
GW2 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 2 (mm)
GW2 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 2 (mm/h)
GW2 Coefficient	Coef. de almacenamiento del depósito subterráneo 2 (h)

Información del caudal base por el método del reservorio lineal - CH río Meléndez

Corriente	GW 1 Initial	GW 1 Fraction	GW 1 Coef	GW2 Initial	GW2 Fraction	GW 2 Coef
W1010	0,060	0,460	24	0,120	0,540	48
W1050	0,196	0,440	24	0,393	0,560	48
W1080	0,078	0,410	24	0,156	0,590	48
W1100	0,120	0,520	24	0,900	0,480	48
W1320	0,122	0,360	24	0,914	0,640	48
W1360	0,071	0,330	24	0,529	0,670	48
W1420	0,037	0,440	24	0,274	0,560	48
W1470	0,015	0,480	24	0,112	0,520	48
W2120	0,070	0,410	24	0,526	0,590	48
W2170	0,026	0,370	24	0,195	0,630	48
W2220	0,006	0,330	24	0,044	0,670	48
W970	0,035	0,390	24	0,262	0,610	48
W960	0,004	0,420	24	0,033	0,580	48
W940	0,011	0,440	24	0,080	0,560	48

Parámetros morfométricos - Cuenca hidrográfica río Pichindé

Corriente	Perímetro (m)	Área Km ²	Longitud del cauce principal (m)	Hmax (msnm)	Hmin (msnm)	So (m/m)	Tc Formula Temez (min)	Tc Formula Kirpich (min)	Tc Formula Bransby Williams (min)	Tc Formula California (min)	Tc Formula Guaire (min)	Tc medio	Tc horas	Tlag
W450	34820	17.23	8907	2250	1400	0.095	148.23	52.90	156.07	143.58	29.79	76.97	1.28	0.77
W460	10373	3.62	4432	3750	2600	0.259	72.11	21.03	74.32	57.07	8.73	86.83	1.45	0.87
W470	9056	3.98	3246	3800	2550	0.385	52.80	14.21	49.82	38.57	8.22	25.08	0.42	0.25
W480	3169	0.58	1146	3050	2600	0.393	23.84	6.33	21.25	17.17	2.59	10.92	0.18	0.11
W490	6446	2.16	1158	2668	2500	0.145	29.04	9.36	22.96	25.40	7.65	42.41	0.71	0.42
W500	5079	0.97	1723	2900	2350	0.319	33.81	9.38	31.62	25.46	3.75	15.65	0.26	0.16
W510	8626	2.42	1543	2550	2300	0.162	35.37	11.19	29.59	30.36	7.92	18.16	0.30	0.18
W520	9062	3.22	3737	3550	2100	0.388	58.68	15.79	58.49	42.87	7.23	65.89	1.10	0.66
W530	8862	4.26	3854	2750	1800	0.246	65.48	19.26	64.23	52.27	9.78	31.51	0.53	0.32
W540	5296	1.42	1792	2850	2200	0.363	34.00	9.20	30.85	24.98	4.54	15.91	0.27	0.16
W550	7083	1.96	1025	2350	2200	0.146	26.42	8.49	20.49	23.04	7.20	14.04	0.23	0.14
W570	7950	2.97	3284	2650	1700	0.289	56.25	16.01	54.96	43.45	7.52	26.59	0.44	0.27
W580	6882	2.05	2593	2400	1650	0.289	47.00	13.35	45.04	36.23	6.03	55.60	0.93	0.56
W590	9873	5.17	3295	1850	1550	0.091	70.24	25.05	65.74	67.98	14.76	36.68	0.61	0.37
W600	5732	1.49	1848	3000	2050	0.514	32.57	8.24	29.53	22.37	4.21	15.01	0.25	0.15
W610	5465	1.69	1661	2050	1450	0.361	32.12	8.70	28.14	23.60	5.02	37.32	0.62	0.37
W620	5984	1.97	1802	2900	1950	0.527	31.80	8.00	27.86	21.72	4.93	14.91	0.25	0.15

Convenciones

Hmax: altura máxima

Hmin: altura mínima

So: pendiente

Tc: tiempo de concentración

Tlag: tiempo que transcurre desde el centro de gravedad de la P neta hasta la punta del hidrograma

Resumen parámetros calibrables SMA - Cuenca hidrográfica río Pichindé

Corriente	CS (mm)	Su S (mm)	MI (mm/h)	SS (mm)	TS (mm)	SP (mm/h)	GW1S (mm)	GW1P (mm/h)	GW1C (h)	GW2S (mm)	GW2P (mm/h)	GW2C (h)
W1120	0.710	16.000	0.503	64.760	53.751	0.302	50.000	0.151	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1180	1.350	16.000	0.351	49.247	40.875	0.211	50.000	0.105	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1190	3.920	9.000	1.956	35.672	29.607	1.174	50.000	0.587	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1210	4.160	13.000	3.400	42.350	35.151	2.040	50.000	1.020	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1220	4.930	10.000	1.717	33.992	28.213	1.030	50.000	0.515	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1230	7.640	9.000	0.800	27.551	22.868	0.480	50.000	0.240	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1290	0.820	15.000	1.960	63.297	52.537	1.176	50.000	0.588	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1310	0.000	15.000	2.332	47.032	39.037	1.399	50.000	0.700	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1860	0.000	15.000	1.622	90.392	75.025	0.973	50.000	0.487	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1870	0.000	15.000	1.892	76.033	63.107	1.135	50.000	0.568	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1910	1.870	16.000	0.814	68.903	57.189	0.488	50.000	0.244	400.000	200.000	0.200	1300.000
W1920	0.980	16.000	0.918	66.859	55.493	0.551	50.000	0.275	400.000	200.000	0.200	1300.000
W2260	5.340	14.000	2.339	23.533	19.533	1.403	50.000	0.702	400.000	200.000	0.200	1300.000
W2270	3.170	15.000	2.793	27.137	22.523	1.676	50.000	0.838	400.000	200.000	0.200	1300.000

Convenciones:

Nombre HMS	Descripción y Unidad
Canopy Storage (CS):	Cap. de almacenamiento por intercepción de vegetación (mm)
Surface Storage (Su S):	Cap. de almacenamiento por retención en depresiones (mm)
Max. Infiltration (MI):	Máxima cap. de infiltración en el suelo (mm/h)
Soil Storage (SS):	Cap. de almacenamiento del suelo (mm)
Tension Storage (TS):	Cap. de almacenamiento en zona de tensión del suelo (mm)
Soil Percolation (SP):	Máxima cap. de percolación del suelo (mm/h)
GW1 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Coefficient	Coef. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (h)
GW2 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 2 (mm)
GW2 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 2 (mm/h)
GW2 Coefficient	Coef. de almacenamiento del depósito subterráneo 2 (h)

Información del caudal base por el método del reservorio lineal - CH río Pichindé

Corriente	GW 1 Initial	GW 1 Fraction	GW 1 Coef	GW2 Initial	GW2 Fraction	GW 2 Coef
W450	0,160	0,450	24	1,800	0,550	48
W460	0,034	0,480	24	0,378	0,520	48
W470	0,037	0,360	24	0,416	0,640	48
W480	0,005	0,320	24	0,060	0,680	48
W490	0,020	0,430	24	0,226	0,570	48
W500	0,009	0,510	24	0,101	0,490	48
W510	0,023	0,440	24	0,253	0,560	48
W520	0,030	0,370	24	0,337	0,630	48
W530	0,040	0,410	24	0,445	0,590	48
W540	0,013	0,360	24	0,149	0,640	48
W550	0,018	0,330	24	0,205	0,670	48
W570	0,028	0,390	24	0,310	0,610	48
W580	0,019	0,420	24	0,214	0,580	48
W590	0,048	0,400	24	0,540	0,600	48
W600	0,014	0,390	24	0,156	0,610	48
W610	0,016	0,330	24	0,176	0,670	48
W620	0,018	0,370	24	0,206	0,630	48

Parámetros morfométricos - Cuenca hidrográfica río Felidia

Corriente	Perímetro (m)	Área Km ²	Longitud del Cauce principal (m)	Hmax (msnm)	Hmin (msnm)	So (m/m)	Tc Formula Temez (min)	Tc Formula Kirpich (min)	Tc Formula Bransby Williams (min)	Tc Formula California (min)	Tc Formula Guaire (min)	Tc medio	Tc horas	Tlag
W300	27878	7.03	6957	3050	2050	0.144	113.65	37.36	122.85	101.38	15.47	55.49	0.92	0.55
W310	5216	1.25	2122	3600	3050	0.259	41.21	11.93	39.58	32.38	4.64	48.96	0.82	0.49
W320	3862	0.76	1275	3450	3050	0.314	26.98	7.49	24.05	20.33	3.27	12.58	0.21	0.13
W330	7225	2.29	2922	3350	2500	0.291	51.41	14.60	50.13	39.63	6.43	24.15	0.40	0.24
W340	5257	1.35	1842	3350	2550	0.434	33.55	8.77	30.76	23.81	4.16	36.74	0.61	0.37
W350	9316	3.89	4039	3200	2050	0.285	66.02	18.89	66.00	51.27	8.87	31.26	0.52	0.31
W360	3576	0.63	1333	2650	2150	0.375	26.98	7.24	24.71	19.64	2.78	12.33	0.21	0.12
W370	3058	0.44	973	3300	2950	0.360	21.41	5.77	18.86	15.66	2.27	23.69	0.39	0.24
W380	2514	0.34	784	3250	2900	0.446	17.44	4.50	14.96	12.20	1.81	7.91	0.13	0.08
W390	3619	0.56	1237	2450	1950	0.404	25.13	6.64	22.87	18.01	2.52	11.43	0.19	0.11
W400	3584	0.55	1369	2350	2000	0.256	29.61	8.56	27.78	23.23	2.87	13.68	0.23	0.14
W410	3432	0.61	1286	2400	2100	0.233	28.73	8.45	26.32	22.93	3.13	13.44	0.22	0.13
W420	4605	1.02	2248	2350	2150	0.089	52.76	18.83	52.98	51.10	5.67	75.60	1.26	0.76
W430	3206	0.57	1122	3000	2500	0.446	22.91	5.93	20.30	16.09	2.48	10.44	0.17	0.10
W440	2664	0.36	988	2950	2550	0.405	21.18	5.58	19.08	15.14	1.94	9.57	0.16	0.10
W450	2719	0.39	851	3000	2600	0.470	18.38	4.70	15.83	12.74	1.95	19.39	0.32	0.19
W460	2153	0.31	655	3150	2800	0.534	14.70	3.65	12.17	9.91	1.62	6.66	0.11	0.07

Convenciones

Hmax: altura máxima

Hmin: altura mínima

So: pendiente

Tc: tiempo de concentración

Tlag: tiempo que transcurre desde el centro de gravedad de la P neta hasta la punta del hidrograma

Resumen parámetros calibrables SMA - Cuenca hidrográfica río Felidia

Corriente	CS (mm)	Su S (mm)	MI (mm/h)	SS (mm)	TS (mm)	SP (mm/h)	GW1S (mm)	GW1P (mm/h)	GW1C (h)	GW2S (mm)	GW2P (mm/h)	GW2C (h)
W310	3.56	15.63	13.44	92.40	76.69	12.10	50	7.38	400	200	0.20	1300
W330	3.56	15.78	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W390	0.34	16.00	2.27	80.76	67.03	1.36	50	0.68	400	200	0.20	1300
W420	3.56	15.81	6.54	92.24	76.56	5.88	50	3.59	400	200	0.20	1300
W460	3.56	15.78	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W510	3.56	15.74	11.31	66.26	55.00	10.18	50	6.21	400	200	0.20	1300
W550	5.63	10.87	3.85	18.78	15.58	3.47	50	2.11	400	200	0.20	1300
W590	5.30	15.75	1.80	63.39	52.61	1.62	50	0.99	400	200	0.20	1300
W630	4.08	15.83	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W670	3.56	15.79	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W720	6.30	14.71	7.44	33.85	28.09	6.69	50	4.08	400	200	0.20	1300
W770	3.56	15.41	6.35	92.23	76.55	5.72	50	3.49	400	200	0.20	1300
W840	3.56	13.32	3.55	37.83	31.40	3.19	50	1.95	400	200	0.20	1300

Convenciones:

Nombre HMS	Descripción y Unidad
Canopy Storage (CS):	Cap. de almacenamiento por intercepción de vegetación (mm)
Surface Storage (Su S):	Cap. de almacenamiento por retención en depresiones (mm)
Max. Infiltration (MI):	Máxima cap. de infiltración en el suelo (mm/h)
Soil Storage (SS):	Cap. de almacenamiento del suelo (mm)
Tension Storage (TS):	Cap. de almacenamiento en zona de tensión del suelo (mm)
Soil Percolation (SP):	Máxima cap. de percolación del suelo (mm/h)
GW1 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 1 (mm)
GW1 Coefficient	Coef. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (h)
GW2 Storage	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 2 (mm)
GW2 Percolation	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 2 (mm/h)
GW2 Coefficient	Coef. de almacenamiento del depósito subterráneo 2 (h)

Información del caudal base por el método del reservorio lineal - CH río Felidia

Corriente	GW 1 Initial	GW 1 Fraction	GW 1 Coef	GW2 Initial	GW2 Fraction	GW 2 Coef
W300	0,100	0,40	24	1,20	0,60	48
W310	0,018	0,35	24	0,21	0,65	48
W320	0,011	0,42	24	0,13	0,58	48
W330	0,033	0,38	24	0,39	0,62	48
W340	0,019	0,46	24	0,23	0,54	48
W350	0,055	0,48	24	0,66	0,52	48
W360	0,009	0,50	24	0,11	0,50	48
W370	0,006	0,37	24	0,08	0,63	48
W380	0,005	0,34	24	0,06	0,66	48
W390	0,008	0,30	24	0,10	0,70	48
W400	0,008	0,42	24	0,09	0,58	48
W410	0,009	0,44	24	0,10	0,56	48
W420	0,015	0,52	24	0,17	0,48	48
W430	0,008	0,41	24	0,10	0,59	48
W440	0,005	0,49	24	0,06	0,51	48
W450	0,006	0,39	24	0,07	0,61	48
W460	0,004	0,35	24	0,05	0,65	48