



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Oscar Manuel Baez Villanueva

Asesor:

M.I. Luis Arturo González Ortiz

Co-Asesor:

Dr. Juan Diego Giraldo Osorio

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2016



Tabla de contenido

Introducción	i
Capítulo 1: Satélites y sus productos.....	1
1.1 Satélites de monitoreo climático y atmosférico	1
1.2 Satélites de monitoreo terrestre y cartografía	4
1.2.1 Satélites ERS	4
1.2.2 Satélite IKONOS	5
1.2.3 Satélite QuickBird	5
1.2.4 WorldView.....	5
1.2.5 Satélites Landsat	6
1.2.6 Satélite Envisat	8
1.2.7 Satélite RESURS.....	8
1.3 Satélites de exploración astronómica y planetaria	9
1.3.1 Satélites de Rayos X	9
1.3.2 Satélites de Rayos Gamma	9
1.4 Satélites de comunicaciones	10
1.5 Satélites de navegación (GPS).....	11
1.5.1 Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global.....	11
1.6 Satélites para propósitos militares.....	11
Capítulo 2: Satélites que proporcionan información sobre precipitación.....	13
2.1 Satélites meteorológicos geoestacionarios	14
2.1.1 Satélites GOES	14
2.1.2 Satélites Meteosat	14
2.1.3 MTSAT	15
2.1.4 Satélites FY-2	15
2.1.5 Satélites Elektro	15
2.1.6 Satélites INSAT y KALPANA.....	16
2.2 Satélites meteorológicos LEO.....	16
2.2.1 Satélites NOAA.....	16
2.2.2 Satélites METOP.....	17

2.2.3	Satélite FY	17
2.3	Productos de estimación de precipitación.....	17
2.3.1	TRMM 3B42.....	17
2.3.2	CPC Morphing Technique CMORPH.....	18
2.3.3	PERSIANN	19
2.3.4	ARC 2.....	19
2.3.5	Global Precipitation Climatology Project (GPCP).....	20
2.3.6	Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP)	20
2.3.7	TMPA.....	21
2.3.8	RFE 2.....	21
	Capítulo 3: Marco teórico sobre análisis, distribuciones de probabilidad y corrección de productos satelitales.....	23
3.1	Llenado de vacíos en datos observados	23
3.2	Análisis de Curva de Doble Masa	23
3.3	Índices de precipitación	24
3.3.1	Precipitación máxima mensual con duración de un día	24
3.3.2	Precipitación máxima mensual de 5 días consecutivos	25
3.3.3	Índice Simple de Intensidad de Precipitación (SDII)	25
3.3.4	Conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm.....	25
3.3.5	Conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm.....	25
3.3.6	Longitud máxima del periodo de sequía (CDD)	26
3.3.7	Longitud máxima del periodo húmedo (CWD).....	26
3.3.8	Precipitación anual mayor al 95 percentil.....	26
3.3.9	Precipitación anual mayor al 99 percentil.....	27
3.3.10	Precipitación total anual en días húmedos (PRCPTOT).....	27
3.4	Generación de Curvas IDF.....	27
3.4.1	Formula de Bell.....	28
3.4.2	Teoría general de escalamiento simple y multiescalamiento	29
3.4.3	Escalamiento Simple	29
3.4.4	Ecuación de Poveda (2002)	30
3.5	Bootstrapping.....	31
3.5.1	Intervalos de confianza Bootstrap	32

3.6	Corrección estadística del sesgo	33
3.6.1	Proceso de Regresión Gaussiana	33
Capítulo 4: Metodología propuesta para la generación de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir de productos satelitales corregidos.....		35
4.1	Localización	35
4.1.1	Macro localización	35
4.1.2	Micro localización	36
4.2	Análisis de datos de estaciones.....	40
4.3	Análisis de datos de CMORPH.....	44
4.4	Corrección estadístico del sesgo	44
4.5	Construcción y comparativa de curvas IDF generadas con la fórmula de Bell	46
Capítulo 5: Resultados sobre la comparativa de índices climáticos y curvas Intensidad – Duración – Frecuencia entre datos observados y el producto satelital CMORPH.....		47
5.1	Consistencia en las estaciones pluviométricas	47
5.1.1	Estaciones con resolución espacial de 5 minutos.....	47
5.1.2	Estaciones con resolución espacial de un día.....	47
5.2	Construcción de curvas IDF.....	49
5.2.1	Curvas IDF de estaciones con resolución de 5 minutos	49
5.2.2	Curvas IDF con el promedio de las estaciones analizadas	52
5.2.3	Curva IDF utilizando el producto de precipitación satelital CMORPH	55
5.2.4	Comparativa de curvas IDF del producto CMORPH y promedios de estaciones.....	56
5.3	Análisis de índices de precipitación.....	59
5.3.1	Análisis de índices de estaciones con duraciones de precipitación de 5 minutos ...	59
5.3.2	Análisis de índices de estaciones con resolución temporal de 1 día	64
5.4	Corrección del sesgo de CMORPH.....	74
5.4.1	Ajuste del sesgo utilizando todo el periodo de registro	74
5.4.2	Ajuste del sesgo mensualmente.....	76
Conclusiones.....		81
Anexos:.....		83
Referencias.....		131

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.1: Satélite geoestacionario (GOES) orbita La Tierra en el ecuador siempre ubicado en un mismo punto respecto a la superficie terrestre. (ametsoc.org)	2
Ilustración 1.2: Satélite de órbita polar (POES) orbita La Tierra en dirección norte-sur. (ametsoc.org)	2
Ilustración 1.3: Firmas espectrales de las características de La Tierra. (missionscience.nasa.gov)	3
Ilustración 1.4: Gráfico de las bandas capturadas por el WorldView 3 respecto a la radiación solar. (geospatialworldforum.org)	6
Ilustración 1.5: Proceso de trilateración por satélites de navegación. (physics.org)	11
Ilustración 2.1: Satélites meteorológicos geoestacionarios y LEO. (C. Kidd, 2009)	13
Ilustración 3.1: Ilustración de la predicción utilizando el Proceso Gaussiano de Regresión.(C. Edward Rasmussen, 2002)	34
Ilustración 4.1: Macro localización de Colombia y ubicación de Cundinamarca (Sistema Coordinado: WGS 84)	35
Ilustración 4.2: Micro localización de la zona de estudio (Sistema Coordinado: WGS 84)	37
Ilustración 4.3: Localización de las estaciones en estudio (Sistema Coordinado: WGS 84)	38
Ilustración 4.4: Localización de las estaciones en estudio (Sistema Coordinado: WGS 84)	39
Ilustración 4.5: Gráficas del ajuste de distribución de probabilidad Normal para duraciones de 5 y 10 minutos en la estación San Benito	42
Ilustración 4.6: Gráfica de las curvas IDF de la estación San Benito para distintos periodos de retorno.	43
Ilustración 4.7: Comparativa de precipitación diaria entre el promedio de datos observados (Rojo) y CMORPH (Negro).	45
Ilustración 4.8: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH sin corregir	46
Ilustración 5.1: Análisis de Doble Curva Masa para las estaciones con resolución diaria.	48
Ilustración 5.2: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para la estación Juan Rey.	50
Ilustración 5.3: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para la estación Moralba.	50
Ilustración 5.4: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para la estación San Benito.	51
Ilustración 5.5: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el promedio de la precipitación máxima ajustada de las estaciones en estudio.	53
Ilustración 5.6: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el máximo de la precipitación máxima de las estaciones en estudio.	53
Ilustración 5.7: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el promedio de la precipitación diaria de las estaciones en estudio.	54
Ilustración 5.8: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el producto satelital CMORPH	55
Ilustración 5.9: Comparativa entre IDF del producto satelital CMORPH e IDF obtenida de las precipitación máximas promedio de las estaciones.	57
Ilustración 5.10: Comparativa entre IDF del producto satelital CMORPH e IDF obtenida de las precipitación máxima de las estaciones.	58
Ilustración 5.11: Comparativa entre IDF del producto satelital CMORPH e IDF obtenida de las precipitación diaria promedio de las estaciones.	58

Ilustración 5.12: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	59
Ilustración 5.13: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de 5 días entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	60
Ilustración 5.14: Comparativa del índice simple de intensidad de precipitación (SDII) entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	60
Ilustración 5.15: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	61
Ilustración 5.16: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	61
Ilustración 5.17: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo de sequía (CDD) entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	62
Ilustración 5.18: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo húmedo (CWD) entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	62
Ilustración 5.19: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 95 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	63
Ilustración 5.20: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 99 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	63
Ilustración 5.21: Comparativa del Índice de precipitación total anual en días húmedos entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.	64
Ilustración 5.22: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	65
Ilustración 5.23: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	65
Ilustración 5.24: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de 5 días entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	66
Ilustración 5.25: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	66
Ilustración 5.26: Comparativa del índice simple de intensidad de precipitación (SDII) entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	67
Ilustración 5.27: Comparativa del índice simple de intensidad de precipitación (SDII) entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	67
Ilustración 5.28: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	68
Ilustración 5.29: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	68
Ilustración 5.30: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	68
Ilustración 5.31: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	69
Ilustración 5.32: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo de sequía (CDD) entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	69
Ilustración 5.33: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo de sequía (CDD) entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	70

Ilustración 5.34: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo húmedo (CWD) entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	70
Ilustración 5.35: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo húmedo (CWD) entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	71
Ilustración 5.36: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 95 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	71
Ilustración 5.37: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 95 percentil entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	72
Ilustración 5.38: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 99 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	72
Ilustración 5.39: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 99 percentil entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	72
Ilustración 5.40: Comparativa del Índice de precipitación total anual en días húmedos entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	73
Ilustración 5.41: Comparativa del Índice de precipitación total anual en días húmedos entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.	73
Ilustración 5.42: Comparativa de precipitación entre el promedio diario de las estaciones y el producto CMORPH.	74
Ilustración 5.43: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido.	75
Ilustración 5.44: Comparativa de precipitación entre el promedio diario de las estaciones y el producto CMORPH corregido.	75
Ilustración 5.45: Comparativa entre la precipitación mensual del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido.	76
Ilustración 5.46: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH sin corregir en el mes seco de Febrero.	77
Ilustración 5.47: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido en el mes seco de Febrero.	77
Ilustración 5.48: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH sin corregir en el mes húmedo de Noviembre.	78
Ilustración 5.49: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido en el mes húmedo de Noviembre.	78
Ilustración 5.50: Comparativa de precipitación entre el promedio diario de las estaciones y el producto CMORPH mensual corregido.	79
Ilustración 5.51: Comparativa entre la precipitación mensual del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido.	79

Índice de tablas

Tabla 1.1: Canales del Landsat 7 y sus aplicaciones. (INEGI, 2012).....	7
Tabla 1.2: Descripción de bandas y su aplicación. (AIRBUS defence and space, 2015).....	10
Tabla 2.1: Características del producto TRMM 3B42 (NASA, 2013).....	18
Tabla 2.2: Características del producto CMORPH (NOAA, 2015).....	18
Tabla 2.3: Características del producto PERSIANN (CHRS, 2015).....	19
Tabla 2.4: Características del producto ARC 2 (NOAA, 2015).....	20
Tabla 2.5: Características del producto GPCP (NOAA, 2015).....	20
Tabla 2.6: Características del producto CMAP (NOAA, 2015).....	21
Tabla 2.7: Características del producto TMPA (NASA, 2015).....	21
Tabla 2.8: Características del producto RFE 2 (NOAA, 2015).....	22
Tabla 3.1: Relación de la lluvia con duración de una hora y periodo de retorno de 2 años con la de 24 horas y mismo periodo de retorno.	29
Tabla 4.1: Coordenadas geográficas de las estaciones en estudio con resolución espacial de 5 minutos.....	38
Tabla 4.2: Coordenadas geográficas de las estaciones en estudio con resolución espacial de un día.....	39
Tabla 4.3: Máxima profundidad de precipitación, para cada año y para cada duración considerada, para la estación San Benito.	41
Tabla 5.1: Funciones de probabilidad con mejor ajuste para las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.....	49
Tabla 5.2: Comparativa del exponente de escalamiento θ de distintas ecuaciones de curvas IDF para las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.....	51
Tabla 5.3: Comparativa del exponente de escalamiento θ a partir de la teoría del escalamiento para las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.....	52
Tabla 5.4: Comparativa del exponente de escalamiento θ a partir de la teoría del escalamiento para el promedio de las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.	54
Tabla 5.5: Comparativa del exponente de escalamiento θ de distintas ecuaciones de curvas IDF para CMORPH.	56
Tabla 5.6: Comparativa del exponente de escalamiento θ a partir de la teoría del escalamiento para CMORPH.	56

Introducción

El recurso hídrico es de gran importancia ya que sostiene la vida en el planeta; por esta razón, es necesario comprender los procesos en los que interviene. El ciclo hidrológico o también denominado ciclo del agua, es un modelo conceptual que describe el almacenamiento y circulación del agua entre la biósfera, atmósfera, litósfera e hidrósfera. El agua puede ser almacenada en los océanos, lagos, ríos, atmósfera, suelos, glaciares y acuíferos. La circulación entre estos depósitos es causado por distintos procesos, como: evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración, percolación y escurrimiento; los cuales son denominados componentes del ciclo hidrológico (Campos Aranda, 2015).

Según la definición oficial de la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization, WMO*), la precipitación es un fenómeno atmosférico que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes formando partículas líquidas de agua de diámetro mayor de 0.5 milímetros.

Este componente del ciclo hidrológico es determinante para establecer la cantidad de agua existente en una zona de interés. Una parte de la precipitación se infiltra en el terreno contribuyendo a la humedad del suelo y a la recarga de las aguas subterráneas, otra porción se convierte en escurrimiento superficial y es conducida por los sistemas de drenaje naturales o artificiales.

La medición de la precipitación es fundamental para determinar la cantidad de agua que entra a una cuenca así como para determinar la duración de la lluvia (en el caso de los pluviómetros). La precipitación pluvial se mide en milímetros; que sería el espesor de la lámina de agua que se formaría sobre una superficie plana e impermeable; es equivalente a litros de agua por metro cuadrado de terreno. Los instrumentos utilizados para este fin son: el pluviómetro; el cual se emplea en las estaciones meteorológicas para la medición de la precipitación en un tiempo determinado (generalmente la medición se realiza a nivel diario). El pluviógrafo por otra parte, mediante un proceso mecánico, capaz de registrar la evolución temporal de la lluvia.

El desarrollo tecnológico ha posibilitado el desarrollo de nuevos métodos de medición como lo son los productos satelitales de precipitación. Estos son algoritmos alimentados por información satelital, que aproximan la cantidad de agua precipitada, generando un mapa del planeta, o de partes del mismo. Estos productos de precipitación tienen resolución temporal generalmente menor a un día.

Justificación

La distribución espacial y temporal de la precipitación en una escala regional, es necesaria para distintos fines; como el diagnóstico climático, estudios de aplicación social, manejo del recurso hídrico para la agricultura o generación de energía, análisis de sequías e inundaciones, entre otros.

Un aspecto común en los países en vía de desarrollo, en lo que a monitoreo hidrológico se refiere, es la baja densidad de redes de estaciones pluviométricas; lo que reduce la fiabilidad de las mediciones (Vila & García, 2012). Es por esto que es necesario utilizar distintas fuentes de información hidrológica como son los productos satelitales de precipitación, que si bien, presentan un desvío respecto a los datos observados, cuando se aplica una corrección estadística del sesgo, se obtienen valores de igual orden de magnitud.

Hipótesis

Son los datos del producto satelital de precipitación CMORPH buenas aproximaciones a la lluvia real que cae en una zona específica, al menos para lluvias intensas.

Hipótesis específicas

Las curvas Intensidad - Duración - Frecuencia construidas con el producto satelital de precipitación CMORPH para una zona específica son una buena aproximación a las curvas IDF construidas con datos observados.

Se mejora la aproximación del producto satelital de precipitación CMORPH a los datos observados si se utilizan métodos de corrección del sesgo.

Objetivos

Objetivo general

Ajustar el producto de precipitación satelital CMORPH mediante un Proceso Gaussiano de Regresión a los datos observados para la generación de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia.

Objetivos específicos

1. Determinar el escalado de las intensidades obtenidas mediante los datos observados para el área urbana de Bogotá.
2. Determinar el escalado de las intensidades obtenidas con el producto satelital de precipitación CMORPH para el área urbana de Bogotá.
3. Determinar mediante diferentes promedios de los datos observados, la mejor representación espacial de la precipitación que muestra CMORPH.
4. Analizar la relación entre los datos observados y el producto satelital de precipitación CMORPH para diferentes magnitudes de precipitación, utilizando los índices de precipitación propuestos por el Equipo de Expertos en Cambio Climático, Detección e Índices (ETCCDI).

Capítulo 1: Satélites y sus productos

La Real Academia de la Lengua Española define como satélite artificial al vehículo tripulado o no, que se coloca en órbita alrededor de La Tierra o de otro astro, y posee aparatos apropiados para recoger información y retransmitirla. Un ejemplo de estos es el satélite GOES que orbita La Tierra siempre en el mismo punto en el ecuador [Ilustración 1.1].

Aproximadamente 3,000 satélites artificiales orbitan La Tierra. Algunos de estos toman imágenes del planeta, las cuales ayudan a los meteorólogos a predecir el clima y a rastrear huracanes, mientras otros toman imágenes de otros planetas y sistemas. Los satélites también son utilizados en la comunicación, como por ejemplo el grupo de alrededor de 30 satélites que constituyen el Sistema de Posicionamiento Global o GPS por sus siglas en inglés (NASA, 2015g).

Desde el lanzamiento del primer satélite el Sputnik 1 lanzado por la Unión Soviética en 1957 los satélites han sido utilizados para diversos fines como desarrollo y planificación urbana, catastro, mapeo y planificación de uso de suelos, infraestructura y comunicaciones, monitoreo de recursos naturales, investigación ambiental, agricultura, geografía y cartografía, respuesta rápida a desastres naturales, aplicaciones militares entre otras (Land Info, 2015).

El Centro de Ciencia Espacial e Ingeniería (SSEC) de la Universidad de Wisconsin-Madison agrupa los satélites en las siguientes categorías generales:

- Monitoreo climático y atmosférico
- Monitoreo terrestre y cartografía
- Exploración astronómica y planetaria
- Comunicaciones
- Navegación (GPS)
- Propósitos militares

Los satélites están equipados con uno o más sensores o instrumentos dependiendo del propósito que tengan. Existen dos tipos de sensores: los pasivos registran la radiación solar reflejada por La Tierra (como la luz visible) o la radiación emitida (como la energía térmica de La Tierra); los sensores activos, por otra parte, emiten pulsos de energía (por radar o laser) a través de la atmósfera hacia la superficie de La Tierra y registran la señal devuelta. La ciencia de la observación satelital es llamada teledetección (SSEC, 2015).

1.1 Satélites de monitoreo climático y atmosférico

Los satélites meteorológicos se utilizan para el monitoreo climático y atmosférico de La Tierra. Los satélites pueden ser de órbita polar [Ilustración 1.2], los cuales usualmente tienen un ángulo de inclinación de 90 grados respecto al ecuador y una altura aproximada de 800 kilómetros; en cada órbita este tipo de satélites pasa por los polos norte y sur, sin embargo como La Tierra rota hacia el este, la órbita de este tipo de satélites puede cubrir completamente la superficie terrestre. Los satélites de órbita geoestacionaria, los cuales se caracterizan por rotar y trasladarse a la misma velocidad que La Tierra, permanecen sobre un mismo punto sobre la superficie del planeta, generalmente en el ecuador, y recopilan información de la misma zona a través del

tiempo; la altura de estos satélites es de aproximadamente 36,000 kilómetros (Digital Collections Program, 1997).

Los satélites meteorológicos observan más que sistemas de nubes, otros datos también son recopilados con estos satélites como incendios, efectos de la contaminación, tormentas de arena, cobertura de nieve, flujos de energía entre otros.

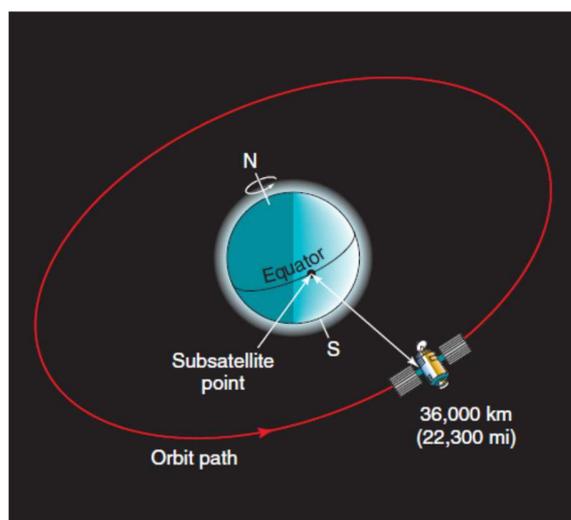


Ilustración 1.1: Satélite geoestacionario (GOES) orbita La Tierra en el ecuador siempre ubicado en un mismo punto respecto a la superficie terrestre. (ametsoc.org)

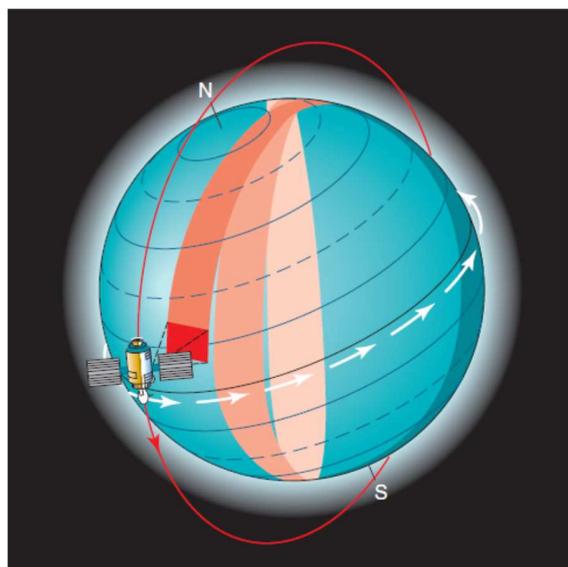


Ilustración 1.2: Satélite de órbita polar (POES) orbita La Tierra en dirección norte-sur. (ametsoc.org)

Se utilizan diferentes canales del espectro electromagnético, particularmente las porciones visibles e infrarrojas para este tipo de satélites.

Toda radiación electromagnética es luz, pero solo es perceptible por los humanos una pequeña porción de la misma, a esta porción se le llama espectro visible. Cada color tiene una longitud de onda distinta, siendo el violeta el color con onda más corta (380 nanómetros) y el rojo el color de onda más larga (700 nanómetros); el infrarrojo (IR) se encuentra dentro del espectro no visible, refleja los rastros de calor emitido por los cuerpos, las imágenes son obtenidas por sensores llamados radiómetros de barrido y se obtienen sin importar la presencia de luz por lo que una imagen infrarroja satelital del planeta provee información en cualquier momento mientras que las imágenes del espectro visible solo pueden ser obtenidas durante las horas del día (NASA, 2015g).

La superficie de los conjuntos de nubes con mayor altura es más fría que la de los conjuntos más bajos, y por esta razón emite menos luz infrarroja. Con estos dispositivos también es posible determinar la temperatura superficial de La Tierra, neblina, océanos y lagos cuando el cielo está despejado.

Los patrones de reflectancia son evidentes dado a que los elementos, moléculas y estructuras tienen patrones distintos de esta, la gráfica de la reflectancia de un objeto a través del espectro se conoce como firma espectral. Algunas firmas características de La Tierra se observan en la ilustración 1.3.

Las superficies reflectantes como las nubes, y el suelo cubierto por nieve se muestran como áreas blancas, y elementos con menos reflectancia como bosques y el océano aparecen más oscuros. Los patrones de nubes mostrados en imágenes satelitales son de gran interés para los científicos dado a que pueden identificar sistemas climáticos específicos y además la etapa de vida y la dirección de los mismos cuando se analizan las imágenes utilizando distintos periodos de tiempo (AMS, 2015).

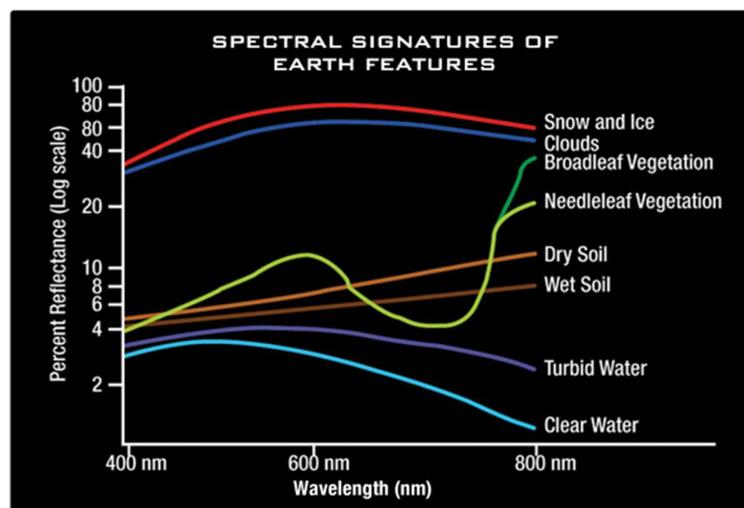


Ilustración 1.3: Firmas espectrales de las características de La Tierra. (missionscience.nasa.gov)

Estos satélites recopilan información acerca de la temperatura atmosférica, humedad, tornados, inundaciones, tormentas y estiman valores de precipitación.

1.2 Satélites de monitoreo terrestre y cartografía

El monitoreo de la superficie terrestre por teledetección se encarga de la recopilación de información por medio de sensores ya sean activos o pasivos, colocados en satélites que capturan las características de la superficie terrestre (Geoscience Australia, 2014).

Los satélites de monitoreo terrestre se dividen en dos grupos según su órbita, los satélites de órbita terrestre baja (LEO, Low Earth Orbit) se encuentran a una altura de 600 kilómetros, desde esta altura no se puede monitorear continuamente la misma zona debido al movimiento relativo del satélite respecto al planeta. Por otra parte los satélites de órbita geoestacionaria (GEO, Geostationary Earth Orbit) se encuentran a 36,000 kilómetros de altura en órbita ecuatorial, se utilizan para monitoreo a gran escala y alta frecuencia aunque es difícil tener una alta resolución espacial (ESA, 2011b).

Algunos ejemplos sobre la utilización de la información satelital tomada por este tipo de satélites son:

- Evaluación y seguimiento de tipos de vegetación y su estado
- Estudio de suelos y uso de los mismos
- Exploración mineral
- Construcción de mapas y cartografía
- Producción de mapas temáticos
- Planificación y seguimiento del recurso hídrico
- Planeación urbana
- Planificación, gestión y control del rendimiento de cultivos
- Evaluación de desastres naturales

1.2.1 Satélites ERS

Los satélites ERS-1 y ERS-2 (*European Remote Sensing*) fueron construidos bajo la gestión de la Agencia Espacial Europea (*European Spatial Agency, ESA*) y fueron lanzados en los años 1991 y 1995 respectivamente. Los dos satélites tenían una órbita polar sincrónica con el Sol a una altura de 785 kilómetros. Contaban con un sistema activo de microondas las cuales podían atravesar gruesas masas nubosas las 24 horas del día, también poseían un sensor llamado difusómetro, este medía la velocidad y dirección del viento sobre los océanos y un el altímetro, el cual podía medir la altura de las olas.

El sensor más conocido de estos satélites era el SAR (*Synthetic Aperture Radar*), este sensor obtenía imágenes de la superficie terrestre y sus datos son aplicados a la cartografía (ESA, 2011a).

El satélite ERS-2 fue equipado además con un sensor para el monitoreo del ozono atmosférico. Los dos satélites recopilaron información importante a cerca de la superficie terrestre, océanos, capas polares, también fueron utilizados para el monitoreo de desastres naturales como

inundaciones severas y terremotos. En Marzo del 2001 debido a una falla el ERS-1 terminó operaciones y en Julio del 2011 el ERS-2 fue retirado de servicio (ESA, 2011a).

1.2.2 Satélite IKONOS

IKONOS es un satélite comercial de teledetección antes perteneciente a la compañía Geoeye actualmente fusionada con DigitalGlobe.

Fue el primer satélite comercial que posibilitó la captación de imágenes con un metro de resolución espacial en pancromático y cuatro metros de resolución en multiespectral (bandas Azul, Verde, Rojo e Infrarrojo cercano) ubicado a una altitud de 681 kilómetros. (DigitalGlobe, 2013)

Algunos de los usos que se le han dado a las imágenes tomadas por el IKONOS son: monitoreo de la condición y vitalidad de cultivos, predicción de tendencias en áreas de elevada fragilidad ambiental, monitoreo, evaluación y planificación del uso de suelo, planificación urbana y mapeo de daños por desastres naturales. (Aeroterra, 2014)

1.2.3 Satélite QuickBird

El satélite comercial perteneciente a la compañía DigitalGlobe llamado QuickBird fue lanzado al espacio el 18 de octubre de 2001 desde la base de la fuerza aérea estadounidense Vandenberg ubicada en California. (ESA, 2011b)

Este satélite orbitaba La Tierra a una altitud de 600 kilómetros, su sensor recogía imágenes diurnas de la superficie terrestre con una resolución de 0.65m por pixel, fue una excelente fuente de información para análisis de cambio de suelo y evaluación forestal y agrícola. El 27 de enero del 2015, después de 13 años en órbita fue puesto fuera de servicio.

1.2.4 WorldView

Los satélites WorldView pertenecen también a la compañía Digitalglobe y cuentan con muy alta resolución.

El WorldView 1 fue lanzado el 18 de septiembre del 2007, con una altitud de 496 kilómetros y utiliza un sensor pancromático, el WorldView 2, puesto en órbita el 8 de Octubre del 2009, con altitud de 770 kilómetros y cuenta con un sensor multiespectral de captación de imágenes. Ambos satélites describen una órbita heliosincrónica.

El sensor del satélite WorldView 1 cuenta con una distancia de muestreo de 0.50 metros en nadir y 0.59 a un ángulo fuera de nadir de 25 grados a lo largo de la franja que habilita las imágenes estereoscópicas, su ancho de franja es de 17.6 kilómetros. El sensor del WorldView 2 tiene un muestreo espacial de 1.85 metros y capta imágenes en 8 bandas. (ESA, 2011b)

El WorldView 3 se lanzó el 13 de agosto del 2014, su sensor fue autorizado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA) para además de recopilar imágenes pancromáticas y multiespectrales de 8 bandas también obtener 8 bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) y un sensor atmosférico (CAVIS) (Satellite Imaging, 2015).

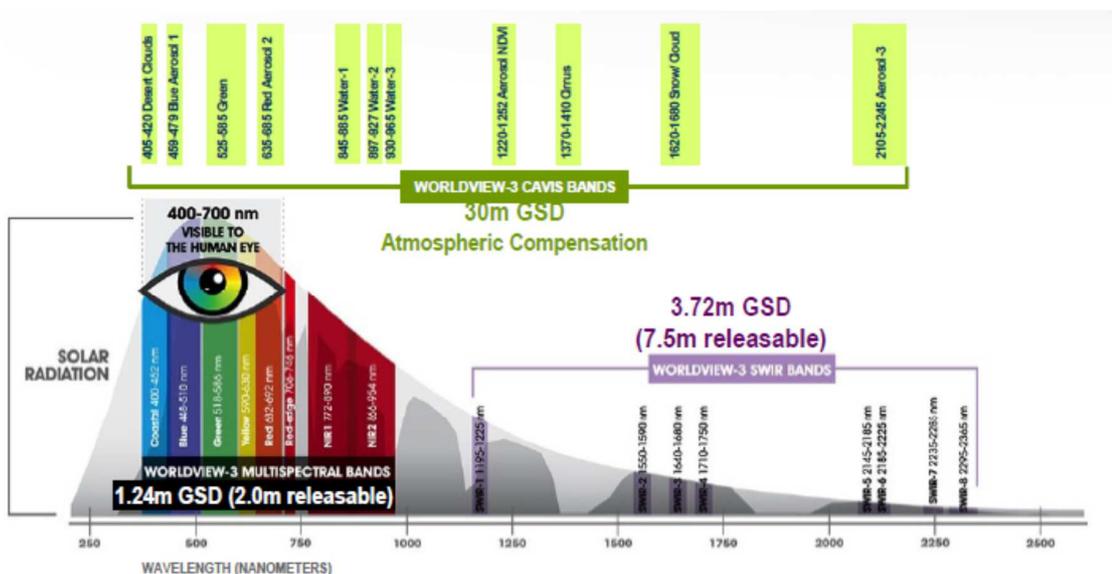


Ilustración 1.4: Gráfico de las bandas capturadas por el WorldView 3 respecto a la radiación solar. (geospatialworldforum.org)

1.2.5 Satélites Landsat

Los Landsat son un conjunto de satélites construidos y puestos en órbita por los Estados Unidos para la observación y monitoreo de la superficie terrestre.

Representa la colección más larga adquirida de forma continua en el mundo, estas imágenes son utilizadas por diferentes sectores como el agrícola, forestal, planeación urbana, educación, cartografía, también son utilizadas por científicos para diversas investigaciones y son de gran valor para la respuesta rápida a emergencias y operaciones de rescate (USGS, 2013).

El proyecto Landsat data desde al año de 1972 cuando se puso en órbita el Landsat 1, en la actualidad se encuentran en funcionamiento el Landsat 7 puesto en órbita el 15 de abril de 1999 con altitud de 705 kilómetros y el Landsat 8 lanzado el 11 de febrero del 2013 y su altitud es de 710 kilómetros.

El Landsat 7 cuenta con 8 bandas [Tabla 1.1]

Banda	Aplicación
Banda 1. Azul	Mapeo de aguas costeras
	Diferenciación entre suelo y vegetación
	Diferenciación entre vegetación conífera y decidua
Banda 2. Verde	Mapeo de vegetación
	Calidad de agua

Banda 3. Roja	Absorción de la clorofila
	Diferenciación de especies vegetales
	Áreas urbanas y uso de suelo
	Agricultura
	Calidad de agua
Banda 4. Infrarrojo cercano	Delimitación de cuerpos de agua
	Mapeo geomorfológico y geológico
	Identificación de áreas de incendios y áreas húmedas
	Agricultura y vegetación
Banda 5. Infrarrojo termal	Uso de suelo
	Medición de humedad en la vegetación
	Diferenciación entre nubes y nieve
	Agricultura
	Vegetación
Banda 6. Infrarrojo termal	Mapeo de stress térmico en plantas
	Corrientes marinas
	Propiedades termales del suelo
Banda 7. Infrarrojo medio	Identificación de minerales
	Mapeo hidrotermal
Banda 8. Pancromática	Imagen blanco y negro de la zona

Tabla 1.1: Canales del Landsat 7 y sus aplicaciones. (INEGI, 2012)

El Landsat 8 además de contar con estas bandas cuenta con tres más, la banda 9 es utilizada para observar las nubes cirrus, y las bandas 10 y 11 son de Infrarrojo de onda larga las cuales son utilizadas para la evaluación de la evapotranspiración para la administración del agua (NASA, 2015c).

1.2.6 Satélite Envisat

El primero de marzo de 2002, la Agencia Espacial Europea (ESA) puso en órbita el Envisat, un satélite de observación terrestre de órbita polar sincrónica que se encontraba a una altitud de 790 kilómetros.

Su misión era la de recopilar datos con el fin de recabar información acerca del calentamiento global, el grado de contaminación atmosférica, los riesgos de desastres naturales con el fin de mitigar sus efectos, gases de efecto invernadero, cambios del nivel de los océanos, fusión de glaciares, destrucción de bosques, restos de hidrocarburos en el mar, inundaciones, erupciones volcánicas y el efecto de El Niño (ESA, 2014a).

La misión del Envisat terminó el 8 de abril del 2012 cuando se perdió por completo el contacto con el satélite.

1.2.7 Satélite RESURS

La Ex Unión Soviética ahora Rusia desarrolló los satélites RESURS que llevan en órbita desde 1985, estos satélites incluyen dos distintos componentes: RESURS-F que su base es el reconocimiento militar y el RESURS-01 orientado al estudio del medio ambiente, estos satélites están dotados de escáneres de cuatro canales en el espectro visible y cercano a infrarrojo y un canal infrarrojo térmico. En continuidad del programa el RESURS-DK1 fue lanzado en 2006 con un sensor capaz de recoger información con resolución en pancromático de un metro y con resolución en multiespectral de 2 a 3 metros, este satélite se encuentra a una altitud de 360 kilómetros con órbita LEO semi-elíptica (ESA, 2014b).

El RESURS-P1 se lanzó el 25 de junio del 2013 con órbita sincrónica al Sol y 480 kilómetros de altitud, su resolución es de 0.7 metros. El satélite está diseñado para recabar imágenes multiespectrales de alta resolución. Su sensor, un Geoton-2 es un radiómetro pancromático y multiespectral de alta definición, sus funciones principales son analizar el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) que es el índice representativo de la biomasa total, medir la fracción de tierra con vegetación, cobertura de incendios, uso de suelo, clasificación de suelo, ubicación de masas de hielo, ubicación de glaciares y determinación de la altura de las nubes (WMO OSCAR, 2015).

El satélite RESURS-P2 fue puesto en órbita el 26 de diciembre de 2014 a 475 kilómetros de altura, la resolución del pancromático es de un metro, además este satélite cuenta con dos cámaras multiespectrales que trabajan en seis longitudes de onda para observar la Tierra. Posee un Geoton-2 de las mismas características del RESURS-P1 y además un Nucleon el cual se encarga del estudio de la materia oscura además de recopilar evidencia de la existencia de la antimateria. (WMO OSCAR, 2015)

1.3 Satélites de exploración astronómica y planetaria

Los satélites de exploración astronómica son básicamente grandes telescopios que son lanzados al espacio. En el espacio la visión de estos satélites no se ve afectada por los gases de la atmósfera y el equipo de imagen en infrarrojo no se ve confundido por el calor de la Tierra.

Por medio del análisis del espectro electromagnético y las diferentes longitudes de onda (por ejemplo, luz ultravioleta, rayos X, el espectro visible, microondas y rayos gama) el satélite genera imágenes. De esta manera las imágenes no son generadas por una cámara, sino mediante el análisis de las ondas que conforman el espectro de la luz (Spacesim, 1997a).

Algunas aplicaciones importantes que tienen estos satélites son:

- Generación de mapas de estrellas
- Estudio y análisis de fenómenos desconocidos (agujeros negros, y quasáres)
- Generación de imágenes de planetas y galaxias lejanas
- Generación de mapas de la superficie de distintos planetas

Los satélites de exploración espacial o sondas espaciales se adentran al sistema solar y funcionan de una forma similar a los satélites astronómicos, las sondas espaciales son responsables de grandes descubrimientos, principalmente observan planetas, satélites, asteroides o cometas y distintas galaxias. Ejemplos de estos satélites son Galileo y la Voyager 1 que en agosto de 2012 abandonó el sistema solar (BBC News, 2013).

1.3.1 Satélites de Rayos X

Este tipo de satélites estudia las emisiones de Rayos X de diferentes cuerpos astrales, deben de estar fuera de la atmósfera para que La Tierra no interfiera en las lecturas.

El satélite en uso por parte de la ESA son el XMM-Newton observatory, el cual tiene como propósito estudiar las regiones de formación de estrellas, la formación de galaxias y la generación de mapas de la materia oscura (ESA, 2011a).

La NASA contaba con el Rossi X-ray Timing Explorer que fue lanzado el 30 de diciembre de 1995 y en 2012 terminó su misión y el Chandra, lanzado el 23 de julio de 1999, está diseñado para detectar los Rayos-X de puntos muy calientes del espacio como estrellas en erupción, galaxias y materia alrededor de los agujeros negros (Harvard, 2015).

1.3.2 Satélites de Rayos Gamma

Los rayos gamma son fotones de energía superiores a los Rayos-X, estos rayos no penetran la atmósfera terrestre por lo que deben de ser estudiados desde un telescopio espacial.

El satélite Swift de la NASA se lanzó en 2004 y recopila información acerca de explosiones que emiten rayos gamma, los principales objetivos de esta misión son determinar el origen de la emisión de los rayos gamma en el espacio, utilizar estos rayos para estudiar el universo joven, monitorear el cielo respondiendo a todo tipo de transitorios, realizar un seguimiento de las fuentes detectadas por otros observatorios y realizar el primer estudio de los Rayos-X del cielo (NASA, 2015c).

El satélite INTEGRAL (*International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*) fue lanzado al espacio en 2002 por la ESA y está diseñado para detectar la radiación más energética proveniente del espacio, este satélite ha tenido éxito en captar agujeros negros y quásares (ESA, 2015a).

El Fermi fue lanzado por la NASA el 11 de junio de 2008 y su objetivo es la recopilación de información acerca de materia oscura, pulsares y agujeros negros (NASA, 2015d).

1.4 Satélites de comunicaciones

Los satélites de comunicación es una de las aplicaciones espaciales que lleva desarrollándose por más tiempo, comenzó con el lanzamiento de Telstar en 1962 y Syncom en 1963 y ha continuado en crecimiento desde ese entonces.

Los satélites de comunicaciones tienen órbitas sincrónicas, aunque algunos tienen órbitas del tipo LEO para este propósito. Estos aparatos amplifican por medio de un transponder las señales de telecomunicación de una fuente hacia el remitente, son utilizados para televisión, radio, telefonía, internet y aplicaciones militares. Existen alrededor de 2,000 satélites de comunicaciones en órbita (Britannica, 2015).

El nivel de transmisión de la información depende de la banda utilizada [Tabla 1.1] y la elección de la frecuencia depende del tipo de aplicación, el requerimiento de ancho de banda, las condiciones de propagación y la infraestructura existente en tierra. A mayor frecuencia más ondas pueden ser dirigidas a una antena de tamaño dado (AIRBUS, 2015).

Banda	Aplicación
L	Telefonía móvil y transmisión de datos
S	Telefonía móvil y transmisión de datos
C	Telefonía fija, servicios de radiodifusión y redes empresariales
X	Comunicación gubernamental o militar encriptada por motivos de seguridad
Ku	Transmisión de datos a alta velocidad, televisión, videoconferencias y redes empresariales
Ka	Transmisión de datos a alta velocidad, televisión, videoconferencias y redes empresariales

Tabla 1.2: Descripción de bandas y su aplicación. (AIRBUS defence and space, 2015)

A cada usuario se le atribuye una parte específica de la banda. Las bandas de frecuencia son asignadas de acuerdo a los lineamientos estandarizados reglamentados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunications Union*, ITU), dependiendo del servicio que se proveerá y la coordinación entre operadores que es fundamental para evitar interferencia entre satélites.

1.5 Satélites de navegación (GPS)

Los satélites de navegación se desarrollaron en 1950 debido a la necesidad de posicionar los barcos en todo momento cuando se encontraban en mar abierto, dado a que no era posible conocer su posición exacta. La idea de utilizar satélites para ubicar una posición geográfica nació con el lanzamiento del Sputnik en 1957, científicos del laboratorio de física aplicada de la universidad de Johns Hopkins monitorearon el satélite, descubrieron un patrón de efecto doppler cuando la radiofrecuencia transmitida por este era graficada (Spacesim, 1997b).

Se descubrió que conociendo la velocidad y el tiempo requerido por la señal para ser transmitida entre dos puntos, la distancia entre dichos puntos podía ser calculada; este cálculo debe de ser preciso y los relojes en los satélites y en tierra deben de estar sincronizados. Hoy en día la mayoría de los sistemas de navegación utilizan tiempo y distancia para determinar una ubicación.

1.5.1 Funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global

El Sistema de Posicionamiento Global (*Global Positioning System*, GPS) está formado por alrededor de 30 satélites ubicados a una altitud aproximada de 20,000 kilómetros, que poseen órbitas medias respecto a la Tierra (MEO). Este sistema está formado por tres elementos: los satélites, las estaciones en tierra y los receptores. La posición de los satélites es conocida aunque es corroborada por los radares en tierra, el receptor GPS se encuentra recibiendo constantemente la señal de dichos satélites y mediante un proceso de trilateración entre varios satélites [Ilustración 1.5], el receptor calcula su ubicación (NASA, 2015b).

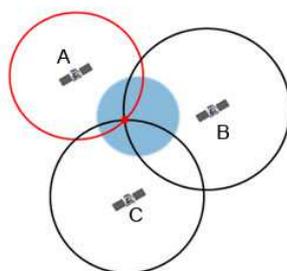


Ilustración 1.5: Proceso de trilateración por satélites de navegación. (physics.org)

1.6 Satélites para propósitos militares

Las misiones más comunes para los satélites con propósitos militares son: recopilación de inteligencia, navegación y comunicación militar. Los primeros satélites militares fueron de reconocimiento fotográfico, se realizaron intentos de desarrollar satélites armados pero su desarrollo fue detenido en 1967 tras la ratificación de los tratados que prohíben el despliegue de armas de destrucción masiva en órbita. No es posible conocer el número de satélites militares en órbita debido a que dicha información no es de conocimiento público.

La comunicación con fines militares es llevada a cabo por satélites de telecomunicación en las bandas de frecuencia X y Ka.

Capítulo 2: Satélites que proporcionan información sobre precipitación

Gracias al desarrollo de los satélites es posible identificar y cuantificar de una manera aproximada la precipitación con intervalos constantes de tiempo. Los satélites meteorológicos expanden la cobertura de las estaciones pluviométricas y reducen o igualan el lapso de las mediciones, por lo que la información obtenida es aplicable en la hidrología.

El objetivo del monitoreo de la precipitación por medio de satélites es proveer información de la ocurrencia de la misma así como de la cantidad y de su distribución espacial. La dificultad de obtener datos veraces reside en que la precipitación es uno de los parámetros más variables respecto al tiempo y el espacio. (V. Levizzani, R. Amorati, & F. Meneguzzo, 2002) La precipitación tiene un impacto directo en la vida cotidiana, ejemplo de esto son las inundaciones y la escasez de agua.

Los satélites meteorológicos [Ilustración 2.1] son los que realizan la tarea de observar y recopilar información acerca de distintos parámetros para inferir los valores de precipitación. Los satélites geoestacionarios proveen observación continua de una misma región pero se ven limitados por la resolución espacial, a diferencia de los satélites LEO, los cuales tienen alta resolución espacial, pero cambian de posición respecto al tiempo; además cuentan con sensores capaces de obtener medidas más directas sobre la precipitación (C. Kidd, V. Levizzani, & R. Ferraro, 2009).

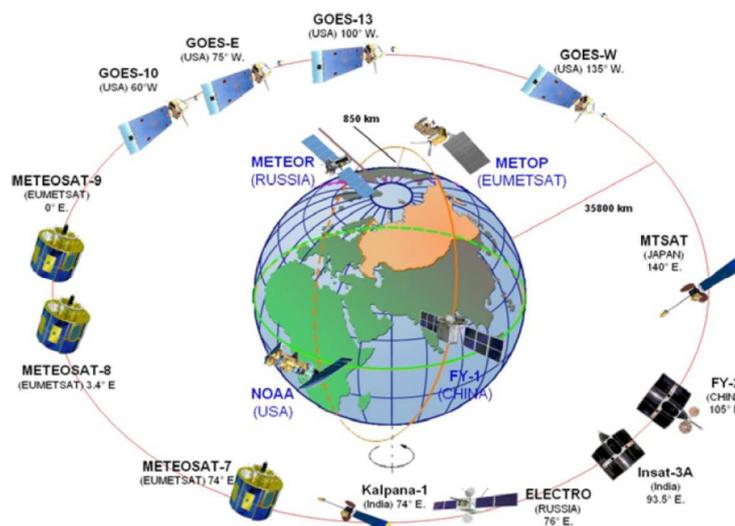


Ilustración 2.1: Satélites meteorológicos geoestacionarios y LEO. (C. Kidd, 2009)

2.1 Satélites meteorológicos geoestacionarios

Los satélites meteorológicos geoestacionarios en operación se encuentran a una altura aproximada de 38,500 kilómetros. Esta órbita permite al satélite la observación de la misma área respecto al tiempo, la cual es alrededor del 42% de la superficie terrestre. Son manipulados por los Estados Unidos (GOES), la Unión Europea (Meteosat), Japón (MTSAT, GMS), China (FY), Rusia (Eektro) y por la India (KALPANA).

Las ventajas de este tipo de satélites son: que realizan observaciones repetidas de un área determinada, llegando a tener una alta resolución temporal (pudiendo llegar a ser de 1 minuto).

2.1.1 Satélites GOES

El programa llamado Satélite Geoestacionario de Operación Ambiental (*Geostationary Operational Environmental Satellite*, GOES) desarrollado por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), ambos de los Estados Unidos.

Los satélites GOES toman mediciones de la temperatura atmosférica, nubosidad, vapor de agua, humedad y vientos, observan los huracanes cuando se desarrollan en el océano (NASA, 2014). Estos datos proveen una corriente de información ambiental para soportar el pronóstico del tiempo y el seguimiento de tormentas severas.

Existen tres satélites GOES en operación: el GOES 13, lanzado en mayo de 2006 se encuentra en operación como GOES Este desde el 2010; el GOES 14 fue puesto en órbita en junio de 2009, se espera que tenga una vida útil de 10 años; y el GOES 15 lanzado en marzo de 2010 se designó para operar como GOES Oeste (NASA, 2014).

El satélite GOES R se encuentra en fase de desarrollo y se pretende poner en órbita en 2016. Su sistema, de nueva generación, será más preciso, y con esto se lograrán mejores predicciones y se perfeccionará el sistema de alertas. Observará y detectará fenómenos meteorológicos que afecten directamente a la seguridad pública, a la protección a la propiedad y al desarrollo económico y de la salud. Además ayudará a los meteorólogos a observar y predecir eventos climáticos locales como tormentas eléctricas, tornados, neblina e inundaciones; también será usado para el monitoreo del clima espacial, oceanografía, monitoreo climático y búsqueda y rescate (NASA, 2015f).

2.1.2 Satélites Meteosat

Meteosat son una serie de satélites meteorológicos construidos y puestos en órbita por la ESA a una altitud de 36,000 kilómetros, su operación y desarrollo está regido por la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*, EUMETSAT).

Los satélites Meteosat 7, lanzado en 1997 opera sobre el océano Índico; Meteosat 8, puesto en órbita en 2002; Meteosat 9, lanzado en 2005 y Meteosat 10 lanzado en 2010 proporcionan información meteorológica de Europa y África en periodos de 15 minutos y se espera que se encuentren en operación al menos por 7 años (EUMETSAT, 2015a). Estos satélites cuentan con

dos instrumentos, uno de observación de espectro visible e infrarrojo (SEVIRI), el cual opera en 12 canales diferentes, y un trazador geoestacionario de radiación terrestre (GERB; ESA, 2015b)

El principal objetivo de estos satélites es el de detectar y pronosticar condiciones climáticas de rápido desarrollo y alto impacto como tormentas eléctricas, neblinas, huracanes entre otros. Los instrumentos instalados en los satélites además son capaces monitorear la lluvia convectiva, tormentas de arena, ceniza y la evaluación de las características de las masas de aire (EUMETSAT, 2015a).

Según la ESA, la tercera generación de Meteosat (MTG) se conformará por seis satélites, cuatro de ellos serán para imágenes, teniendo una expectativa de vida de 20 años operacionales, y dos de sondeo, con expectativa de 15.5 años en operación. La sonda será una innovación en el programa permitiendo a los satélites tomar imágenes de los sistemas climáticos y analizar la atmósfera capa por capa realizando estudios de su composición química.

2.1.3 MTSAT

MTSAT es el programa sucesor del Satélite Meteorológico Geoestacionario (*Geostationary Meteorological Satellite*, GMS), los MTSAT por sus siglas en inglés (*Multifunctional Transport Satellites*) son una serie de satélites meteorológicos propiedad del Ministerio Japonés de Suelo, Infraestructura, Transporte y Turismo y la Agencia Meteorológica de Japón (*Japan Meteorological Agency*, JMA) proveyendo cobertura de Japón y Australia.

Los satélites MTSAT proveen imágenes en 5 bandas del espectro visible, con resolución de 1 kilómetro, y cuatro bandas en infrarrojo con resolución de 4 kilómetros (JMA, 2015). Actualmente se encuentran dos satélites en órbita, el MTSAT 2 conocido como Himawari 7, puesto en órbita en febrero de 2006 y el Himawari 8 que se lanzó en julio de 2015.

Los principales objetivos del programa son: recopilación y distribución de imágenes de la superficie terrestre y la compilación de información meteorológica utilizando el sistema DCP (Data Collection Platform; EO, 2015b).

2.1.4 Satélites FY-2

Los satélites Chinos de la serie FY-2, operados por el Centro Nacional Meteorológico Satelital (*National Satellite Meteorological Center*, NSMC), tienen como objetivo recopilar información oceanográfica, de la agricultura, hidrológica y para el control de desastres (NSMC, 2013).

Existen en operación dos satélites de este programa, el FY-2D, lanzado en diciembre de 2006 y el FY-2E puesto en órbita en diciembre de 2008, los cuales observan el hemisferio del este de Asia cada hora.

2.1.5 Satélites Elektro

El Elektro-L representa la nueva generación de satélites meteorológicos rusos, desarrollado por la Agencia Espacial Federal Rusa, el cual fue lanzado en enero de 2011 siendo el primer satélite de este país en operar en órbita geoestacionaria.

El satélite se encuentra a una altitud de 36,000 kilómetros y sus objetivos son: el análisis del clima, recopilación de información acerca del cambio climático y monitoreo oceánico, capturará imágenes del espectro visible con una resolución de un kilómetro y de infrarrojo con resolución de cuatro kilómetros siendo capaz de producir imágenes cada 30 minutos; además se encargará de monitorear la radiación solar (Russian Space Web, 2015).

2.1.6 Satélites INSAT y KALPANA

La Organización de Investigación Espacial India cuenta con tres satélites activos. El satélite KALPANA fue lanzado en septiembre de 2002 y tiene como misión proveer información climática las 24 horas sobre la región India y recopilar información acerca de los eventos climáticos (Su-Yin Tan, 2014).

El INSAT 3A fue lanzado en abril de 2003 y se encuentra a una altitud de 36,000 kilómetros, su misión aparte de meteorología es de comunicación, cuenta con un radiómetro de alta resolución e infrarrojo con resoluciones de 2x2 y 8x8 kilómetros respectivamente. Además captura imágenes en el espectro visible con resolución de un kilómetro. (IMD, 2015)

El INSAT 3D fue puesto en órbita en julio de 2013, su objetivo es el proporcionar un sistema operacional, ambiental y de alerta de tormentas para proteger la vida y la propiedad y además monitorear la superficie terrestre y llevar a cabo observaciones oceánicas (National Satellite Meteorological Centre, 2014).

2.2 Satélites meteorológicos LEO

Los satélites de órbita baja LEO se encuentran a una altitud aproximada entre 160 y 900 kilómetros. Su periodo orbital dura alrededor de 90 minutos, es decir, viajan aproximadamente a 7.8 km/s. Este tipo de órbita permite al satélite tener una cobertura de toda la superficie terrestre con una mayor resolución.

Colocar un satélite en este tipo de órbita es más económico dado que se requiere menor energía para posicionarlo, comparado con uno de órbita geostacionaria.

2.2.1 Satélites NOAA

Complementando a los satélites geostacionarios existen dos satélites de órbita polar conocidos como TIROS-N o ATN. Estos satélites pasan cerca de ambos polos y poseen una altitud de 870 kilómetros. Sus instrumentos pueden realizar diversas mediciones de la atmósfera terrestre, su superficie, nubosidad, medición de protones, medición de iones positivos, densidad del flujo de electrones, además que reciben información de las boyas oceánicas.

El instrumento principal a bordo de estos satélites es el **Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR)** el cual monitorea variables atmosféricas, imágenes de nubes, provee imágenes en infrarrojo y en espectro visible usadas para realizar mediciones de la radiación y perfiles de temperatura (NOAA, 2015c). Finalmente los sensores ultravioleta miden los niveles de ozono en la atmósfera.

2.2.2 Satélites METOP

El programa posee dos satélites en órbita, el METOP-A, lanzado en octubre de 2006 y el METOP-B puesto en órbita en septiembre de 2012, ambos con una altitud de 817 kilómetros. Estos satélites fueron construidos para obtener mejores observaciones sobre la atmósfera, océanos y continentes.

Los instrumentos en estos satélites son de alta tecnología y aumentan la fiabilidad de la medición de la temperatura y humedad, lecturas de velocidad del viento y perfiles atmosféricos del ozono (EUMETSAT, 2015b).

El Interómetro Infrarrojo Atmosférico (IASI) tiene la capacidad de detectar y medir con exactitud los niveles y patrones de circulación de los gases que son conocidos por influenciar el clima (EUMETSAT, 2015b).

El METOP-C que será el último satélite del programa será lanzado en el año 2017, y tendrá como objetivo el monitoreo de las capas de hielo y del océano, seguimiento del clima y de la química atmosférica (OSCAR, 2015b).

2.2.3 Satélite FY

Los satélites FY (*FengYun*) son satélites meteorológicos de China, El programa FY-3 maneja los satélites de órbita baja. Los satélites en operación son el FY-3A, lanzado en mayo de 2008, su objetivo principal es el monitoreo climatológico y también monitoreo de cuerpos de hielo y océanos, química de la atmósfera y clima espacial como medición de iones, protones y electrones solares (EO, 2015a).

El FY-3B fue puesto en órbita en noviembre de 2010, y al igual que el FY-3A, tiene como misión el monitoreo de cuerpos de hielo y océanos, meteorología operacional y química atmosférica; se encuentra a una altitud de 847 kilómetros. El FY-3C se encuentra a una altitud de 834 kilómetros y se lanzó en septiembre de 2013, además de tener como objetivos la observación de la química atmosférica, monitoreo de hielos y océanos y monitoreo climatológico; este satélite cuenta con más instrumentos siendo capaz de medir la radiación de La Tierra, los niveles de ozono y detectar iones de alta energía (OSCAR, 2015a).

2.3 Productos de estimación de precipitación

Los productos de estimación de precipitación realizados por satélite son aproximaciones de la lluvia en el planeta que se determina por mediciones y observaciones meteorológicas y de nubosidad. Actualmente existen varios productos provenientes de distintas fuentes que están disponibles de carácter abierto cada uno con sus ventajas y desventajas, pudiendo estas ser importantes o no, según la aplicación que se le dé a los productos.

2.3.1 TRMM 3B42

La misión de medición de precipitación tropical (TRMM) resultó de la suma de esfuerzos de la NASA y la Agencia Aeroespacial de Exploración de Japón (*Japan Aerospace Exploration Agency*, JAXA). Se desarrolló en 1997 para el estudio de la precipitación e investigación climática,

principalmente en los trópicos, como parte del ciclo del agua en el sistema climático actual (NASA, 2015e). Este programa realizaba mediciones de las microondas emitidas por La Tierra, y estimaba la cantidad de vapor de agua, y agua en las nubes, para entregar un producto con la intensidad de precipitación, en milímetros por hora.

El propósito del algoritmo 3B42 es el producir datos de precipitación fusionada de infrarrojos TRMM y estimación de la raíz del error cuadrático medio (*Root Mean Square Error*, RMSE). Los satélites que participan en este producto son: TRMM, GOES-E, GOES-W, Meteosat-7, Meteosat-5 y NOAA-12 (NASA, 2013). En la Tabla 2.1 se observan sus características.

Características del producto TRMM 3B42	
Cobertura temporal:	01 de enero de 1998 – 14 abril de 2015
Cobertura espacial:	Latitud: 50°S – 50°N; Longitud: 180°E – 180°O
Resolución temporal:	3 horas
Resolución horizontal:	0.25° x 0.25°; No. Píxeles de latitud (nlat)=400, No. Píxeles de longitud (nlong)=1440

Tabla 2.1: Características del producto TRMM 3B42 (NASA, 2013)

El programa terminó oficialmente el 15 de abril de 2015 después que el principal satélite de medición (TRMM) vaciara las reservas de combustible. El satélite fue apagado y reingresado a La Tierra. Originalmente estaba diseñado para operar 3 años, pero logró cumplir su misión por 17.

2.3.2 CPC Morphing Technique CMORPH

La técnica CPC Morphing produce información acerca de la intensidad de precipitación, en milímetros por hora, en una alta resolución espacial y temporal. La técnica consiste en estimar la precipitación exclusivamente con satélites de baja órbita y mayor resolución. Esta información se transfiere a los satélites geoestacionarios por medio de propagación espacial, los cuales utilizan el infrarrojo para obtener la información (NOAA, 2015b). En la Tabla 2.2 se observan las características de este producto.

Características del producto CMORPH	
Cobertura temporal:	03 de diciembre de 2002 – a la fecha
Cobertura espacial:	Global
Resolución temporal:	Hasta 30 minutos
Resolución horizontal:	(4'22") 0.07277 Grados lat/lon (8km en el ecuador)

Tabla 2.2: Características del producto CMORPH (NOAA, 2015)

Las microondas se generan con los satélites DMSP 13, 14 y 15, NOAA 15, 16, 17 y 18, AQUA y TRMM. Los datos tomados con satélites geoestacionarios dotados con sensor infrarrojo se utilizan para determinar la precipitación cuando satélites con microondas no se encuentran en la zona para realizar las observaciones. Se realiza una correlación con los valores tomados con microondas e infrarrojo para el mismo periodo de tiempo y se ajusta el valor de los datos obtenidos con infrarrojo.

2.3.3 PERSIANN

La estimación de Precipitación por medio de Sensores Remotos utilizando Redes Neuronales Artificiales (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks*, PERSIANN) es un algoritmo que provee información de precipitación cercana al tiempo real. El algoritmo utiliza información de sensores infrarrojos de satélites geosincrónicos como fuente primaria de información (CHRS, 2015). Las características de este producto se observan en la Tabla 2.3.

Características del producto PERSIANN	
Cobertura temporal:	01 de enero de 2000 – a la fecha
Cobertura espacial:	Latitud: 50°S – 50°N; Longitud: 0° – 360°
Resolución temporal:	3 horas
Resolución horizontal:	0.25° x 0.25°; nlat=400, nlong=1440

Tabla 2.3: Características del producto PERSIANN (CHRS, 2015)

Otro producto de PERSIANN es el llamado PERSIANN-CDR el cual es un producto de precipitación diario para el periodo de 1983 al 2011; tiene una cobertura de 60°S - 60°N y de 0° - 360° de longitud, con una resolución espacial de 0.25°

Este producto utiliza Redes Neuronales Artificiales (*Artificial Neural Networks*, ANN) para extraer los pixeles de nubes frías y características vecinas utilizando imágenes de infrarrojo, además de variaciones asociativas de temperatura en cada pixel para estimar la superficie de la zona con lluvia (NOAA, 2014).

2.3.4 ARC 2

ARC 2 por sus siglas en inglés (*Africa Rainfall Climatology Version 2*), se estableció en 2012 como una base de datos de precipitación centrada en África con 30 años de registro.

Funciona con imágenes de infrarrojo geoestacionarias cada 3 horas, información obtenida por la Organización de Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) y estaciones de medición que reportan profundidad de precipitación en 24 horas controladas por el Sistema de Telecomunicaciones Global (GTS; NOAA, 2015a). En la Tabla 2.4 se observan sus características.

Características del producto ARC 2	
Cobertura temporal:	01 de enero de 1983 – 11 de octubre de 2015
Cobertura espacial:	Latitud: 40°S – 40°N; Longitud: 20°W – 55°E
Resolución temporal:	Diaria
Resolución horizontal:	0.25° x 0.25°; nlat=801, nlong=751

Tabla 2.4: Características del producto ARC 2 (NOAA, 2015)

ARC 2 resulta de recalibrar las imágenes de infrarrojo de Meteosat de 1983 a 2005 teniendo como resultado una mayor correlación con otras bases de datos de periodos largos como el Proyecto Global de Precipitación y Climatología (*Global Precipitation Climatology Project*, GPCP) y el Centro de Predicción Climática Fusionado de Análisis de Precipitación (*Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation*, CMAP).

2.3.5 Global Precipitation Climatology Project (GPCP)

Esta base de datos contiene datos de precipitación diaria y de precipitación media mensual. El programa está diseñado para proveer información estimada de la precipitación de manera global.

Dado a la falta de datos en los océanos los valores que presentan los modelos de precipitación como el GPCP basados en satélite pueden diferir en gran medida con los reales. En la Tabla 2.5 se observan las características de este producto.

Características del producto GPCP	
Cobertura temporal:	01 de enero de 1979 – 31 de julio de 2015
Cobertura espacial:	Latitud: 88.75°S – 88.75°N; Longitud: 1.25° – 358.75°
Resolución temporal:	Diaria y Mensual
Resolución horizontal:	1° x 1°; nlat=80, nlong=357

Tabla 2.5: Características del producto GPCP (NOAA, 2015)

2.3.6 Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP)

El CMAP es una base de datos de precipitación, la base de datos mensual más utilizada mundialmente. Estos valores son estimados con imágenes satelitales y estaciones de precipitación. Generalmente esta base de datos tiene más certidumbre en las regiones cercanas a los trópicos, y la va perdiendo en las regiones cercanas a los polos (UCAR, 2015).

Las discontinuidades de esta base de datos principalmente ocurren por la diferencia en los métodos de calibración utilizados y la metodología para proporcionar un peso a cada estación pluviométrica utilizada. Las características de este producto se observan en la Tabla 2.6.

Características del producto GPCP	
Cobertura temporal:	01 de enero de 1979 – 31 de julio de 2015
Cobertura espacial:	Latitud: 88.75°S – 88.75°N; Longitud: 1.25° – 358.75°
Resolución temporal:	5 días y mensual
Resolución horizontal:	2.5° x 2.5°; nlat=72, nlong=144

Tabla 2.6: Características del producto CMAP (NOAA, 2015)

2.3.7 TMPA

El producto satelital TMPA 3B43 (Tropical Rainfall Measuring Mission) mensual provee información de la distribución de la precipitación con detalles regionales y series de datos. Está relacionado con el TRMM, utilizando los mismos satélites, ya que se derivan del mismo producto. Existen diferentes series de datos, mensuales (3B43), precipitaciones diarias (3B42 derivado) y cada 3 horas (3B42; NASA, 2015a). En la Tabla 2.7 se observan sus características.

Características del producto TMPA	
Cobertura temporal:	01 de enero de 1998 – 14 abril de 2015
Cobertura espacial:	Latitud: 50°S – 50°N; Longitud: 180°E – 180°O
Resolución temporal:	3 horas, diaria y mensual
Resolución horizontal:	0.25° x 0.25°; nlat=801, nlong=751

Tabla 2.7: Características del producto TMPA (NASA, 2015)

2.3.8 RFE 2

Es un producto implementado por el Centro de Predicción Climática de la NOAA, utiliza técnicas para generar un mejor estimado de la precipitación en África el cual responde a las necesidades humanitarias de este continente. Además sigue utilizando la temperatura del tope de las nubes e información de estaciones pluviométricas.

Este sistema utiliza información del espectro infrarrojo de los Meteosat, además del Sistema Global de Telecomunicación (*Global Telecommunication System, GTS*) de la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization, WMO*). Toda la información es combinada utilizando el método de estimación de máxima verosimilitud (NOAA, 2006). La precipitación generada por nubes cálidas no es considerada en este producto. Sus características se observan en la Tabla 2.8.

Características del producto RFE 2	
Cobertura temporal:	01 de enero de 2001 – a la fecha
Cobertura espacial:	Latitud: 40°S – 40°N; Longitud: 20°O – 55°E
Resolución temporal:	diaria
Resolución horizontal:	0.1° x 0.1°; nlat=801, nlong=751

Tabla 2.8: Características del producto RFE 2 (NOAA, 2015)

Capítulo 3: Marco teórico sobre análisis, distribuciones de probabilidad y corrección de productos satelitales

3.1 Llenado de vacíos en datos observados

La precipitación es uno de los datos cruciales en los análisis hidrológicos, sin embargo, la mayoría de esta información tiene un número significativo de datos faltantes o son muy cortas para realizar un análisis. Por esta razón completar los datos faltantes de una manera correcta es crucial.

Los datos faltantes pueden aparecer por distintas razones: fallas en los equipos de medición, limitantes económicos y error humano. Dichos datos pueden ser inferidos con ayuda de la información de estaciones vecinas (Campos Aranda, 1992).

El método del Servicio Nacional del Clima de los estados unidos (U.S. National Weather Service) ha sido verificado teórica y empíricamente. Considera, que un valor faltante en la estación “A” puede ser estimado con los valores observados en el mismo intervalo de tiempo de las estaciones vecinas. Este método puede ser aplicado para completar datos faltantes a nivel diario, mensual y anual (Aparicio, 2001).

$$P_x = \frac{\sum(P_i W_i)}{\sum W_i} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde:

P_x = Precipitación que se desconoce [mm].

P_i = Precipitación observada en las estaciones cercanas en el periodo faltante [mm].

$$W_i = \frac{1}{D_i^2} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde:

D_i = Distancia de cada estación vecina respecto a la estación con valores faltantes [km].

3.2 Análisis de Curva de Doble Masa

Cuando existe un cambio en las condiciones que permiten la obtención de datos en una estación, la tendencia sufre alteraciones que afectan a la homogeneidad de la serie. Para detectar y corregir estas alteraciones, el método de la Curva de Doble Masa es utilizado.

Este método es utilizado para analizar la consistencia de diferentes datos hidrológicos, comparando los valores de una estación con un patrón de valores de las estaciones utilizadas en la zona de estudio.

Esta curva es utilizada para ajustar datos de precipitación que sean inconsistentes. La gráfica de la lluvia acumulada en las estaciones de la zona estudio, contra la lluvia acumulada de la estación

analizada, deberá ser lineal. Puntos de cambio de pendiente de la recta indican cambio en la relación entre las variables, variaciones que indican un cambio en la recolección de los datos o errores físicos que alteren dicha relación (Jackson Roherig, 2015).

La pendiente de la línea recta representa la constante de proporcionalidad entre las cantidades graficadas. El punto de inflexión indica el periodo de tiempo en el que el cambio ocurre entre las mismas. La diferencia entre las pendientes separadas por el punto de inflexión indica el grado de cambio en la relación (Ven Te Chow, 1994).

Para corregir la información de precipitación, utilizando el método de la Curva de Doble Masa se utiliza la ecuación 3.3:

$$P_a = \frac{b_a}{b_o} P_o \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde:

P_a = Precipitación ajustada [mm].

P_o = Precipitación observada [mm].

b_a = Pendiente de la gráfica a la que los datos son ajustados.

b_o = Pendiente del gráfico al tiempo al que P_o fue observado.

3.3 Índices de precipitación

Los índices de precipitación propuestos por el Equipo de Expertos en Cambio Climático, Detección e Índices (ETCCDI) se desarrollaron con el objetivo de evaluar los diferentes aspectos del cambio climático de una manera global, cambios en intensidad, frecuencia y duración de los eventos de precipitación (Alexander, J. Caesar, B. Gleason, Peterson, & Zhang, 2006).

Dichos índices se utilizarán en la evaluación de las series de las estaciones pluviométricas analizadas y en las series de datos obtenidas con el producto satelital CMORPH dado a que algunos de ellos representan eventos que ocurren continuamente por temporada o anualmente y otros representan valores que se encuentran en los extremos de la distribución de probabilidad.

3.3.1 Precipitación máxima mensual con duración de un día

Este es un índice absoluto, el cual muestra el máximo valor de precipitación en 24 horas en cada mes del año.

$$Rx1 \text{ day }_j = \max(RR_{i j}) \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde:

$Rx1 \text{ day }_j$ = Índice de precipitación máxima mensual con duración de un día.

$RR_{i j}$ = Precipitación diaria en el día i en el periodo j [mm].

3.3.2 Precipitación máxima mensual de 5 días consecutivos

Al igual que el índice anterior, este es un índice absoluto, despliega el valor mensual de la suma de precipitaciones de 5 días consecutivos.

$$Rx5\ day_j = \max(RR_{kj}) \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Donde:

$Rx5\ day_j$ = Índice de precipitación máxima mensual con duración de 5 días.

RR_{kj} = Cantidad de precipitación de 5 días para el final del intervalo k en el periodo j [mm].

3.3.3 Índice Simple de Intensidad de Precipitación (SDII)

Índice que relaciona la cantidad promedio de precipitación (mayor o igual a 1 mm) en los días húmedos en un periodo determinado.

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Donde:

$SDII_j$ = Índice Simple de Intensidad de Precipitación.

RR_{wj} = Precipitación diaria en días húmedos, w ($RR \geq 1$ mm) en el periodo j [mm].

W = Número de días húmedos en el periodo j.

3.3.4 Conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm

Índice límite que muestra el número de días en los cuales el valor de 10 milímetros de precipitación es excedido.

$$R_{10\ mm} = RR_{ij} \geq 10\ mm \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Donde:

$R_{10\ mm}$ = Índice de precipitación diaria mayor a 10 mm.

RR_{ij} = Precipitación diaria en el día i en el periodo j [mm].

3.3.5 Conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm

Al igual que el índice $R_{10\ min}$, este es un índice límite y muestra el número de días en los cuales el valor de 20 milímetros de precipitación es excedido.

$$R_{20\ mm} = RR_{ij} \geq 20\ mm \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Donde:

$R_{20\text{ mm}}$ = Índice de precipitación diaria mayor a 20 mm.

RR_{ij} = Precipitación diaria en el día i en el periodo j [mm].

3.3.6 Longitud máxima del periodo de sequía (CDD)

Este índice muestra el máximo número de días consecutivos con precipitación diaria menor a un milímetro por año.

$$CDD_j = RR_{ij} < 1\text{ mm} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Donde:

CDD_j = Índice de longitud máxima del periodo de sequía en el periodo j.

RR_{ij} = Precipitación diaria en el día i en el periodo j [mm].

3.3.7 Longitud máxima del periodo húmedo (CWD)

Este índice despliega el máximo número de días consecutivos con precipitación diaria mayor o igual a un milímetro por año.

$$CWD_j = RR_{ij} \geq 1\text{ mm} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Donde:

CWD_j = Índice de longitud máxima del periodo húmedo en el periodo j.

RR_{ij} = Precipitación diaria en el día i en el periodo j [mm].

3.3.8 Precipitación anual mayor al 95 percentil

Este índice de precipitación representa la cantidad de lluvia que cae en la zona de estudio que está por encima del 95 percentil.

$$R_{95p_j} = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \quad \text{donde } RR_{wj} > RR_{wn\ 95} \quad \text{Ec. (3.11)}$$

Donde:

R_{95p_j} = Índice de precipitación anual mayor al 95 percentil en el periodo j.

RR_{wj} = Precipitación diaria en un día húmedo w ($RR \geq 1\text{ mm}$) en el periodo j [mm].

$RR_{wn\ 95}$ = Valor de la precipitación en el 95 percentil en los días húmedos [mm].

3.3.9 Precipitación anual mayor al 99 percentil

Este Índice basado en percentiles representa la cantidad de lluvia que cae en la zona de estudio que está por encima del 99 percentil.

$$R_{99p_j} = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \quad \text{donde } RR_{wj} > RR_{wn_{99}} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

Donde:

R_{99p_j} = Índice de precipitación anual mayor al 99 percentil en el periodo j.

RR_{wj} = Precipitación diaria en un día húmedo w ($RR \geq 1$ mm) en el periodo j [mm].

$RR_{wn_{99}}$ = Valor de la precipitación en el 99 percentil en los días húmedos [mm].

3.3.10 Precipitación total anual en días húmedos (PRCPTOT)

Este índice representa la cantidad total de precipitación en un año.

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad \text{Ec. (3.13)}$$

Donde:

$PRCPTOT_j$ = Índice de precipitación total anual en el periodo j.

RR_{ij} = Precipitación diaria en el día i en el periodo j [mm].

I = Número de días en j.

3.4 Generación de Curvas IDF

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia hacen referencia a una gráfica en la cual se concentran las características de las tormentas en una zona de estudio con respecto a sus variables: magnitud, duración y frecuencia (Campos Aranda, 1992). Dichas curvas, resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media para intervalos de diferente duración, y todos ellos correspondientes a una misma frecuencia (J. Témez, 1978).

La frecuencia en la que ocurren las precipitaciones intensas se caracteriza mediante periodos de retorno, el periodo de retorno se define como el número de años en que, en promedio y a la larga, se presenta un evento determinado (Aparicio, 2001). Este es inversamente proporcional a la probabilidad de ocurrencia de dicho evento.

La intensidad es la tasa temporal de la precipitación, es decir, la altura de lámina de precipitación por unidad de tiempo (Ven Te Chow, 1994), y se expresa en mm/h ó in/h.

$$i = \frac{P}{D} \quad \text{Ec. (3.14)}$$

Donde:

i = Intensidad del evento [mm/h ó in/h].

P = Altura de agua de precipitación [mm ó in].

D = Duración de la lluvia [h].

3.4.1 Formula de Bell

La determinación de las curvas IDF requiere datos de medición de precipitación continuos o de intervalos cortos de tiempo, los cuales son escasos; en cambio, se cuenta con un mayor número de registros pluviométricos, es decir, la lámina de lluvia diaria en un punto determinado.

F. C. Bell analizó una relación empírica con gran número de estudios, una lluvia de *t* minutos de duración posee un coeficiente consistente con la lluvia de una hora e igual periodo de retorno. Su estudio indica que estos cocientes son independientes del periodo de retorno en análisis y que tienen un error promedio que varía del 5 al 8%. Adicionalmente, Bell encontró cocientes estables entre la lluvia de una hora de duración y periodo de retorno de 10 años y la lluvia de igual duración pero distinto periodo de retorno (Campos Aranda, 1992).

Finalmente Bell combinó las relaciones encontradas y presentó la ecuación en función de una lluvia de duración de una hora y periodo de retorno de dos años (P_2^{60})

$$P_T^t = (0.35 \ln T + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_2^{60} \quad \text{Ec. (3.15)}$$

Donde:

P_T^t = Precipitación de duración *t* minutos y periodo de retorno *T* en años [mm].

T = Periodo de retorno [años].

t = Duración de la lluvia [min].

La Organización Meteorológica Mundial señala que el cociente que relaciona la lluvia con duración de una hora y periodo de retorno de dos años y la de 24 horas con igual frecuencia varía respecto al número medio de días con lluvia mayor a 1 milímetro por año [Tabla 3.1].

Número medio de días con lluvia mayor a 1 mm por año	1	8	16	24
$(P\ 1\ hora / P\ 24\ horas)_{2\ años}$	0.20	0.30	0.40	0.50

Tabla 3.1: Relación de la lluvia con duración de una hora y periodo de retorno de 2 años con la de 24 horas y mismo periodo de retorno.

3.4.2 Teoría general de escalamiento simple y multiescalamiento

El término de invariancia de escala o de multiescala es utilizado cuando es posible establecer relaciones de variabilidad espacio-temporal de cierto fenómeno que no se modifiquen ante los cambios de escala. En el caso de la precipitación, el parámetro de escala es la duración de la misma. (E. Pulgarín Dávila, 2009)

3.4.3 Escalamiento Simple

Un fenómeno presenta características de escalamiento simple para la variable aleatoria I , cuando para el factor de escala λ ($\lambda > 0$), existe una función, $C(\lambda)$, de tal forma que conserve la relación (V.K. Gupta & E. Waymire, 1990):

$$I(\lambda d) = C(\lambda)I(d) \quad \text{Ec. (3.16)}$$

Esta relación fue definida como “escalamiento simple en sentido estricto” (V.K. Gupta & E. Waymire, 1990), en la cual se denota la igualdad en la función de distribución de probabilidad. Esta distribución es invariante con respecto a la escala. La variable I en este caso representa la intensidad de la precipitación, y d es la duración de la lluvia.

La función $C(\lambda)$ se puede escribir como (V.K. Gupta & E. Waymire, 1990):

$$C(\lambda) = \lambda^\theta \quad \text{Ec. (3.17)}$$

Donde:

θ = Cualquier número real, llamado exponente característico o de escalamiento.

La ecuación 3.17 implica que los cuantiles son, del mismo modo, invariantes con la escala temporal.

$$I_q(\lambda d) = \lambda^\theta I_q(d) \quad \text{Ec. (3.18)}$$

Donde:

I_q = q-ésimo cuantil de la variable I .

Se espera una relación lineal en el espacio logarítmico entre el parámetro de escalamiento y el valor de la variable I que corresponde a dicho cuantil. Siempre y cuando los momentos de la variable I existan, serán invariantes con la escala, y su relación es:

$$M_r(\lambda d) = \lambda^{\xi_r} M_r(d) \quad \text{Ec. (3.19)}$$

Donde:

M_r = Momento estadístico de orden r de la variable I .

$$\xi_r = r(1 - \theta_1) \quad \text{Ec. (3.20)}$$

Donde:

ξ_r = Parámetro de escalamiento.

r = Valor del momento de orden r .

θ_1 = Exponente característico o de escalamiento del primer momento.

La ecuación 3.20 establece una relación lineal entre el parámetro de escalamiento y cada uno de los diferentes momentos de orden r en el espacio logarítmico.

3.4.4 Ecuación de Poveda (2002)

Poveda (2002) propone una ecuación basada en la teoría del escalamiento simple. Si se conoce la función de distribución de los valores extremos de los registros, el valor del exponente de escalamiento (θ) y el coeficiente de variación (CV), es posible calcular las intensidades máximas a partir de un valor de referencia conocido (I_{ref}).

$$I_{d,q} = E[I_{dref}] \frac{\exp\left[\frac{\Phi_q \sqrt{\ln(1 + CV^2)}}{\sqrt{1 + CV^2}}\right] \left(\frac{d}{d_{ref}}\right)^\theta}{\sqrt{1 + CV^2}} \quad \text{Ec. (3.21)}$$

Donde:

$I_{d,q}$ = Intensidad para la duración d (horas) y el periodo de retorno q (años) [mm/h].

$E[I_{dref}]$ = Intensidad de precipitación de una duración de referencia (24 horas) [mm/h].

Φ_q = Inversa de la distribución normal acumulada estándar para una probabilidad de no excedencia q .

CV = Coeficiente de variación (aproximado a 0.25).

d_{ref} = Duración de referencia (24 horas) [minutos].

θ = Valor del exponente de escalamiento.

Para el caso de escalamiento simple, el coeficiente de variación (CV) es una constante dada por:

$$CV = \frac{\sqrt{\text{Var}[I_d]}}{E^2[I_d]} = \frac{\sqrt{\text{Var}[I_{dref}]}}{E^2[I_{dref}]} \quad \text{Ec. (3.22)}$$

Donde:

I_d = Intensidad máxima para una duración d [mm/h].

I_{dref} = Intensidad máxima para una duración de referencia [mm/h].

3.5 Bootstrapping

El *bootstrapping* es un método de remuestreo de datos, conceptualizado y descrito sistemáticamente por Bradley Efron en 1979. Es utilizado para aproximar el sesgo o la varianza de un análisis estadístico, así como para construir intervalos de confianza o realizar contrastes de hipótesis sobre parámetros de interés (R. Ledesma, 2008).

Este método requiere de un ordenador capaz de simular un proceso de muestreo aleatorio de los datos, para generar un gran número de muestras con reposición de los datos observados. La definición de remuestreo se debe a que este método se basa en la extracción de muestras repetidas de los propios datos. El *bootstrapping* es una estrategia general para la resolución de problemas de estadística aplicada (J. Simon, 1997).

Suponiendo que se tiene una muestra $S = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ extraída de una población $P = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ donde N es mucho mayor que n y que S es una muestra independiente y aleatoria de P (**P puede ser una población infinita, especificada, por ejemplo, por una función de distribución de probabilidad**) (John Fox, 2002).

A continuación se supone el interés en un estadístico $T=t(S)$ como un estimado del parámetro de la población correspondiente $\vartheta=t(P)$, donde ϑ puede ser un vector de parámetros y T el vector correspondiente de valores estimados. Un enfoque tradicional de la inferencia estadística es realizar suposiciones de la estructura de la población (por ejemplo, asumir normalidad) y con la estipulación de un muestreo aleatorio, derivar la distribución muestral de T lo cual tiene dos deficiencias potencialmente importantes:

1. Un error en los supuestos respecto a la población generara valores incorrectos en la distribución muestral del estadístico.
2. El enfoque requiere alta destreza matemática que permita el cálculo de la distribución muestral de la estadística, ya que en algunos casos, una derivación de este tipo puede ser prohibitivamente difícil.

El *bootstrap* no paramétrico nos permite estimar la distribución muestral de un estadístico empíricamente y sin realizar suposiciones a cerca de las características poblacionales y sin derivar la distribución muestral explícitamente.

Para entender el proceso, se procede a dibujar una muestra de tamaño n a partir de los elementos de S . La muestra *bootstrap* será: $S_1^* = \{X_{11}^*, X_{12}^*, \dots, X_{1n}^*\}$, siendo necesario que el

muestreo se realice con reemplazo. Cada elemento X_i de S , es seleccionado para la muestra *bootstrap* con una probabilidad de $1/n$, como se realizaría con la muestra S de la población P . Este procedimiento se repite un gran número de veces. La muestra b_{th} se denotará como $S_b^* = \{X_{b1}^*, X_{b2}^*, \dots, X_{bn}^*\}$, denotando que la población es a la muestra como la muestra es a las muestras *bootstrap*.

A continuación se calcula el estadístico T para cada una de las muestras *bootstrap*, siendo $T_b^* = t(S_b^*)$. De esta manera, la distribución de T_b^* alrededor del estimado original T es análoga a la distribución muestral del estimador T alrededor del parámetro de población ϑ .

El promedio de los estadísticos con *bootstrapping* es:

$$\bar{T}^* = \hat{E}^*(T^*) = \frac{\sum_{b=1}^R T_b^*}{R} \quad \text{Ec. (3.23)}$$

Con la Ec. 3.23 se estiman los valores esperados de los estadísticos *bootstrapped*. El estimado del sesgo de T es:

$$\bar{B}^* = \bar{T}^* - T = T - \theta \quad \text{Ec. (3.24)}$$

De la misma manera se tiene la varianza de T^* :

$$\hat{V}^*(T^*) = \frac{\sum_{b=1}^R (T_b^* - \bar{T}^*)^2}{R - 1} \quad \text{Ec. (3.25)}$$

3.5.1 Intervalos de confianza Bootstrap

En este método además se toman los valores percentiles deseados de la distribución, que son utilizados como una aproximación a los límites superior e inferior del intervalo de confianza, en este caso se tomarán los percentiles 2.5 y 97.5 para representar un intervalo de confianza del 95%. A este proceso se le denomina método percentilar, ya que se basa en tomar los valores ubicados en determinadas posiciones de la distribución.

$$T^*_{(menor)} < \theta < T^*_{(mayor)} \quad \text{Ec. (3.26)}$$

Donde T^* corresponde a los valores de los cuantiles utilizados para generar el intervalo de confianza.

La teoría del intervalo normal (John Fox, 2002) asume que el estadístico T es normalmente distribuido (lo cual es común para muestras suficientemente largas). Utiliza la varianza y el sesgo obtenidas con el método *bootstrap* para construir un intervalo de confianza para $100(1-\alpha)$ -porcentaje de la forma:

$$\theta = (T - \hat{B}^*) \pm Z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}^*(T^*) \quad \text{Ec. (3.27)}$$

Donde:

$$\widehat{SE}^*(T^*) = \sqrt{\widehat{V}^*(T^*)} \quad \text{Ec. (3.28)}$$

La Ec. 3.28 muestra el estimado *bootstrap* del error estándar de T , y $Z_{1-\alpha/2}$ es el $1-\alpha/2$ cuantil de la distribución estándar normal (por ejemplo, $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ para el 95% de intervalo de confianza, donde $\alpha=0.05$).

3.6 Corrección estadística del sesgo

La llegada de las Máquinas kernel como “Support Vector Machines” (SVM) y el Proceso de Regresión Gaussiano ha desarrollado la posibilidad de generar modelos flexibles los cuales son practicos de utilizar. Las SVM son un conjunto de algoritmos de aprendizaje supervisado desarrollados por Vladimir Vapnik; estos métodos se relacionan con problemas de clasificación y regresión (Schölkopf & J. Smola, 2002).

3.6.1 Proceso de Regresión Gaussiana

Un Proceso de Regresión Gaussiana es una colección de variables aleatorias de números finitos cualesquiera con distribución Gaussiana (C. Edward Rasmussen, 2002).

En este método se asume normalidad en las variables, y la relación entre ellas se realiza mediante medias de la matriz de covarianza. La matriz kernel es utilizada como la matriz de covarianza, lo cual es una manera eficiente de extender el modelo Bayesiano de estimadores lineales a situaciones no lineales.

La ventaja de la formulación de procesos Gaussianos es que la combinación de los modelos puede llevarse a cabo de una manera exacta utilizando operaciones matriciales.

Como lo explica Williams en el trabajo *Gaussian Processes of Regretion*, un proceso estocástico es una colección de variables aleatorias $\{Y(x) | x \in X\}$ indexadas para un conjunto X . en este caso, X será el espacio de entrada con la dimensión d , el número de entradas. El proceso estocástico se especifica dando la distribución de probabilidad para cada subconjunto finito de variables $Y(x^{(1)}), \dots, Y(x^{(k)})$ de forma consistente.

Un proceso Gaussiano, es un proceso estocástico que puede ser completamente especificado por su función media $\mu(x)=E[Y(x)]$ y su función de covarianza $C(x,x')=E[(Y(x)-\mu(x))(Y(x')-\mu(x'))]$; cualquier conjunto finito de puntos tendrá una distribución Gaussiana multivariada de puntos.

Los datos constan de de n pares de entradas y objetivos $\{(x^{(i)}, t^{(i)}), i=1 \dots n\}$. El vector de entrada para el caso de prueba se denota con x (sin superíndice). Las entradas son d -dimensionales x_1, \dots, x_d y los objetivos son escalares.

La distribución predictiva para el caso x se obtiene de la distribución Gaussiana conjunta $n+1$ para las salidas de los casos n y para el caso prueba, por medio del condicionamiento de los objetivos observados en el conjunto. Este procedimiento se muestra en la Ilustración 3.1 para el caso donde hay un punto de análisis y uno de prueba. En dicha ilustración existe un caso de análisis $(x^{(1)}, t^{(1)})$ y un caso prueba para el cual se desea predecir y . La elipse en la izquierda es el contorno

de la desviación estándar de la distribución conjunta de y_1 y y . la línea punteada representa la observación $y_1=t^{(1)}$. A la derecha, se observa la distribución obtenida para el caso de prueba, obtenida condicionando el objetivo observado. Los ejes verticales poseen la misma escala en ambos gráficos.

En general la distribución predictiva es Gaussiana con media y varianza:

$$\hat{y}(x) = k^t(x)K^{-1}t \quad \text{Ec. (3.29)}$$

$$\sigma_y^2(x) = C(x, x) - k^t(x)K^{-1}k(x) \quad \text{Ec. (3.30)}$$

Donde

$$k(x) = C(x, x^{(1)}, \dots, C(x, x^{(n)}))^T$$

K = Matriz de covarianza para los casos prueba $K_{ij} = C(x^{(i)}, x^{(j)})$, y $t = (t^{(1)}, \dots, t^{(n)})^T$

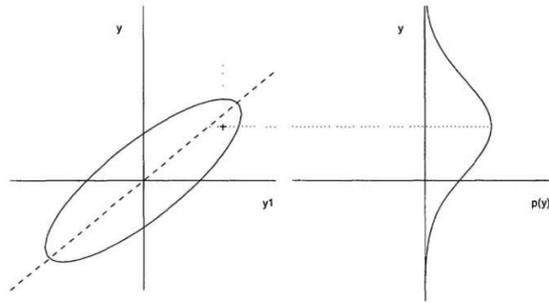


Ilustración 3.1: Ilustración de la predicción utilizando el Proceso Gaussiano de Regresión. (C. Edward Rasmussen, 2002)

Una función kernel k calcula el producto interno de dos vectores x, x' en una asignación determinada $\phi : X \rightarrow H$. La elección de un kernel es central en cualquier algoritmo basado en kernels y consecuentemente también en un paquete de software relacionado con estos métodos.

$$k(x, x') = \langle x, x' \rangle \quad \text{Ec. (3.31)}$$

El kernel utilizado para esta aproximación [Ec. 3.31] es lineal, el cual es utilizado cuando se manejan vectores grandes y con datos dispersos como es el caso de datos de precipitación (Karatzoglou & Smola, 2005).

Capítulo 4: Metodología propuesta para la generación de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir de productos satelitales corregidos

4.1 Localización

Las estaciones utilizadas en esta tesis se localizan en la ciudad de Bogotá, capital de la República de Colombia y del departamento de Cundinamarca, el cual es una de las 32 entidades territoriales del país. El departamento fue creado el 5 de agosto de 1886, mientras que la ciudad de Bogotá fue fundada el 6 de agosto de 1538. El territorio corresponde a la Cordillera Oriental de Colombia; en su parte media se encuentra la altiplanicie de la Sabana de Bogotá. Los sectores planos del departamento corresponden al valle del río Magdalena (hacia el Oeste) y la parte de los Llanos Orientales (al este).

4.1.1 Macro localización

La República de Colombia se ubica en la región noroccidental de América del Sur. Su superficie es de 2'129,748 kilómetros cuadrados de los cuales 1'141,748 km² corresponden a su territorio continental y 988,000 km² a su extensión marítima.

Limita al este con Venezuela y Brasil, al sur con Perú y Ecuador y al noroeste con Panamá. Colombia es la única nación de América del Sur que tiene costas en el océano Pacífico y acceso al océano Atlántico a través del mar Caribe. El país es la cuarta nación en extensión territorial en América del Sur y posee alrededor de 47 millones de habitantes siendo la tercera en América Latina [Ilustración 4.1].



Ilustración 4.1: Macro localización de Colombia y ubicación de Cundinamarca (Sistema Coordenado: WGS 84)

Colombia es atravesada por la cordillera de los Andes y la Llanura Amazónica. Su ubicación latitudinal corresponde a 12°26'46" al norte en el sitio denominado Punta Gallinas y 4°12'30" de

latitud sur en la Quebrada de San Antonio; el extremo Oriental está ubicado a 60°50'54" de longitud oeste sobre la isla de San José en el río Negro y por el occidente llega hasta los 79°02'33" de longitud oeste que corresponde al Cabo Manglares.

4.1.2 Micro localización

Cundinamarca está circundado por los departamentos de Boyacá, Tolima, Huila, Caldas y Meta. Su superficie es de 22,478 km² sin incluir el área del Distrito Capital de la ciudad de Bogotá, la cual es de 1,732 km².

Se localiza entre los 3°40'14" y 5°50'11" de latitud norte y los 73°03'08" y 74°53'35" de longitud oeste. El departamento de Cundinamarca está dividido en 116 municipios y 14 corregimientos [Ilustración 4.2].

Bogotá, oficialmente denominado Bogotá, Distrito Capital (Bogotá D. C.) es la capital de la República de Colombia y del departamento de Cundinamarca. Cuenta con una población de 7'878,783 habitantes. Está ubicada en la región natural conocida como la Sabana de Bogotá que hace parte del altiplano cundiboyacense, formación ubicada en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos a una altura promedio de 2,625 metros sobre el nivel del mar.

La ciudad de Bogotá se localiza a 4°35'56" de latitud norte y a 74°04'51" de longitud oeste. Está dentro de la zona de confluencia intertropical, lo que produce dos épocas de lluvia al año, la primera en los meses de marzo, abril y mayo y la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre (Alcaldía de Bogotá, 2015).

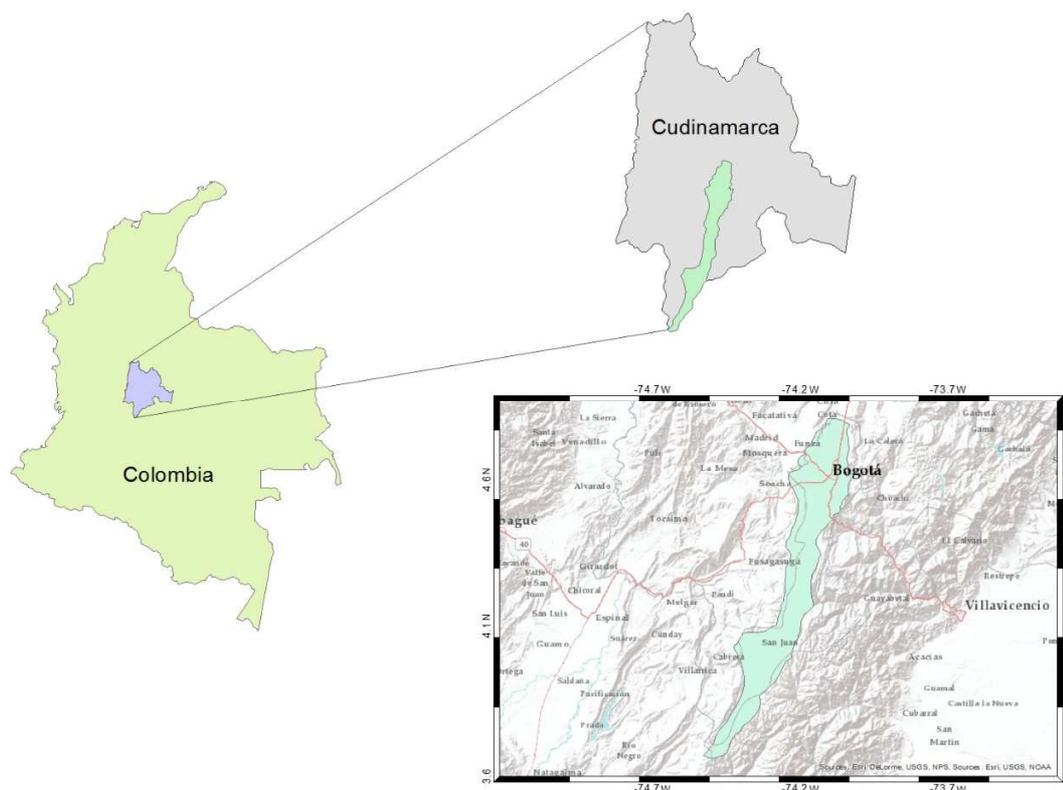


Ilustración 4.2: Micro localización de la zona de estudio (Sistema Coordinado: WGS 84)

Las estaciones pluviométricas automáticas utilizadas, con resolución temporal de 5 minutos son Moralba, Juan Rey y San Benito [Ilustración 4.3]. Todas están ubicadas en la zona urbana de la ciudad de Bogotá. Se obtuvieron de la tesis llamada “Calibración de los modelos hidrológico e hidráulico para el sistema de alerta temprana para inundación por desbordamiento para la quebrada Chiguaza”, en la cual se comprueba la homogeneidad de los datos por el método de doble masa.

A continuación se denota el periodo de registro de lluvia de las estaciones: (L. Montaña, 2015)

- Estación Moralba, del 2010 al 2013
- Estación Juan Rey, del 2008 al 2013
- Estación San Benito, del 2008 al 2013

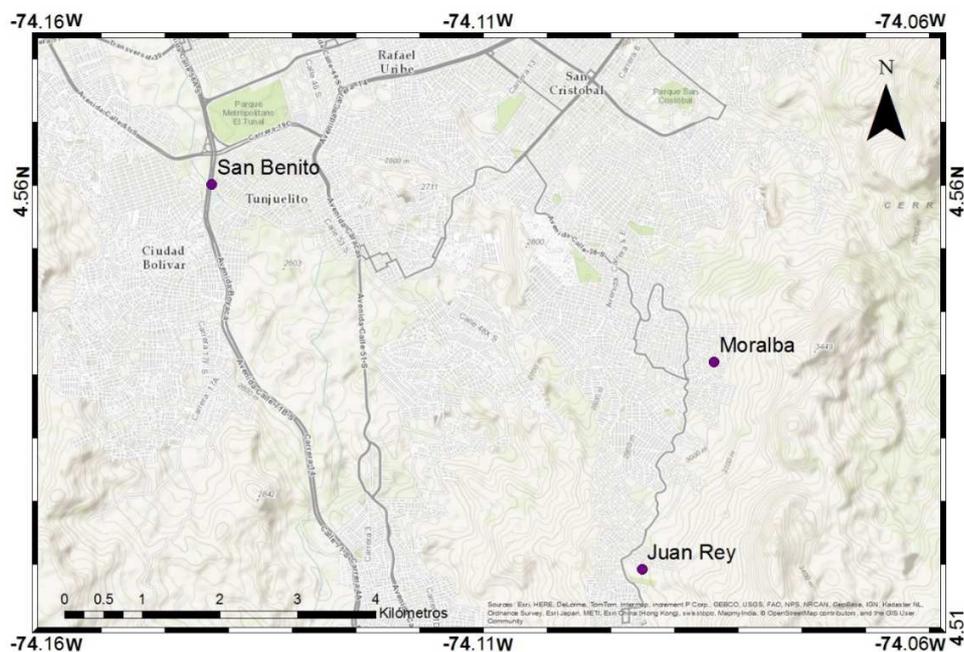


Ilustración 4.3: Localización de las estaciones en estudio (Sistema Coordinado: WGS 84)

Las coordenadas de las estaciones en estudio son:

Nombre de la estación	Coordenadas geográficas
Moralba	Latitud: 4°32'34.53"N, Longitud: 74° 4'49.19"O
Juan Rey	Latitud: 4°31'7.40"N, Longitud: 74° 5'19.20"O
San benito	Latitud: 4° 33'49.11"N, Longitud: 74° 8'18.43"O

Tabla 4.1: Coordenadas geográficas de las estaciones en estudio con resolución espacial de 5 minutos.

Las estaciones con resolución temporal de un día son La Conejera, Cerro Suba, Aeropuerto, Salitre y Fontibón teniendo un registro temporal más amplio [Ilustración 4.4]. Posteriormente serán utilizadas para la comparativa de los índices de precipitación.

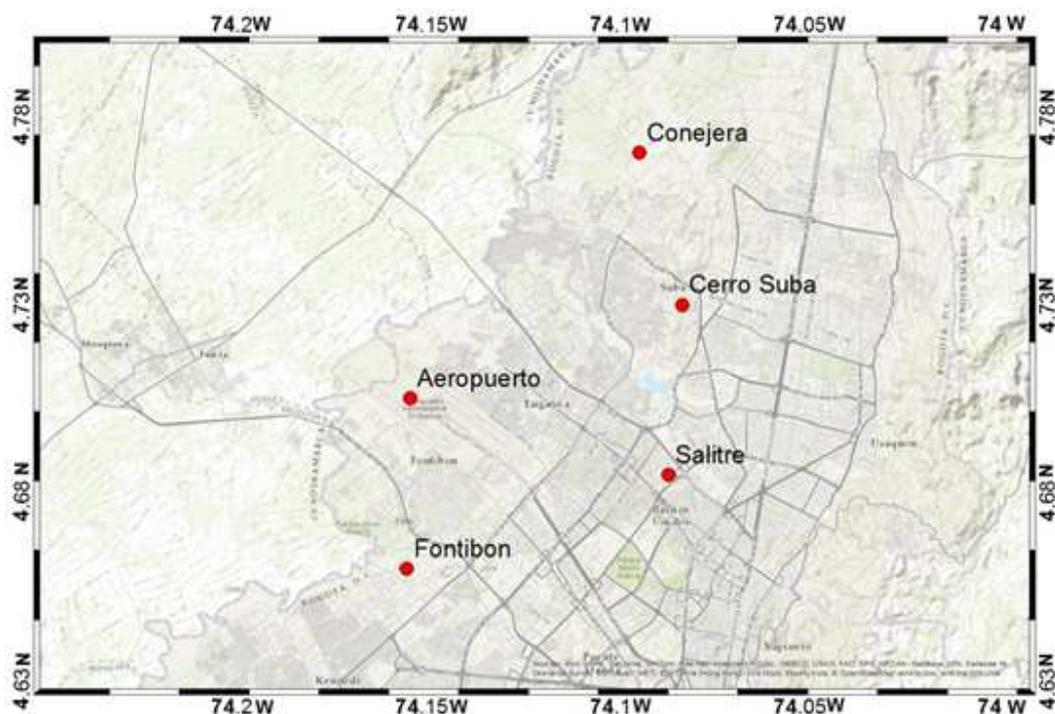


Ilustración 4.4: Localización de las estaciones en estudio (Sistema Coordinado: WGS 84)

Las coordenadas de las estaciones en estudio son:

Nombre de la estación	Coordenadas geográficas
La Conejera	Latitud: 4°46'8.66"N, Longitud: 74° 5'27.07"O
Cerro Suba	Latitud: 4°43'43.01"N, Longitud: 74° 4'46.75"O
Aeropuerto	Latitud: 4°42'13.72"N, Longitud: 74° 9'5.41"O
Salitre	Latitud: 4°41'0.01"N, Longitud: 74° 4'59.99"O
Fontibón	Latitud: 4°39'30.18"N, Longitud: 74° 9'8.31"O

Tabla 4.2: Coordenadas geográficas de las estaciones en estudio con resolución espacial de un día.

4.2 Análisis de datos de estaciones

El manejo de datos de las estaciones se realizó con el software R, el cual es un software libre para el análisis estadístico de datos en el cual es posible programar con scripts (secuencia de comandos en un archivo de texto). Varios scripts fueron realizados con el fin de analizar los datos obtenidos de las estaciones (scripts que se encuentran en el anexo electrónico de esta tesis):

- Prec_max.R
- Series_Diarias_estaciones.R
- Dist_prob.R
- IDF_estaciones.R
- Indices_Estaciones.R
- Ecuaciones_intensidad.R

Se obtienen las precipitaciones máximas anuales para diferentes duraciones que van de los 5 minutos a los 5 días:

- 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 60 minutos (1 hora).
- 2, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 24 horas (1 día).
- 0.25, 0.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75, 3.00, 3.25, 3.50, 3.75, 4.00, 4.25, 4.50, 4.75 y 5.00 días (e. g. 1.25 días = 1 día + 6 horas; 1.50 días = 1 día + 12 horas; 1.75 días = 1 día + 18 horas).

A continuación se genera una tabla de la máxima profundidad de precipitación dada en milímetros para cada duración en minutos por año de registro.

año	dur_5	dur_10	dur_15	dur_20	dur_25	dur_30	dur_60	dur_120
8	9.7	9.7	11.6	11.6	13.5	13.5	15.8	16.2
9	4.6	7.5	9.3	11.1	12.7	13.6	15.9	20.3
10	11	14.4	17.7	20.1	20.7	20.9	21.2	27.9
11	8.8	8.8	15.9	15.9	20	20	25.1	29.3
12	4.3	8.1	11.3	13.5	15.3	16.2	20.1	21.3
13	5.2	9.4	12.7	15.4	16.8	18.6	28.7	33.7
año	dur_180	dur_360	dur_540	dur_720	dur_900	dur_108	dur_126	dur_144
8	21.8	26.7	26.7	31	37.7	37.8	45	50.3
9	22	26.8	27.6	27.6	27.6	28.2	32.5	33.1
10	28	28.8	29.2	34.3	34.5	37.4	50.8	56.9
11	30.6	34.9	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	45.1
12	24	26.4	28.2	34.2	37.3	37.8	37.8	37.8
13	36.5	38.6	40.9	49.3	52.1	53.2	53.9	58.3
año	dur_180	dur_216	dur_252	dur_288	dur_324	dur_360	dur_396	dur_432
8	56.5	59.4	60	70.3	75.3	81.9	84.8	86.1
9	33.2	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4
10	64	64.1	64.1	64.2	65.2	65.3	66.2	68.1
11	54.5	54.9	54.9	54.9	55	55	55	55.2
12	44.1	52.4	59.9	66.7	67.2	67.7	68.2	68.2
13	62.4	65.5	65.5	66.9	70	70	70	76.8
año	dur_468	dur_504	dur_540	dur_576	dur_612	dur_648	dur_684	dur_720
8	86.1	89.2	91	91.1	98.5	101.7	104.7	104.7
9	33.4	33.4	33.4	33.8	33.8	33.8	34.5	34.6
10	69.7	69.8	70.3	70.3	71.1	71.2	71.5	73.9
11	55.2	55.2	55.2	55.2	63.8	63.9	63.9	67.2
12	73.7	73.9	74	74.7	77.3	77.3	78	79.9
13	76.8	76.8	76.8	76.8	76.9	76.9	76.9	77.3

Tabla 4.3: Máxima profundidad de precipitación, para cada año y para cada duración considerada, para la estación San Benito.

El script Series_Diarias_estaciones.R genera la serie diaria de profundidad de precipitación a partir de los valores de las estaciones tomados cada 5 minutos. Este exporta la tabla para su uso posterior.

Las series temporales de valores máximos de precipitación para cada duración son ajustadas considerando las funciones de distribución de probabilidad (fdp) Normal, Lognormal, Gumbel y Weibull, y utilizando la prueba de Smirnov-Kolmogorov como prueba de bondad de ajuste. Para más detalle ver el artículo “Uso de distribuciones de probabilidad en análisis de lluvia” (M. Anand & J. Bhagwan, 2010).

Se generan los gráficos [Ilustración 4.5] comparando los valores reales de la estación y el ajuste, obteniendo el valor de bondad del mismo. La función de probabilidad que en promedio ajuste mejor para todas las duraciones consideradas en la estación, es la que se elige para obtener los valores para los periodos de retorno en análisis (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).

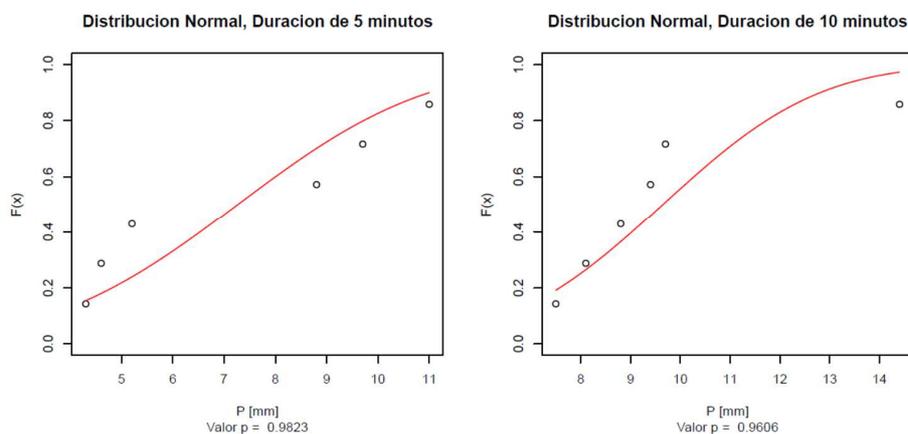


Ilustración 4.5: Gráficas del ajuste de distribución de probabilidad Normal para duraciones de 5 y 10 minutos en la estación San Benito.

A continuación, se genera un archivo PDF con las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para los periodos de retorno analizados [Ilustración 4.6].

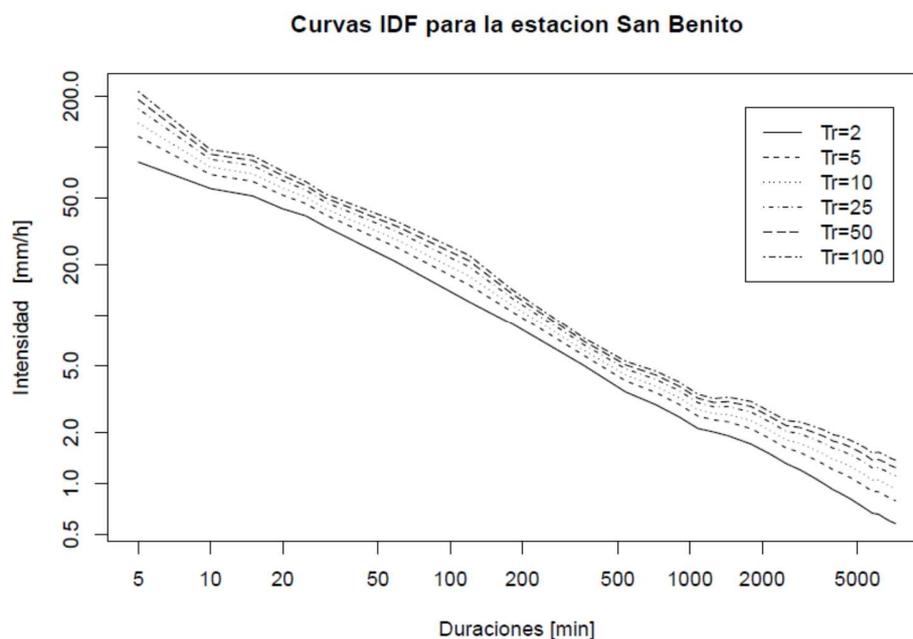


Ilustración 4.6: Gráfica de las curvas IDF de la estación San Benito para distintos periodos de retorno.

Una vez obtenidas las curvas IDF para las estaciones se ajustan las ecuaciones de Poveda y las ecuaciones paramétricas, que tienen las siguientes formas (D. Froehlich, 1995):

$$I = \frac{A}{d^\theta} \quad \text{Ec. (4.1a)}$$

$$I = \frac{A}{(d + B)^\theta} \quad \text{Ec. (4.1b)}$$

$$I = \frac{A}{(d^\theta + B)} \quad \text{Ec. (4.1c)}$$

Donde:

I = Intensidad de la precipitación [mm/h].

A, B = Parámetros adimensionales y no lineales de la ecuación.

θ = Exponente de escalamiento.

El ajuste de las ecuaciones respecto a los valores de intensidad se realizó por mínimos cuadrados no lineales para ambas ecuaciones.

En seguida de la construcción de las curvas IDF para cada estación, se realizaron promedios diferentes de las estaciones en estudio para establecer, posteriormente, mediante una comparativa con el producto satelital la manera más adecuada de determinar la precipitación en la zona de estudio.

El primero fue realizado promediando la precipitación máxima anual obtenida para cada estación; la siguiente aproximación se tomó el valor máximo mensual para cada año del registro; y la tercera se realizó promediando los valores diarios de las estaciones. Esto con la finalidad de observar que aproximación se acerca más a los valores obtenidos al producto satelital.

4.3 Análisis de datos de CMORPH

El producto de precipitación CMORPH utilizado cuenta con mapas del tipo ráster, que muestran valores de intensidad en mm/h para periodos de tiempo de 3 horas, por lo que en un año de registro se cuenta con 2,920 mapas. Tomando en cuenta que la información está entre el 2003 y el 2014, el número de mapas analizados es de 35,040.

El programa R fue utilizado para la obtención de la serie de datos puntual de profundidad de precipitación con resolución temporal de 3 horas correspondiente a cada estación analizada. Aplicando el mejor ajuste obtenido a partir de diferentes distribuciones de probabilidad (Normal, Lognormal, Gumbel y Weibull) a esta información se construyeron las curvas IDF para los periodos de retorno establecidos.

4.4 Corrección estadístico del sesgo

Para la corrección del sesgo del producto satelital CMORPH se utilizó un Proceso de Regresión Gaussiana con una función kernel lineal para calibrar el modelo de ajuste. Se graficó la precipitación diaria promedio de las estaciones contra el producto con la finalidad de observar la correlación entre el producto y los datos observados [Ilustración 4.7].

Comparativa de precipitación entre el promedio de estaciones y CMORPH

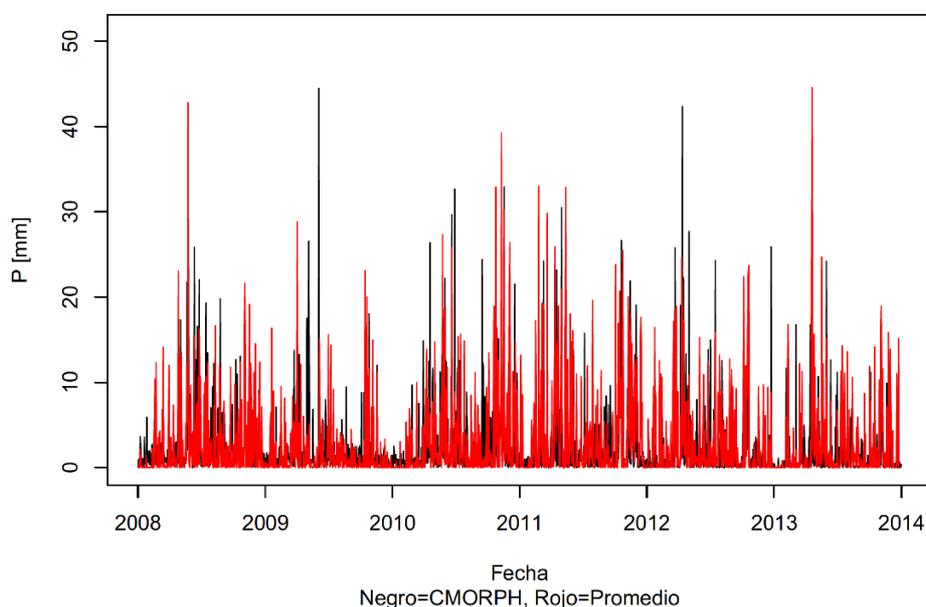


Ilustración 4.7: Comparativa de precipitación diaria entre el promedio de datos observados (Rojo) y CMORPH (Negro).

Se realizó la comparativa de la función de probabilidad acumulada para las estaciones así como para los promedios obtenidos de las estaciones contra CMORPH para observar el desvío entre los datos satelitales y los observados.

A continuación se construyó la función de distribución acumulada (fda) del promedio de las estaciones, y se comparó con la fda de CMORPH para ver el desvío que presenta la misma respecto a los datos observados [Ilustración 4.8].

Posteriormente, mediante un proceso de Regresión Gaussiana utilizando un kernel lineal se corrige el sesgo del producto satelital para todos los datos en conjunto y para los datos manejados de manera mensual. Se observó que en los días de no precipitación, el producto satelital mostraba un valor constante menor a un milímetro, dicho valor fue sustraído de los valores corregidos diarios para ajustarlos.

El modelo fue aplicado a los valores diarios del producto para generar la serie corregida del producto satelital CMORPH y de esta manera, generar las curvas IDF del mismo. Estas curvas se compararon con los promedios generados para los datos observados.

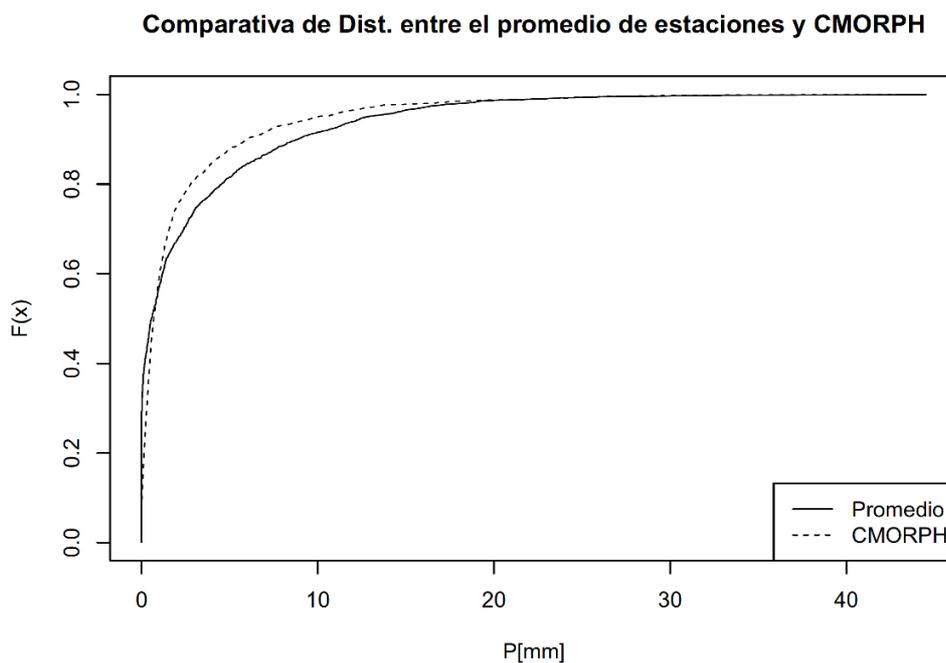


Ilustración 4.8: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH sin corregir.

4.5 Construcción y comparativa de curvas IDF generadas con la fórmula de Bell

Se utilizaron los datos de precipitación diaria del producto satelital CMORPH para generar las curvas IDF mediante el uso de la fórmula de Bell. De esta manera se pretende comparar el desempeño de la fórmula en duraciones menores a un día ya que es un método empírico utilizado para la determinación de intensidades de corta duración cuando la única información que existe es la de profundidad de precipitación diaria.

Capítulo 5: Resultados sobre la comparativa de índices climáticos y curvas Intensidad – Duración – Frecuencia entre datos observados y el producto satelital CMORPH

5.1 Consistencia en las estaciones pluviométricas

Se evalúa la consistencia de los datos observados para las estaciones de resolución temporal de 5 minutos y de un día que serán utilizadas.

5.1.1 Estaciones con resolución espacial de 5 minutos

En el caso de estas estaciones; Moralba, Juan Rey y San Benito la consistencia de los datos ya ha sido probada mediante el método de la Doble Curva Masa en la tesis “Calibración de los modelos hidrológico e hidráulico para el sistema de alerta temprana para inundación por desbordamiento para la quebrada Chiguaza” (L. Montaña, 2015). Además que, por ser series temporales tan cortas no se puede definir alguna tendencia de los datos.

5.1.2 Estaciones con resolución espacial de un día

Para la determinación de la consistencia de las estaciones con resolución temporal de un día, se tomó el periodo 2003-2012 para realizar el análisis de Doble Curva Masa.

En la Ilustración 5.1, en las figuras A, B, C, D y E, se muestran las gráficas de dicho análisis para cada una de las estaciones; El Salitre, Fontibon, Conejera, Cerro Suba y Aeropuerto respectivamente.

Los valores de lámina de precipitación acumulada en cada una de las estaciones, presentan linealidad respecto a los valores de precipitación promedio acumulada de las estaciones analizadas, por lo que no existe un cambio en la constante de proporcionalidad entre las cantidades graficadas. No se presentan cambios en la recolección de los datos o errores físicos que alteren los valores observados en las estaciones.

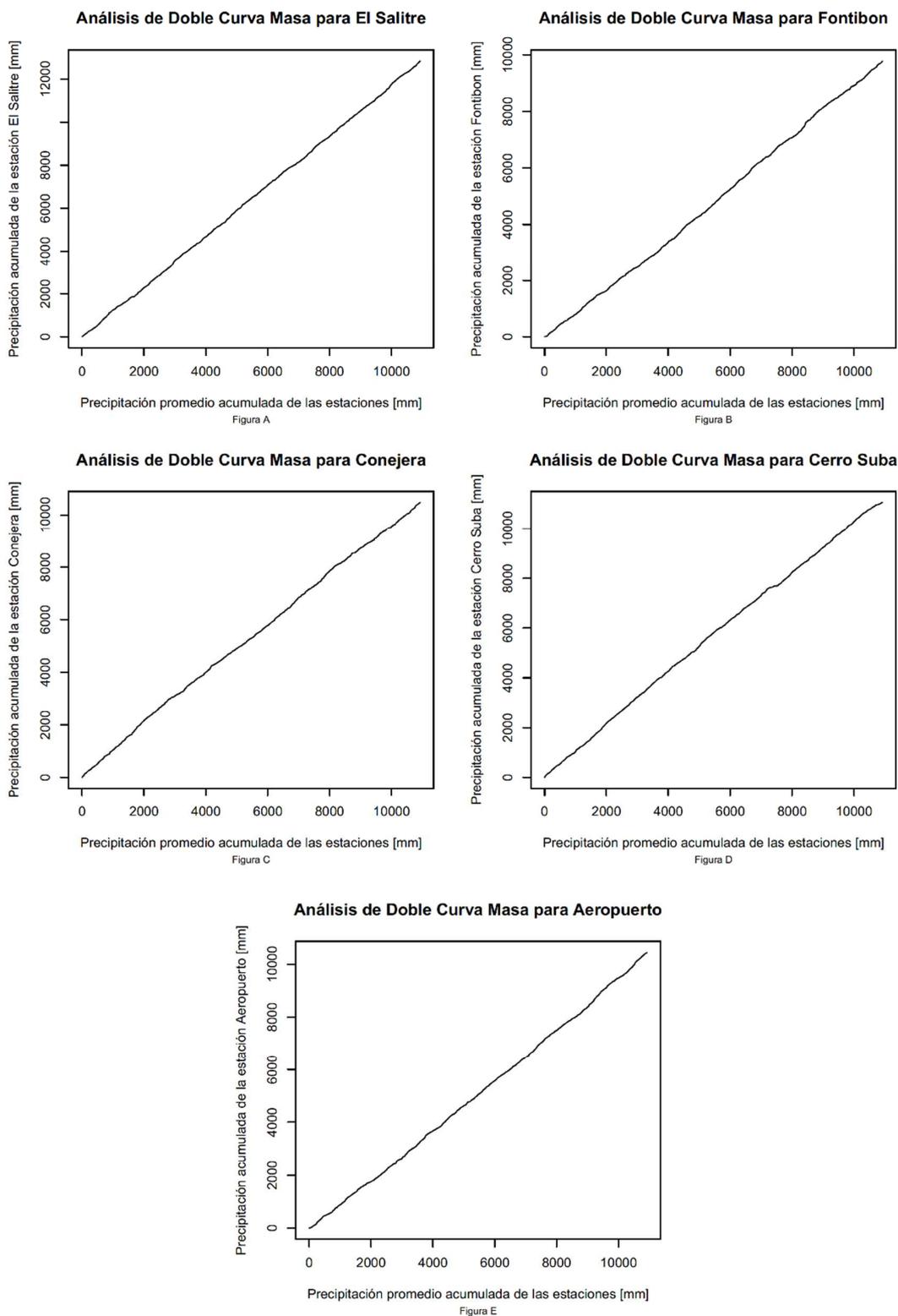


Ilustración 5.1: Análisis de Doble Curva Masa para las estaciones con resolución diaria.

5.2 Construcción de curvas IDF

5.2.1 Curvas IDF de estaciones con resolución de 5 minutos

Para realizar las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia de las estaciones con resolución temporal de 5 minutos, se ajustaron diferentes distribuciones de probabilidad (Normal, Lognormal, Gumbel y Weibull) a los datos [Anexo 2].

Se obtuvo el valor p de ajuste de cada distribución para cada duración analizada. Para seleccionar la distribución que presentó un mayor ajuste en cada estación [Tabla 5.1], se promedió dicho valor p para todas las duraciones, con la finalidad de distinguir el mejor ajuste general en cada una.

Estación	Función y valor promedio del valor p de ajuste	
	Función	Valor
Juan Rey	Lognormal	0.988
Moralba	Normal	0.998
San Benito	Lognormal	0.986

Tabla 5.1: Funciones de probabilidad con mejor ajuste para las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.

Una vez determinada la función de probabilidad que mejor ajusta los datos observados, se obtienen valores de intensidad de lluvia para distintos periodos de retorno. Para este análisis, los periodos de retorno seleccionados fueron: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Con estos valores se grafican las curvas IDF para cada estación:

Curvas IDF para la estación Juan Rey

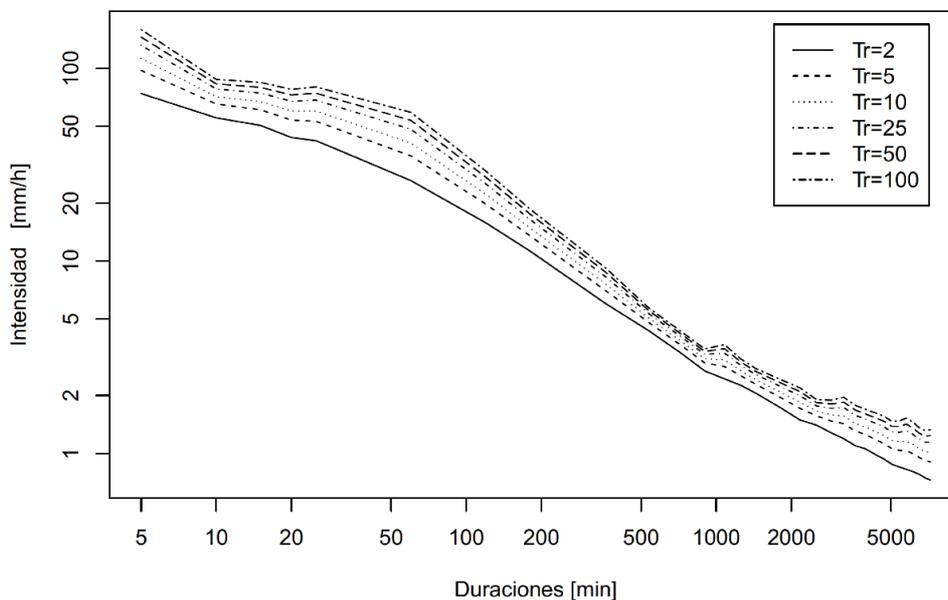


Ilustración 5.2: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para la estación Juan Rey.

Curvas IDF para la estación Moralba

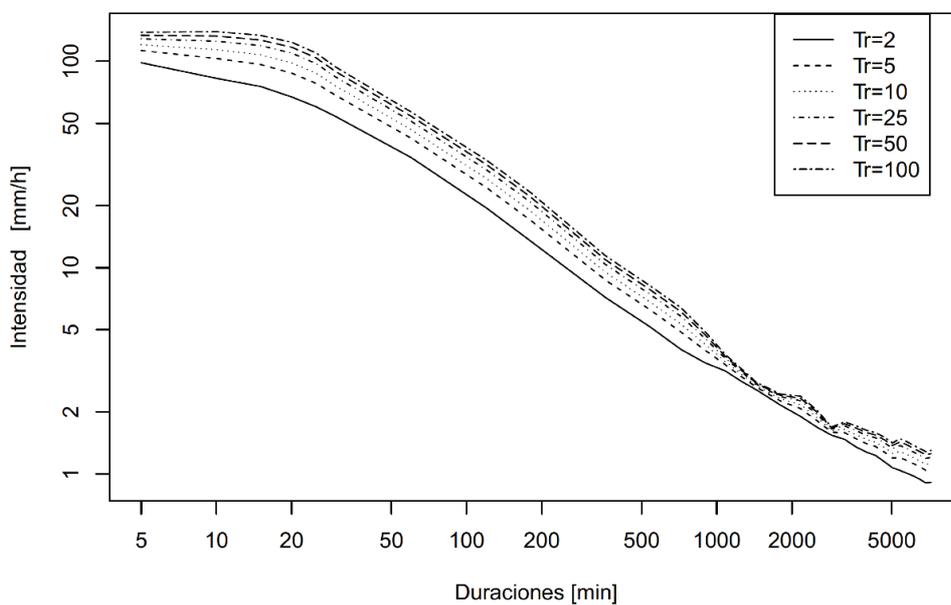


Ilustración 5.3: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para la estación Moralba.

Curvas IDF para la estación San Benito

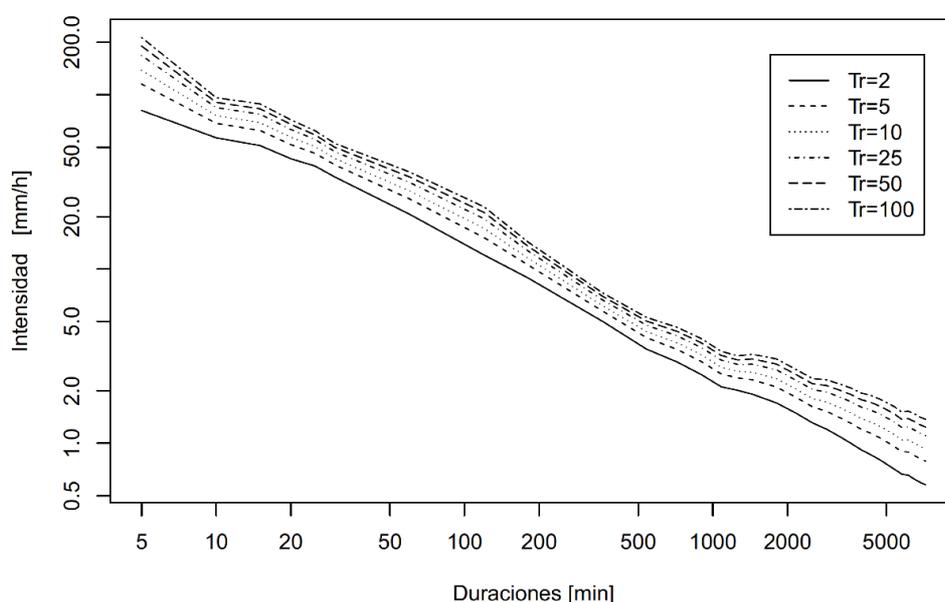


Ilustración 5.4: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para la estación San Benito.

En las gráficas de las curvas [Ilustración 5.2, Ilustración 5.3 e Ilustración 5.4] se observa que el orden de magnitud de las intensidades para cada duración es el mismo, esto es, debido a la cercanía entre las estaciones; las cuales reciben a su vez, el mismo orden de valores de precipitación.

Una vez obtenidos los datos se procede a construir las ecuaciones de las curvas utilizando las ecuaciones paramétricas y la ecuación de Poveda [Ecuaciones 4.1a, 4.1b, 4.1c y 3.18 respectivamente].

El exponente de escalamiento fue determinado para cada estación y para cada ecuación analizada. [Tabla 5.2]

Estaciones	Ecuaciones para ajuste a las curvas IDF			
	Ecuación de Poveda	Ecuaciones Paramétricas		
	$I_{d,q} = E[I_{dref}] \frac{\exp\left[\Phi_q \sqrt{\ln(1+CV^2)}\right]}{\sqrt{1+CV^2}} \left(\frac{d}{d_{ref}}\right)^\theta$	$I = \frac{A}{d^\theta}$	$I = \frac{A}{(d+B)^\theta}$	$I = \frac{A}{(d^\theta+B)}$
Juan Rey	-0.5734	0.5284	0.5083	0.3074
Moralba	-0.6186	0.5049	0.5086	0.3065
San Benito	-0.6872	0.6873	0.5086	0.3068

Tabla 5.2: Comparativa del exponente de escalamiento θ de distintas ecuaciones de curvas IDF para las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.

Se determinó el coeficiente de escalamiento de las estaciones analizadas del mismo modo mediante el procedimiento utilizado en el artículo llamado “Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas Intensidad-Frecuencia-Duración en Colombia” (Germán Poveda & Jaime Velez, 2002).

Estaciones	Teoría de escalamiento	
	$I_q(\lambda d) = \lambda^\theta I_q(d)$	Intervalos de confianza del 95%
Juan Rey	-0.7007	$-0.5109 \leq \theta \leq -0.8914$
Moralba	-0.6953	$-0.5111 \leq \theta \leq -0.8895$
San Benito	-0.6956	$-0.5077 \leq \theta \leq -0.8896$

Tabla 5.3: Comparativa del exponente de escalamiento θ a partir de la teoría del escalamiento para las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.

Dado a que las ecuaciones 4.1a, 4.1b, 4.1c y 3.18 están ajustadas con coeficientes preestablecidos, el coeficiente de escalamiento varía entre sí, lo mismo sucede con la ecuación de escalamiento mostrada en la Tabla 5.3 en la cual, al no contar con coeficientes empíricos se denota el exponente de escalamiento real de las estaciones. El valor del exponente es similar entre las estaciones analizadas dado a la cercanía entre ellas. Por esta razón se define el exponente de escalamiento para la región de Bogotá con el valor medio de -0.697 de acuerdo a las estaciones analizadas.

5.2.2 Curvas IDF con el promedio de las estaciones analizadas

Se realizaron tres tipos de aproximaciones para obtener la curva IDF de la zona de estudio que representa a las estaciones analizadas intentando tomar en cuenta la distribución espacial de la precipitación en la misma.

En la Ilustración 5.5 se muestra la curva IDF construida mediante el promedio de las precipitaciones máximas ajustadas de cada estación analizada para los diferentes periodos de retorno. En la Ilustración 5.6 se observa la curva IDF generada utilizando el máximo valor de precipitación para cada año y para cada duración. Se aplicó la función de probabilidad Weibull ya que fue la que obtuvo el mejor valor de ajuste, siendo este de 0.9959; con esto se obtuvieron los valores máximos de precipitación e intensidad para los periodos de retorno en análisis.

Curvas IDF para el promedio de las estaciones

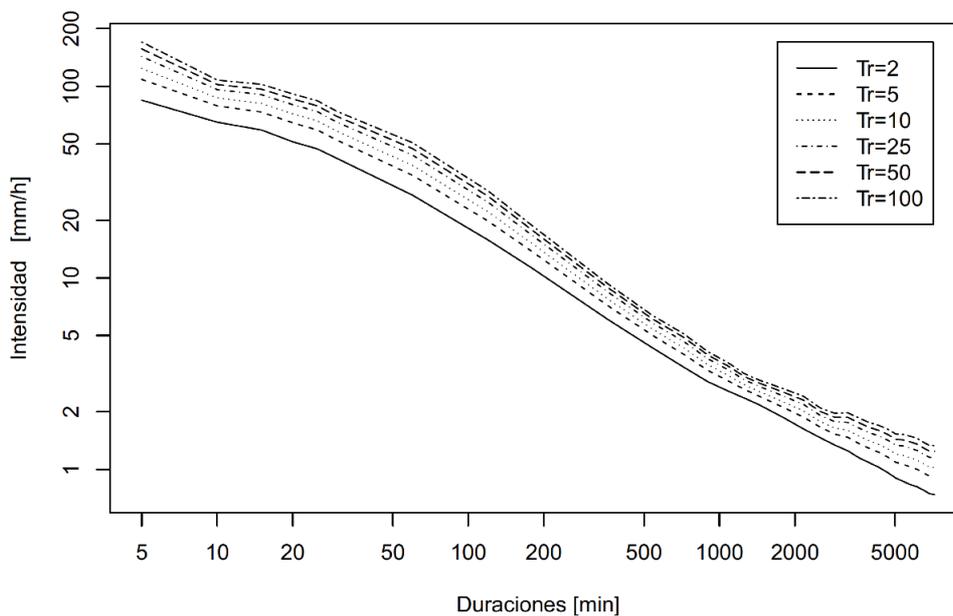


Ilustración 5.5: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el promedio de la precipitación máxima ajustada de las estaciones en estudio.

Curvas IDF para el máximo de las estaciones

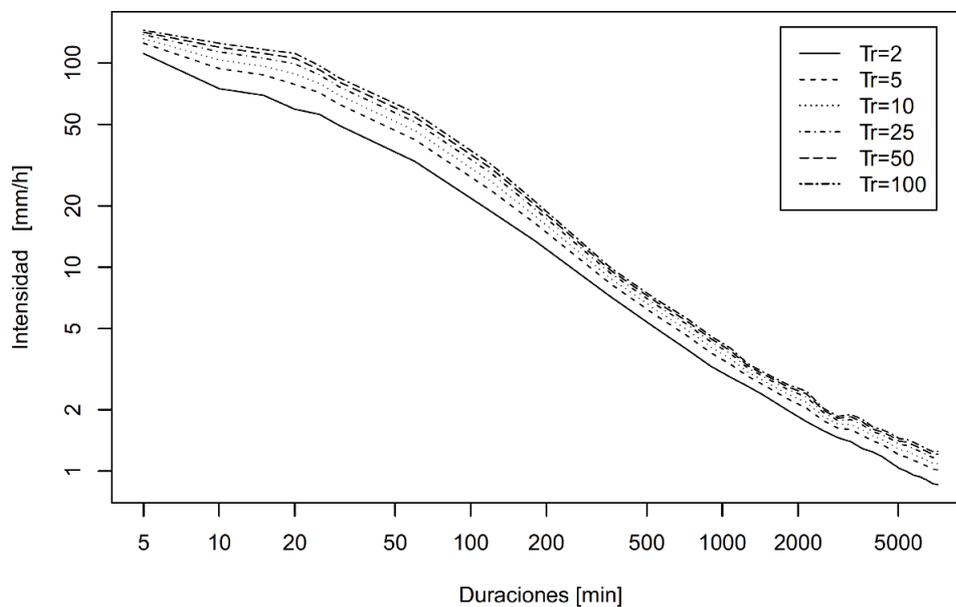


Ilustración 5.6: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el máximo de la precipitación máxima de las estaciones en estudio.

En la Ilustración 5.7 se muestra la gráfica IDF generada mediante el promedio de la serie diaria de datos de las estaciones analizadas. Se observa una disminución de la intensidad respecto a las otras gráficas debido a que las estaciones no mostraron precipitación los mismos días haciendo que el valor promedio disminuyera respecto al de cada estación medida de manera independiente.

La distribución que mostró mejor valor ajuste fue la de Weibull (valor $p = 0.9998$). Con dicha fdp fueron obtenidos los valores necesarios para la construcción de las curvas IDF [Ilustración 5.7].

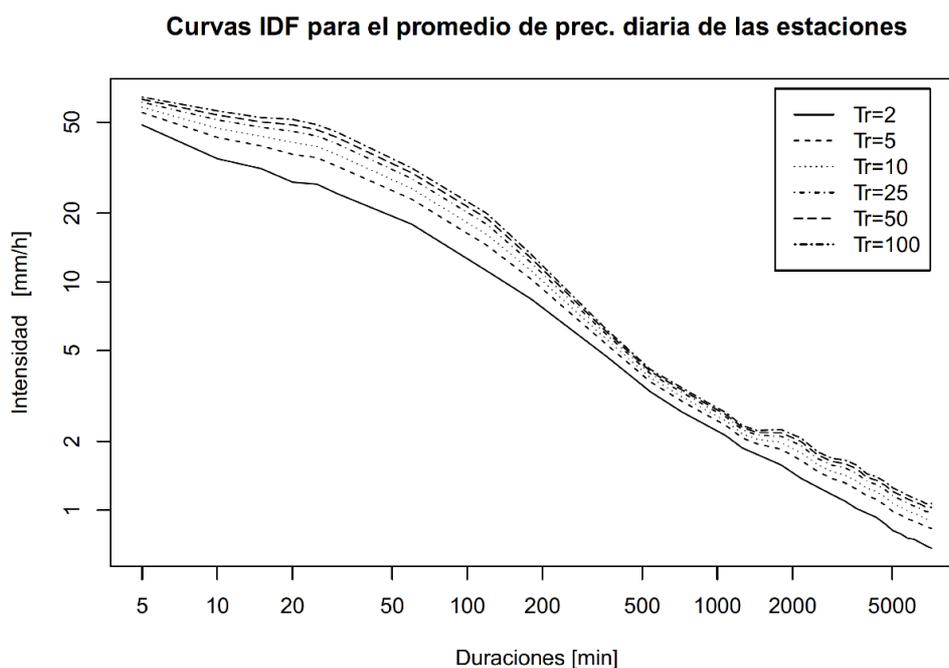


Ilustración 5.7: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el promedio de la precipitación diaria de las estaciones en estudio.

Promedios	Teoría de escalamiento	
	$I_q(\lambda d) = \lambda^\theta I_q(d)$	Intervalos de confianza del 95%
Promedio de valores máximos	-0.7170	$-0.5093 \leq \theta \leq -0.8909$
Valores máximos de estaciones	-0.6893	$-0.5118 \leq \theta \leq -0.8890$
Promedio de precipitación diaria	-0.7013	$-0.5087 \leq \theta \leq -0.8898$

Tabla 5.4: Comparativa del exponente de escalamiento θ a partir de la teoría del escalamiento para el promedio de las estaciones con resolución temporal de 5 minutos.

En la Tabla 5.4 se denota el cálculo del exponente de escalamiento e intervalos de confianza del 95% mediante el proceso de “bootstrapping”. Se observa que el exponente de escalamiento de las tres curvas.

El menor desvío respecto al valor medio del exponente de escalamiento de las estaciones analizadas lo presenta el valor generado mediante el promedio de precipitaciones diarias con un valor de 0.0043, esto es debido a que representa la precipitación real promedio en el área de estudio y no solo el valor puntual de la medición (en este caso las estaciones pluviométricas), le sigue el valor obtenido con el valor máximo de las estaciones (desvío de 0.0077); y por último el obtenido con el valor promedio de las estaciones máximas (desvío de 0.02).

5.2.3 Curva IDF utilizando el producto de precipitación satelital CMORPH

Para determinar la curva IDF para el producto satelital CMORPH se siguió el mismo procedimiento que para las estaciones con diferentes duraciones, las cuales van; de 30 minutos a 5 días.

Se determinó de igual manera que la fdp que mejor ajusta los datos es la lognormal [Anexo 2], con un valor p de 0.9668.

Se calcularon las intensidades de precipitación para los periodos de retorno establecidos, obteniendo de esta manera la curva IDF para el producto CMORPH para las duraciones estudiadas como se muestra en la Ilustración 5.8

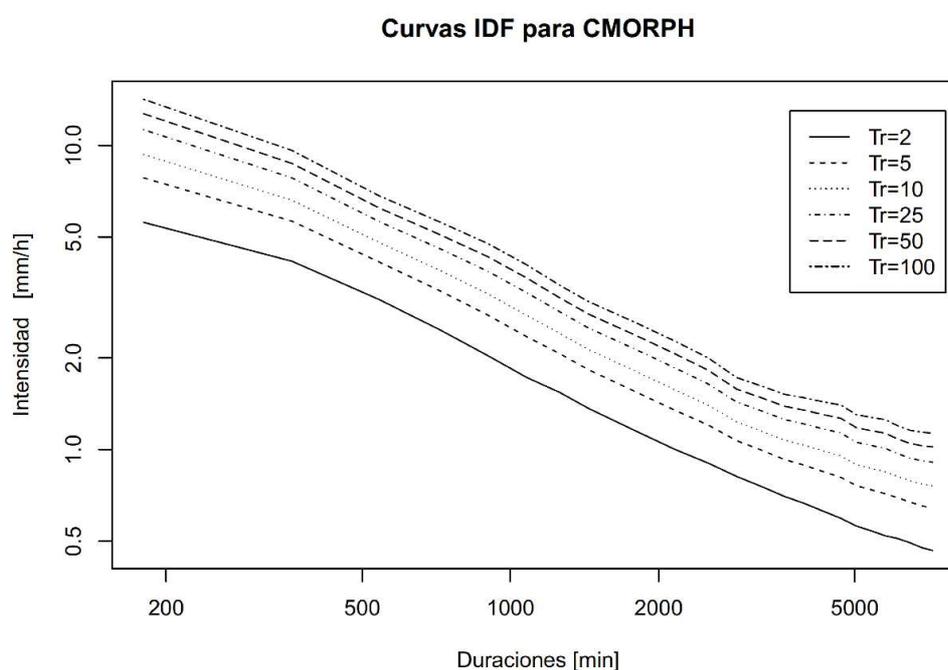


Ilustración 5.8: Curva Intensidad - Duración - Frecuencia para el producto satelital CMORPH.

El exponente de escalamiento fue determinado para cada estación y para cada ecuación analizada [Tabla 5.5].

Producto	Ecuaciones para ajuste a las curvas IDF			
	Ecuación de Poveda	Ecuaciones Paramétricas		
	$I_{d,q} = E[I_{dref}] \frac{\exp\left[\frac{\Phi_q \sqrt{\ln(1+CV^2)}}{\sqrt{1+CV^2}}\right] \left(\frac{d}{d_{ref}}\right)^\theta}{1}$	$I = \frac{A}{d^\theta}$	$I = \frac{A}{(d+B)^\theta}$	$I = \frac{A}{(d^\theta+B)}$
CMORPH	-0.7046	0.7052	0.5188 0.3222	

Tabla 5.5: Comparativa del exponente de escalamiento θ de distintas ecuaciones de curvas IDF para CMORPH.

Se observa variación en los exponentes de escalamiento de cada ecuación debido a la forma de la ecuación (Poveda y paramétricas) y a los valores predefinidos que posee cada una de ellas.

Producto	Teoría de escalamiento	
	$I_q(\lambda d) = \lambda^\theta I_q(d)$	Intervalos de confianza del 95%
CMORPH	-0.6947	-0.5090 $\leq \theta \leq$ -0.8898

Tabla 5.6: Comparativa del exponente de escalamiento θ a partir de la teoría del escalamiento para CMORPH.

Se observa similitud respecto a los valores de las estaciones analizadas, sobre todo en las ecuaciones paramétricas 4.1b y 4.1c aún sin haber corregido el producto.

El exponente de escalamiento del producto satelital es muy parecido al obtenido con las estaciones analizadas [Tabla 5.6].

5.2.4 Comparativa de curvas IDF del producto CMORPH y promedios de estaciones

En la Ilustración 5.9, Ilustración 5.10 e Ilustración 5.11 se observa la comparativa de la curva IDF del producto satelital CMORPH, con los diferentes promedios realizados con la finalidad de observar el comportamiento del producto respecto a las estaciones pluviométricas utilizadas.

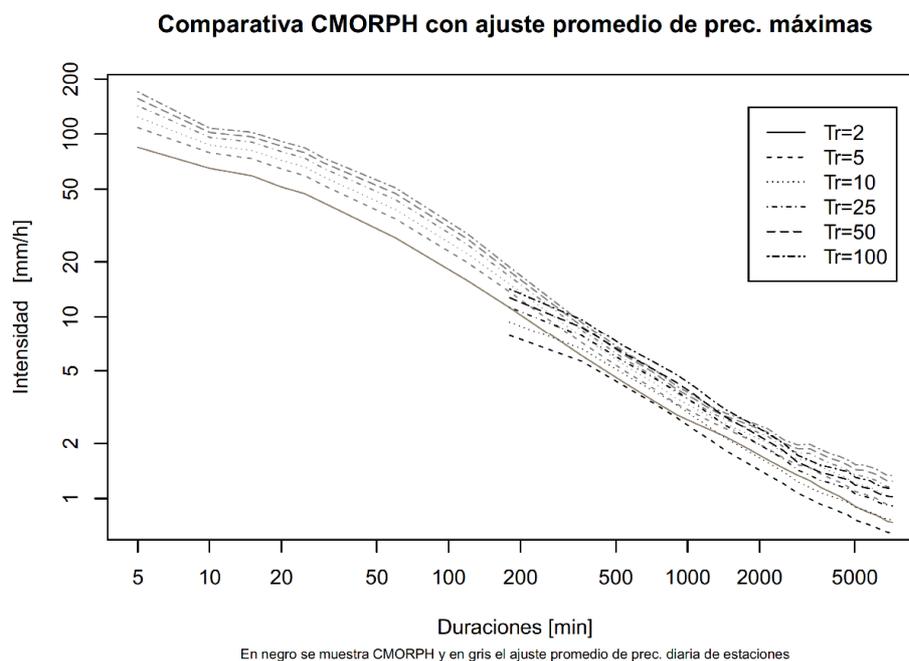
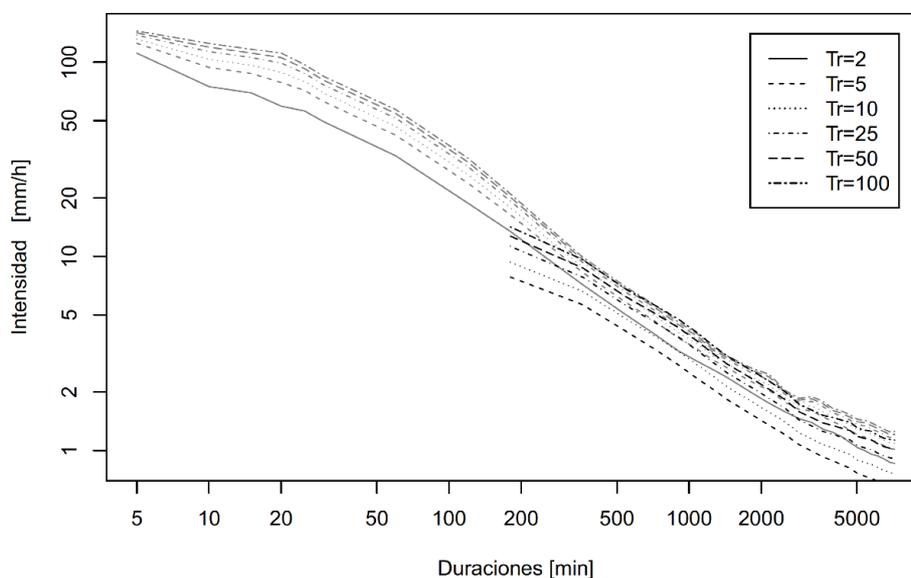


Ilustración 5.9: Comparativa entre IDF del producto satelital CMORPH e IDF obtenida de las precipitación máximas promedio de las estaciones.

En la Ilustración 5.9 se observa una buena relación entre el producto satelital y el promedio de las estaciones, a medida que la duración se reduce, CMORPH reduce la pendiente. La desviación entre los exponentes de escalamiento (CMORPH y promedio de las estaciones) es de 0.0223

Se muestra [Ilustración 5.10] la comparativa de las curvas IDF de CMORPH con la precipitación máxima obtenida de las estaciones, al igual que en la ilustración anterior se muestra un buen ajuste en ambos, pero a medida que disminuyen las duraciones, el producto satelital muestra un decremento de las intensidades. La desviación entre los exponentes de escalamiento es de 0.0054

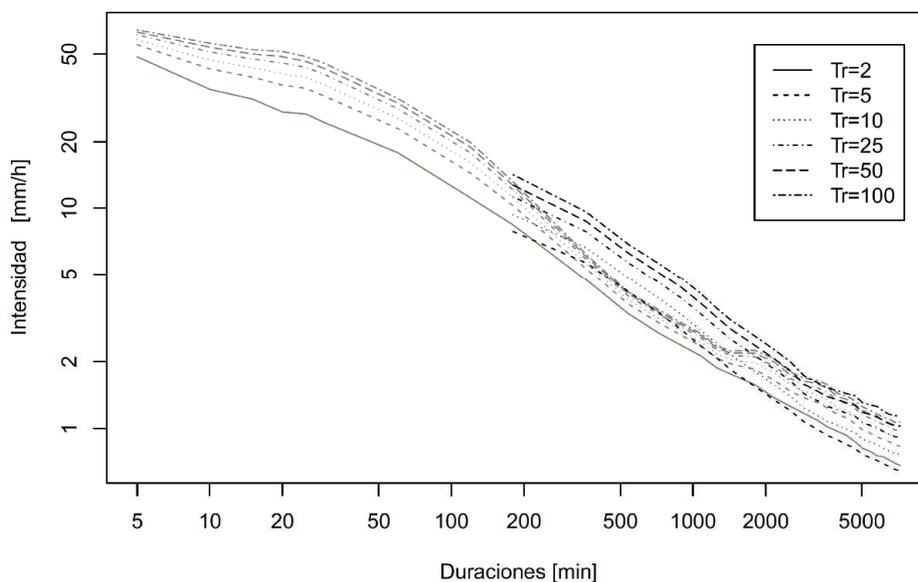
Comparativa CMORPH con ajuste con precipitación máxima



En negro se muestra CMORPH y en gris el ajuste con precipitación máxima

Ilustración 5.10: Comparativa entre IDF del producto satelital CMORPH e IDF obtenida de las precipitación máxima de las estaciones.

Comparativa CMORPH con ajuste promedio de prec. diaria de estaciones



En negro se muestra CMORPH y en gris el ajuste promedio de prec. diaria de estaciones

Ilustración 5.11: Comparativa entre IDF del producto satelital CMORPH e IDF obtenida de las precipitación diaria promedio de las estaciones.

En la Ilustración 5.11 se observa la comparativa de curvas IDF entre CMORPH y el promedio de precipitaciones diarias. La desviación entre los exponentes de escalamiento es de 0.0066, se

aprecia una buena relación en las intensidades de ambas curvas, incluso en las duraciones cortas del producto satelital.

5.3 Análisis de índices de precipitación

El análisis de los índices de precipitación propuestos por el Equipo de Expertos en Cambio Climático, Detección e Índices (ETCCDI) se realizó para las estaciones automáticas con información de duraciones de 5 minutos (Juan Rey, Moralba y San Benito), y con estaciones de información diaria (Cerro Suba, Salitre, La Conejera, Fontibón y Aeropuerto), con el fin de tener series de tiempo más largas y observar la correlación de CMORPH con los datos.

5.3.1 Análisis de índices de estaciones con duraciones de precipitación de 5 minutos

Se tomó el valor medio de la precipitación máxima mensual con duración de un día para las estaciones al igual que para CMORPH del periodo 2008-2013 excepto para la estación Moralba cuyos datos representan al periodo 2010-2013.

En la Ilustración 5.12, además de la media de CMORPH, en color rojo, se muestra la desviación estándar de sus valores alrededor de este valor medio, con el fin de observar el ajuste que tiene este producto satelital con los valores presentados por las estaciones. Se observa que el producto satelital se encuentra en el orden de magnitud de los valores obtenidos en las estaciones, por lo cual se asume que este posee un buen ajuste en los valores extremos de la precipitación.

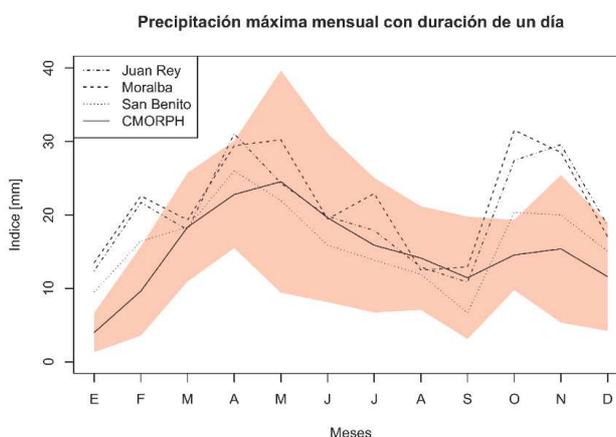


Ilustración 5.12: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

Al igual que en el índice anterior se tomó el valor medio de la precipitación máxima mensual, ahora para 5 días consecutivos de precipitación. Se aprecia [Ilustración 5.13] que la desviación estándar de los valores de CMORPH se encuentra en el rango de los valores de las estaciones, aunque subestima los picos máximos de los datos observados, lo cual indica que los valores de precipitación con menor magnitud tienen una correlación menor entre el producto y las estaciones.

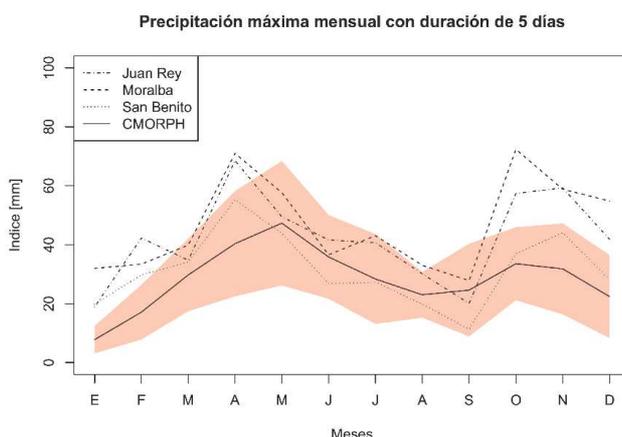


Ilustración 5.13: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de 5 días entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

El Índice simple de intensidad de precipitación (SDII) calcula la precipitación total anual y la divide entre el número de días en los cuales hubo precipitación para cada año de registro. En la Ilustración 5.14, se presenta el análisis de los valores medios de precipitación que presentan las estaciones observadas y CMORPH. Se puede determinar que el producto subestima el índice respecto a las estaciones en estudio. Esto se debe a dos causas: la precipitación total anual del producto satelital es menor a la de las estaciones [Ilustración 5.21]; y además, el producto reparte dicha precipitación en más días con lluvia, por lo que este índice se reduce notablemente [Ilustración 5.18].

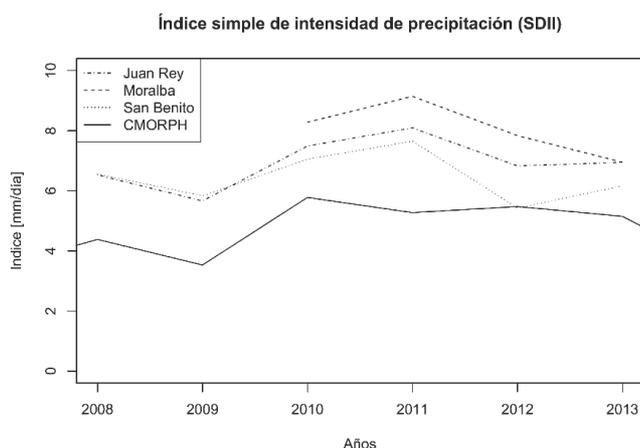


Ilustración 5.14: Comparativa del índice simple de intensidad de precipitación (SDII) entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

En la Ilustración 5.15 se aprecia la comparativa entre CMORPH y las estaciones del índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm. Este valor muestra el número de días con precipitación mayor o igual a 10 mm. Se aprecia que el valor del producto satelital se encuentra por debajo de los valores de las estaciones. Como ya se mencionó anteriormente, existe un peor ajuste cuando los valores se alejan de los valores extremos. La diferencia en este índice indica el subestimado de precipitación por parte del producto satelital.

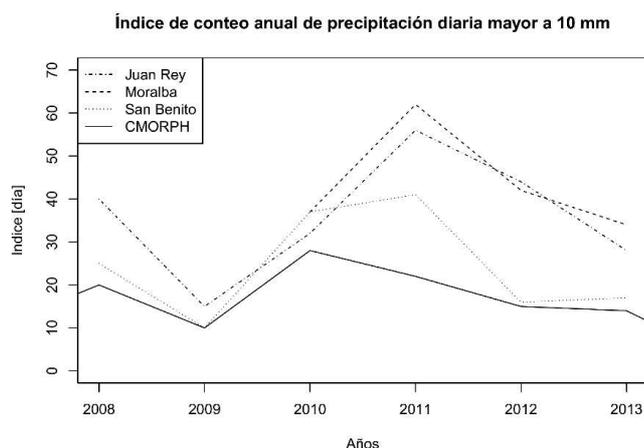


Ilustración 5.15: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

Al igual que el índice anterior, el índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm cuenta anualmente el número de días en los cuales se presenta una lámina de precipitación mayor a la establecida en el índice. En la Ilustración 5.16, se observa que a medida que los valores se acercan a los máximos el ajuste es mayor. Por lo tanto, aunque subdimensionado, este índice ajusta mejor que el anterior respecto a los datos de las estaciones.

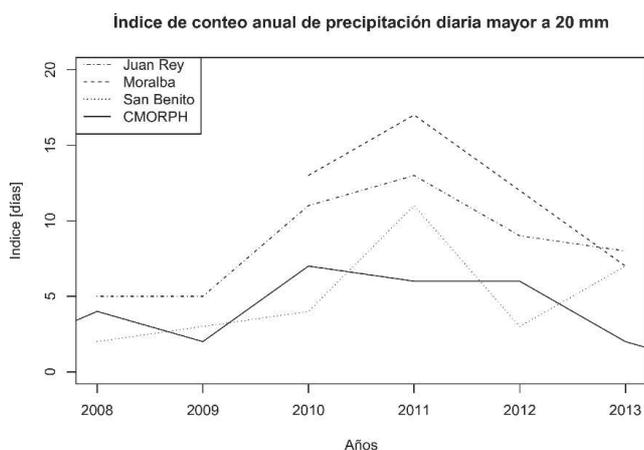


Ilustración 5.16: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

El índice de longitud máxima del periodo de sequía (CDD) muestra el número de días consecutivos con precipitación menor a un milímetro. Se muestra en la Ilustración 5.17, que el producto CMORPH se encuentra por debajo de los valores en las estaciones; esto es, dado porque el producto supone días con precipitación cuando las estaciones no presentan. Al ser CMORPH un producto con una resolución espacial menor (8km x 8km), determina precipitaciones en un área mayor que las estaciones, ya que estas solo toman un valor puntual.

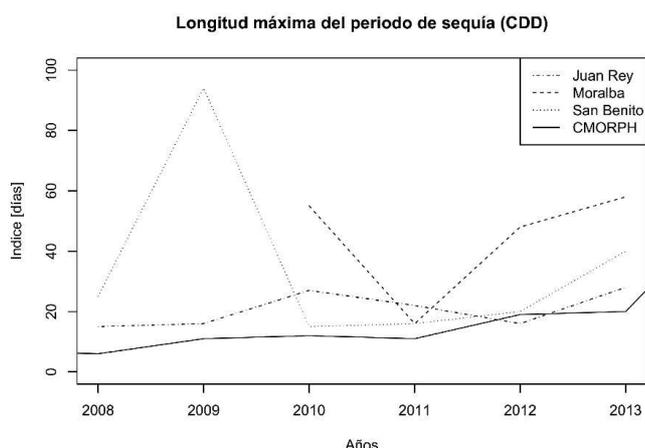


Ilustración 5.17: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo de sequía (CDD) entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

Por el contrario, el índice de longitud máxima del periodo húmedo muestra el número de días consecutivos en los que en un año se presenta lluvia mayor o igual a un milímetro. Se muestra [Ilustración 5.18] que CMORPH ajusta mejor e incluso del año 2009 a mediados del 2010 muestra un incremento en el índice, determinando que el producto en ocasiones sobreestima los días con lluvia en el área de estudio.

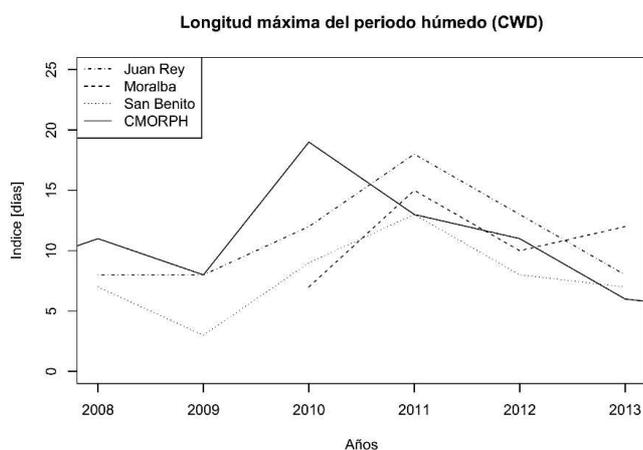


Ilustración 5.18: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo húmedo (CWD) entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

El índice de precipitación anual mayor al 95 percentil despliega para cada año el valor de las lluvias que están por encima del 0.95 de la distribución de probabilidad acumulada durante el año analizado.

En la Ilustración 5.19 se observa nuevamente una buena correlación entre el producto CMORPH y los valores de las estaciones para los valores máximos de precipitación.

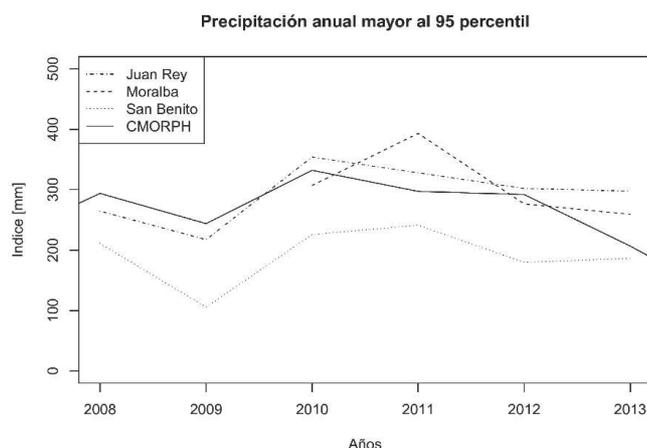


Ilustración 5.19: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 95 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

Al igual que el índice anterior, el índice de precipitación anual mayor al 99 percentil muestra las lluvias mayores al 0.99 de la distribución de probabilidad acumulada. Este índice [Ilustración 5.20] se encuentra por encima de las estaciones en la mayor parte del tiempo excepto en la segunda mitad del año 2012 y para la estación Moralba a mediados de 2011 y el periodo correspondiente al primer semestre del año 2012.

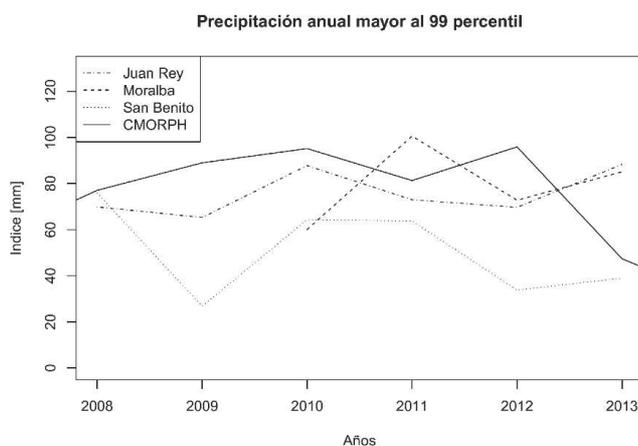


Ilustración 5.20: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 99 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

El índice de precipitación total anual en días húmedos es la suma de los valores anuales de precipitación. Se observa [Ilustración 5.21] que el producto CMORPH se encuentra generalmente por debajo de los valores de las estaciones aunque se encuentra en el mismo orden de magnitud que la precipitación anual para la zona de estudio.

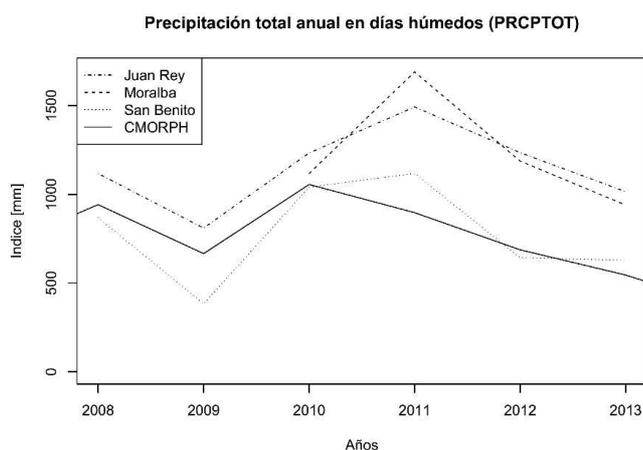


Ilustración 5.21: Comparativa del Índice de precipitación total anual en días húmedos entre las estaciones con resolución temporal de 5 minutos y CMORPH.

5.3.2 Análisis de índices de estaciones con resolución temporal de 1 día

Los resultados que se muestran en el análisis de los índices de precipitación propuestos por el Equipo de Expertos en Cambio Climático, Detección e Índices (ETCCDI) para las estaciones con resolución temporal de 1 día son consistentes con los observados en las estaciones con resolución de 5 minutos; aunque, estos cuentan con un mayor número de años de registro (2003-2012).

Las estaciones en estudio se localizan en dos píxeles del producto satelital, por lo tanto, las estaciones de Aeropuerto, Cerro Suba, Fontibón y Salitre se muestran en una gráfica mientras la estación de La Conejera se despliega en otra.

Los gráficos entre la estación La Conejera y CMORPH son menos representativos que los correspondientes a las otras cuatro estaciones que se encuentran en el mismo píxel del producto. Esto es debido a que una estación es solo un dato puntual del área representada por CMORPH y no toma en cuenta la variabilidad de precipitación en el área analizada.

En las Ilustración 5.22 e Ilustración 5.23 se observa que la media del producto satelital se encuentra ligeramente por debajo de la media de los datos observados, y la desviación estándar de la misma se encuentra en el rango de valores de los mismos.

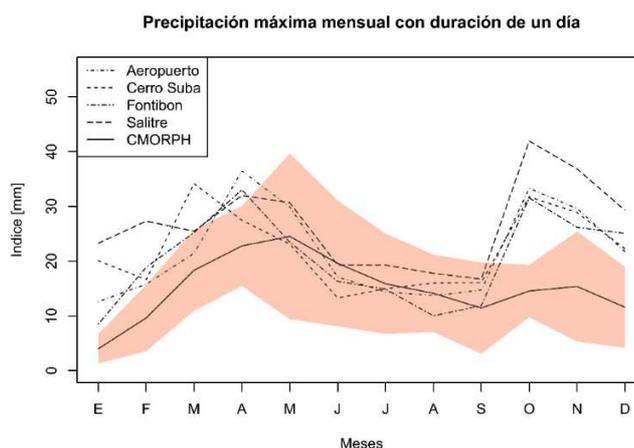


Ilustración 5.22: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

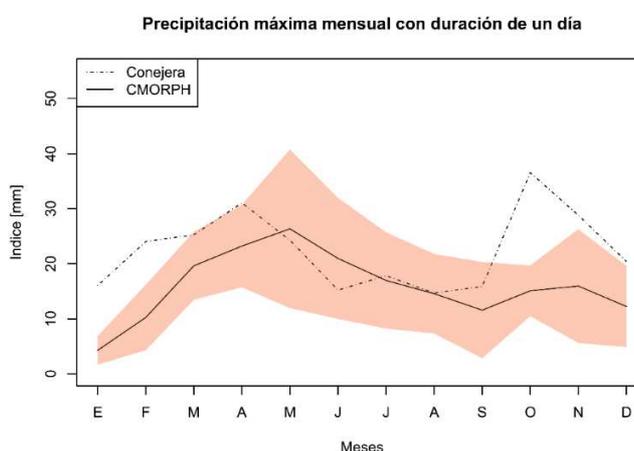


Ilustración 5.23: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

El índice de precipitación máxima mensual [Ilustración 5.24 e Ilustración 5.25], al igual que en el índice anterior; muestra un subestimado de valores para el producto CMORPH, sobre todo en los meses de octubre a diciembre, en los cuales este índice se encuentra por debajo de los datos observados.

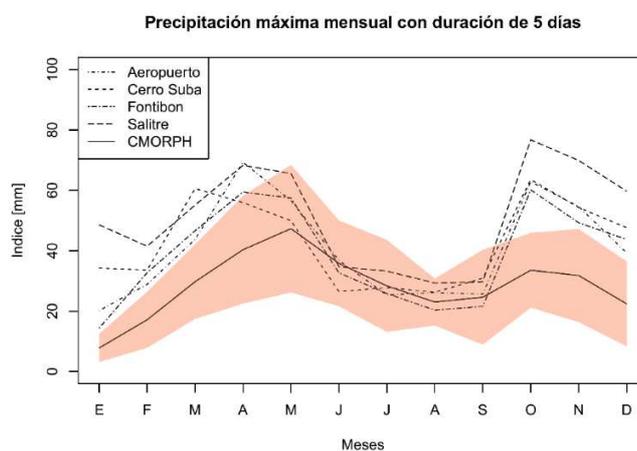


Ilustración 5.24: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de 5 días entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

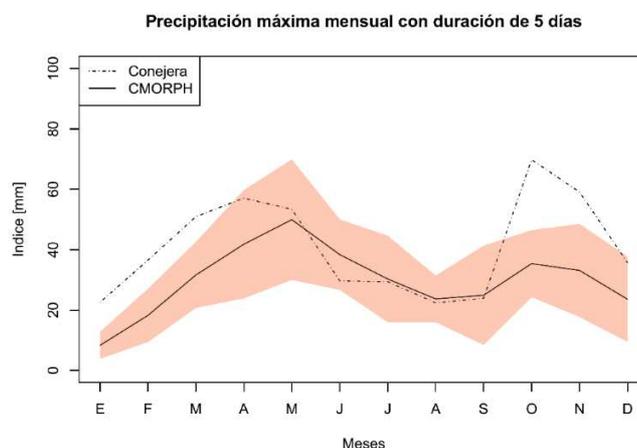


Ilustración 5.25: Comparativa de precipitación máxima mensual con duración de un día entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

Se aprecia en la Ilustración 5.26 e Ilustración 5.27 que el índice simple de intensidad de precipitación de CMORPH se encuentra por debajo de los índices de los datos observados. Se repite que la precipitación total anual del producto satelital es menor al de las estaciones [Ilustración 5.40 e Ilustración 5.41] y, además, el producto reparte dicha precipitación en más días por lo que este índice es menor respecto al de los datos observados [Ilustración 5.34 e Ilustración 5.35].

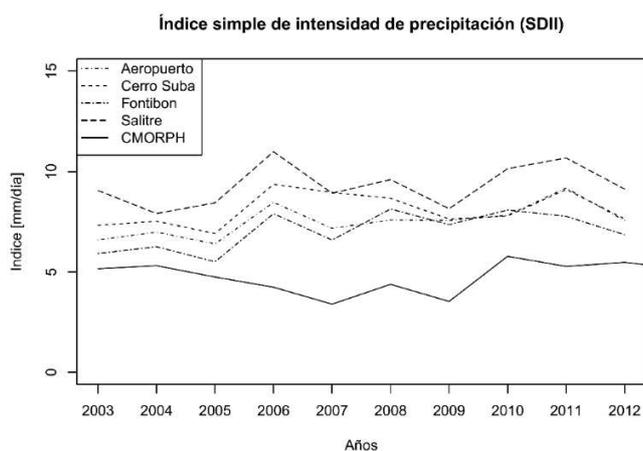


Ilustración 5.26: Comparativa del índice simple de intensidad de precipitación (SDII) entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

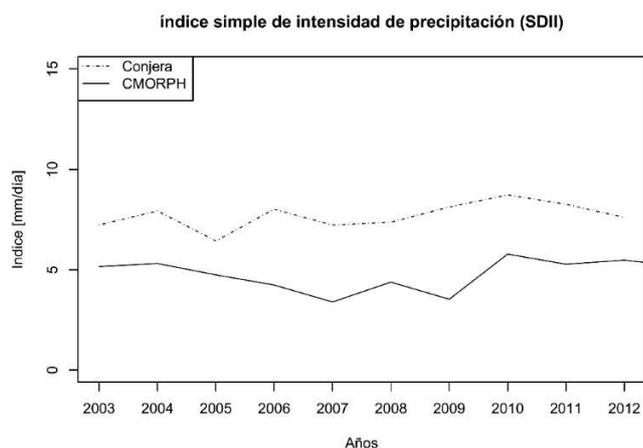


Ilustración 5.27: Comparativa del índice simple de intensidad de precipitación (SDII) entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

En el índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm [Ilustración 5.28 e Ilustración 5.29] y en el índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm [Ilustración 5.30 e Ilustración 5.31] se observa que los índices del producto satelital son menores que los observados. Esto hace referencia que los valores medios de las distribuciones de probabilidad entre el producto y los datos observados difieren entre sí.

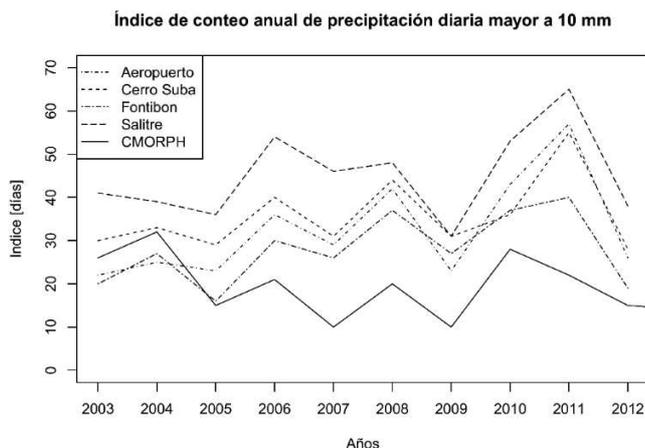


Ilustración 5.28: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

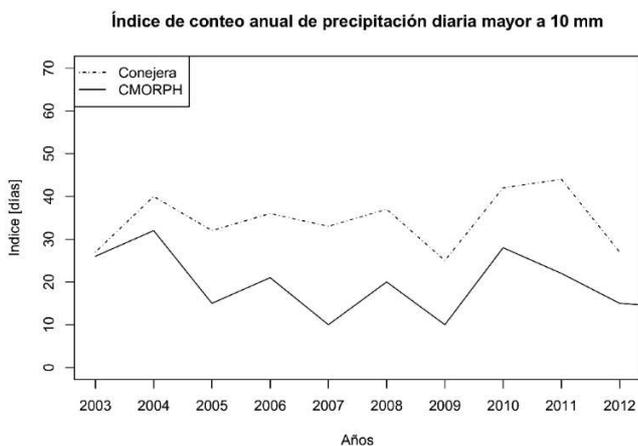


Ilustración 5.29: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 10 mm entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

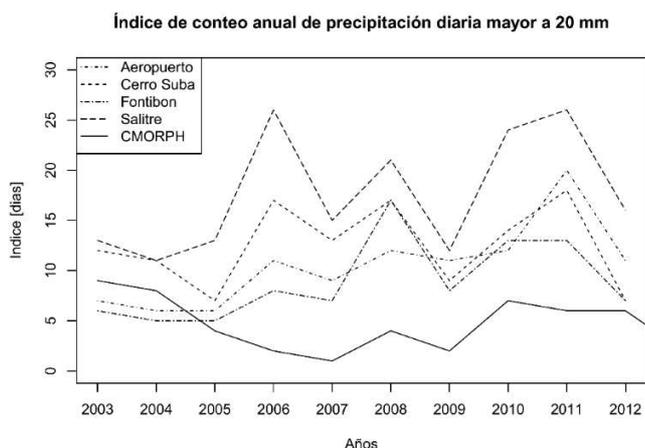


Ilustración 5.30: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

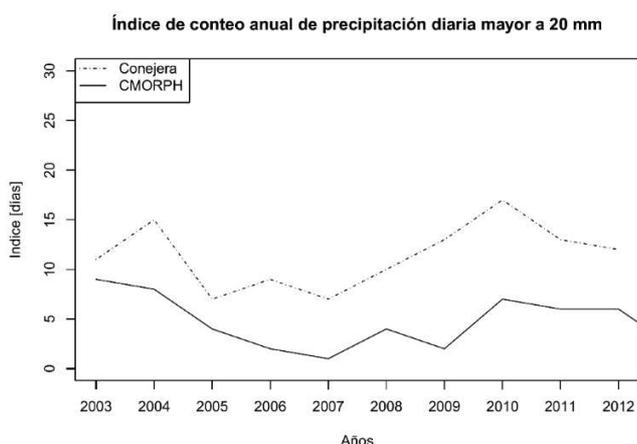


Ilustración 5.31: Comparativa del Índice de conteo anual de precipitación diaria mayor a 20 mm entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

En la Ilustración 5.32 e Ilustración 5.33 se observa el índice de longitud máxima del periodo de sequía, el cual indica el mayor número de días sin lluvia o lluvia menor a 1 milímetro. El número consecutivo de días en estas condiciones para CMORPH, es menor que el de los datos observados, indicando que el producto detecta precipitación en días en los que no se registra en las estaciones.

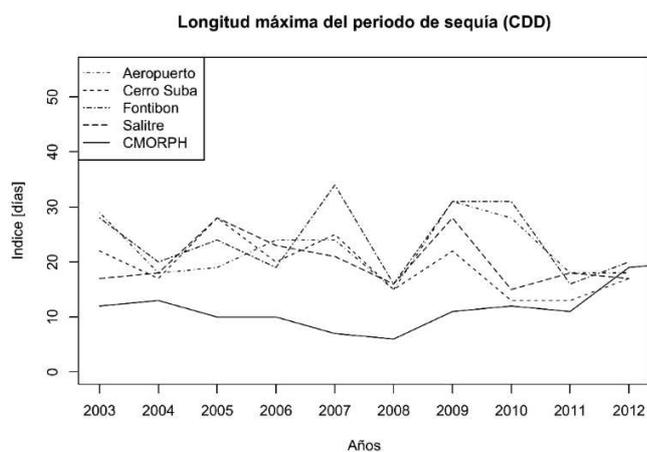


Ilustración 5.32: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo de sequía (CDD) entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

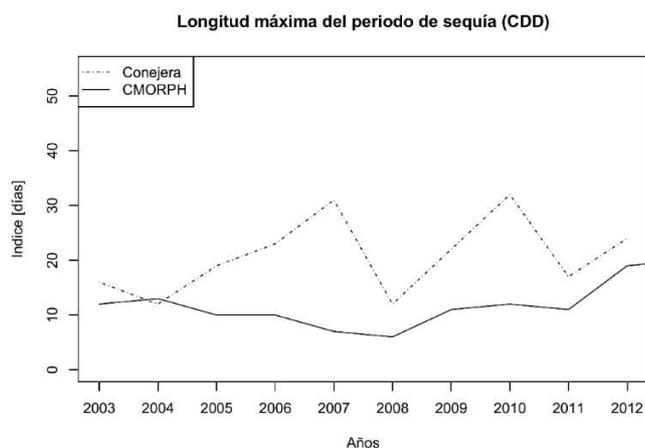


Ilustración 5.33: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo de sequía (CDD) entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

A diferencia del índice anterior, el índice de longitud máxima del periodo húmedo para CMORPH [Ilustración 5.34 e Ilustración 5.35] tiene una buena correlación con los índices de los datos observados; este índice indica la cantidad máxima de días consecutivos con lluvia mayor o igual a un milímetro.

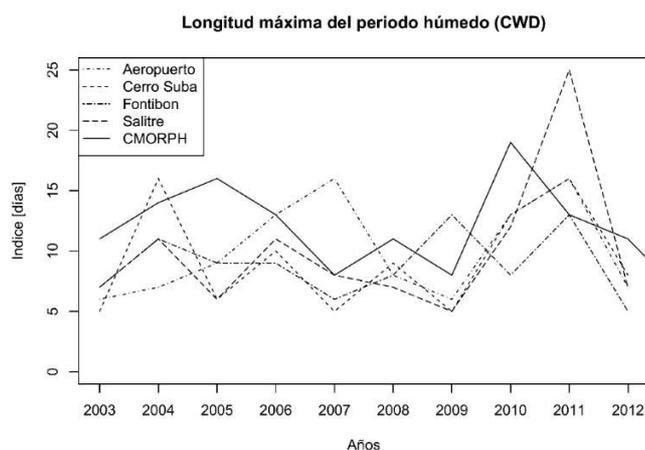


Ilustración 5.34: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo húmedo (CWD) entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

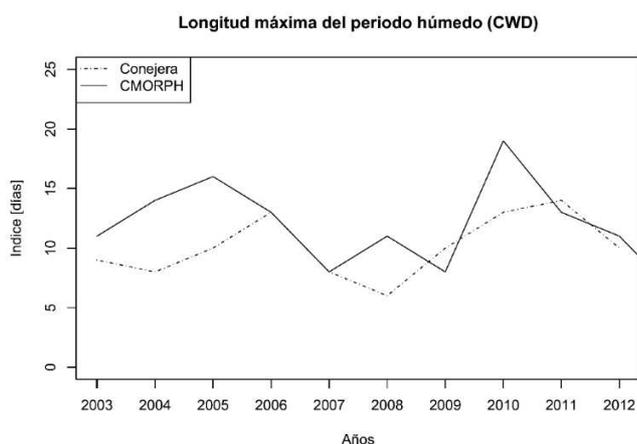


Ilustración 5.35: Comparativa del Índice de longitud máxima del periodo húmedo (CWD) entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

En el índice de precipitación mayor al 95 percentil [Ilustración 5.36 e Ilustración 5.37], y el índice de precipitación mayor al 99 percentil [Ilustración 5.38 e Ilustración 5.39], se observa de igual manera que la correlación entre los valores del producto y las estaciones es buena. CMORPH ajusta nuevamente de manera correcta los valores extremos observados.

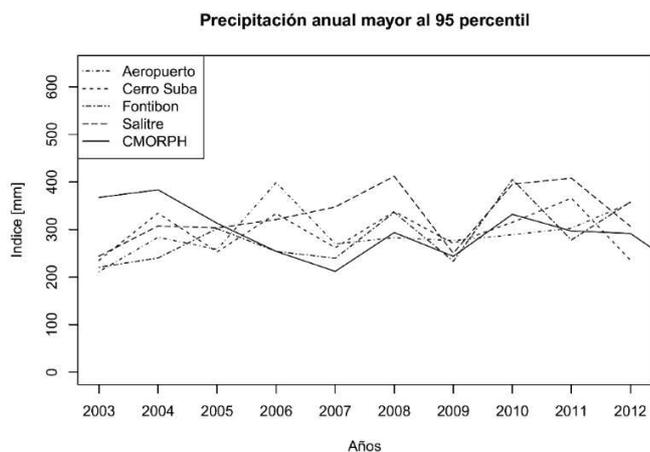


Ilustración 5.36: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 95 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

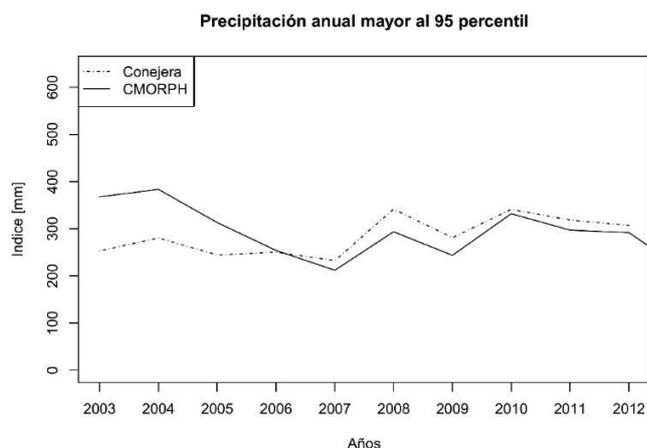


Ilustración 5.37: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 95 percentil entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

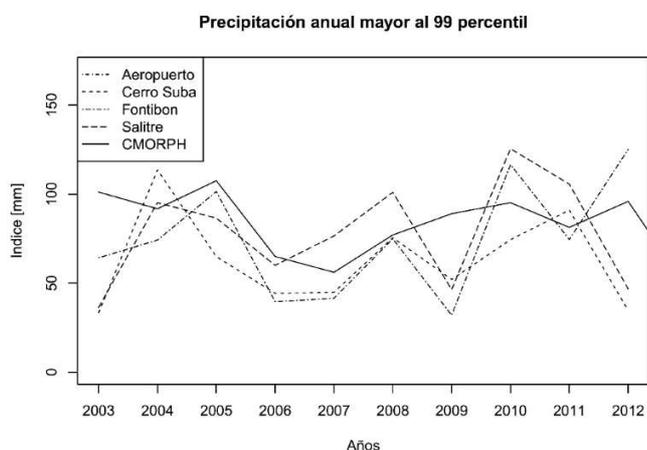


Ilustración 5.38: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 99 percentil entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

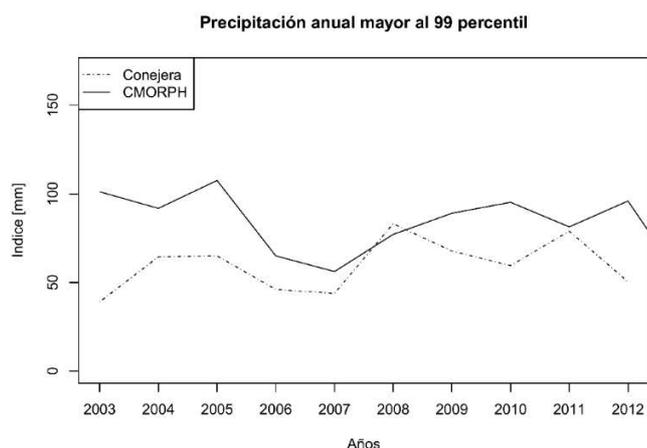


Ilustración 5.39: Comparativa del Índice de precipitación anual mayor al 99 percentil entre la estación Conejera con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

En la Ilustración 5.40 e Ilustración 5.41 se observa el índice de precipitación total anual en días húmedos, el cual, se encuentra en el orden de magnitud de la precipitación total anual para las estaciones analizadas en el periodo determinado.

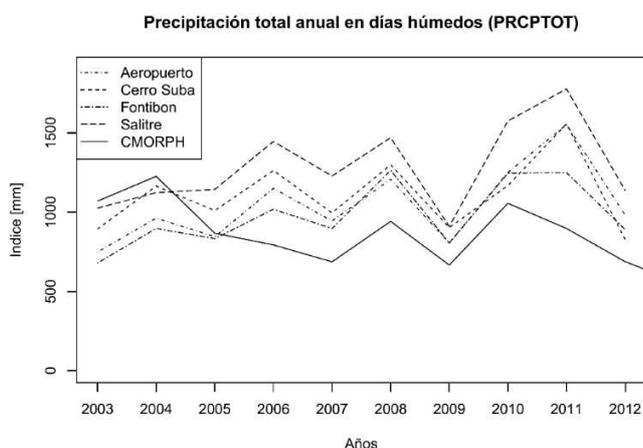


Ilustración 5.40: Comparativa del Índice de precipitación total anual en días húmedos entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

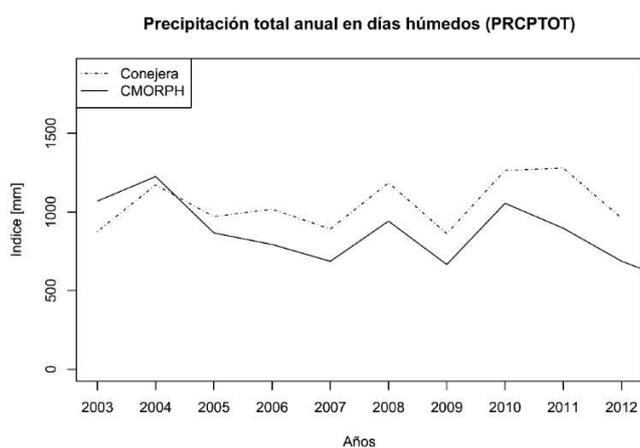


Ilustración 5.41: Comparativa del Índice de precipitación total anual en días húmedos entre las estaciones con resolución temporal de 1 día y CMORPH.

5.4 Corrección del sesgo de CMORPH

Con el uso de Máquinas de Soporte Vectorial (*Supporting Vector Machines, SVM*), en especial el Proceso de Regresión Gaussiana, se realizó la corrección del sesgo del producto satelital mediante dos aproximaciones. La primera, utilizando los valores de profundidad de precipitación de todo el periodo de registro. La segunda aproximación separó dichos valores de manera mensual, de tal forma que el ciclo anual de las precipitaciones se capturara de una mejor manera (i. e. profundidad de la precipitación, y números de días secos y húmedos, para cada mes).

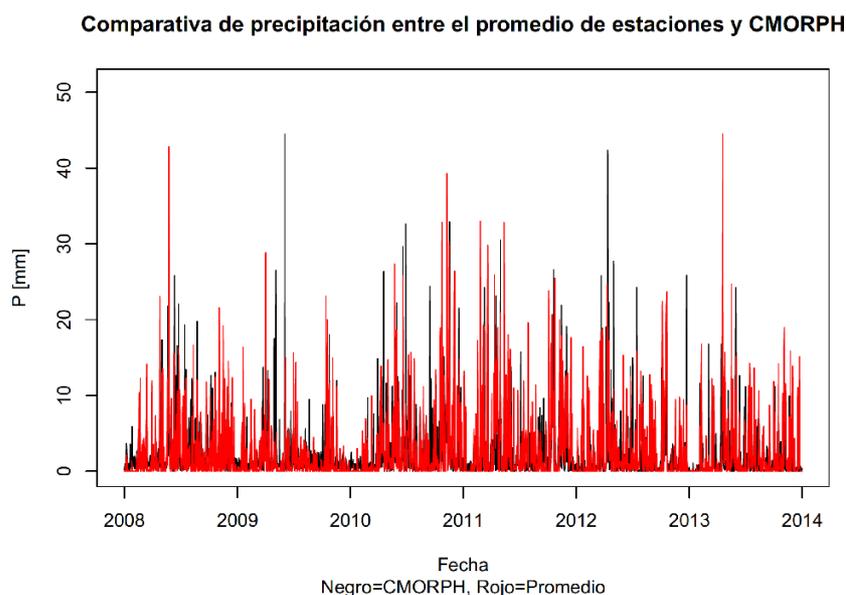


Ilustración 5.42: Comparativa de precipitación entre el promedio diario de las estaciones y el producto CMORPH.

En la Ilustración 5.42 se muestra la comparativa de profundidad diaria de precipitación del promedio de las estaciones obtenido con los valores diarios y el producto satelital CMORPH sin corregir. Se observa que el producto ajusta al valor promedio aunque se debe de realizar una corrección al mismo para obtener un ajuste que concuerde con los valores diarios observados.

5.4.1 Ajuste del sesgo utilizando todo el periodo de registro

En la Ilustración 5.43 se observa la comparativa entre las distribuciones de probabilidad acumulada entre el promedio de los datos observados y el producto satelital corregido con el kernel lineal por medio del Proceso de Regresión Gaussiano. La corrección del producto satelital muestra un buen ajuste a los valores observados, incluyendo a los cuantiles altos los cuales representan los eventos extremos de lluvia.

Para analizar la corrección se realizó la desviación cuadrática media (DCM), primeramente entre los valores observados y el producto sin corregir (DCM observada) y posteriormente, entre los valores observados y el producto satelital corregido (DCM corregida). El valor de la DCM observada es de 26.56, valor mayor que la DCM corregida, el cual es de 16.94; la reducción de este valor muestra un mejor ajuste de CMORPH corregido a los valores observados.

Se observa [Ilustración 5.44] la comparación entre los valores de precipitación observados y el producto satelital CMORPH corregido, se aprecia un mejor ajuste comparado a los valores no corregidos.

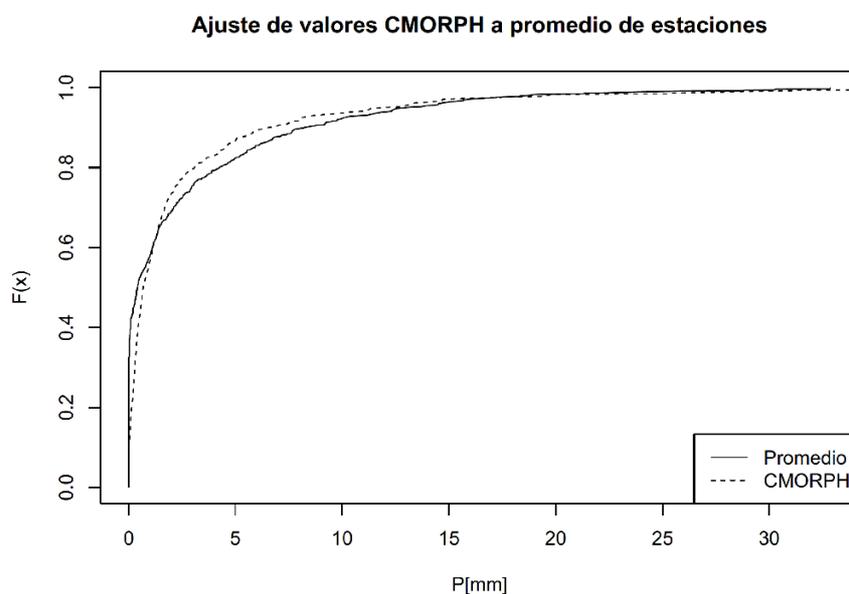


Ilustración 5.43: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido.

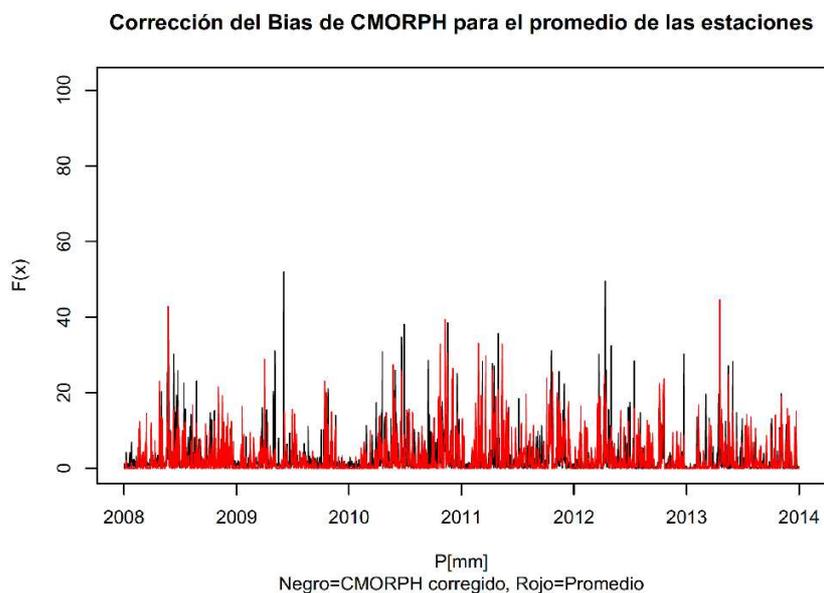


Ilustración 5.44: Comparativa de precipitación entre el promedio diario de las estaciones y el producto CMORPH corregido.

En la Ilustración 5.45 se aprecia en rojo, los valores de precipitación mensual promedio de los años de registro y en negro, se observan dichos valores del producto satelital corregido. Existe una buena correlación en el orden de magnitud de los valores, debido a que la corrección de los datos es a nivel diario. Cuando se grafica a nivel mensual se observa el desvío total del valor de precipitación en los meses.

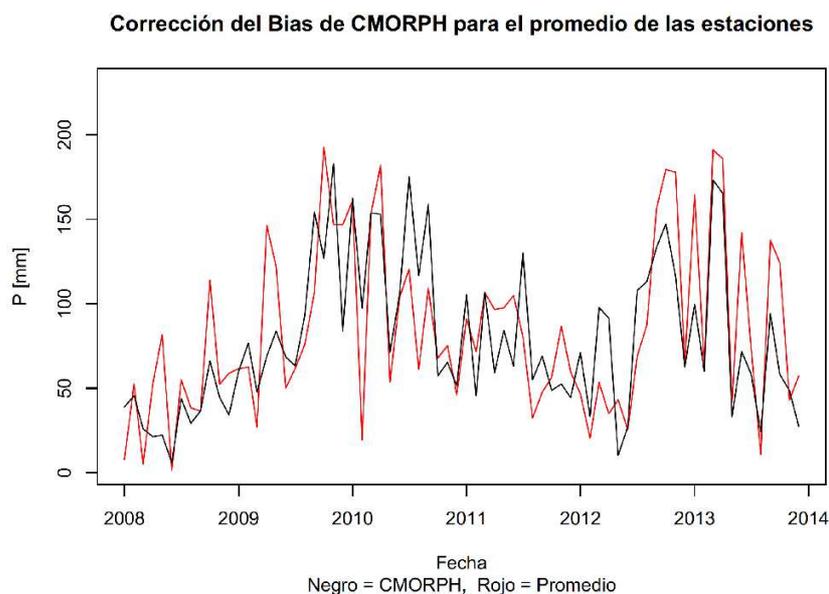


Ilustración 5.45: Comparativa entre la precipitación mensual del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido.

5.4.2 Ajuste del sesgo mensualmente

Se realizó un ajuste separando los valores de manera mensual para tomar en cuenta la estacionalidad de los datos. La corrección del producto satelital presenta un buen ajuste respecto a los datos observados incluyendo los valores de los cuantiles altos, estos, representan los eventos de alta precipitación. En Ilustración 5.46 e Ilustración 5.48 se muestra la comparativa de la fda de los datos observados contra CMORPH no corregido para el mes seco de febrero, y el mes húmedo de noviembre, respectivamente. La Ilustración 5.47 e Ilustración 5.49 presentan la comparativa de la fda de los datos observados contra CMORPH corregido para los meses antes mencionados. Las gráficas de los meses restantes se encuentran en el Anexo 3.

Para comparar la corrección realizada al producto CMORPH, se calculó la desviación cuadrática media (DCM) entre la serie de tiempo observada y CMORPH (DCM observada), y de la misma manera, entre la serie observada y CMORPH corregido (DCM corregida). El valor obtenido para la DCM observada es de 26.56 mm, valor mayor que el obtenido para la DCM corregida, el cual fue de 1.83 mm, se observa que la corrección del producto satelital CMORPH presenta un mejor ajuste respecto a los datos promedio observados de las estaciones analizadas.

Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH

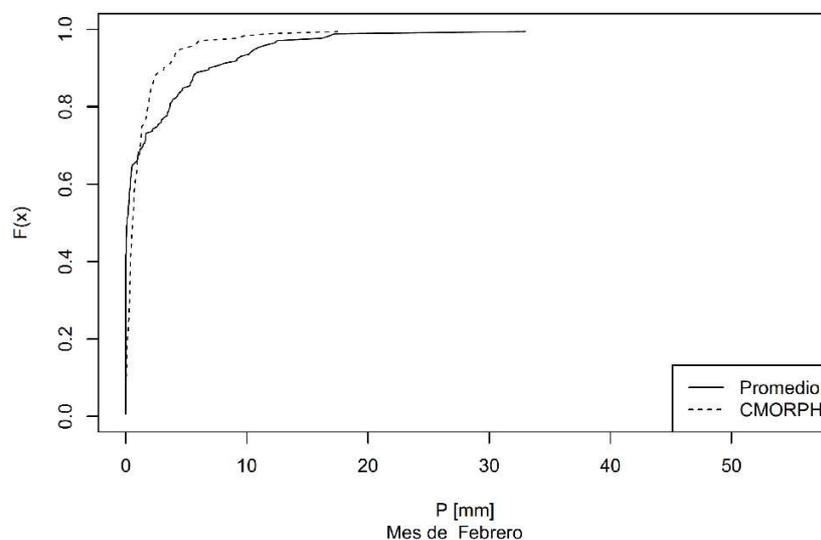


Ilustración 5.46: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH sin corregir en el mes seco de Febrero.

Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH

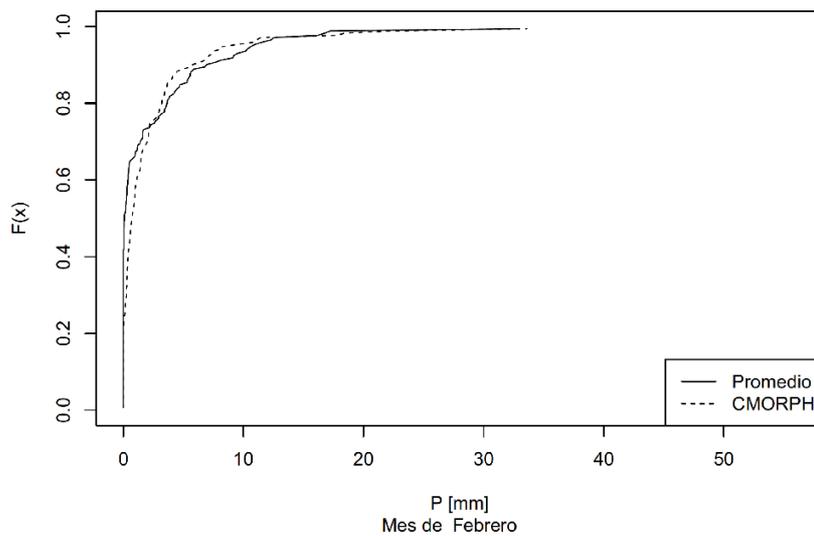


Ilustración 5.47: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido en el mes seco de Febrero.

Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH

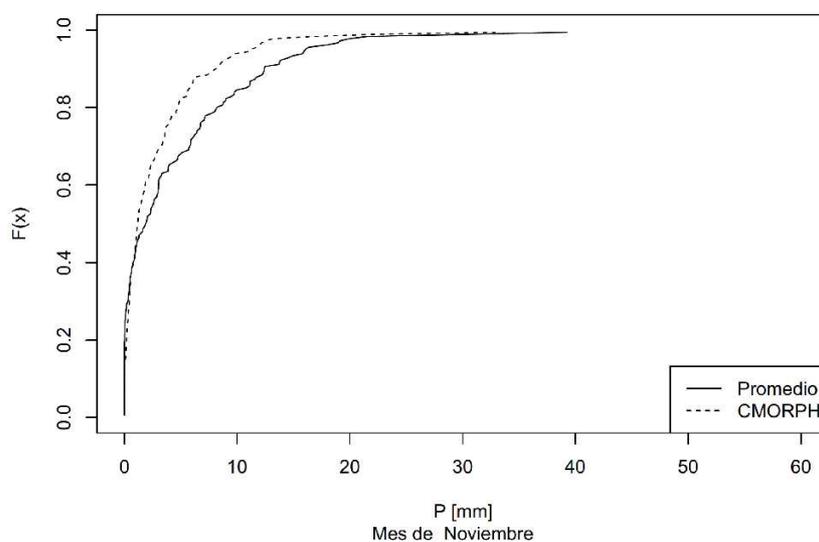


Ilustración 5.48: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH sin corregir en el mes húmedo de Noviembre.

Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH

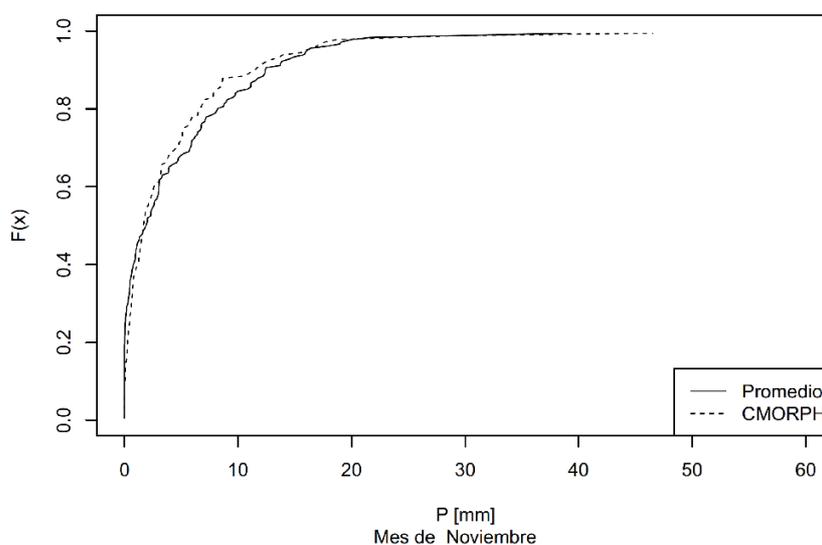


Ilustración 5.49: Comparativa entre la distribución de probabilidad acumulada del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido en el mes húmedo de Noviembre.

En la Ilustración 5.50 se aprecia la comparación entre los valores de precipitación observados y el producto satelital CMORPH corregido. Se aprecia un mejor ajuste comparado al caso anterior de ajuste [Ilustración 5.43].

Corrección del Bias de CMORPH para Promedio

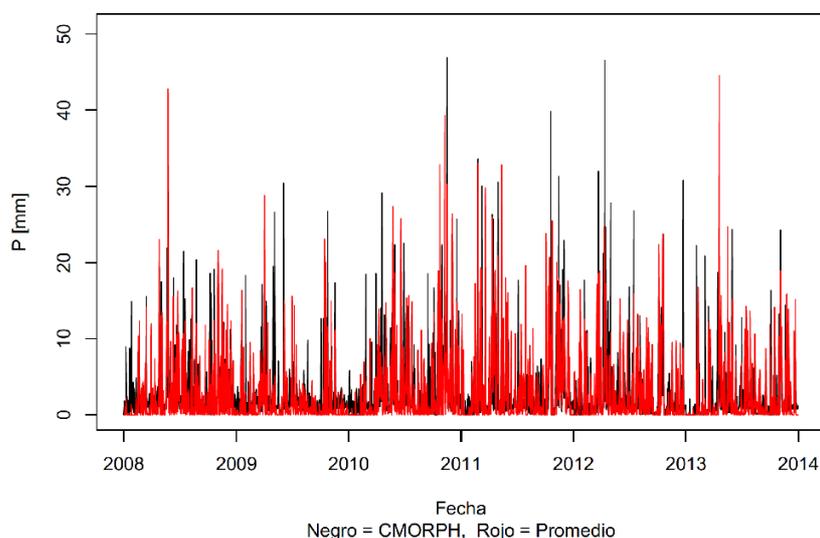


Ilustración 5.50: Comparativa de precipitación entre el promedio diario de las estaciones y el producto CMORPH mensual corregido.

En la Ilustración 5.50 se aprecia en rojo, los valores de precipitación mensual promedio de los años de registro y en negro se observan dichos valores del producto satelital. Existe una buena correlación en el orden de los valores, debido a que la corrección de los datos es a nivel diario, cuando se grafica a nivel mensual se observa el desvío total del valor de precipitación en los meses.

Corrección mensual del Bias de CMORPH para el promedio de las estaciones

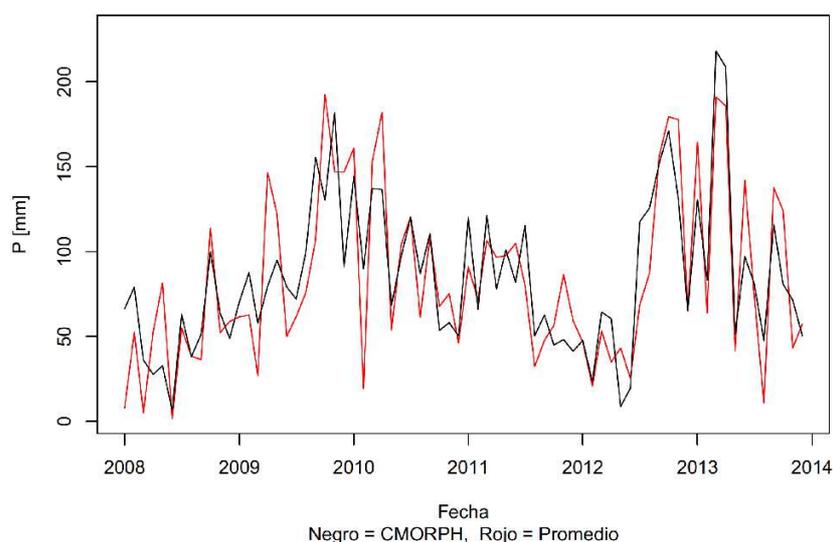


Ilustración 5.51: Comparativa entre la precipitación mensual del promedio de los datos diarios observados y el producto satelital CMORPH corregido.

En la Ilustración 5.51 se observa la comparativa de los valores mensuales de precipitación de los datos observados (rojo) y CMORPH (negro). Se aprecia un mejor ajuste que en el caso anterior, concluyendo que el mejor ajuste es el que toma en cuenta la estacionalidad de los valores ajustados.

Conclusiones

La información satelital es una herramienta útil para la evaluación de la precipitación. La escala temporal de la información de precipitación satelital tiene una resolución temporal más corta comparada con la obtenida mediante estaciones pluviométricas convencionales, las cuales miden la profundidad de precipitación a nivel diario. Las series temporales de satélite ajustadas pueden ser usadas para determinar la duración de eventos pasados en el análisis de inundaciones sin la necesidad de estaciones de alta resolución temporal ubicadas en el área de estudio, problemática frecuentemente encontrada en la práctica.

El escalado de los valores observados muestra consistencia para el área de Bogotá siendo el valor medio -0.697. El escalado generado con los valores máximos de las estaciones es de -0.7170; este posee un desvío de 0.02 respecto a la media de los valores observados. El escalado del promedio de los valores máximos de las duraciones de las estaciones analizadas es de -0.6893, con un desvío de 0.0077. El promedio que mostró menor desvío (0.0043) respecto al escalado medio de los valores observados fue el obtenido del promedio de la precipitación diaria de las estaciones, el cual es de -0.7013.

De los promedios generados, el que mejor ajusta a las curvas IDF a las generadas con los valores del producto satelital CMORPH es el de los valores de precipitación diaria, ya que las duraciones cortas presentan el mismo orden de valores. En los valores generados con el promedio de los valores máximos de profundidad de precipitación y los valores máximos generales de las estaciones, existe un buen ajuste entre las curvas pero a medida que la duración disminuye, las intensidades del producto satelital lo hacen también comparadas con los datos observados.

Los valores generados con el promedio de la precipitación diaria de los datos observados representan la precipitación real promedio en el área de estudio, y no sólo el valor puntual de medición (como lo son las estaciones pluviométricas). Como lo muestra la comparación con el producto CMORPH, los valores muestran la variabilidad de precipitación en el área de estudio.

Los índices calculados indican el ajuste de CMORPH con los datos observados para diferentes magnitudes de precipitación, ya que el sesgo que presenta el producto no es constante para todos los valores de profundidad de precipitación registrados. Se observa que el índice que analiza el comportamiento del producto cuando no se presenta precipitación (Longitud máxima del periodo de sequía) es menor en el caso de CMORPH que respecto a los valores observados, por lo cual este producto registra lluvia cuando no lo hacen las estaciones pluviométricas.

Se observa en los índices que evalúan la precipitación observada entre los cuantiles 0.2 y 0.8 (SDII, Índice de conteo anual mayor a 10 y a 20 mm e Índice de precipitación total anual en días húmedos) que el sesgo del producto es importante, y que el producto subestima los valores observados, debido a que éste reparte menor profundidad de lluvia en más días respecto a los datos observados.

En la comparativa de los índices que muestran los eventos extremos de precipitación (Precipitación máxima mensual, Precipitación máxima mensual en 5 días consecutivos, Precipitación mayor al 95 y al 99 percentil). Se aprecia que el producto ajusta correctamente al

orden de magnitud de los valores observados. Esto es de gran utilidad debido a que si se desea obtener únicamente los valores máximos de precipitación en cada año del registro, el producto satelital CMORPH puede ser utilizado incluso sin corrección, debido a que el producto satelital ajusta correctamente a la cola superior de los valores en la distribución acumulada de probabilidad.

El Proceso Gaussiano de Regresión es una buena aproximación para el ajuste del producto satelital CMORPH. El kernel lineal ha mostrado un buen comportamiento en el proceso de ajuste, sobre todo en los eventos de lluvia fuerte. La corrección mensual del sesgo muestra un buen ajuste debido a que toma en cuenta la estacionalidad en el proceso de corrección, lo que no hace la corrección del sesgo cuando se utiliza toda la serie de datos. Aunque aun así, los eventos de lluvia con baja intensidad son ligeramente sobrestimados.

Otros kernels y funciones pueden aplicarse para reducir el valor de la DCM corregida, como la función gamma multiparámetro que toma en cuenta los ceros de la serie (días sin precipitación) para realizar la corrección de los datos de CMORPH. Este proceso se puede efectuar utilizando la teoría “bootstrapping” para localizar los intervalos de los distintos parámetros gamma y de esta manera, determinar la función de mejor ajuste para corregir el producto de precipitación satelital CMORPH.

Anexo 1: Máxima profundidad de precipitación por estación

Las profundidades de precipitación para todas las estaciones están dadas en milímetros y la duración en minutos.

Estación San Benito

año	max_	max_dur						
8	9.7	9.7	11.6	11.6	13.5	13.5	15.8	16.2
9	4.6	7.5	9.3	11.1	12.7	13.6	15.9	20.3
10	11	14.4	17.7	20.1	20.7	20.9	21.2	27.9
11	8.8	8.8	15.9	15.9	20	20	25.1	29.3
12	4.3	8.1	11.3	13.5	15.3	16.2	20.1	21.3
13	5.2	9.4	12.7	15.4	16.8	18.6	28.7	33.7
año	max_	max_dur						
8	21.8	26.7	26.7	31.0	37.7	37.8	45.0	50.3
9	22.0	26.8	27.6	27.6	27.6	28.2	32.5	33.1
10	28.0	28.8	29.2	34.3	34.5	37.4	50.8	56.9
11	30.6	34.9	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	45.1
12	24.0	26.4	28.2	34.2	37.3	37.8	37.8	37.8
13	36.5	38.6	40.9	49.3	52.1	53.2	53.9	58.3
año	max_	max_dur						
8	56.5	59.4	60.0	70.3	75.3	81.9	84.8	86.1
9	33.2	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4
10	64.0	64.1	64.1	64.2	65.2	65.3	66.2	68.1
11	54.5	54.9	54.9	54.9	55.0	55.0	55.0	55.2
12	44.1	52.4	59.9	66.7	67.2	67.7	68.2	68.2
13	62.4	65.5	65.5	66.9	70.0	70.0	70.0	76.8
año	max_	max_dur						
8	86.1	89.2	91.0	91.1	98.5	101.7	104.7	104.7
9	33.4	33.4	33.4	33.8	33.8	33.8	34.5	34.6
10	69.7	69.8	70.3	70.3	71.1	71.2	71.5	73.9
11	55.2	55.2	55.2	55.2	63.8	63.9	63.9	67.2
12	73.7	73.9	74.0	74.7	77.3	77.3	78.0	79.9
13	76.8	76.8	76.8	76.8	76.9	76.9	76.9	77.3

Estación Juan Rey

año	max_	max_dur						
8	8.6	8.6	14.4	14.1	22.5	22.5	29.5	30.3
9	8.8	8.8	11.1	11.1	12.1	12.1	15.1	21.9
10	6.3	11.4	15.6	18.9	22.6	27.7	44.3	47.4
11	5.5	10.6	13.9	17.8	19.0	19.6	27.3	36.5
12	5.9	10.6	13.9	17.0	19.7	21.1	26.4	32.4
13	3.5	6.6	8.6	10.6	12.8	15.7	22.7	26.4
año	max_	max_dur						
8	31.2	34.5	34.6	34.6	34.6	34.7	49.1	52.8
9	27.4	34.7	39.2	39.3	39.3	39.9	39.5	39.6
10	47.8	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6
11	38.2	38.4	38.4	38.4	38.4	40.1	42.1	49.9
12	35.0	36.3	36.8	39.2	39.7	56.0	58.1	58.2
13	27.3	27.6	37.4	41.1	42.4	48.4	48.9	49.2
año	max_	max_dur						
8	53.8	55.1	61.3	66.5	67.2	67.3	67.6	67.6
9	39.6	39.6	48.5	48.5	48.8	48.8	58.3	58.3
10	51.0	51.5	51.8	51.8	52.3	56.1	57.0	59.8
11	57.7	63.2	63.2	63.2	64.5	66.0	66.0	66.2
12	59.0	59.0	63.6	70.6	84.3	85.8	97.0	101.6
13	54.1	58.1	67.8	72.8	76.9	78.3	80.4	82.9
año	max_	max_dur						
8	67.6	68.1	70.8	72.4	75.9	76.0	76.3	81.9
9	58.5	58.6	62.5	62.5	65.6	67.1	67.2	67.3
10	65.4	68.4	68.5	69.2	71.7	79.2	79.4	79.4
11	66.4	66.4	67.2	67.2	68.1	69.9	71.8	71.8
12	107.4	109.1	119.5	122.0	122.1	122.2	125.8	133.2
13	82.9	82.9	82.9	98.8	104.2	104.5	104.5	105.9

Estación Moralba

año	max_	max_dur						
10	8.5	15.9	21.6	26.1	29.5	31.7	37.3	38.6
11	7.7	13.1	20.2	24.0	26.7	28.5	42.8	54.2
12	10	17.7	23.9	28.8	32.0	33.2	36.4	37.5
13	6.6	8.4	9.8	10.6	12.2	14.5	20.2	25.4
año	max_	max_dur						
10	39.1	44.6	56.0	60.4	62.7	62.7	62.7	63.0
11	55.9	55.9	55.9	55.9	55.9	56.5	58.6	63.5
12	41.2	41.8	42.3	42.5	42.5	57.6	60.2	60.2
13	25.4	29.3	32.0	33.7	46.0	50.7	53.8	58.7
año	max_	max_dur						
10	63.0	66.1	67.9	72.0	75.6	75.9	75.9	82.7
11	66.5	69.0	72.6	72.6	72.6	72.6	75.4	75.6
12	60.4	60.4	63.8	72.5	80.4	82.5	92.1	97.7
13	68.6	78.3	78.4	78.5	89.4	93.6	93.7	97.6
año	max_	max_dur						
10	82.8	84.3	85.8	94.0	96.6	96.7	97.0	104.6
11	75.6	75.6	75.6	75.6	77.1	78.8	80.2	84.6
12	101.2	102.7	115.4	118.4	118.4	118.5	122.3	132.2
13	97.6	97.6	97.6	98.8	106.5	113.2	113.2	116.4

Promedio de estaciones

Valor promediado a nivel diario de las estaciones analizadas

año	max_	max_dur						
8	4.9	4.9	7.2	7.2	11.3	11.3	14.8	15.2
9	4.4	4.4	5.6	5.7	6.5	7.4	11.0	17.5
10	4.5	8.2	11.4	14.2	16.9	19.2	26.0	30.8
11	3.7	7.0	9.3	11.3	13.0	14.0	23.1	31.0
12	3.3	5.9	8.2	10.4	12.3	13.8	19.1	24.7
13	3.2	4.0	5.1	6.3	7.2	8.1	13.3	14.9
año	max_	max_dur						
8	19.3	24.6	24.8	25.1	34.6	35.4	36.9	44.4
9	21.1	27.1	29.7	30.0	30.0	30.0	30.1	30.2
10	31.5	32.8	34.4	39.3	41.7	41.7	41.7	41.8
11	32.9	32.9	32.9	32.9	32.9	33.4	35.6	40.4
12	28.0	28.8	29.4	29.5	29.7	40.9	43.1	43.2
13	17.1	20.9	24.3	34.3	40.5	44.1	44.7	48.9
año	max_	max_dur						
8	54.2	57.3	60.4	62.3	66.1	69.6	72.6	74.1
9	31.3	31.4	34.6	34.6	34.8	35.2	41.3	41.5
10	43.2	44.1	45.3	49.4	52.6	52.7	52.8	59.5
11	47.0	48.9	52.5	56.4	56.6	56.7	57.7	57.7
12	43.6	46.1	54.1	58.9	62.7	67.5	74.5	78.5
13	60.6	66.5	66.6	70.4	77.9	80.6	80.7	85.8
año	max_	max_dur						
8	76.3	76.5	76.6	78.9	84.5	87.4	90.2	93.3
9	41.6	41.6	43.5	43.6	48.7	48.9	49.0	49.0
10	59.6	59.7	63.7	66.9	69.9	72.2	72.5	72.6
11	57.7	57.8	59.9	60.0	60.0	61.3	64.6	66.0
12	82.4	84.0	91.6	94.0	94.1	94.2	97.7	105.0
13	85.8	85.8	85.8	86.5	93.4	98.2	98.2	99.4

Valor máximo de estaciones

Valores promediados obtenidos de los valores máximos de las estaciones analizadas

año	max_dur_5	max_dur_10	max_dur_15	max_dur_20	max_dur_25	max_dur_30	max_dur_60	max_dur_120
8	9.7	9.7	14.4	14.4	22.5	22.5	29.5	30.3
9	8.8	8.8	11.1	11.1	12.7	13.6	15.9	21.9
10	11.0	15.9	21.6	26.1	29.5	31.7	44.3	47.4
11	8.8	13.1	20.2	24	26.7	28.5	42.8	54.2
12	10.0	17.7	23.9	28.8	32.0	33.2	36.4	37.5
13	6.6	9.4	12.7	15.4	16.8	18.6	28.7	33.7
año	max_dur_180	max_dur_360	max_dur_540	max_dur_720	max_dur_900	max_dur_1080	max_dur_1260	max_dur_1440
8	31.2	34.5	34.6	34.6	37.7	37.8	49.1	52.8
9	27.4	34.7	39.2	39.3	39.3	39.3	39.5	39.6
10	47.8	48.6	56.0	60.4	62.7	62.7	62.7	63.0
11	55.9	55.9	55.9	55.9	55.9	56.5	58.6	63.5
12	41.2	41.8	42.3	42.5	42.5	57.6	60.2	60.2
13	36.5	38.6	40.9	49.3	52.1	53.2	53.9	58.7
año	max_dur_1800	max_dur_2160	max_dur_2520	max_dur_2880	max_dur_3240	max_dur_3600	max_dur_3960	max_dur_4320
8	56.5	59.4	61.3	70.3	75.3	81.9	84.8	86.1
9	39.6	39.6	48.5	48.5	48.8	48.8	58.3	58.3
10	64.0	66.1	67.9	72.0	75.6	75.9	75.9	82.7
11	66.5	69.0	72.6	72.6	72.6	72.6	75.4	75.6
12	60.4	60.4	63.8	72.5	84.3	85.8	97.0	101.6
13	68.6	78.3	78.4	78.5	89.4	93.6	93.7	97.6
año	max_dur_4680	max_dur_5040	max_dur_5400	max_dur_5760	max_dur_6120	max_dur_6480	max_dur_6840	max_dur_7200
8	86.1	89.2	91.0	91.1	98.5	101.7	104.7	104.7
9	58.5	58.6	62.5	62.5	65.6	67.1	67.2	67.3
10	82.8	84.3	85.8	94.0	96.6	96.7	97.0	104.6
11	75.6	75.6	75.6	75.6	77.1	78.8	80.2	84.6
12	107.4	109.1	119.5	122.0	122.1	122.2	125.8	133.2
13	97.6	97.6	97.6	98.8	106.5	113.2	113.2	116.4

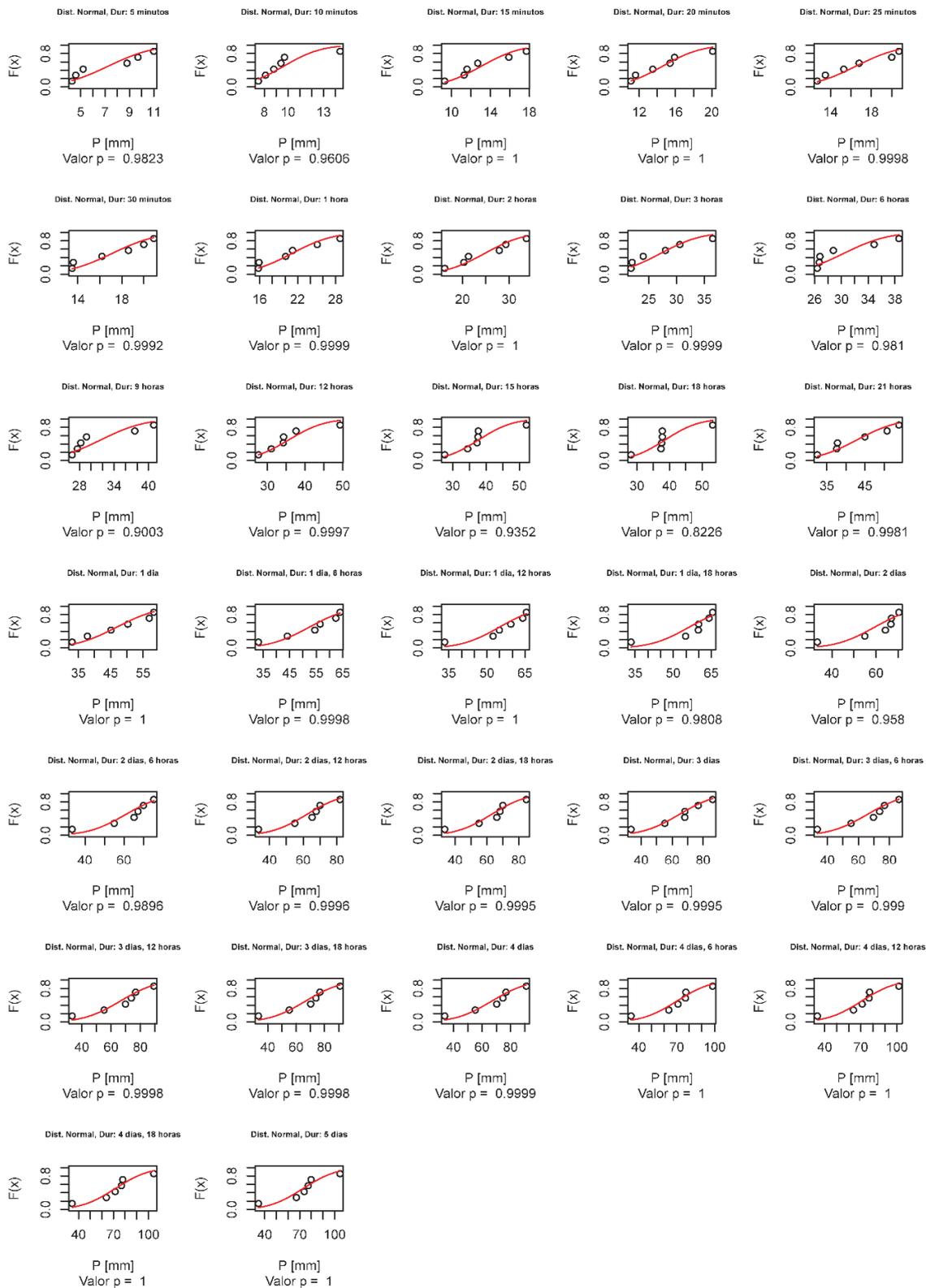
Serie de CMORPH en Colombia

año	dur_180	dur_360	dur_540	dur_720	dur_900	dur_1080	dur_1260	dur_1440
3	20.7	28.6	29.8	29.8	30.1	33.1	36.8	37.0
4	23.0	31.3	32.8	33.9	34.2	34.4	35.0	35.7
5	27.3	43.9	54.7	61.4	63.7	63.9	64.2	65.0
6	20.4	22.3	22.9	22.9	23.0	23.0	23.2	24.2
7	10.5	15.6	16.9	17.4	17.8	17.8	22.0	22.4
8	12.4	23.6	25.6	26.8	27.1	28.5	28.7	29.2
9	36.2	39.6	41.6	43.3	43.7	43.9	44.3	44.6
10	17.2	30.7	31.9	32.3	34.8	35.4	38.8	39.6
11	13.3	25.4	29.2	29.7	30.0	30.0	30.3	30.5
12	12.0	20.1	26.2	34.7	40.3	41.2	41.8	42.4
13	13.9	24.0	27.6	27.8	27.8	27.8	27.8	28.0
14	10.3	12.3	16.3	17.7	17.8	17.9	17.9	18.0
año	dur_1800	dur_2160	dur_2520	dur_2880	dur_3240	dur_3600	dur_3960	dur_4320
3	37.9	38.0	38.6	38.8	41.3	47.4	51.3	52.2
4	36.8	41.5	43.7	45.7	49.1	50.3	56.5	61.9
5	67.0	68.7	75.2	75.3	76.8	77.4	77.4	77.7
6	25.1	30.4	34.4	34.9	37.6	38.1	40.7	41.5
7	22.9	22.9	26.5	27.4	27.4	28.2	28.2	28.5
8	36.6	41.8	44.1	44.8	44.9	45.0	47.0	47.8
9	44.8	44.8	45.6	45.8	45.8	45.8	46.3	46.5
10	43.7	44.2	45.5	45.5	47.8	51.6	53.2	57.3
11	33.9	35.0	35.0	36.9	39.1	42.0	47.0	51.2
12	43.2	43.4	44.4	45.3	48.5	49.2	50.1	50.2
13	28.0	28.0	28.0	32.3	34.7	34.9	35.3	36.2
14	18.0	18.0	19.4	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
año	dur_4680	dur_5040	dur_5400	dur_5760	dur_6120	dur_6480	dur_6840	dur_7200
3	52.4	52.5	54.4	58.7	59.2	59.8	60.3	60.4
4	65.7	66.5	70.7	71.8	73.2	74.0	74.6	75.4
5	78.2	79.2	80.4	80.8	86.2	88.7	89.8	91.8
6	42.3	43.8	47.7	48.4	50.9	51.5	51.6	52.0
7	28.7	29.3	29.8	30.5	33.6	34.2	34.3	34.6
8	49.5	49.7	49.9	53.0	55.3	65.6	71.0	73.4
9	46.5	47.2	48.3	49.0	49.6	49.9	50.0	58.4
10	58.0	58.1	58.8	59.0	60.5	60.6	60.6	62.0
11	54.5	54.5	54.5	57.6	60.8	60.8	63.2	67.4
12	56.9	58.6	63.6	68.3	69.2	69.2	72.5	73.5
13	36.2	36.4	38.4	38.4	38.4	38.6	38.9	39.3
14	20.5	21.3	21.4	21.4	22.9	23.9	24.1	24.1

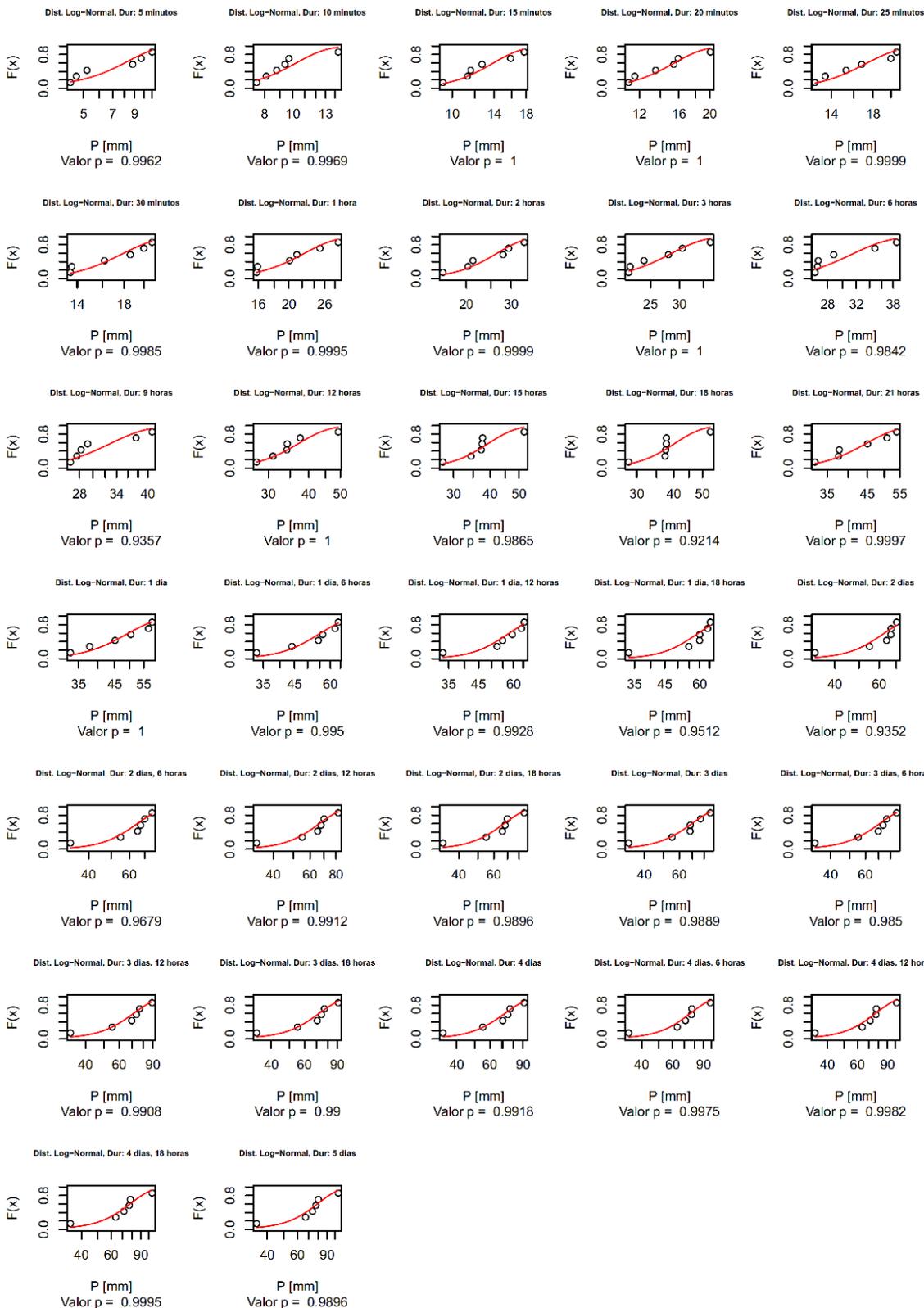
Anexo 2: Ajuste de distribución de probabilidad para estaciones y análisis de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov

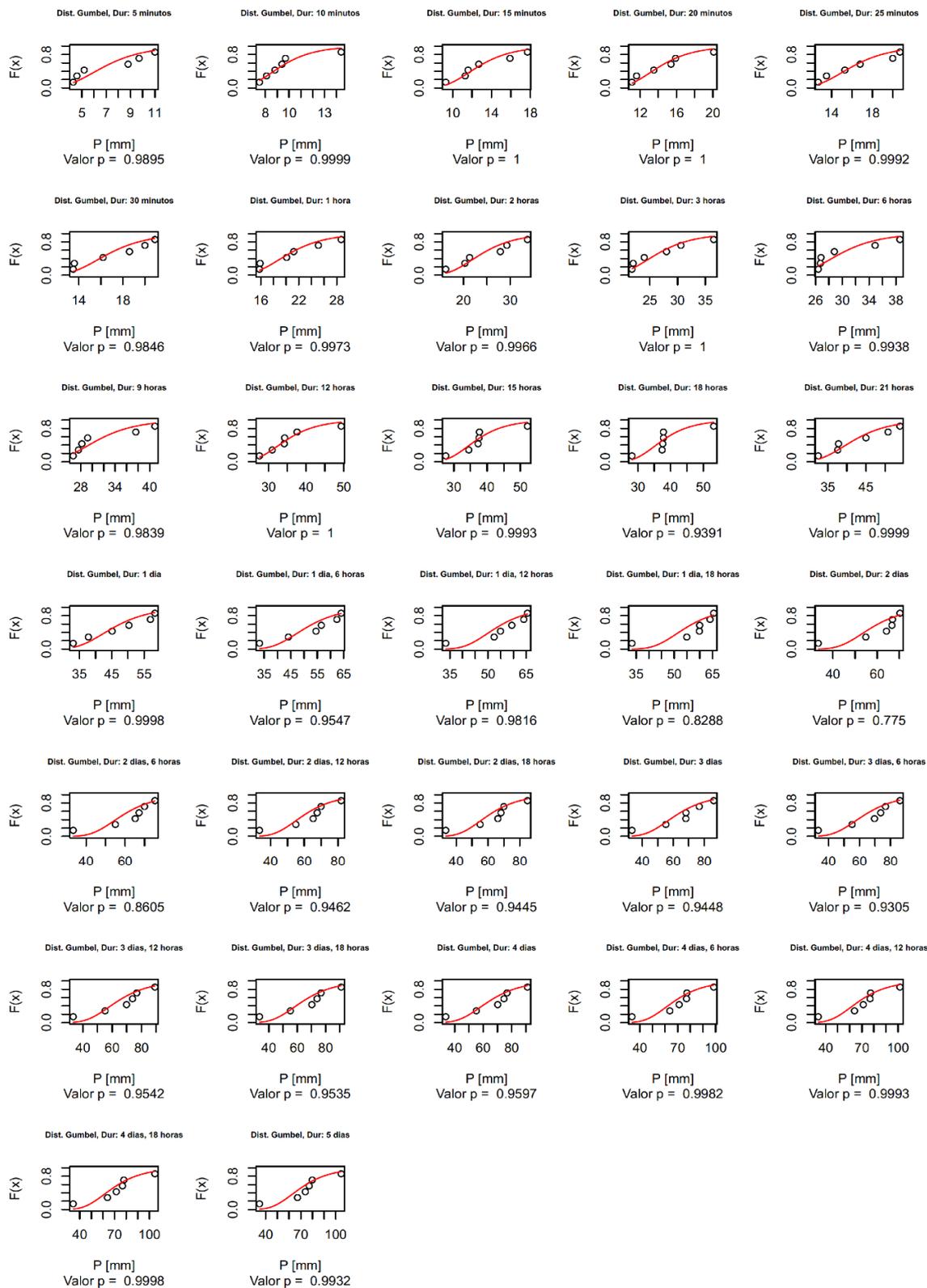
Ajustes de probabilidad
Normal Log normal, Weibull y Gumbel
y prueba de bondad
Smirnov – Kolmogorov
para la estación
San Benito

Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH

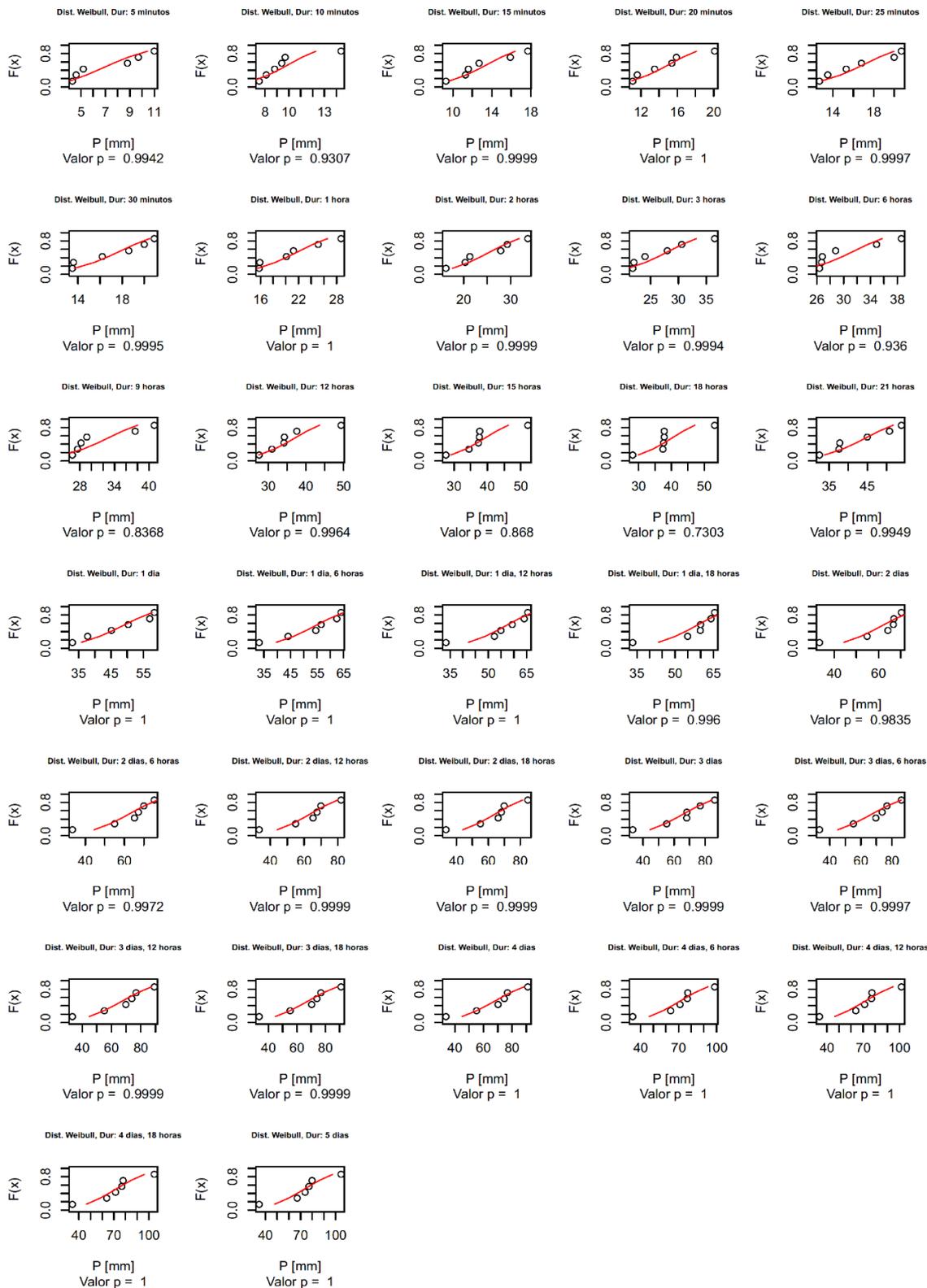


Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH



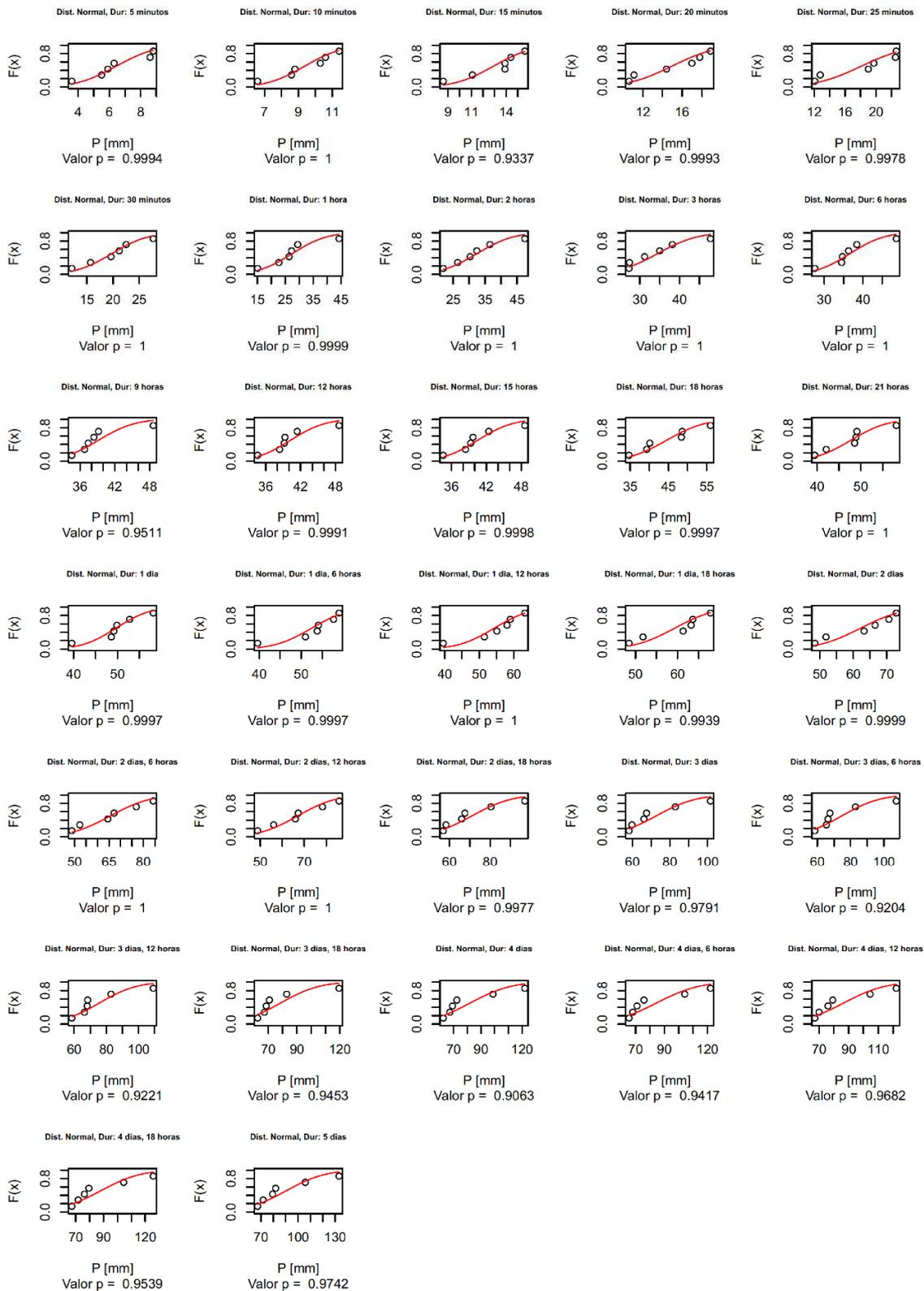


Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH

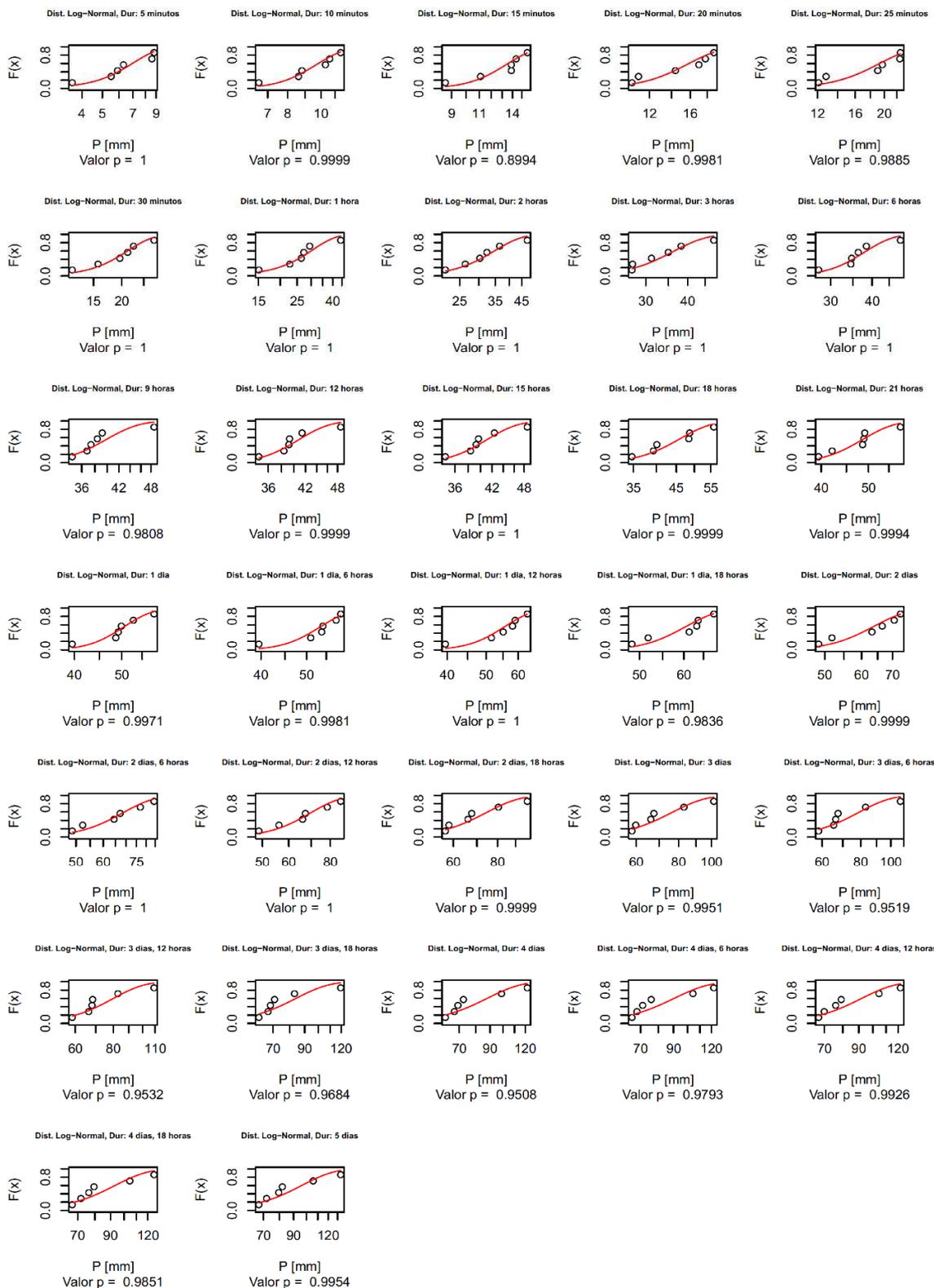


Ajustes de probabilidad
Normal Log normal, Weibull y Gumbel
y prueba de bondad
Smirnov – Kolmogorov
para la estación
Juan Rey

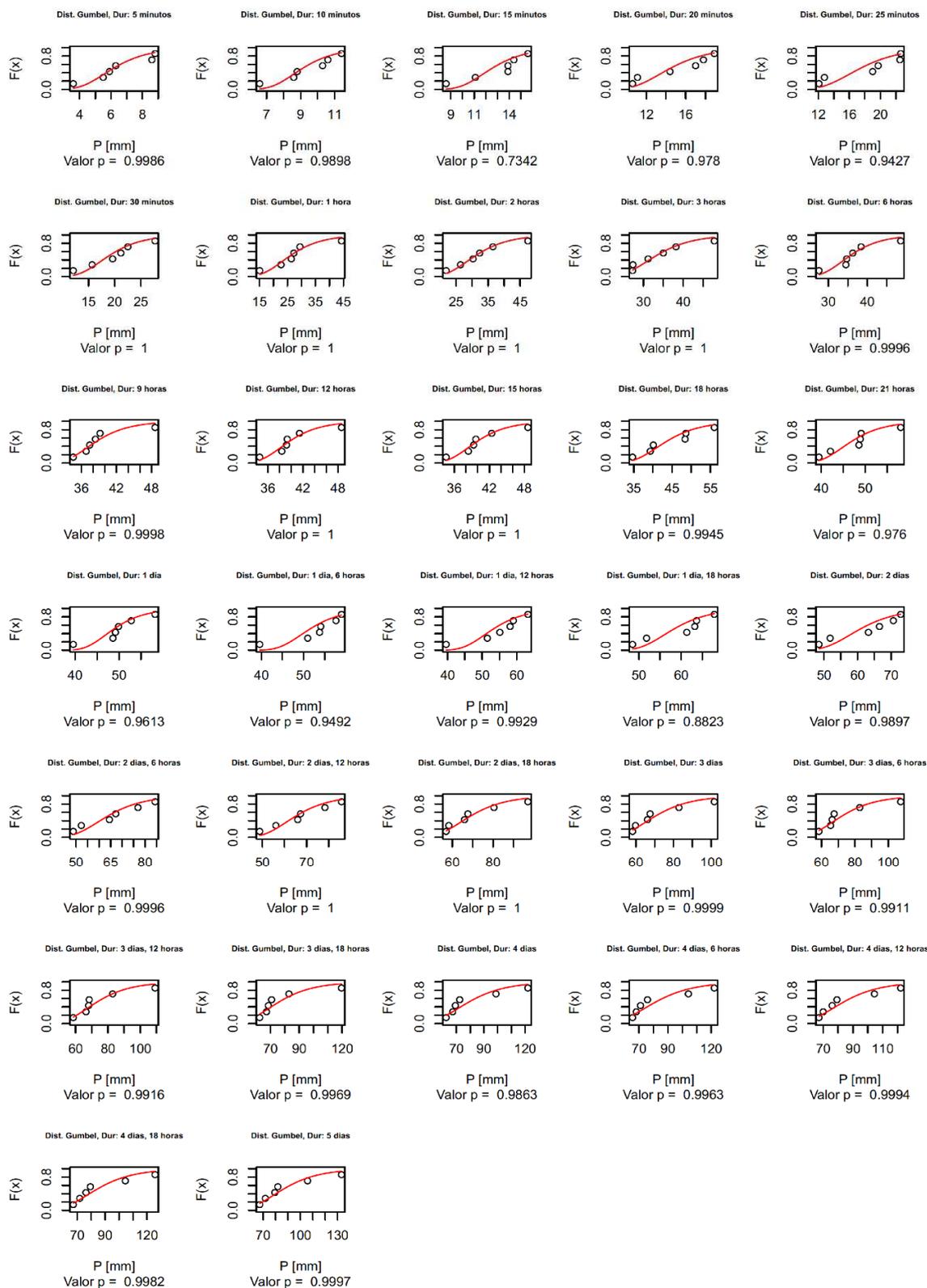
Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH



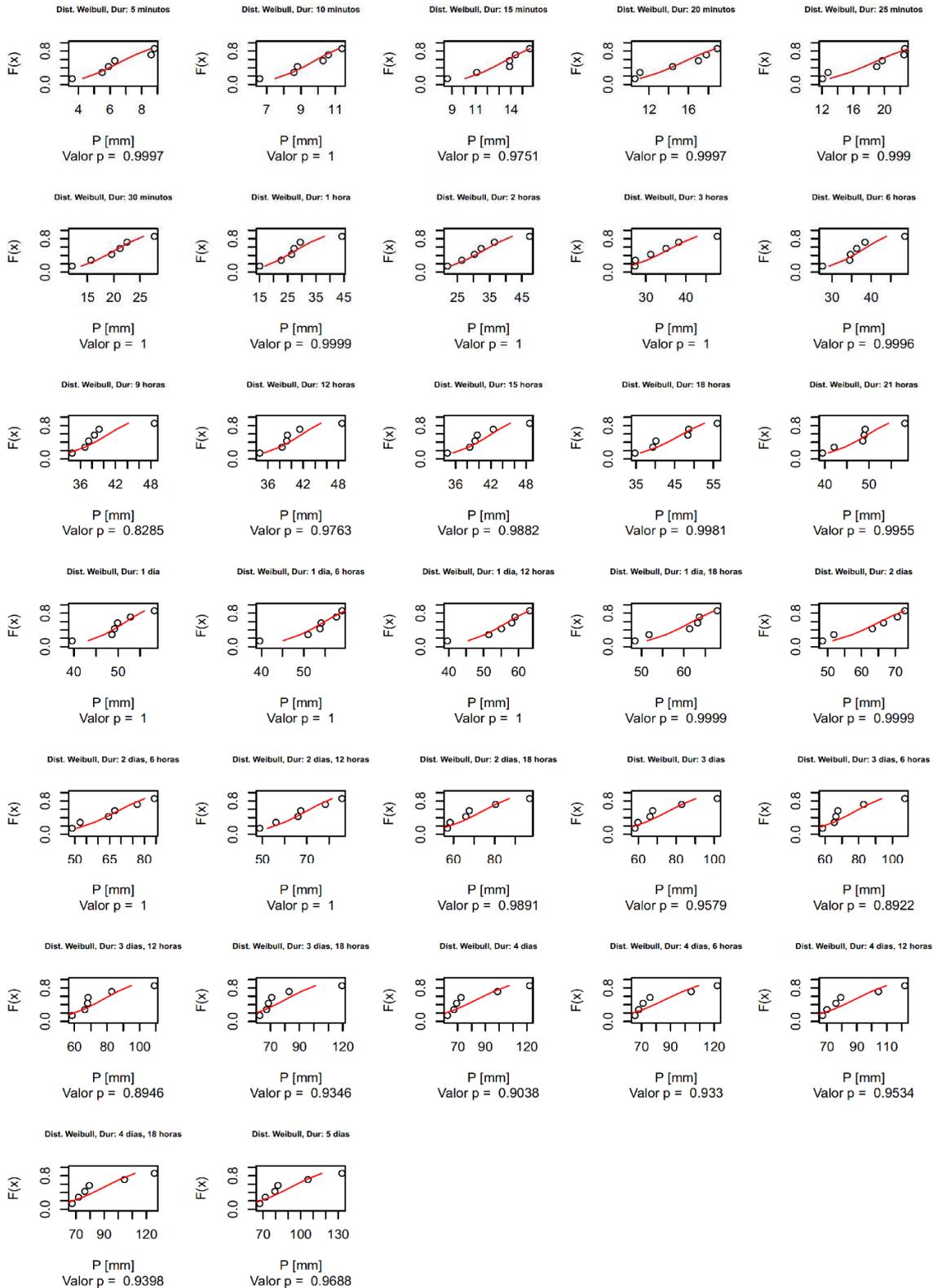
Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH



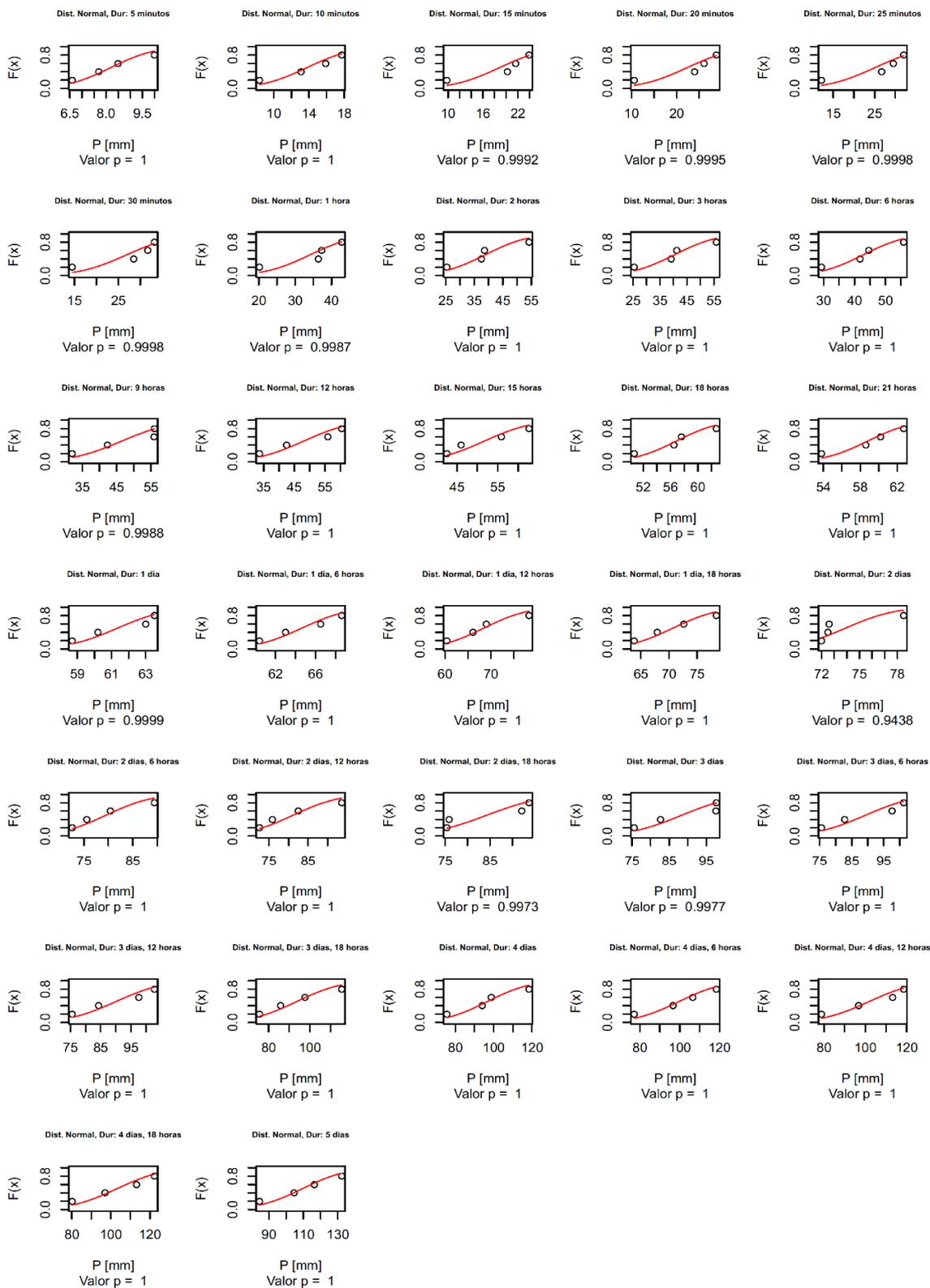
Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH

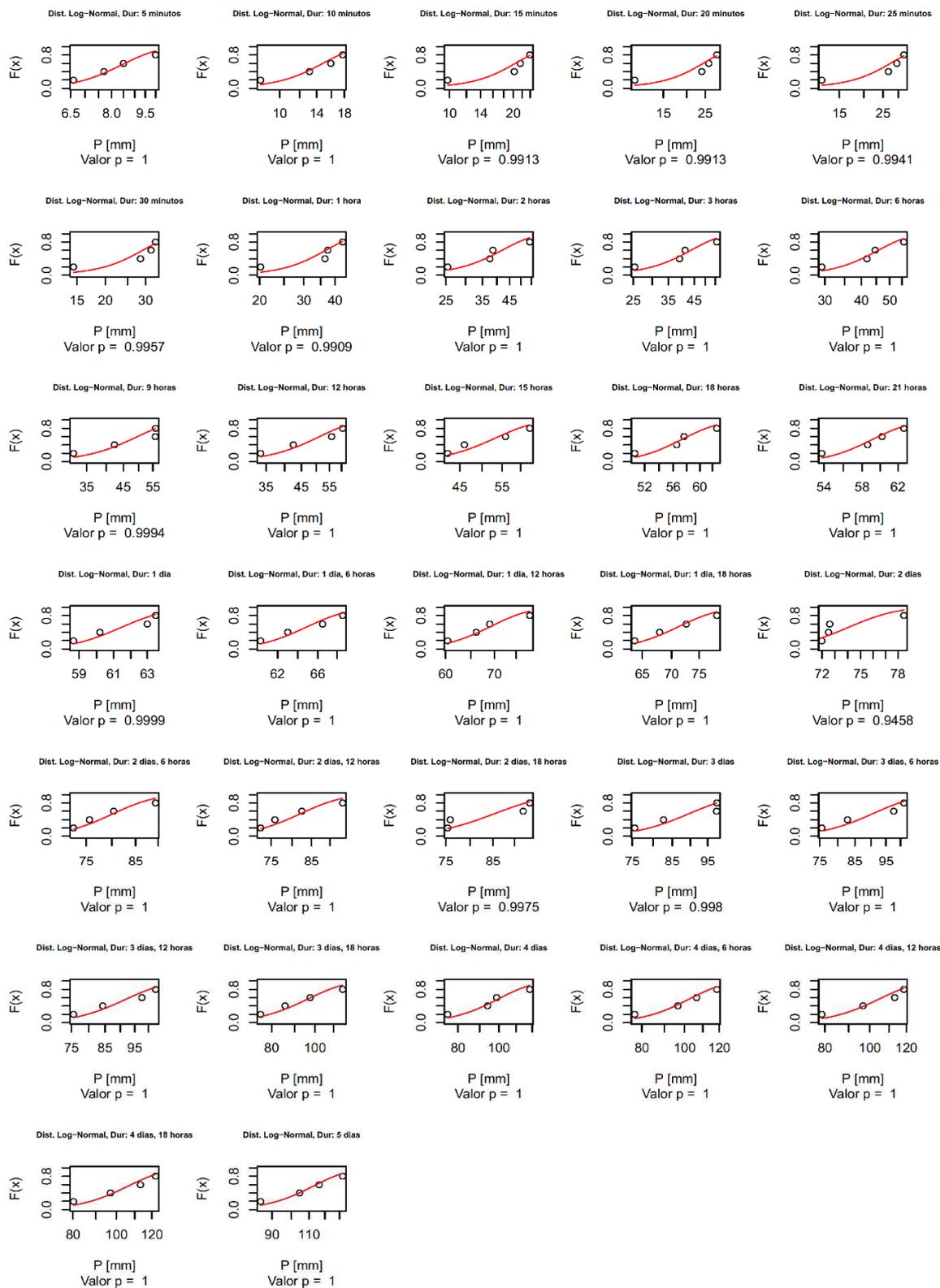


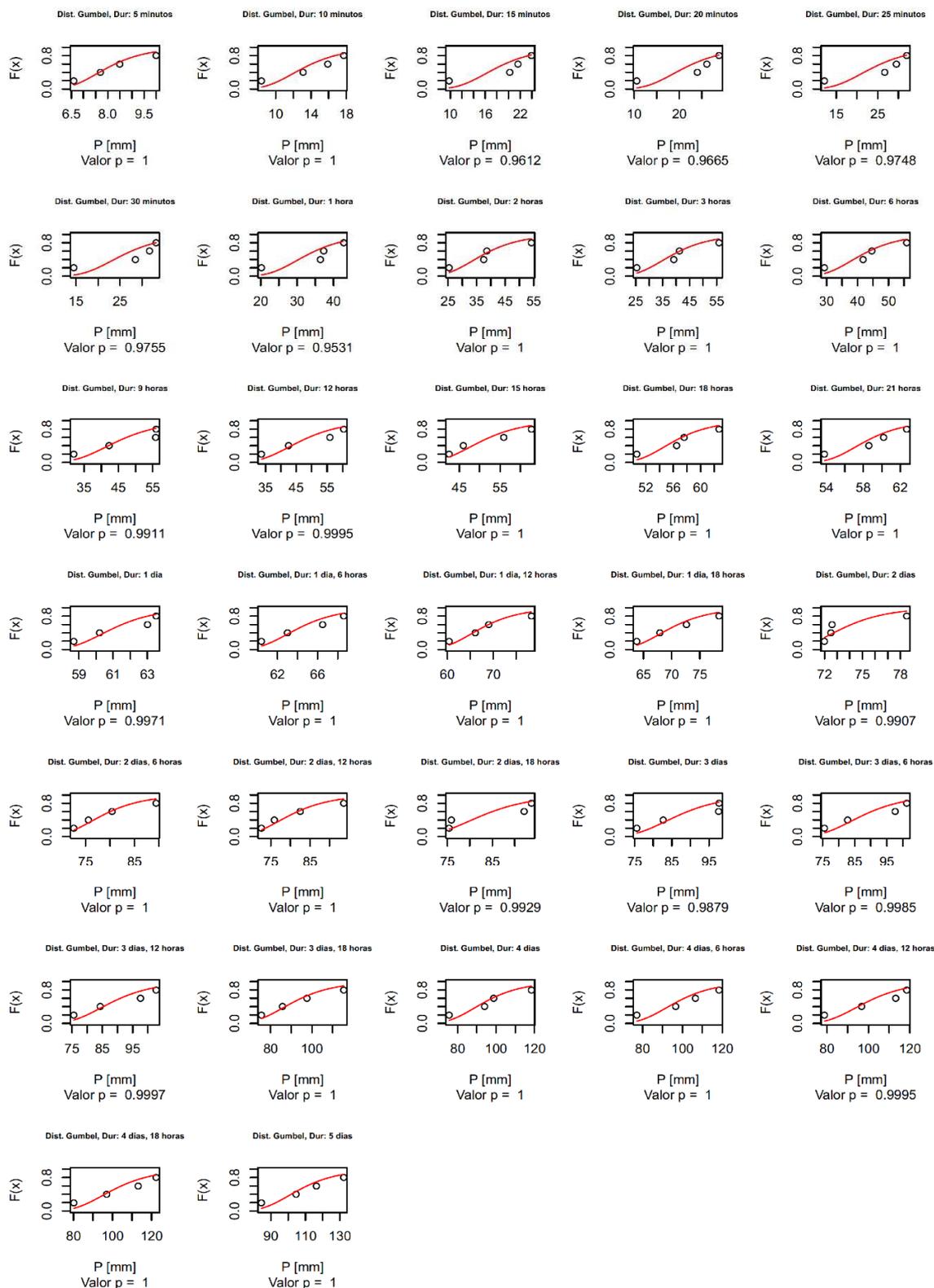
Ajuste de curvas Intensidad – Duración - Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH

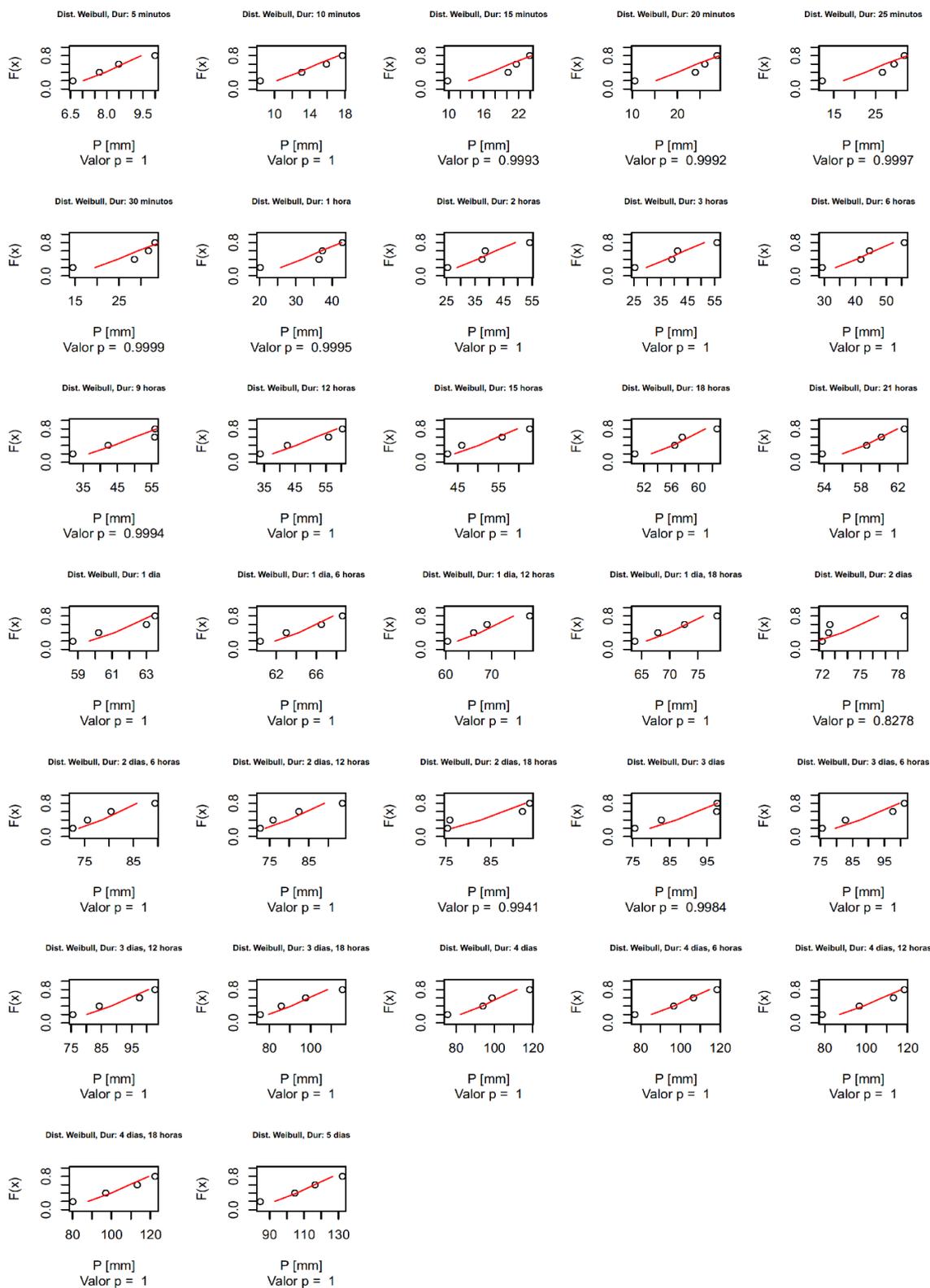


Ajustes de probabilidad
Normal Log normal, Weibull y Gumbel
y prueba de bondad
Smirnov – Kolmogorov
para la estación
Moralba

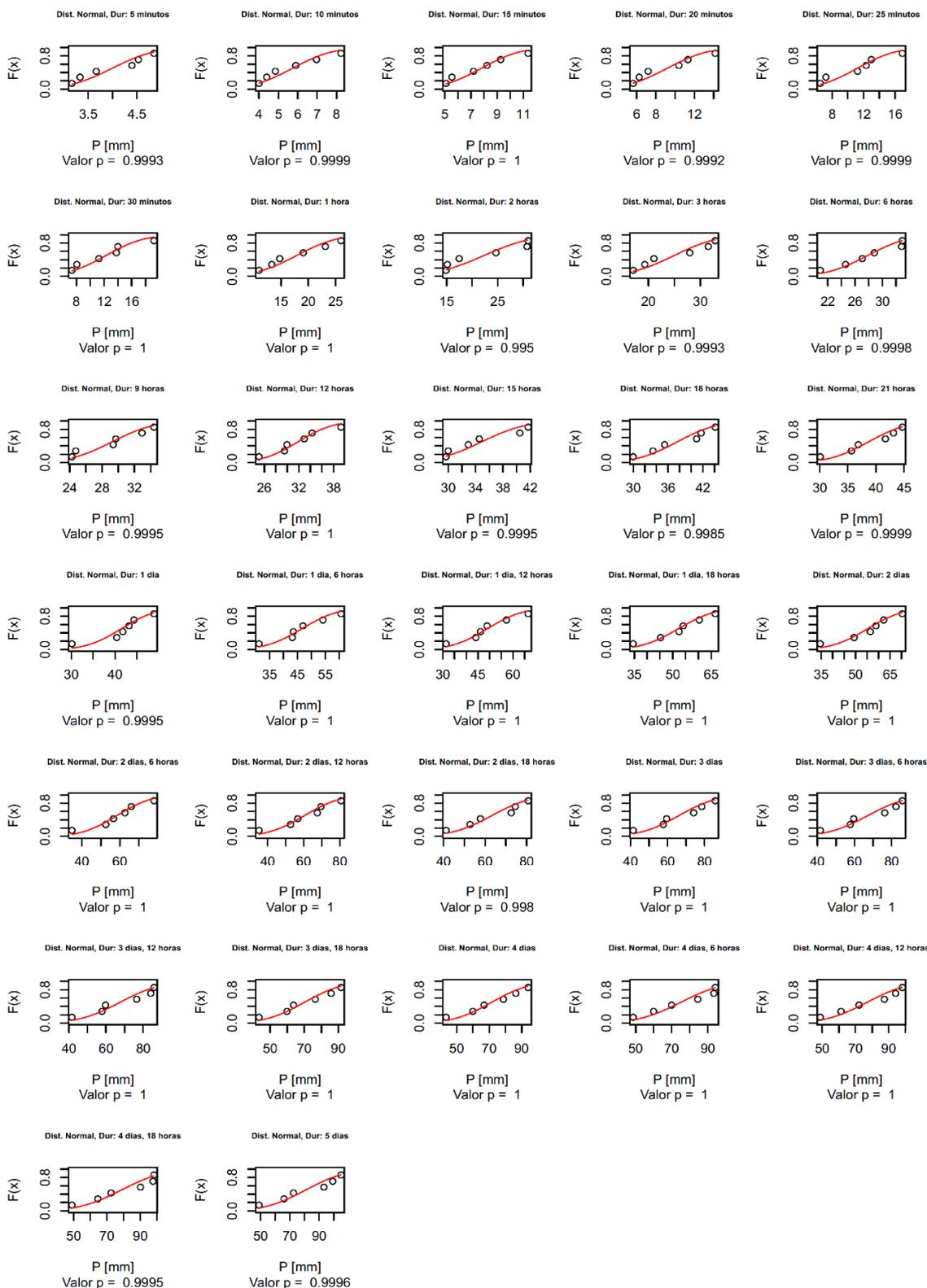




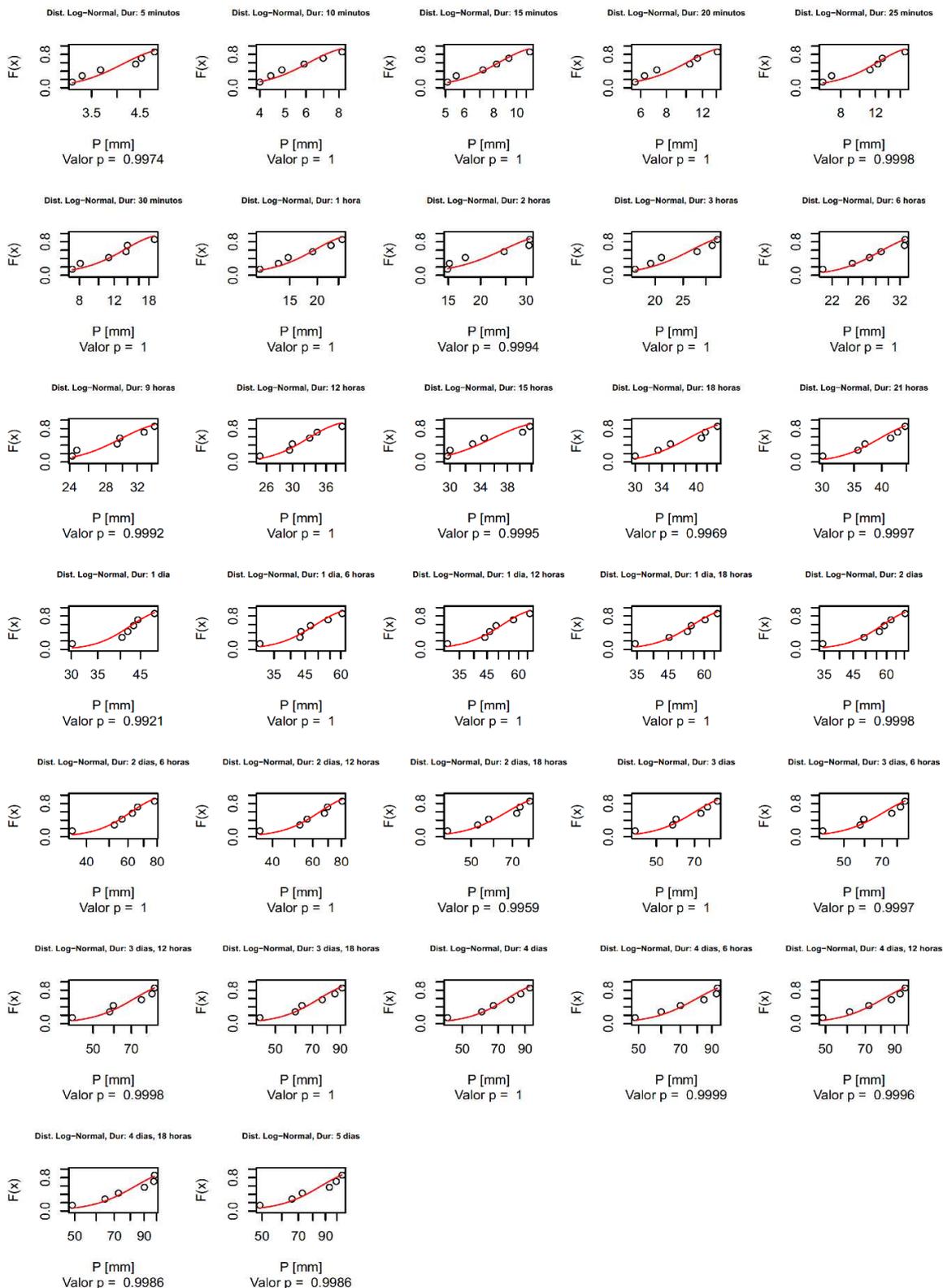


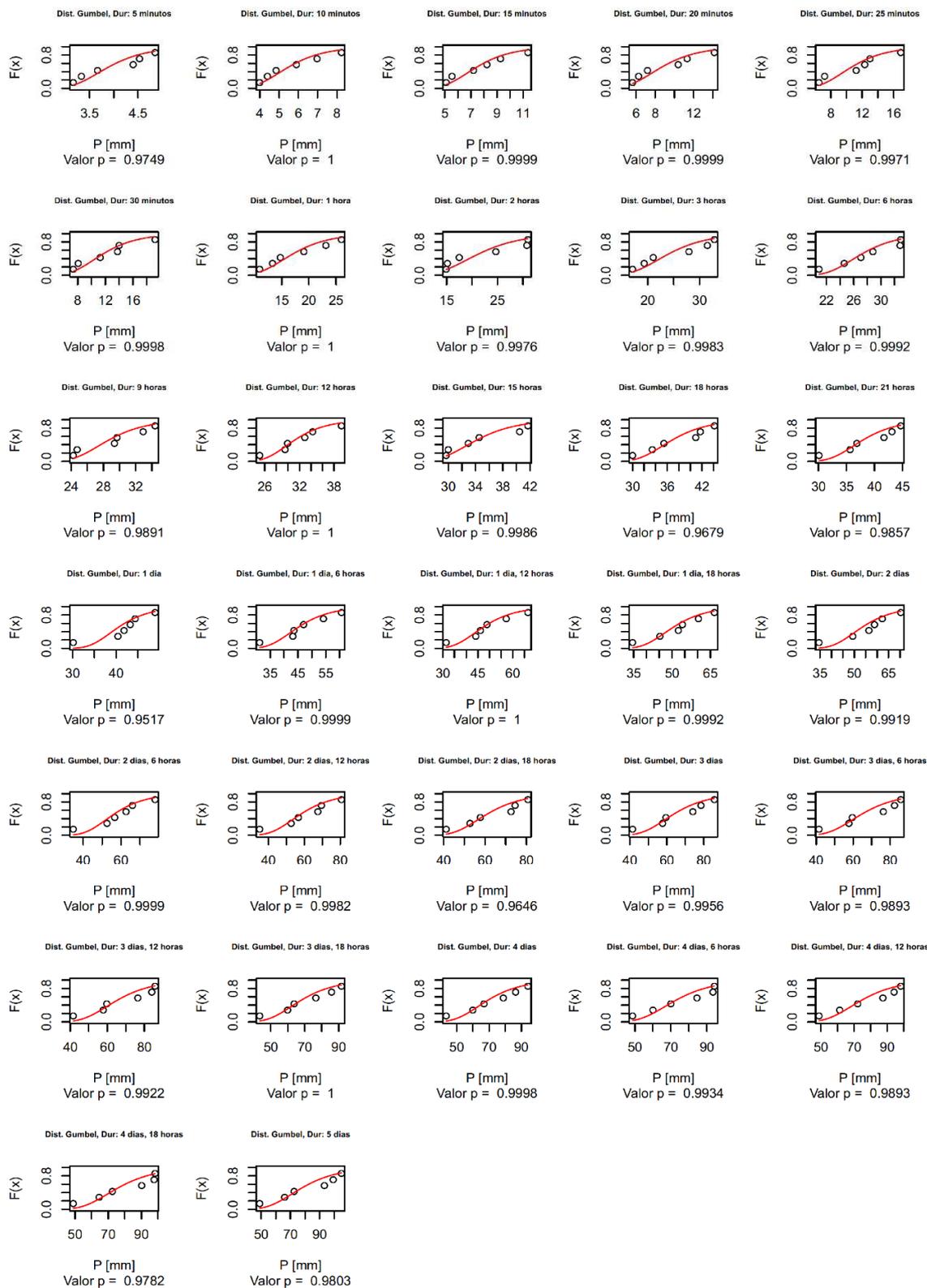


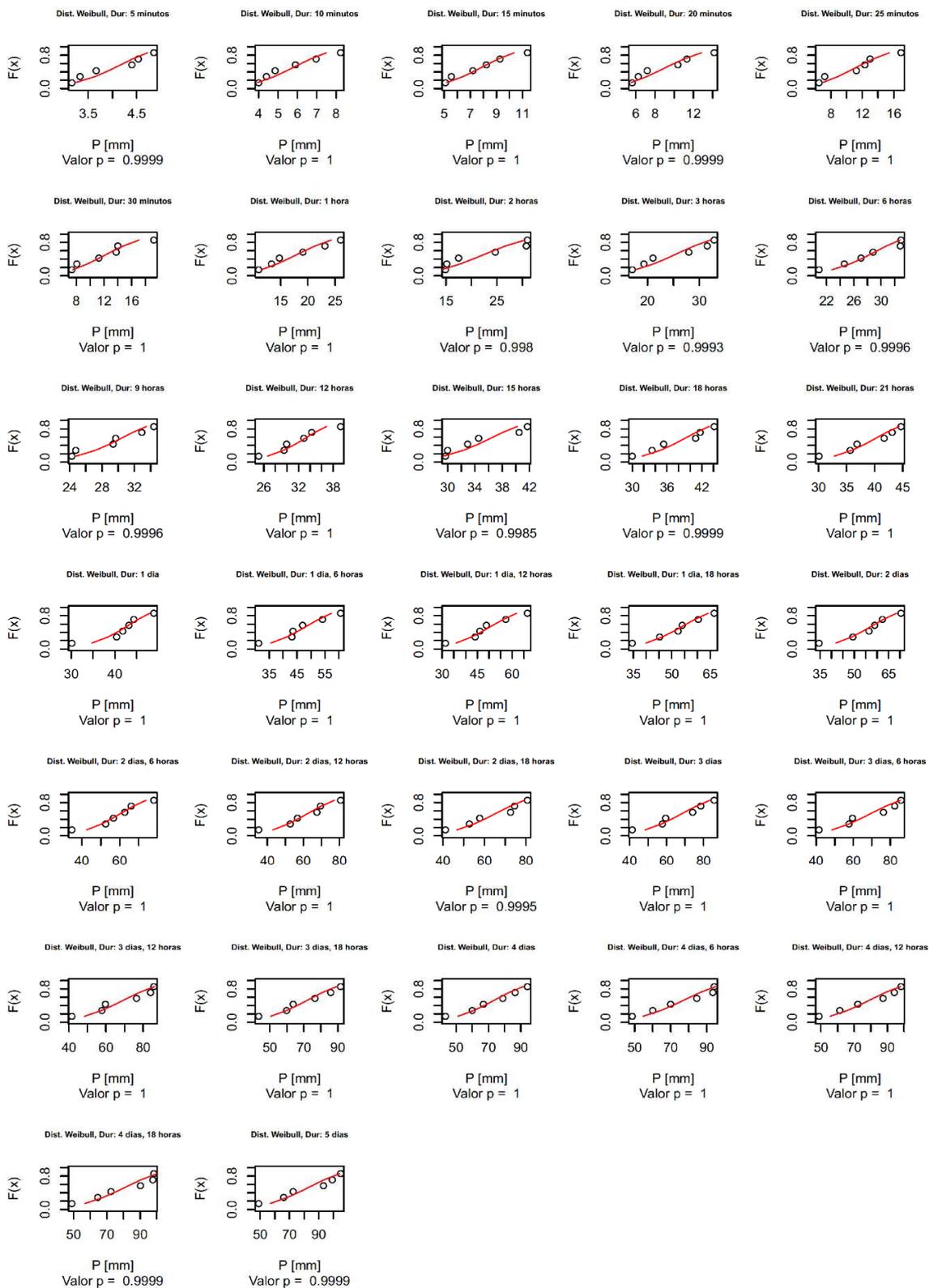
Ajustes de probabilidad
Normal Log normal, Weibull y Gumbel
y prueba de bondad
Smirnov – Kolmogorov
para el promedio
de las estaciones



Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH

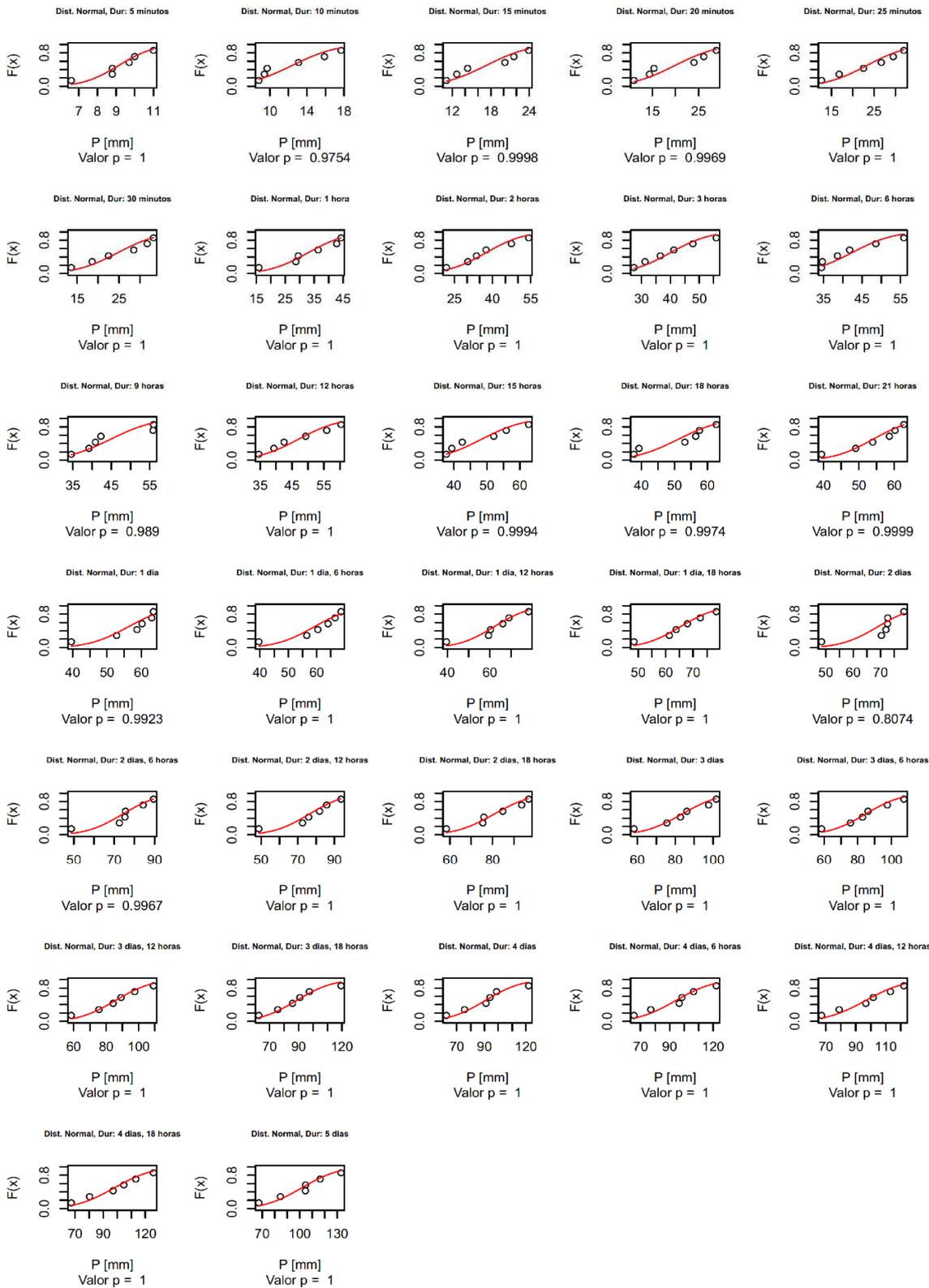


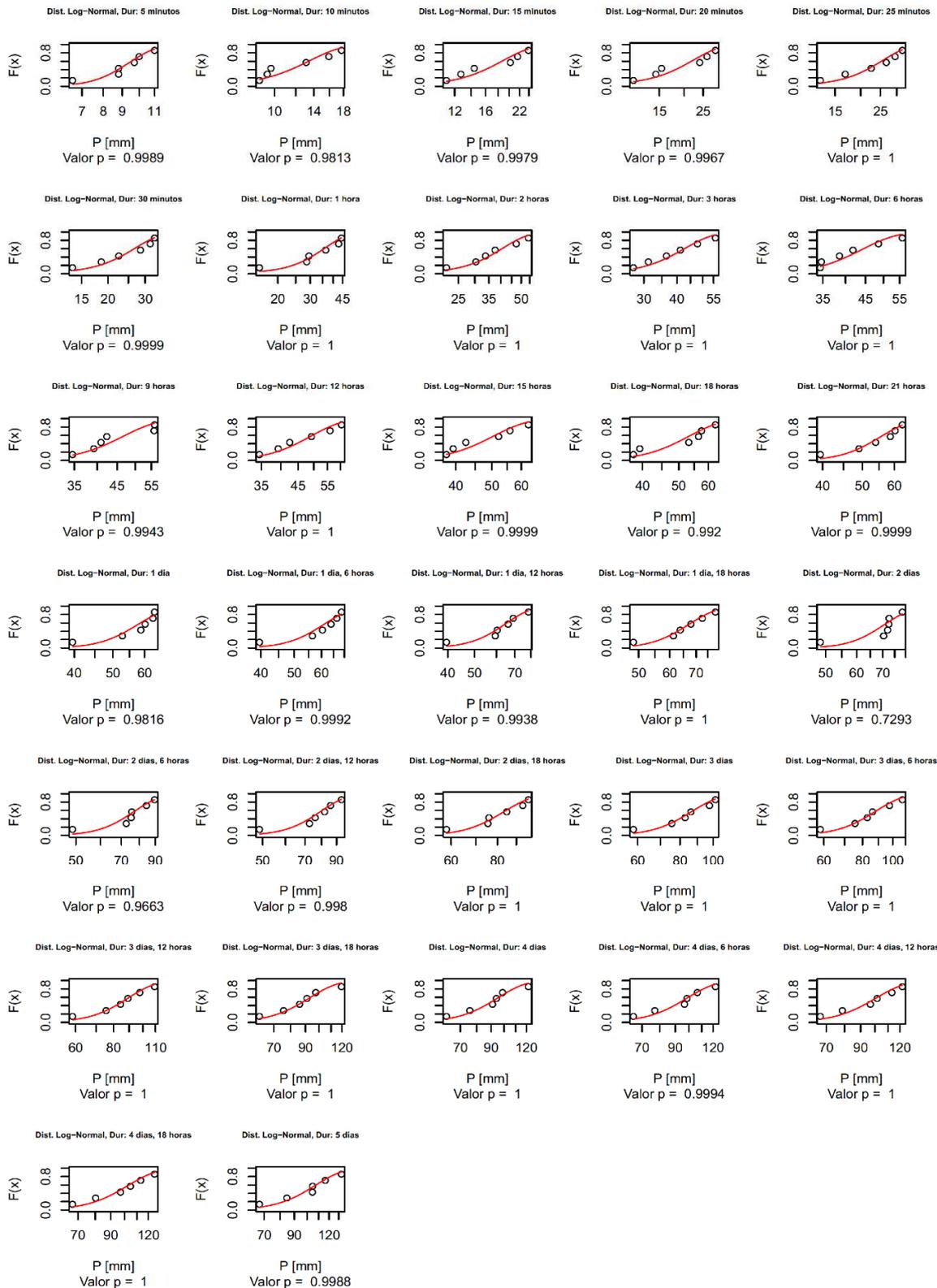




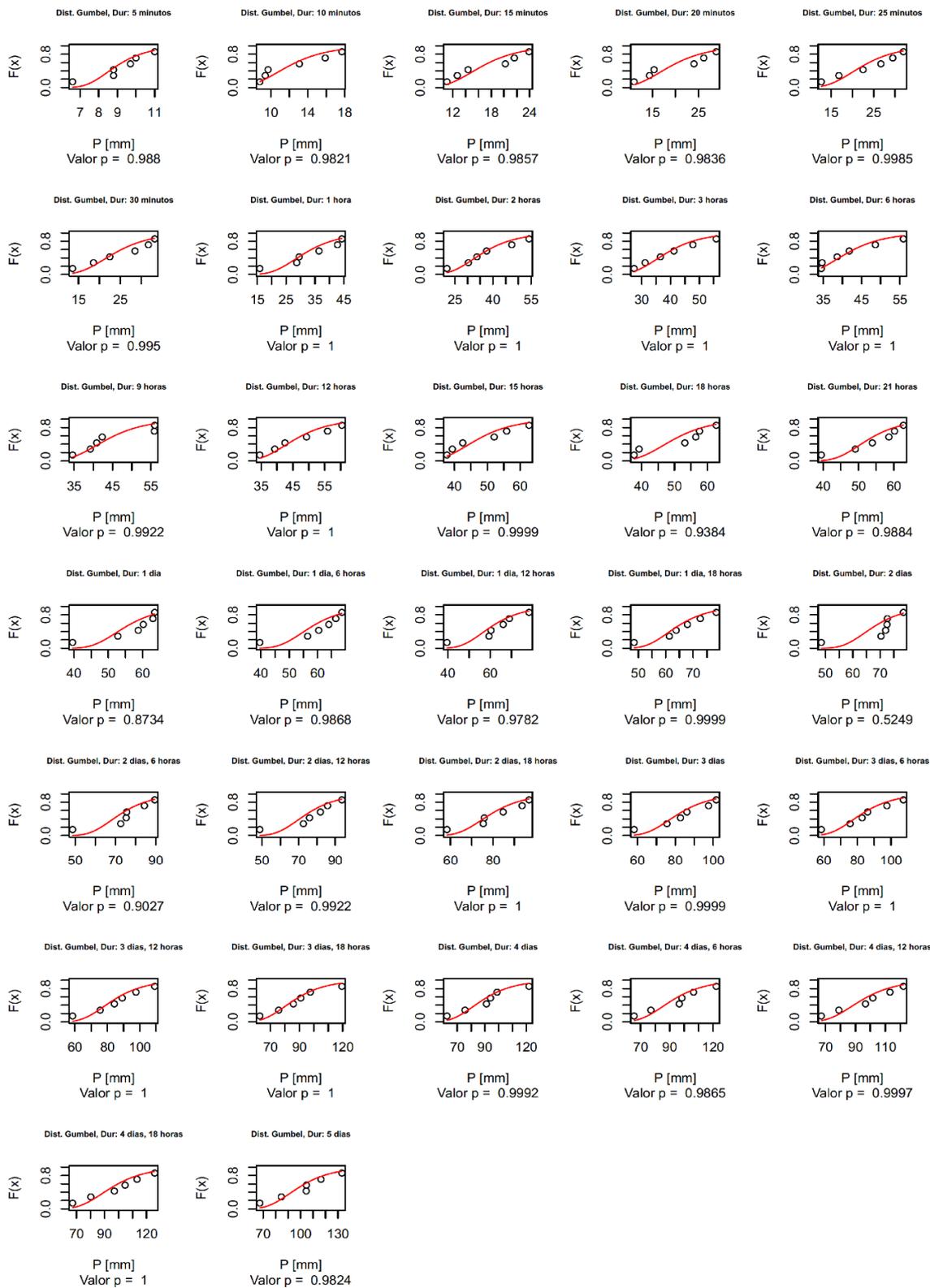
Ajustes de probabilidad
Normal Log normal, Weibull y Gumbel
y prueba de bondad
Smirnov – Kolmogorov
para el máximo
de las estaciones

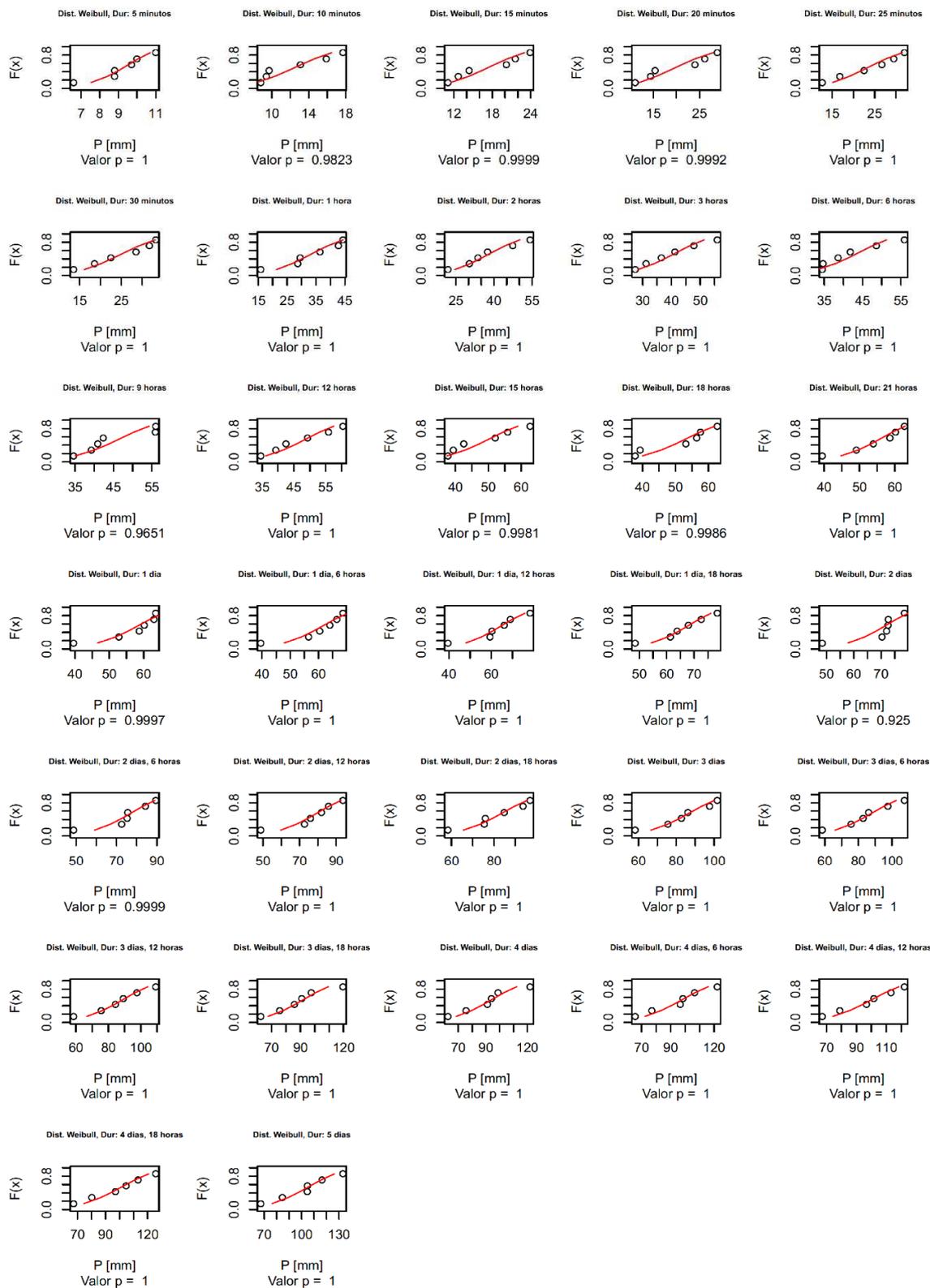
Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH



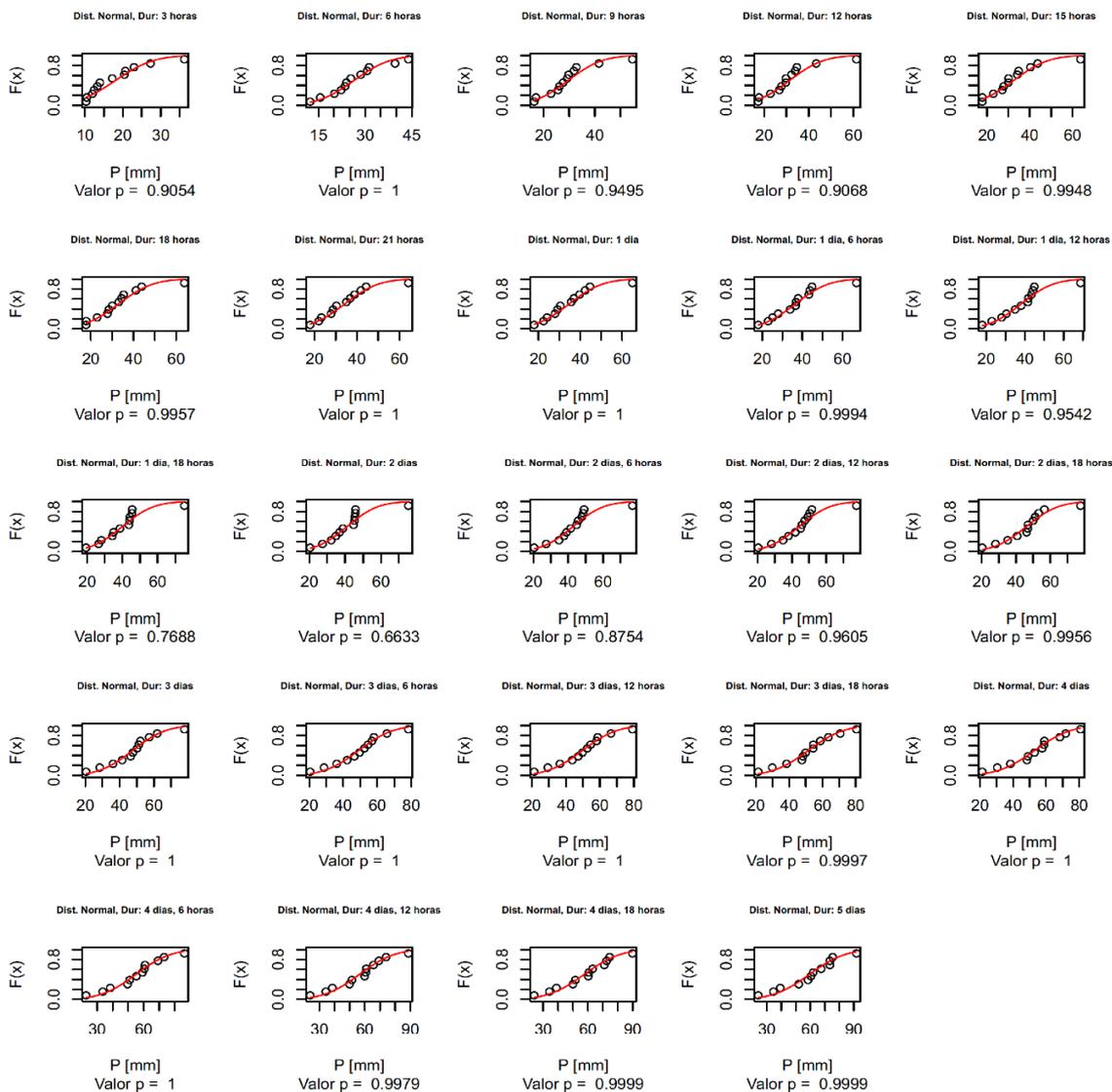


Ajuste de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH

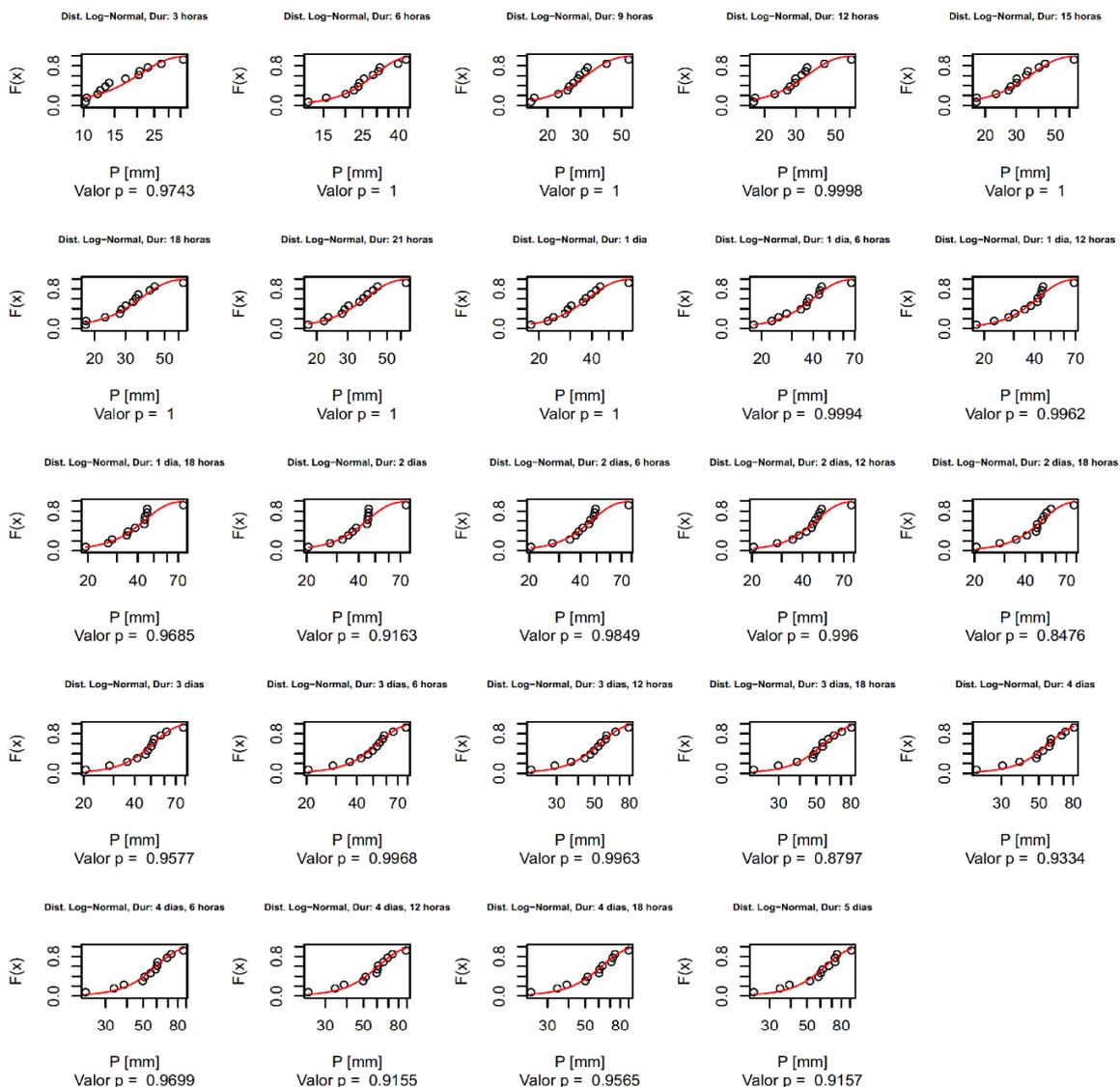


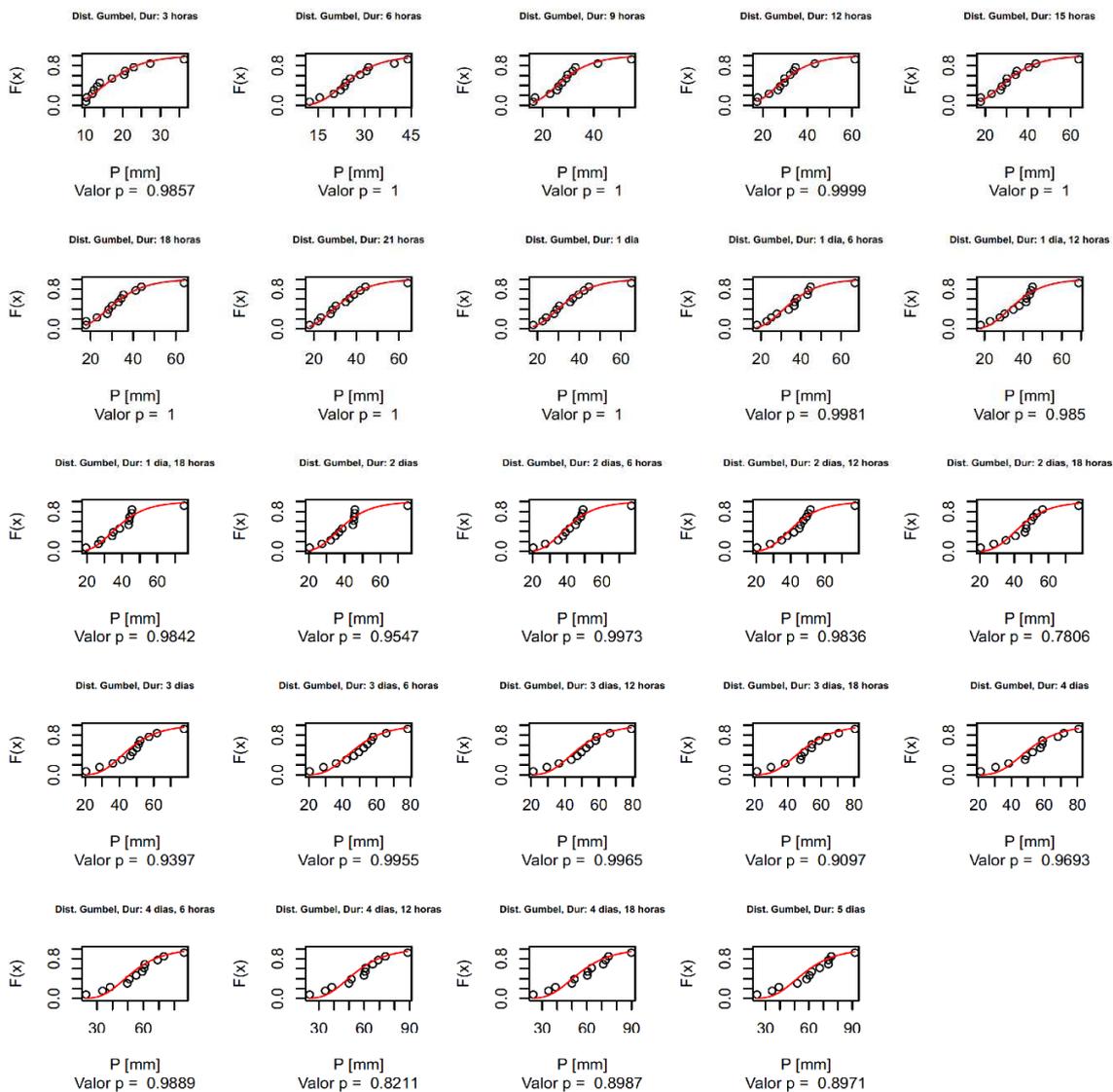


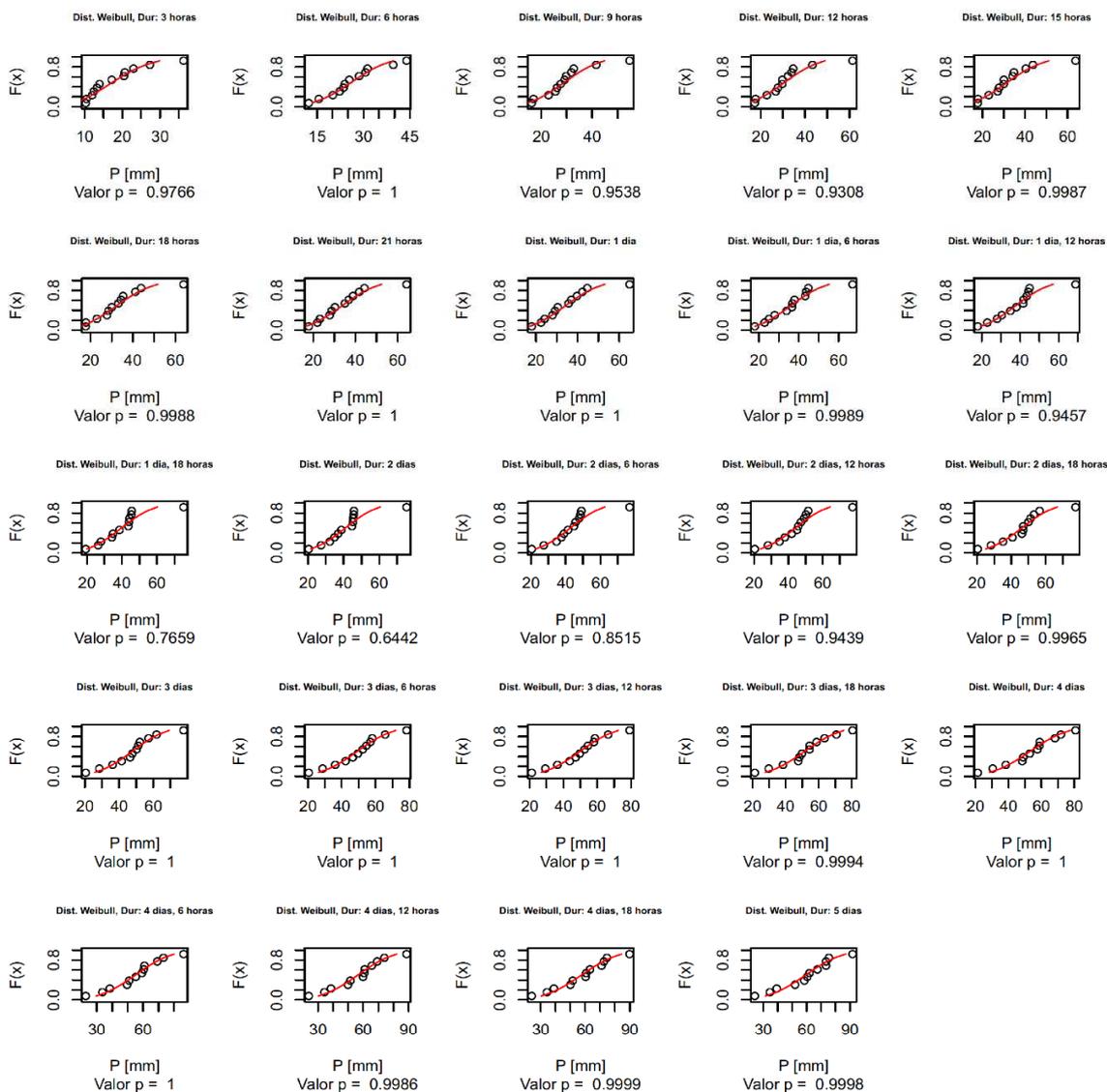
Ajustes de probabilidad
Normal Log normal, Weibull y Gumbel
y prueba de bondad
Smirnov – Kolmogorov
para CMORPH
Colombia



Ajuste de curvas Intensidad – Duración - Frecuencia a partir del producto satelital de precipitación CMORPH



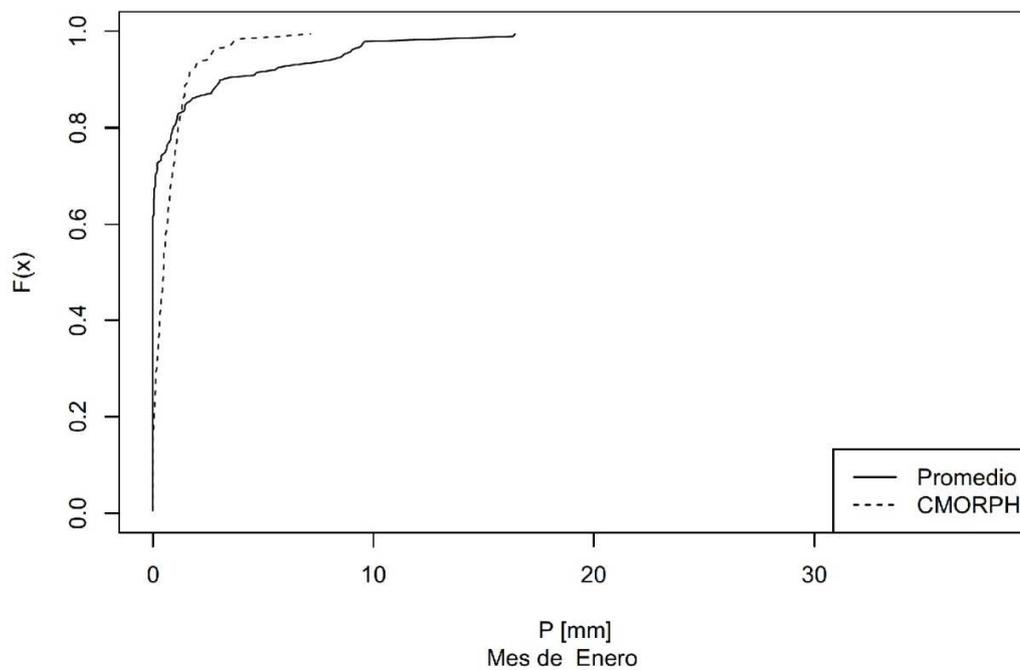




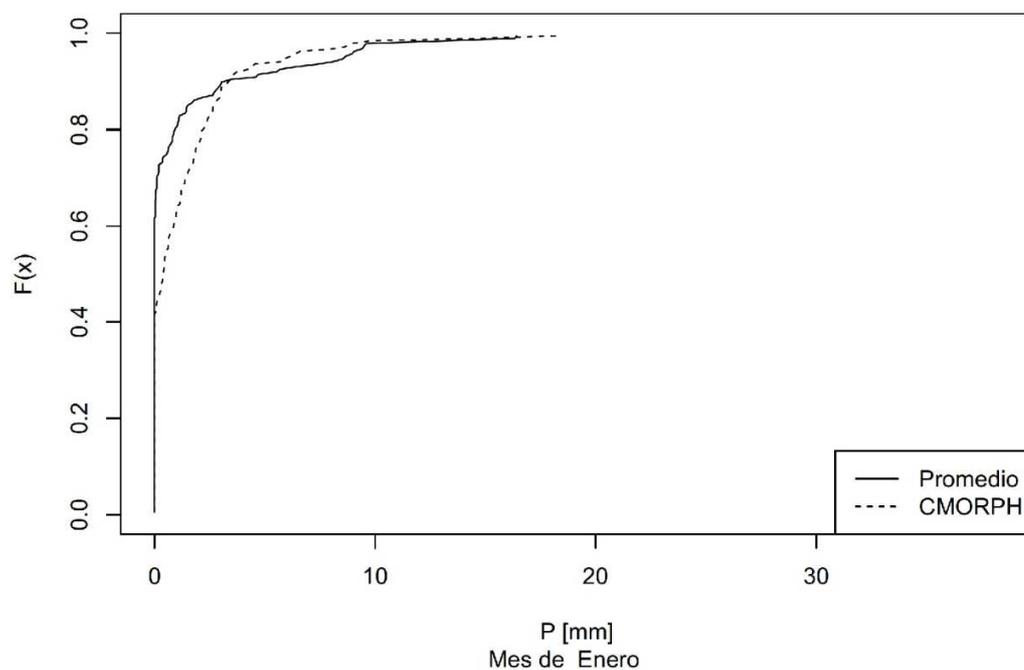
Anexo 3: Corrección del sesgo a nivel mensual

Comparativa y ajuste mensual entre el producto satelital CMORPH y valores observados

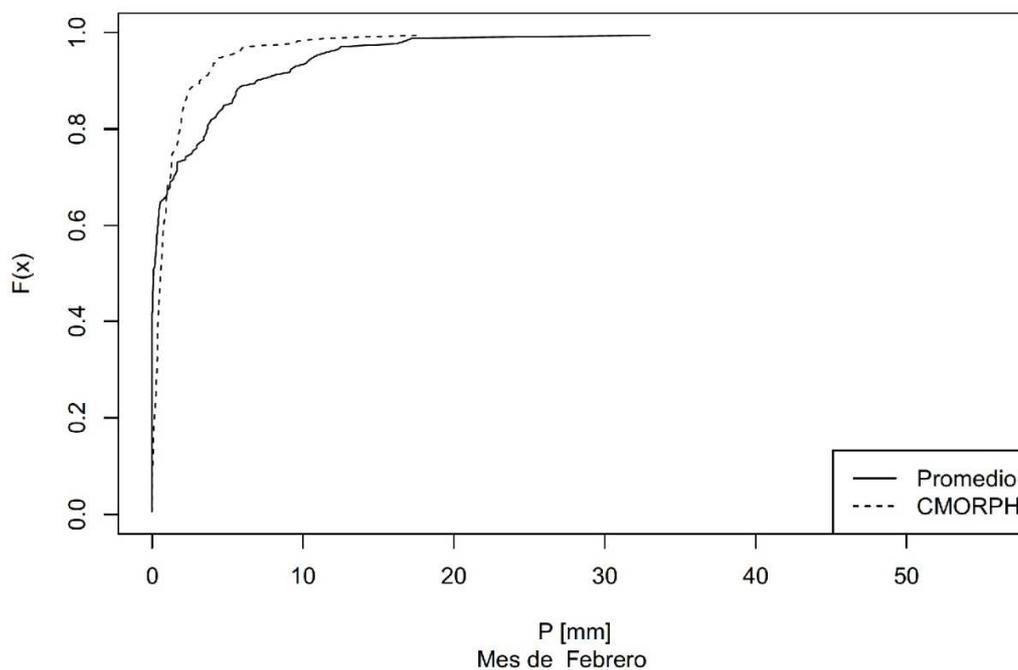
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



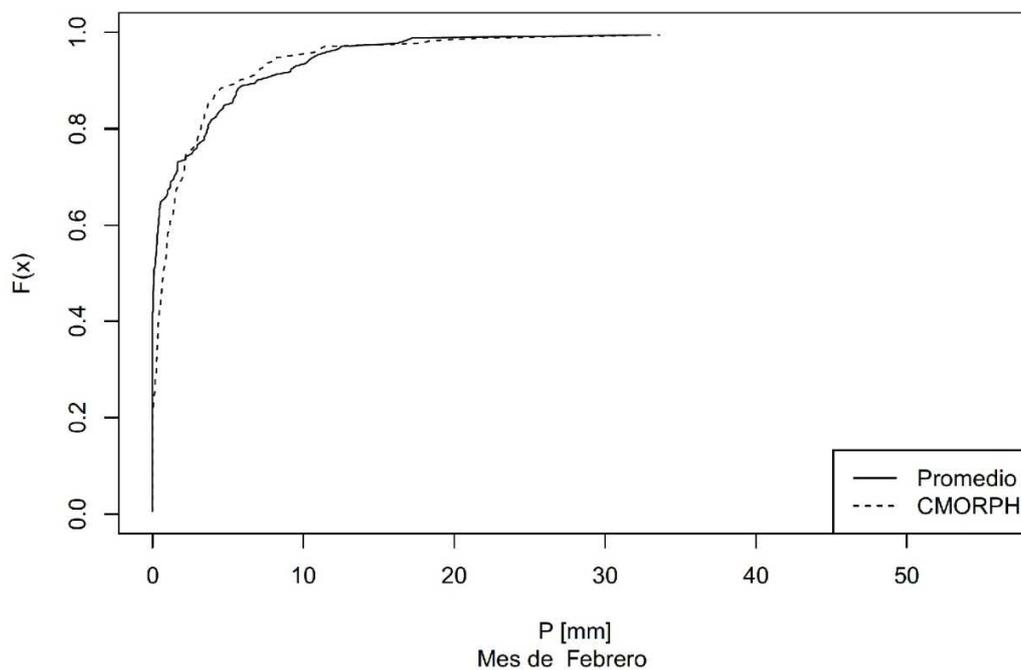
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



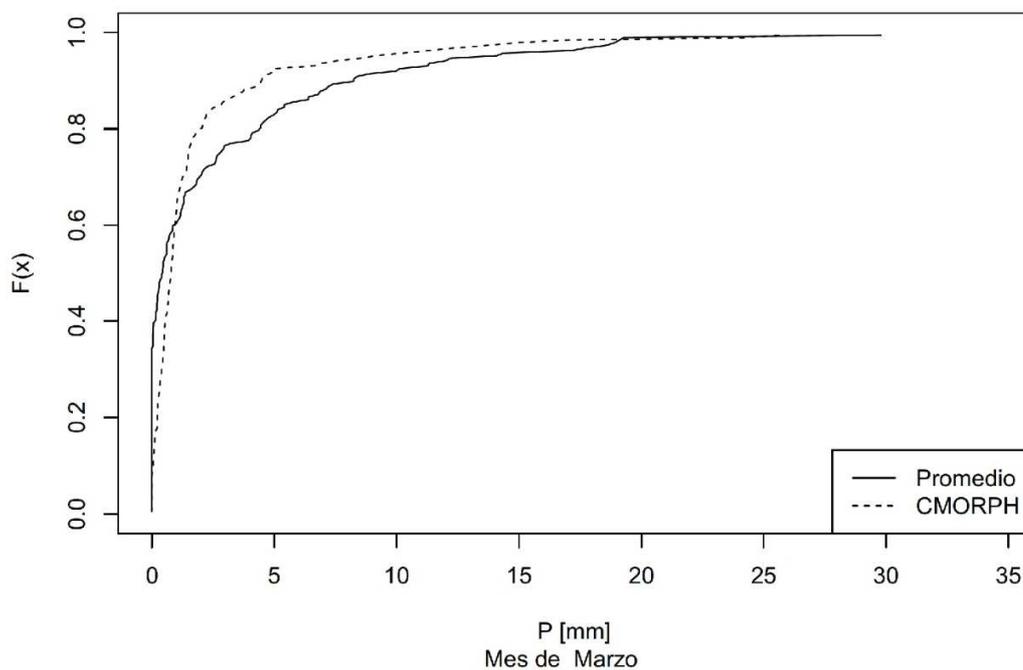
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



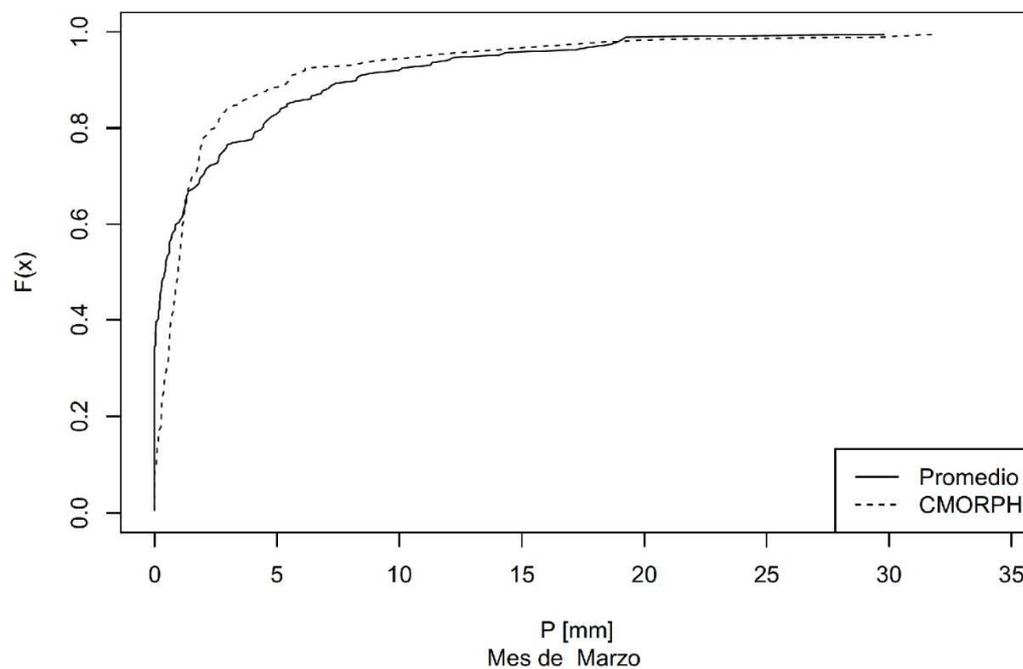
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



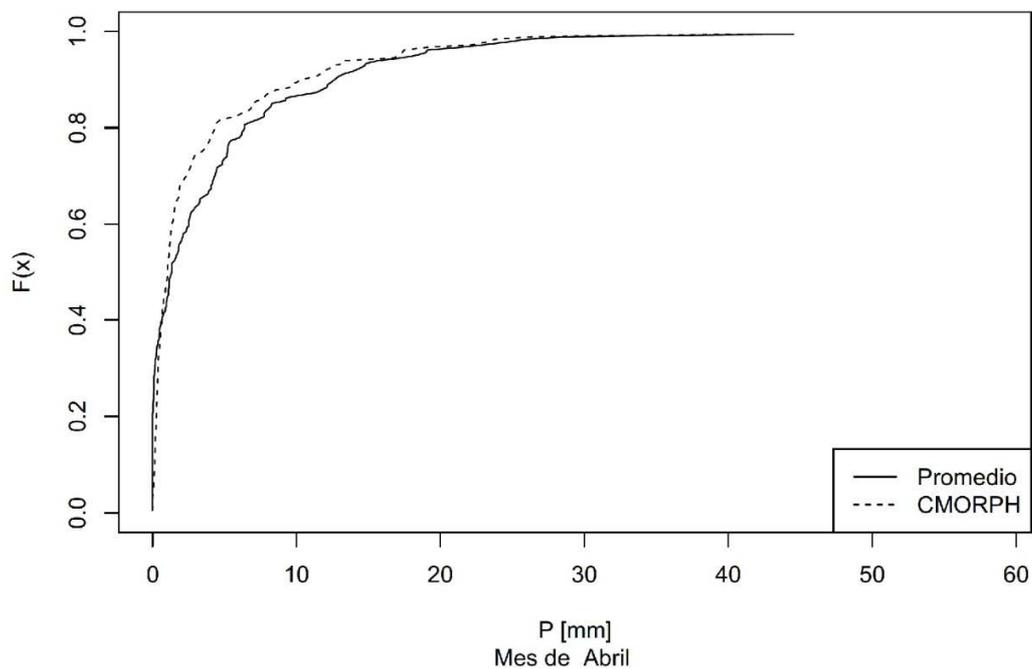
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



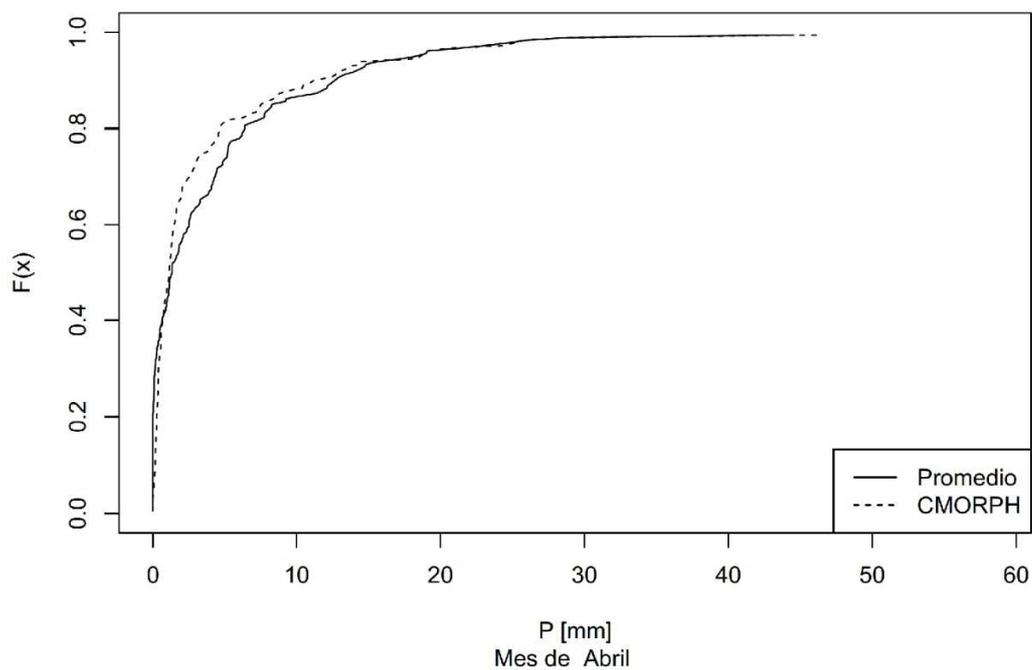
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



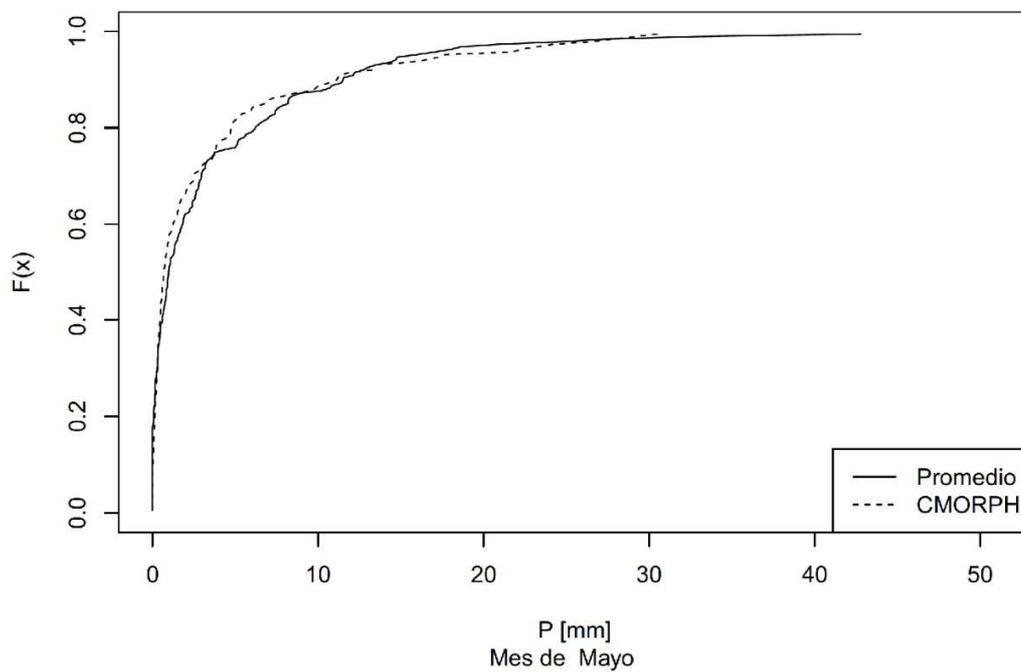
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



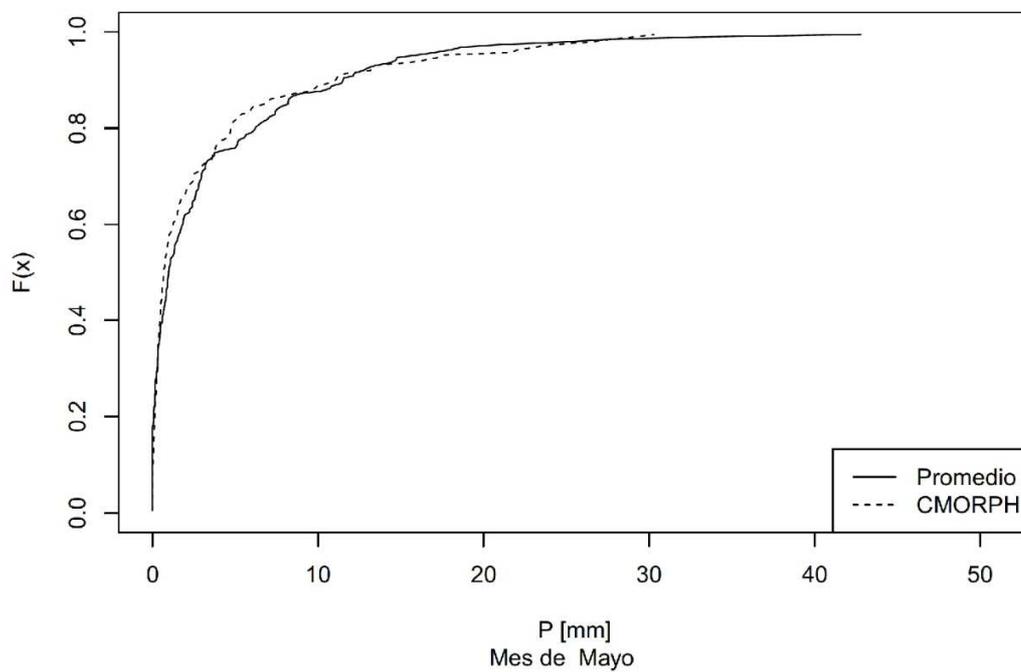
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



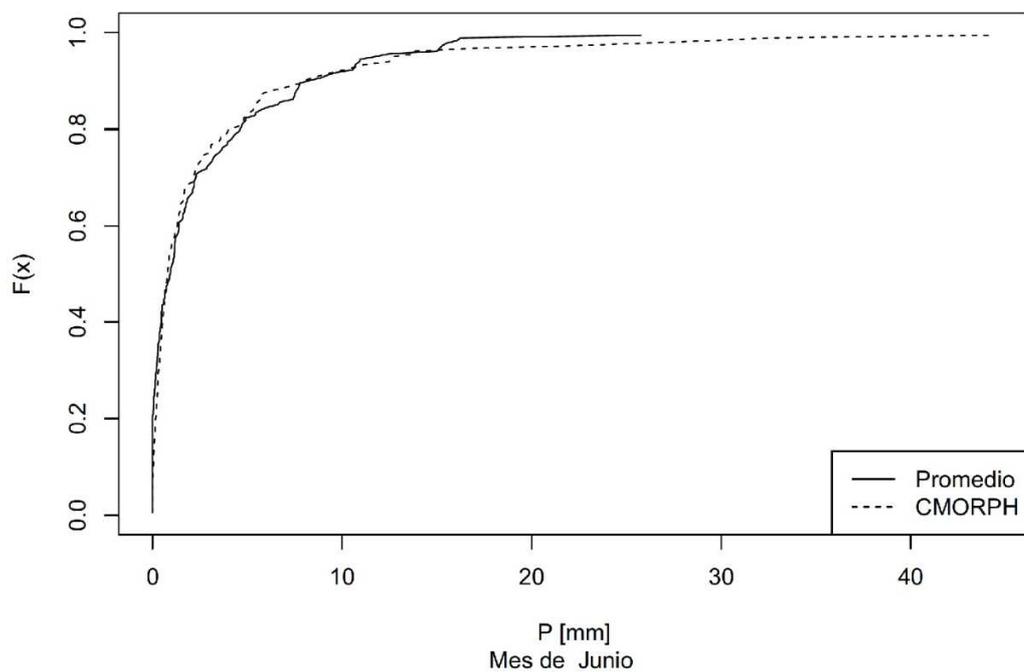
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



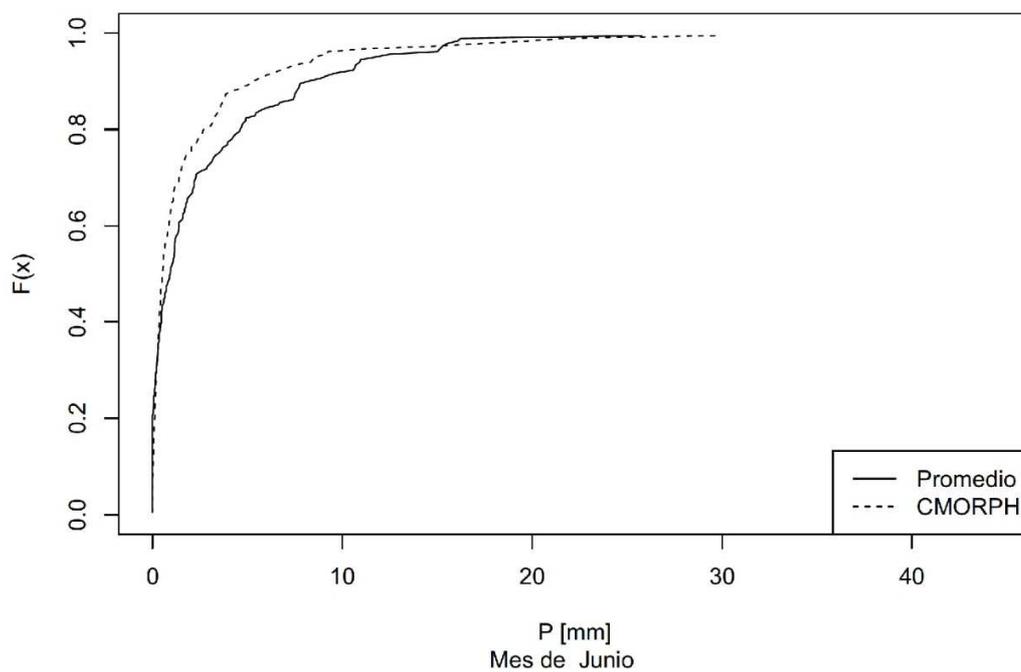
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



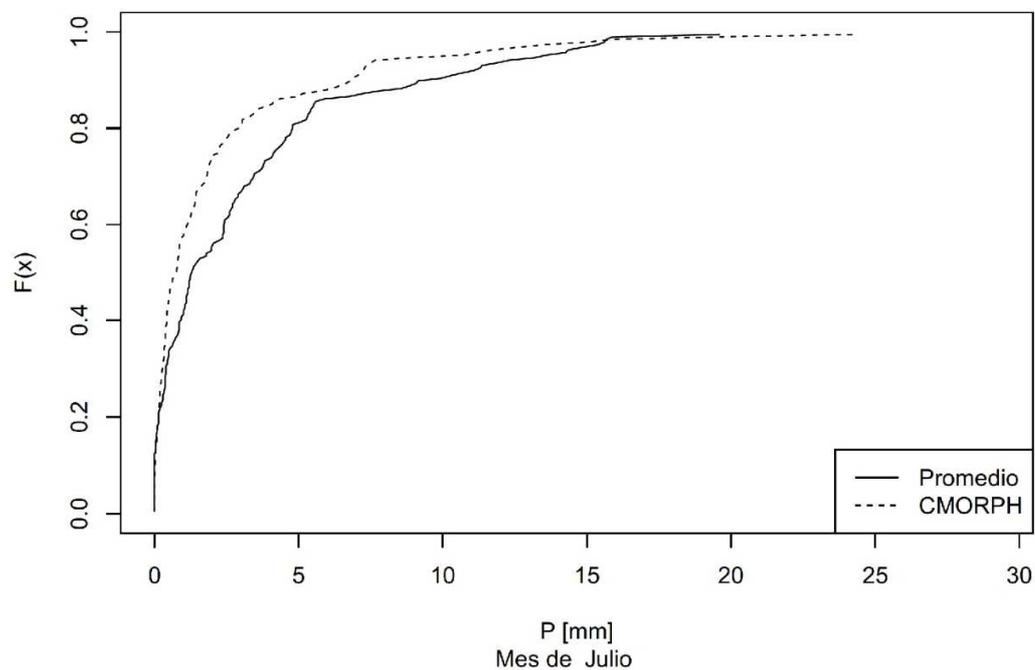
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



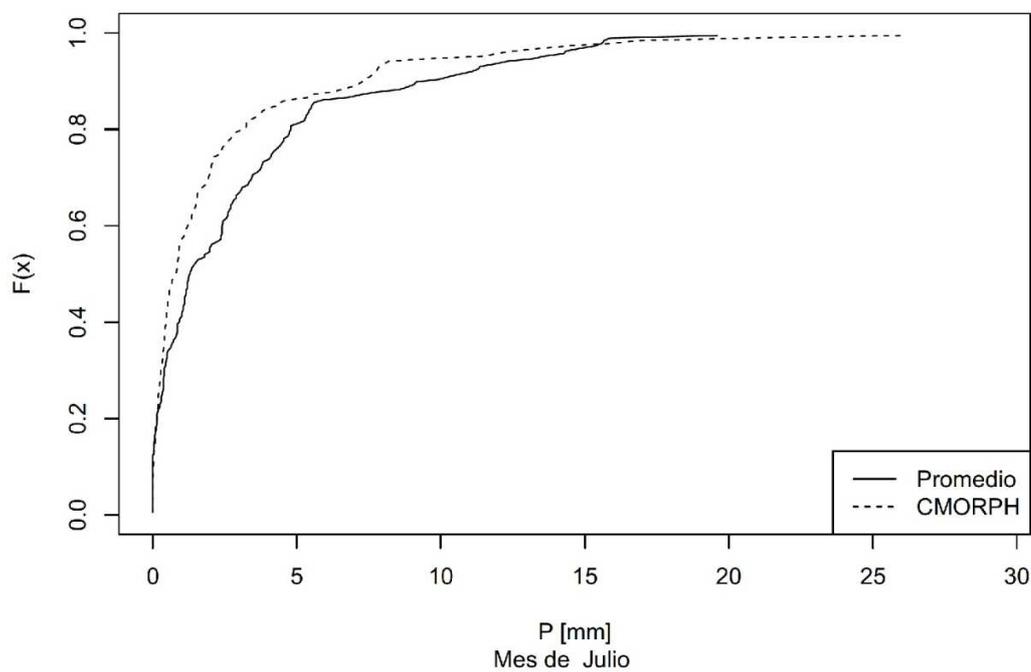
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



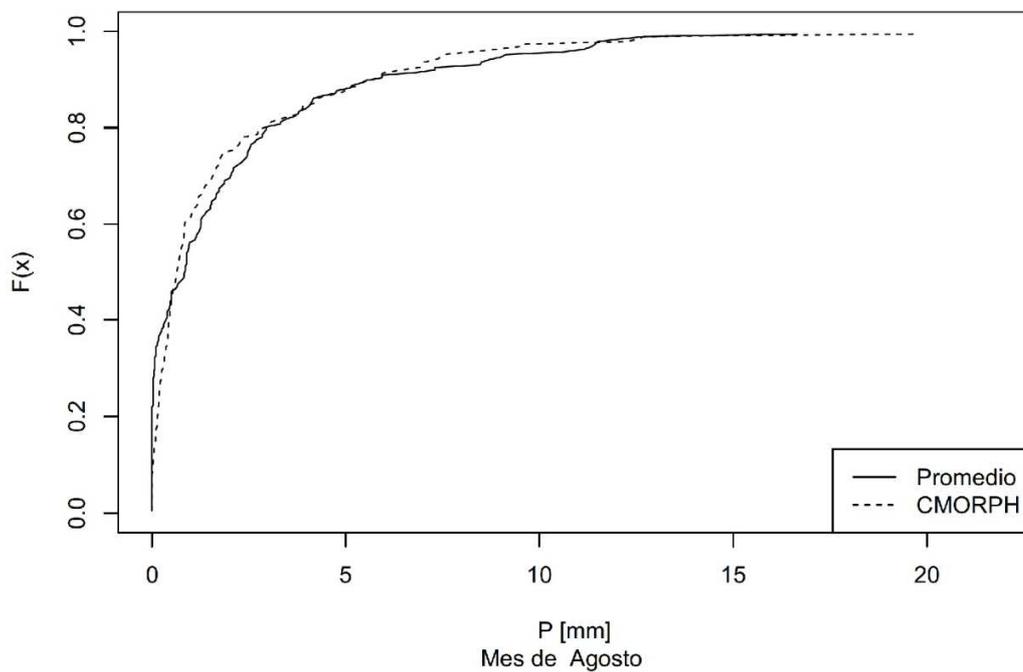
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



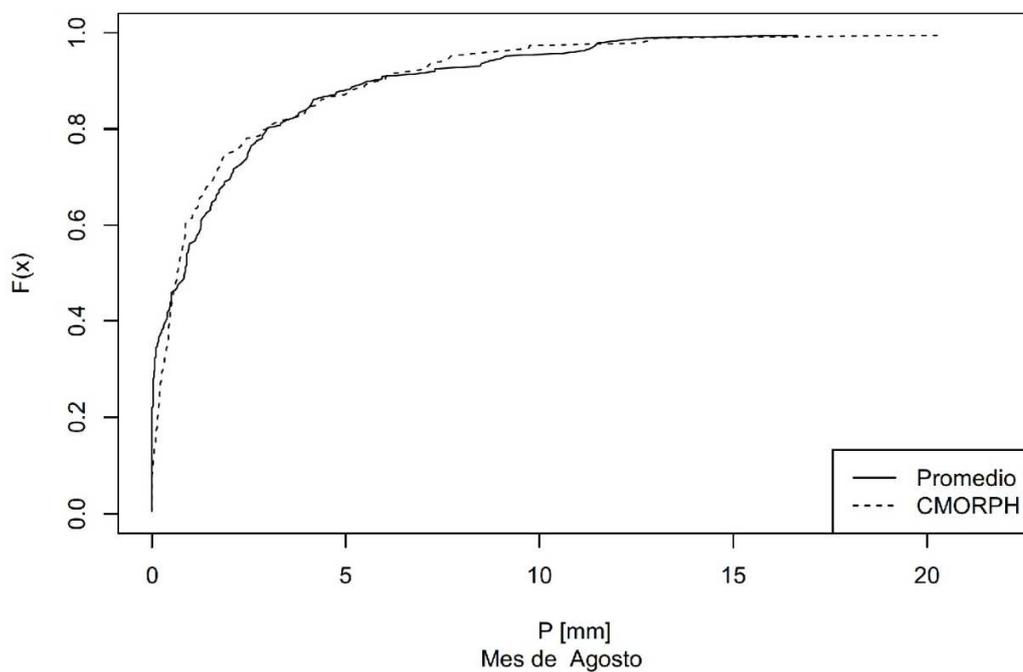
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



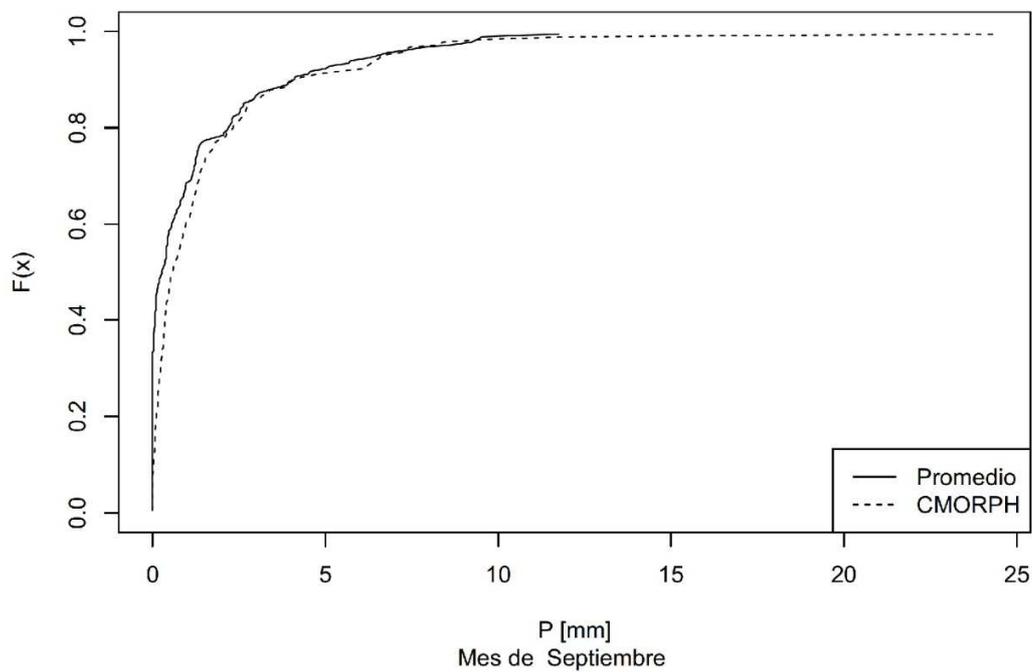
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



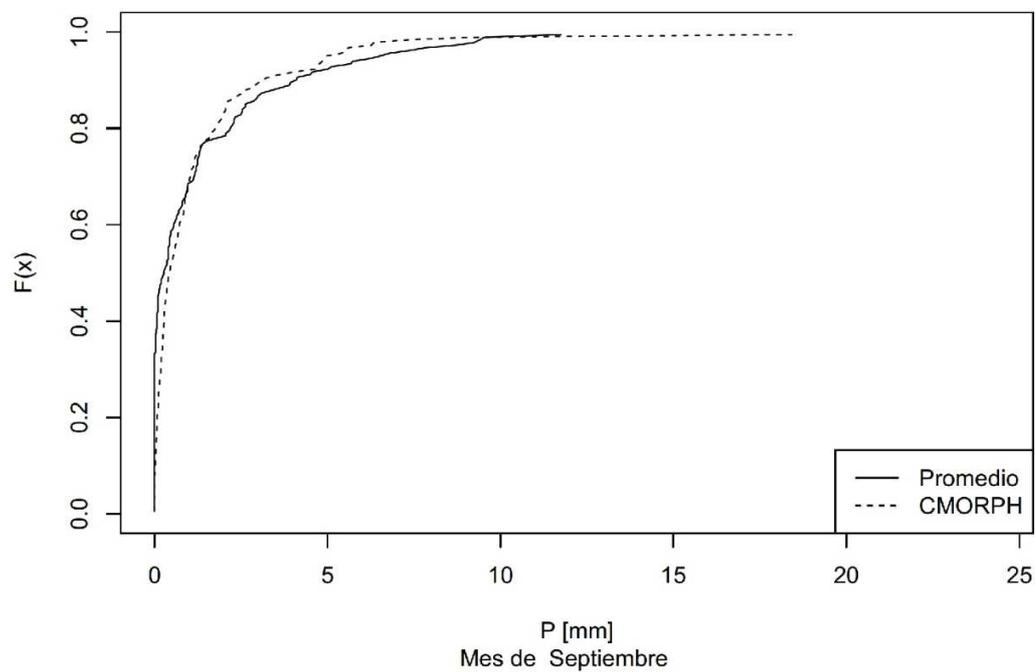
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



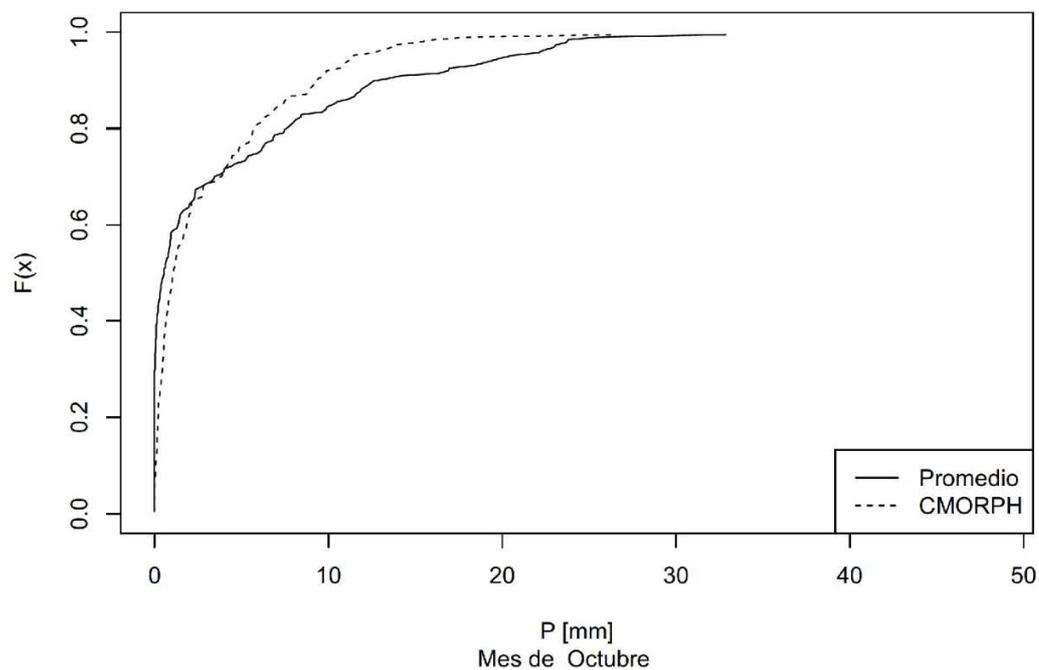
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



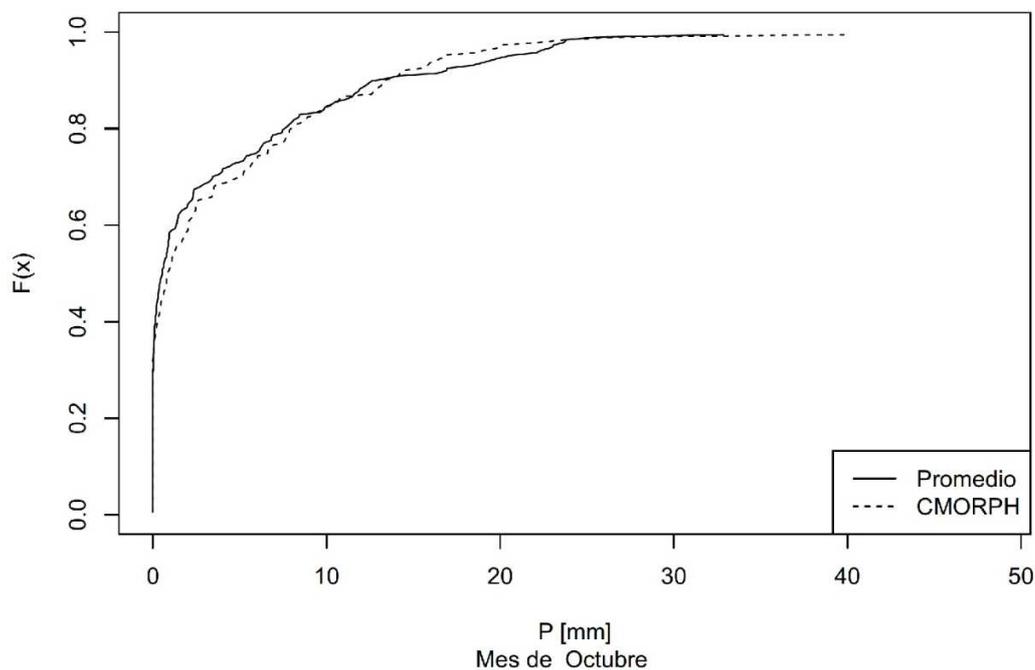
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



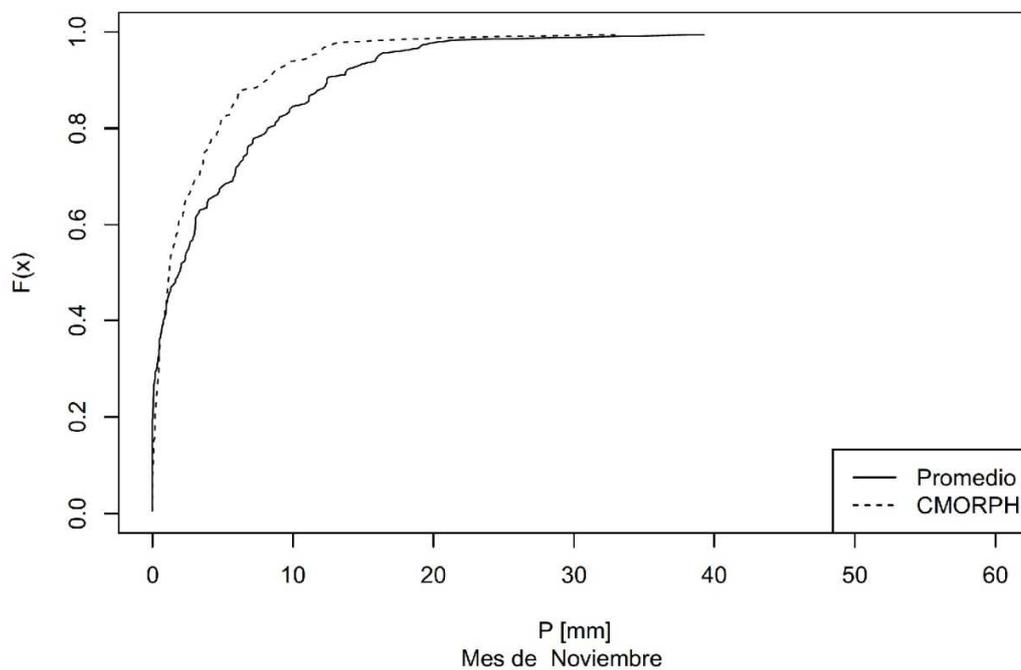
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



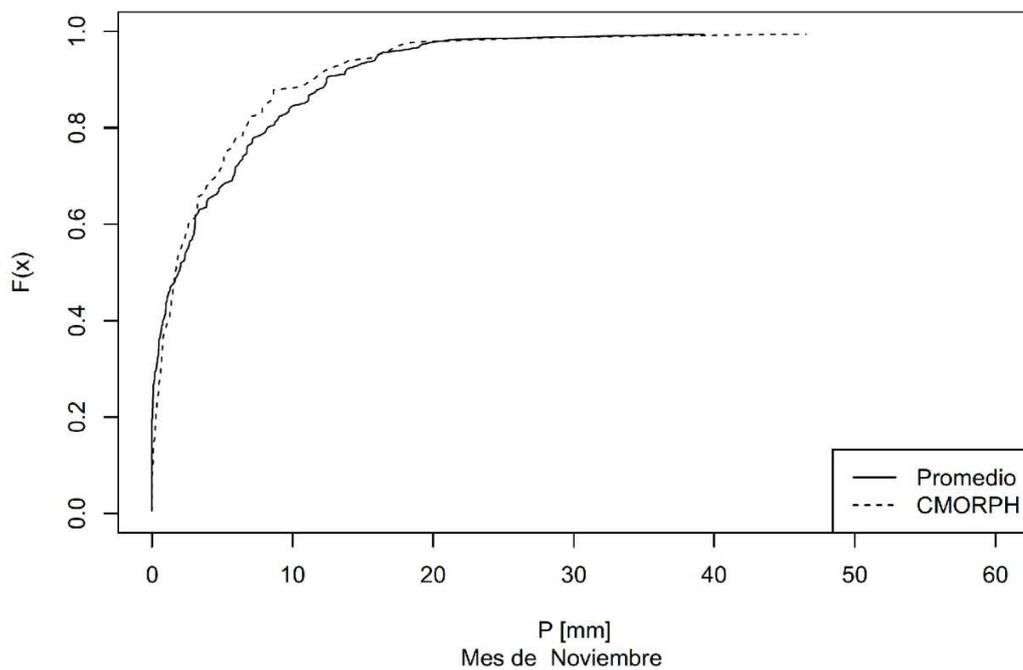
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



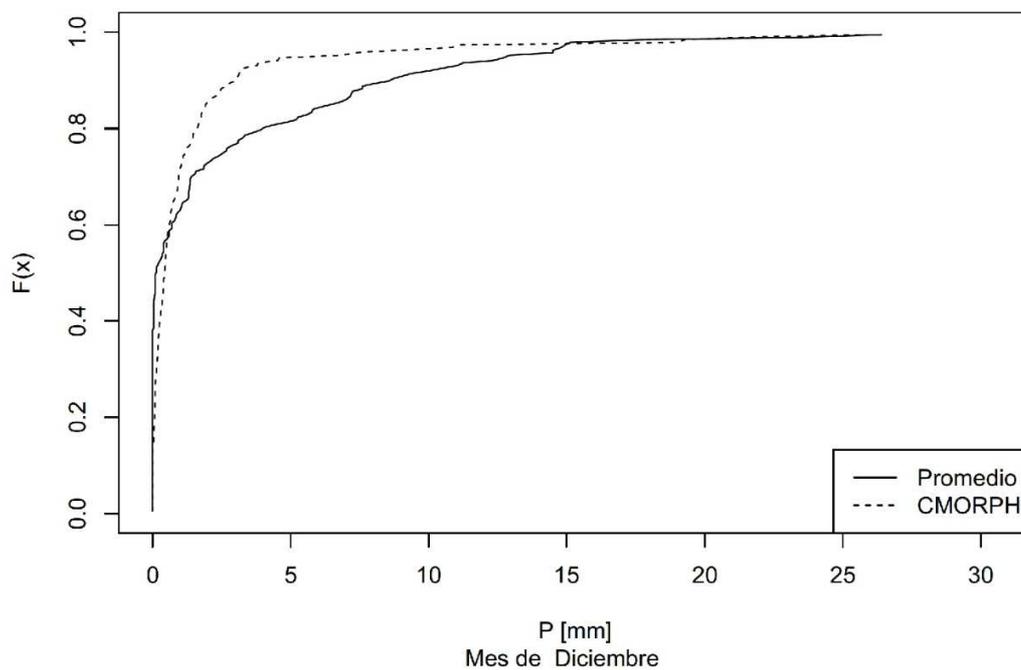
Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



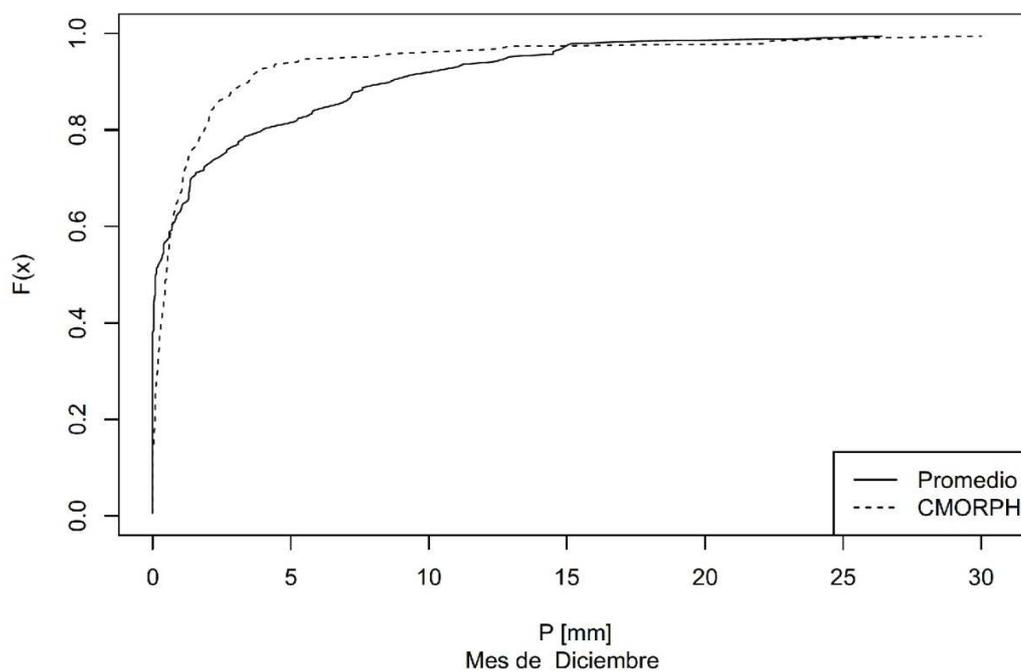
Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



Comparativa mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



Ajuste mensual de Dist. entre el promedio de las estaciones y CMORPH



Referencias

- Aeroterra. (2014). AEROTERRA, evaluación de recursos naturales y geoprocesamiento. Retrieved September 10, 2015, from <http://www.aeroterra.com/p-ikonos.htm>
- AIRBUS. (2015). Do you know how a communications satellite works - Article: Airbus Defence and Space. Retrieved September 18, 2015, from <http://www.space-airbusds.com/en/news2/do-you-know-how-a-communications-satellite-works.html>
- Alcaldía de Bogotá. (2015). Ubicación de la Ciudad | Portal Bogota | Bogota.gov.co. Retrieved October 27, 2015, from <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>
- Alexander, L., J. Caesar, B. Gleason, Peterson, T. C., & Zhang, X. (2006). Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *D05109*, 1–22.
- AMS. (2015). Education Program - American Meteorological Society. Retrieved September 10, 2015, from <https://www2.ametsoc.org/ams/index.cfm/education-careers/education-program/>
- Aparicio. (2001). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Distrito Federal, México: Limusa.
- BBC News. (2013). Voyager probe “leaves Solar System” - BBC News. Retrieved September 15, 2015, from <http://www.bbc.com/news/science-environment-24026153>
- Britannica. (2015). satellite communication. Retrieved September 17, 2015, from <http://global.britannica.com/technology/satellite-communication>
- Campos Aranda. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos Aranda. (2015). *Introducción a la Hidrología Urbana*.
- C. Edward Rasmussen. (2002). Gaussian Processes in Machine Learning. Max Planck Institute for Biological Cybernetics, Tübingen, Germany.
- CHRS. (2015). PERSIANN 0.25 Product Access Tools. Retrieved October 8, 2015, from <http://chrs.web.uci.edu/persiann/data.html>
- C. Kidd, V. Levizzani, & R. Ferraro. (2009). Satellite Precipitation Measurements for Water Resource Monitoring, *45*(3), 567–579.
- D. Froehlich. (1995). Intermediate-Duration-Rainfall Intensity Equations, 751–756.
- Digital Collections Program. (1997). Satellites.
- DigitalGlobe. (2013). IKONOS_esUN_0.pdf. Retrieved September 10, 2015, from http://global.digitalglobe.com/sites/default/files/IKONOS_esUN_0.pdf
- EO. (2015a). FY-3 - eoPortal Directory - Satellite Missions. Retrieved October 8, 2015, from <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/fy-3>
- EO. (2015b). MTSAT - eoPortal Directory - Satellite Missions. Retrieved September 24, 2015, from <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mtsats>
- E. Pulgarín Dávila. (2009). *Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia. (Región Andina Colombiana)*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

- ESA. (2011a, January 26). ESA - Eduspace ES - Inicio - ERS. Retrieved September 14, 2015, from http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM05E3GXF_0.html
- ESA. (2011b, March 2). ESA - Eduspace ES - Inicio - Satélites de observación terrestre: introducción. Retrieved September 10, 2015, from http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMJC07SXIG_0.html
- ESA. (2014a). ESA - Eduspace ES - Inicio - Envisat. Retrieved September 14, 2015, from http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM306E3GXF_0.html
- ESA. (2014b). ESA - Eduspace ES - Inicio - RESURS. Retrieved September 14, 2015, from http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM056E3GXF_0.html
- ESA. (2015a). INTEGRAL. Retrieved September 15, 2015, from <http://sci.esa.int/integral/>
- ESA. (2015b). Meteosat Second Generation. Retrieved September 24, 2015, from http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Meteosat_Second_Generation
- EUMETSAT. (2015a). Meteosat — EUMETSAT. Retrieved September 24, 2015, from <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Meteosat/index.html>
- EUMETSAT. (2015b). Metop — EUMETSAT. Retrieved October 6, 2015, from <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/index.html>
- Geoscience Australia. (2014, May 15). About Earth Observation and Satellite Imagery. Retrieved September 10, 2015, from <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/earth-obs/basics/about>
- Germán Poveda, Jaime Velez, & Oscar Mesa. (2002). Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas Intensidad-Frecuencia-Duración en Colombia, 91–100.
- Harvard. (2015). Chandra: About Chandra. Retrieved September 15, 2015, from <http://chandra.harvard.edu/about/>
- IMD. (2015, September). Indian Meteorological Department - Satellite Images. Retrieved September 24, 2015, from http://imdtvm.gov.in/index.php?option=com_content&task=view&id=33&Itemid=47
- INEGI. (2012). Aspectos Técnicos de las Imágenes Landsat, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- Jackson Roherig. (2015). *Hydrology*. Cologne, Germany: Institute for Technology and Resources Management in the Tropics and Subtropics, Cologne University of Applied Sciences.
- JMA. (2015, August). Meteorological Satellites - Japan Meteorological Agency -. Retrieved September 24, 2015, from <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/>
- John Fox. (2002). Bootstrapping Regression Models. Appendix to An R and S-PLUS companion to applied regression.
- J. Simon. (1997). Resampling: The New Statistics, Estados Unidos de America (USA).
- J. Témez. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid, España: Dirección General de Carreteras.
- Karatzoglou, A., & Smola, A. (2005). kernlab, An S4 Package for Kernel Methods in R.

- Land Info. (2015). Tipos de Imágenes Satelitales y sus Aplicaciones - LAND INFO Worldwide Mapping. Retrieved September 8, 2015, from http://www.landinfo.com/espanol/productos_satellite.htm
- L. Montaña. (2015, April). Calibración de los modelos hidrológico e hidráulico para el sistema de alerta temprana para inundación por desbordamiento para la quebrada Chiguaza. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia.
- M. Anand, & J. Bhagwan. (2010). Use of Probability Distribution in Rainfall Analysis, 40–49.
- NASA. (2013). Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. Retrieved October 8, 2015, from http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/documentation/TRMM_README/TRMM_3B42_readme.shtml
- NASA. (2014). GOES FAQ. Retrieved September 23, 2015, from <http://goes.gsfc.nasa.gov/text/goesfaq.html#goesstatus>
- NASA. (2015a). Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Retrieved October 13, 2015, from http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/gesNews/trmm_v7_multisat_precip
- NASA. (2015b). How Does GPS Work? NASA Space Place. Retrieved September 18, 2015, from <http://spaceplace.nasa.gov/gps/en/>
- NASA. (2015c). Missions - LDCM/Landsat 8 - NASA Science. Retrieved September 11, 2015, from <http://science.nasa.gov/missions/lcdm/>
- NASA. (2015d). Missions - Swift - NASA Science. Retrieved September 15, 2015, from <http://science.nasa.gov/missions/swift/>
- NASA. (2015e). TRMM Home Page Precipitation Measurement Missions. Retrieved October 8, 2015, from <http://pmm.nasa.gov/trmm>
- NASA. (2015f, May). Missions - GOES-R - NASA Science. Retrieved September 23, 2015, from <http://science.nasa.gov/missions/goes-r/>
- NASA, S. (2015g, June 16). What Is a Satellite? Retrieved September 8, 2015, from <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html>
- National Satellite Meteorological Centre. (2014). INSAT-3D, Observing Weather from Space. India Meteorological Department.
- NOAA. (2006). Climate Prediction Center - Africa RFE General Description. Retrieved October 13, 2015, from http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/RFE2.0_desc.shtml
- NOAA. (2014, March). Climate Data Record (CDR) Program.
- NOAA. (2015a). Climate Prediction Center (CPC) Africa Rainfall Climatology Version 2.0 (ARC2) - Data.gov. Retrieved October 13, 2015, from <https://catalog.data.gov/dataset/climate-prediction-center-cpc-africa-rainfall-climatology-version-2-0-arc2>
- NOAA. (2015b). CPC: Monitoring and Data - Global Precipitation Analyses. Retrieved October 8, 2015, from http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html
- NOAA. (2015c). NOAA Satellite Information System (NOAASIS). Retrieved October 6, 2015, from <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/genlsatl.html>

- NSMC. (2013, September). National Satellite Meteorological Center of CMA FY-2 Program. Retrieved September 24, 2015, from http://www.nsmc.cma.gov.cn/NSMC_EN/Channels/100096.html
- OSCAR. (2015a). WMO OSCAR Satellite: FY-3B. Retrieved October 8, 2015, from <http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/114>
- OSCAR. (2015b). WMO OSCAR Satellite: Metop-C. Retrieved October 6, 2015, from <http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/308>
- R. Ledesma. (2008). Introducción al Bootstrap. Desarrollo de un ejemplo acompañado de software de aplicación, 4, 51–60.
- Russian Space Web. (2015, February). Elektro-L. Retrieved September 24, 2015, from <http://www.russianspaceweb.com/elektro.html>
- Satellite Imaging. (2015). WorldView-3 Satellite Imagery and Satellite Sensor Specifications | Satellite Imaging Corp. Retrieved September 11, 2015, from <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-3/>
- Schölkopf, B., & J. Smola, A. (2002). *Learning with kernels*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Spacesim. (1997a). Satellites - Astronomy Satellites. Retrieved September 15, 2015, from <http://satellites.spacesim.org/english/function/astronom/index.html>
- Spacesim. (1997b). Satellites - Navigation Satellites. Retrieved September 18, 2015, from <http://satellites.spacesim.org/english/function/navigati/index.html>
- SSEC, U. of W.-M. (2015). Space Science and Engineering Center. Retrieved from <http://www.ssec.wisc.edu/>
- Su-Yin Tan. (2014). *Meteorological Satellite Systems* (2014th ed.). Heidelberg, New York: Springer.
- UCAR. (2015, October). CMAP: CPC Merged Analysis of Precipitation | NCAR - Climate Data Guide. Retrieved October 13, 2015, from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cmap-cpc-merged-analysis-precipitation>
- USGS. (2013). Landsat Project Description. Retrieved September 11, 2015, from http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php
- Ven Te Chow, D. R. M. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- Vila, D., & García, C. (2012). Application of a combined daily rain gauges and rainfall satellite estimates scheme for basin management. INPE-CPTEC.
- V.K. Gupta, & E. Waymire. (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions., 95, 148–227.
- V. Levizzani, R. Amorati, & F. Meneguzzo. (2002). *A Review of Satellite-based Rainfall Estimation Methods*. Bologna, Italia: Istitu WMO OSCAR. (2015). WMO OSCAR Details for Instrument Geoton-2. Retrieved September 14, 2015, from <http://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/6to> di Scienze dell'Atmosfera e del Clima.