



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Identificación de modos principales de variabilidad hidroclimática en Colombia y la Cuenca Amazónica mediante la Transformada de Hilbert-Huang

Alejandra María Carmona Duque

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia

2010

Identificación de modos principales de variabilidad hidroclimática en Colombia y la Cuenca Amazónica mediante la Transformada de Hilbert-Huang

Alejandra María Carmona Duque

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería- Recursos Hidráulicos

Director (a):

I.C, MSc, Ph.D., Germán Poveda Jaramillo

Línea de Investigación:

Hidroclimatología de Colombia y de la Cuenca Amazónica.

Grupo de Investigación:

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2010

Agradecimientos

Agradezco a mis papás y a mi hermana por apoyarme en mi decisión de seguir estudiando y emprender un camino en la investigación.

A la Universidad Nacional de Colombia por respaldar mis estudios de maestría a través de la Beca de Estudiantes Sobresalientes de Posgrado.

A mi director de tesis Germán Poveda por guiarme durante estos dos años, por sus valiosas enseñanzas, consejos y recomendaciones.

A los profesores Jaime Ignacio Vélez y Andrés Ochoa por haberme impulsado, apoyado y motivado para entrar a la Maestría.

Gracias a Juan David Osorio y a Jorge Ramírez por haberme ayudado en la comprensión de la transformada de Hilbert-Huang, sus bases matemáticas y sus aplicaciones.

Gracias a mis compañeros de maestría y amigos por compartir estos cuatro semestres de investigación y de trabajo a mi lado.

Finalmente agradezco el apoyo de COLCIENCIAS y del IDEAM por los datos de precipitación y caudales suministrados. También a CENICAFÉ por proporcionar los datos de temperatura utilizados en el estudio y a la NASA de Estados Unidos por permitirnos el acceso al software DataDemon.

Resumen

Este trabajo tiene por objeto identificar los principales modos de variabilidad hidro-climática en series de precipitación, caudales y temperatura en Colombia y en la cuenca Amazónica, de varias resoluciones temporales, comparando los resultados obtenidos mediante las transformadas de Fourier, Onditas y Hilbert-Huang, así como identificar señales de cambio climático y variabilidad hidro-climática de largo plazo a través de la metodología de la Descomposición en Modos Empíricos. Finalmente, se acopla la transformada de Hilbert-Huang con modelos conocidos de predicción de caudales promedios mensuales con el fin de potenciarlos y aumentar la capacidad predictiva. Los resultados obtenidos evidencian la potencia y superioridad de la transformada de Hilbert-Huang, no sólo para el análisis de señales no estandarizadas y series con datos atípicos, sino también para extraer residuos que representan las tendencias de largo plazo de las series estudiadas mediante Descomposición en Modos Empíricos. Además se muestra que la aplicación de la transformada de Hilbert-Huang al pronóstico de caudales medios mensuales conduce a mejorar los pronósticos de los métodos AR(1) y Redes Neuronales, para todas las ventanas de predicción.

Palabras clave: Análisis espectral, Descomposición en Modos Empíricos, Hidrometeorología, Transformada de Fourier, Transformada de Hilbert-Huang, Transformada en Onditas, Variabilidad Hidro-climática.

Abstract

The application of the Hilbert-Huang Transform in series of rainfall, river discharge and temperature (in different temporal resolutions) is studied, in order to identify the principal modes of hydro-climatic variability in Colombia and the Amazon River Basin, comparing the results with those obtained by the Fourier, Wavelet and Hilbert-Huang transforms. Also, signs of climate change and long term hydro-climatic variability are detected through the Empirical Mode Decomposition. Finally, the Hilbert-Huang transform coupled with well known predictive models is used in order to empower and enhance the predictive capability of mean monthly river discharges. The power and superiority of the Hilbert-Huang transform is demonstrated, not only for non-standardized signal analysis and series with outliers, but also to detect a residue that represents the long-term trend of the studied series by the Empirical Mode Decomposition. Results also show that the application of the Hilbert-Huang transform to the prediction of mean monthly river discharges, leads to improve the AR (1) and Neural Networks methods.

Keywords: Spectral analysis, Empirical Mode Decomposition, Hydrometeorology, Fourier Transform, Hilbert-Huang Transform, Wavelet Transform, hydro-climatic variability.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	5
Fundamentos Teóricos	5
2.1 Transformada de Fourier	6
2.1.1 Transformada de Fourier Por Ventanas	8
2.2 Transformada en Onditas	9
2.3 Transformada de Hilbert-Huang	12
2.3.1 Análisis Espectral de Hilbert	12
2.3.2 Descomposición en Modos Empíricos (DME)	14
2.3.3 Estado del Arte de la Aplicación de la Transformada de Hilbert-Huang	16
CAPÍTULO 2	19
Información Utilizada	19
CAPÍTULO 3	36
Aplicación en Series Hidrometeorológicas en Colombia y la Cuenca Amazónica 36	
3.1 Identificación de Modos Principales de Variabilidad Hidroclimática	36
3.1.1 Precipitación Mensual	37
3.1.2 Precipitación Diaria	64
3.1.3 Precipitación Horaria.....	69
3.1.4 Caudales Medios Mensuales	72
3.1.5 Temperatura Media Mensual	80
3.1.6 Temperatura Mínima Mensual	82
3.2 Detección de Señales de Cambio Climático	86

3.3	Aplicación de la transformada de Hilbert-Huang a la Predicción de Caudales Medios Mensuales	105
3.3.1	Modelos Auto-regresivos Univariados AR(p).....	105
3.3.2	Redes Neuronales	106
3.3.3	Predicción de Caudales Medios Mensuales en Ríos Colombianos.....	110
	CONCLUSIONES	119
	REFERENCIAS	124

Lista de Tablas

Tabla 1 Estaciones de precipitación mensual en la cuenca Amazónica	21
Tabla 2 Regiones de precipitación homogénea en Colombia (Hurtado, 2009).....	22
Tabla 3 Estaciones colombianas de precipitación mensual	22
Tabla 4 Estaciones colombianas de precipitación diaria	25
Tabla 5 Estaciones colombianas de precipitación horaria	26
Tabla 6 Estaciones colombianas de caudales medios mensuales	27
Tabla 7 Estaciones colombianas de temperatura media mensual	28
Tabla 8 Estaciones colombianas de temperatura mínima mensual	29
Tabla 9 Frecuencias predominantes detectadas en la señales de precipitación mensual, Amazonas.....	38
Tabla 10 Propiedades de las FMI, Estación 155001	39
Tabla 11 Frecuencias predominantes en la región 1, Llanura del Pacífico.....	41
Tabla 12 Frecuencias predominantes en la región 2, Cordillera Oriental-Ladera Oriental	41
Tabla 13 Frecuencias predominantes en la región 3, Meseta de Popayán-Río Cauca	42
Tabla 14 Frecuencias predominantes en la región 4, Río Magdalena	42
Tabla 15 Frecuencias predominantes en la región 5, Cordillera Central-Ladera Oriental	43
Tabla 16 Frecuencias predominantes en la región 6, Valle del Magdalena.....	43
Tabla 17 Frecuencias predominantes en la región 7, Cordillera Oriental-Ladera Oriental	44
Tabla 18 Frecuencias predominantes en la región 8, Piedemonte llanero	44
Tabla 19 Frecuencias predominantes en la región 9, Valle del Cauca	45
Tabla 20 Frecuencias predominantes en la región 10, Río Magdalena	45
Tabla 21 Frecuencias predominantes en la región 11, Cordillera Oriental-Ladera Oriental	46
Tabla 22 Frecuencias predominantes en la región 12, Atlántico.....	46
Tabla 23 Frecuencias predominantes en la región 13, Río Cauca	47
Tabla 24 Frecuencias predominantes en la región 14, Panamá	47
Tabla 25 Frecuencias predominantes en la región 15, Río Magdalena	48
Tabla 26 Frecuencias predominantes en la región 16, Río Magdalena	48
Tabla 27 Frecuencias predominantes en la región 17, Península de la Guajira.....	49

Tabla 28 Frecuencias predominantes en la región 20, Cordillera Oriental-Ladera Occidental.....	49
Tabla 29 Frecuencias predominantes en la región 21, Río Cauca	50
Tabla 30 Frecuencias predominantes en la región 22, Llanos Orientales	50
Tabla 31 Propiedades de las FMI, Estación 5311501	52
Tabla 32 Propiedades de las FMI, Estación 2118004	55
Tabla 33 Propiedades de las FMI, Estación 5307003	57
Tabla 34 Propiedades de las FMI, Estación 2125007	60
Tabla 35 Propiedades de las FMI de la serie estandarizada, Estación 2125007	60
Tabla 36 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Atrato Colombia	64
Tabla 37 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Catatumbo, Colombia.....	65
Tabla 38 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Patía, Colombia	65
Tabla 39 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Orinoco, Colombia	66
Tabla 40 Propiedades de las FMI, Estación 5102001	67
Tabla 41 Frecuencias predominantes en las series de precipitación horaria, Región Cenicafé Colombia	69
Tabla 42 Propiedades de las FMI, Estación 2308517	70
Tabla 43 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Atrato	72
Tabla 44 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Catatumbo	73
Tabla 45 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Lebrija	73
Tabla 46 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Negro	74
Tabla 47 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Nechí.....	74
Tabla 48 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Patía.....	75
Tabla 49 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Saldaña.....	75
Tabla 50 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río San Juan.....	76
Tabla 51 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Sinú.....	76
Tabla 52 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Sumapaz.....	77
Tabla 53 Propiedades de las FMI, Estación 2205701, Río Saldaña	78
Tabla 54 Frecuencias predominantes en las series de temperatura media mensual	80
Tabla 55 Propiedades de las FMI, Estación 2315503	81
Tabla 56 Frecuencias predominantes en las series de temperatura mínima mensual	83
Tabla 57 Propiedades de las FMI, Estación 2403512	84
Tabla 58 Estaciones con un registro superior a 25 años en Colombia	89
Tabla 59 Estaciones con un registro superior a 30 años en Colombia	89

Tabla 60 Estaciones con un registro superior a 40 años en Colombia	90
Tabla 61 Estaciones con un registro superior a 50 años en Colombia	90
Tabla 62 Resultados tendencias en la precipitación, Cuenca Amazónica	90
Tabla 63 Estaciones de precipitación mensual comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010)	101
Tabla 64 Estaciones de caudales medios mensuales comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010)	102
Tabla 65 Estaciones de temperatura media mensual comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010)	102
Tabla 66 Estaciones de temperatura mínima mensual comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010)	103
Tabla 67 Períodos de Calibración y validación de los ríos estudiados	112
Tabla 68 Errores de predicción, Río Atrato	113
Tabla 69 Errores de predicción, Río Catatumbo	113
Tabla 70 Errores de predicción, Río Lebrija	113
Tabla 71 Errores de predicción, Río Nechí.....	114
Tabla 72 Errores de predicción, Río Negro	114
Tabla 73 Errores de predicción, Patía	114
Tabla 74 Errores de predicción, Río Saldaña	114
Tabla 75 Errores de predicción, Río San Juan.....	115
Tabla 76 Errores de predicción, Río Sinú.....	115
Tabla 77 Errores de predicción, Río Sumapaz.....	115

Lista de Figuras

Figura 1	Localización estaciones de precipitación mensual en la cuenca Amazónica.....	30
Figura 2	Localización estaciones de precipitación mensual en Colombia	31
Figura 3	Localización estaciones de precipitación diaria en Colombia.....	32
Figura 4	Localización estaciones de precipitación horaria en Colombia	33
Figura 5	Localización estaciones de caudales medios mensuales en Colombia	34
Figura 6	Localización estaciones de Temperatura Media y Mínima mensual en Colombia.....	35
Figura 7	Proceso de desplazamiento y escalamiento de la transformada en onditas.....	11
Figura 8	Ondita tipo Morlet.....	11
Figura 9	Serie de precipitación mensual estación 155001, Cuenca Amazónica	39
Figura 10	Descomposición en modos empíricos, estación 155001, Cuenca Amazónica	39
Figura 11	Espectro de potencias (Fourier), estación 155001, Cuenca Amazónica.....	40
Figura 12	Espectro de Onditas, estación 155001, Cuenca Amazónica.....	40
Figura 13	Espectro de Hilbert, estación 155001, Cuenca Amazónica.....	40
Figura 14	Precipitación mensual, estación 5311501, región 1, Colombia	51
Figura 15	Descomposición en modos empíricos, estación 5311501, región 1, Colombia	52
Figura 16	Espectro de potencias (Fourier), estación 5311501, región 1, Colombia.....	52
Figura 17	Espectro de Onditas, estación 5311501, región 1, Colombia.....	53
Figura 18	Espectro de Hilbert, estación 5311501, región 1, Colombia.....	53
Figura 19	Series FMI h6 de la estación 5311501 (verde), PDO (rojo) y AMO (azul).....	54
Figura 20	Precipitación mensual, estación 2118004, región 5, Colombia	54
Figura 21	Descomposición en modos empíricos, estación 2118004, región 5, Colombia	55
Figura 22	Espectro de potencias (Fourier), estación 2118004, región 5, Colombia.....	55
Figura 23	Espectro de Onditas, estación 2118004, región 5, Colombia.....	56
Figura 24	Espectro de Hilbert, estación 2118004, región 5, Colombia.....	56
Figura 25	Precipitación mensual, estación 5307003, región 1, Colombia	57
Figura 26	Descomposición en modos empíricos, estación 5307003, región 1, Colombia	57
Figura 27	Espectro de potencias (Fourier), estación 5307003, región 1, Colombia.....	58
Figura 28	Espectro de Onditas, estación 5307003, región 1, Colombia.....	58

Figura 29 Espectro de Hilbert, estación 5307003, región 1, Colombia.....	58
Figura 30 Precipitación mensual, estación 2125007, región 6, Colombia	59
Figura 31 Serie estandarizada de precipitación mensual, estación 2125007, región 6, Colombia .	59
Figura 32 Descomposición en modos empíricos, estación 2125007, región 6, Colombia	59
Figura 33 Descomposición en modos empíricos de la serie estandarizada, estación 2125007, región 6, Colombia	60
Figura 34 Espectro de potencias (Fourier), estación 2125007, región 6, Colombia.....	61
Figura 35 Espectro de potencias (Fourier) de la serie estandarizada, estación2125007, región 6, Colombia	61
Figura 36 Espectro de Onditas, estación 2125007, región 6, Colombia.....	61
Figura 37 Espectro de Onditas de la serie estandarizada, estación 2125007, región 6, Colombia	62
Figura 38 Espectro de Hilbert, estación 2125007, región 6, Colombia.....	62
Figura 39 Espectro de Hilbert de la serie estandarizada, estación 2125007, región 6, Colombia ..	63
Figura 40 Precipitación Diaria, estación 5102001, Colombia	66
Figura 41 Descomposición en modos empíricos, estación 5102001, Colombia	67
Figura 42 Espectro de potencias (Fourier), estación 5102001, Colombia	67
Figura 43 Espectro de Onditas, estación 5102001, Colombia.....	68
Figura 44 Espectro de Hilbert, estación 5102001, Colombia.....	68
Figura 45 Precipitación Horaria, estación 2308517, Colombia	70
Figura 46 Descomposición en modos empíricos, estación 2308517, Colombia	70
Figura 47 Espectro de potencias (Fourier), estación 2308517, Colombia	70
Figura 48 Espectro de Onditas, estación 2308517, Colombia.....	71
Figura 49 Espectro de Hilbert, estación 2308517, Colombia.....	71
Figura 50 Caudales medios mensuales, estación 2205701, Río Saldaña	77
Figura 51 Descomposición en modos empíricos, estación 2205701, Río Saldaña.....	78
Figura 52 Espectro de potencias (Fourier), estación 2205701, Río Saldaña	78
Figura 53 Espectro de Onditas, estación 2205701, Río Saldaña	79
Figura 54 Espectro de Hilbert, estación 2205701, Río Saldaña	79
Figura 55 Temperatura media mensual, estación 2315503.....	81
Figura 56 Descomposición en modos empíricos, estación 2315503.....	81
Figura 57 Espectro de potencias (Fourier), estación 2315503	81
Figura 58 Espectro de Onditas, estación 2315503	82
Figura 59 Espectro de Hilbert, estación 2315503	82
Figura 60 Temperatura mínima mensual, estación 2403512.....	83
Figura 61 Descomposición en modos empíricos, estación 2403512.....	83
Figura 62 Espectro de potencias (Fourier), estación 2403512	84
Figura 63 Espectro de Onditas, estación 2403512	84

Figura 64 Espectro de Hilbert, estación 2403512	85
Figura 65 Serie de Temperatura Mínima Mensual Aeropuerto Olaya Herrera, Medellín	88
Figura 66 Descomposición en modos empíricos, Aeropuerto Olaya Herrera.....	88
Figura 67 Serie temperatura Mínima Aeropuerto Olaya Herrera + Residuo.....	88
Figura 68 Residuo descomposición en modos empíricos.....	89
Figura 69 Tendencias en las estaciones de Precipitación Mensual en la cuenca Amazónica	92
Figura 70 Tendencias en las estaciones de Precipitación Mensual, tendencia creciente (izquierda), tendencia decreciente (derecha).....	93
Figura 71 Tendencias en las estaciones de Precipitación Mensual (izquierda) y Tendencias en las estaciones de Caudal (derecha)	94
Figura 72 Tendencias en las estaciones de Temperatura Media (izquierda) y Temperatura Mínima (derecha)	95
Figura 73 Variación de la magnitud de la tendencia con la Elevación de las estaciones de precipitación, Colombia	96
Figura 74 Variación de la magnitud de la tendencia con la Elevación de las estaciones de precipitación, Cuenca Amazónica.....	96
Figura 75 Variación de la tendencia de los caudales de los ríos Negro, Saldaña, Atrato y San Juan	97
Figura 76 Variación de las temperaturas media y mínima y de la magnitud de la tendencia con la elevación	98
Figura 77 Tendencia en la serie de tiempo del promedio mensual de advección de humedad por el Chorro del Chocó.	99
Figura 78 Esquema de Neuron Simple	107
Figura 79 Esquema una red compuesta por una sola capa	108
Figura 80 Esquema de perceptrón multicapa,)	110
Figura 81. Predicción de la serie de caudales medios mensuales del Río Atrato con el modelo AR(1).	116
Figura 82 Predicción Caudal Río Atrato, Redes Neuronales.....	116
Figura 83 Errores de predicción Ríos Atrato y Cataumbo	118

Introducción

Colombia exhibe una alta variabilidad climática en diferentes escalas temporales y espaciales, por su localización tropical entre el océano Pacífico y el mar Caribe, por tener parte de su territorio dentro de las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco, y por la presencia de los 3 ramales de la cordillera de los Andes (Poveda, 2004).

Entre los mecanismos físicos que dominan la variabilidad climática colombiana se destaca el ciclo anual de las precipitaciones, resultado de la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), de la dinámica del Chorro del Chocó (Poveda, 1998), con sistemas convectivos de mesoescala (Velasco y Frish, 1987, Poveda 1998, Mejia y Poveda 2005, Zuluaga y Poveda, 2004), así como de la dinámica del chorro del este de Colombia (Montoya, Pelkowski y Eslava, 2001). La variabilidad climática interanual está dominada por las dos fases del sistema El Niño/Oscilación del Sur (ENSO): El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría).

A escalas mayores (decadal e interdecadal) actúan fenómenos macro-climáticos como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), fenómenos que hacen parte de la variabilidad natural del clima del planeta.

A nivel intra-anual se evidencian fenómenos como la oscilación de 30-60 días u oscilaciones de Madden-Julian (Madden y Julian, 1971, Poveda 1998, Hoyos

1999), las ondas tropicales del este (Riehl y Malkus 1958), los huracanes sobre el Caribe y el Pacífico Oriental, y la poco estudiada interacción suelo-atmósfera. En la escala diurna, la gran amplitud del ciclo diurno de las temperaturas es la característica más dominante en la variabilidad climática del trópico (Hastenrath, 1991, Poveda 2004), el cual se manifiesta en el ciclo diurno de la precipitación (Poveda *et al.*, 2005).

El entendimiento de la interacción de la dinámica acoplada del sistema hidroclimático en distintas escalas espaciales y temporales es un tema de estudio relevante en las ciencias geofísicas. Esta variación del clima en el planeta es natural, sin embargo la acción antrópica, causante del calentamiento global y del cambio ambiental aumenta la complejidad del sistema hidro-climático, influyendo en la capacidad de predicción de los fenómenos (Poveda, 2004).

Hay muchas evidencias de cambio climático en Colombia. El trabajo de Hense, Krahe y Flohn (1988) reporta incrementos en las temperaturas medias anuales de la tropósfera entre 200 y 700 hPa para Bogotá. Smith *et al.*, (1996) realizan pruebas estadísticas para la detección de tendencias y cambios en la función de probabilidad de registros hidrológicos de Colombia, en términos de cambios en la media, la varianza y tendencias. El trabajo de Smith *et al.*, (1996) evidencia cambios en la serie centenario de precipitación anual del Observatorio Nacional en Bogotá y rasgos de tendencia decrecientes en la media anual, pero atribuyó dichos cambios y tendencias al efecto de “isla de calor” debido a la ubicación de la estación de medición en Bogotá. Por otra parte, Mesa, Poveda y Carvajal (1997) realizan una serie de análisis de tipo estadístico guiados hacia la búsqueda de evidencias de cambio climático en variables con resolución mensual, como la temperatura (media y mínima), punto de rocío, tensión de vapor, evaporación de tanque, precipitación, caudal y presión atmosférica. Allí se concluye que, en general, la precipitación presenta evidencias mezcladas de cambio climático con tendencias positivas y negativas en toda Colombia, sin ningún patrón geográfico característico. Mesa, Poveda y Carvajal (1997)

encuentran que los caudales de las principales cuencas de Colombia exhiben tendencias negativas y las atribuyen a diferentes causas como la deforestación en algunas zonas. Los resultados producto de ese trabajo, junto con los de Ochoa y Poveda (2008) confirman la existencia de tendencias crecientes, estadísticamente significativas en los registros de temperaturas medias y mínimas (en particular, señalan tendencias positivas del orden de 1°C en 20 años en los registros de temperatura mínima), así como en los de humedad relativa y evaporación en todo el país. Finalmente, en Colombia también se han encontrado evidencias de retroceso de los glaciares de montaña (Hoyos, 1996; Poveda y Pineda 2009).

Así, se hace necesario el análisis de las diferentes variables hidro-climáticas mediante herramientas de diagnóstico potentes que contribuyan de manera eficaz al entendimiento de los distintos fenómenos y modos de variabilidad hidro-climática, que influyen en forma simultánea sobre la hidro-climatología del trópico suramericano. A su vez, también se necesita continuar la búsqueda de evidencias y señales de cambio climático en Colombia, en series de registros más largos que los usados por Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y a la vez usando metodologías estadístico-matemáticas novedosas y potentes.

La Transformada de Hilbert-Huang (THH; Huang *et al.*, 1998, Huang y Wu, 2008) es una herramienta matemática moderna que se compone de la Descomposición en Modos Empíricos (DME), y de la transformada de Hilbert. Esta transformada es aplicable para estimar el espectro de señales no lineales y no estacionarias, permitiendo el análisis de series de variables sin un procesamiento previo, entregando resultados de fácil interpretación física. Es por esto que la THH es útil en el campo de la investigación hidro-climatológica, cuyas series exhiben variabilidad en distintas escalas espaciales y temporales y además supera en muchos aspectos a otras técnicas similares como la Transformada Rápida de Fourier y la transformada en Onditas (Wavelets).

Este trabajo tiene por objeto identificar los principales modos de variabilidad hidro-climática en series de precipitación, caudales y temperatura en Colombia y en la cuenca Amazónica, de varias resoluciones temporales, comparando los resultados obtenidos mediante las transformadas de Fourier, Onditas y Hilbert-Huang, así como identificar señales de cambio climático y variabilidad hidro-climática de largo plazo a través de la metodología de la Descomposición en Modos Empíricos. Finalmente, se acoplará la transformada de Hilbert-Huang con modelos conocidos de predicción de caudales promedios mensuales con el fin de potenciarlos y aumentar la capacidad predictiva.

El presente trabajo se distribuye de la siguiente manera: en el primer capítulo se hace una revisión de las herramientas matemáticas utilizadas para el análisis de la información, es decir, una descripción de las transformadas de Fourier, Onditas y Hilbert-Huang y también el estado del arte de la metodología de análisis de Hilbert-Huang. En el segundo capítulo se describen las series de precipitación, caudal y temperatura media y mínima utilizadas. En el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos: los principales modos de variabilidad encontrados para las estaciones estudiadas regionalmente, los resultados de la búsqueda de señales de cambio climático y tendencias y por último, el acoplamiento de la Descomposición en Modos Empíricos a modelos de predicción existentes. Finalmente se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

Capítulo 1

Fundamentos Teóricos

Con el fin de explicar, comprender y estudiar los procesos que ocurren en la naturaleza, especialmente en el campo de la hidro-climatología, se ha recurrido al análisis de series de variables como precipitación, temperatura, caudal, velocidad de viento, evapotranspiración, entre otras. Desafortunadamente, estos datos, ya sean provenientes de mediciones en campo o de simulación numérica generalmente tienen uno de los siguientes inconvenientes: 1) La longitud de registro es demasiado corta, 2) Los datos son no-estacionarios, ó su función de distribución de probabilidades varía en el tiempo, 3) Los datos representan procesos no-lineales. Esto hace que las herramientas con las cuales podemos estudiar dichas variables sean limitadas (Huang y Wu, 2008).

El análisis de las series de tiempo puede hacerse tanto en el dominio del tiempo donde la señal o el proceso es función del tiempo $f(t)$, como en el dominio de la frecuencia, en el cual el proceso es definido por su amplitud F en función de la frecuencia ω , $F(\omega)$. Para este último fin se utilizan tradicionalmente dos metodologías: la Transformada de Fourier y la Transformada en Onditas.

En este capítulo se discuten ambas metodologías, y se hace una revisión de la transformada de Hilbert-Huang.

2.1 Transformada de Fourier

Históricamente, el análisis espectral mediante la transformada de Fourier ha sido un método ampliamente usado para examinar la energía global de una distribución de frecuencias. Como resultado el término “Espectro” se ha vuelto prácticamente sinónimo de la transformada de Fourier de los datos (Huang y Hu, 2008).

Esta herramienta permite analizar una señal periódica en términos de su contenido frecuencial o espectro. En el análisis tradicional de Fourier, la frecuencia se define utilizando el seno y el coseno de funciones que abarcan toda la longitud de los datos (Rao y Hsu, 2008). La transformada de Fourier descompone o separa una función en senos y cosenos de diferentes frecuencias, los cuales sumados dan como resultado la

función original (Hoyos, 1999). Para una función $f(t) \in L^1$, es decir $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$, la definición más común de la transformada de Fourier de una señal continua $f(t)$ es la dada por la Ecuación (1):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i \omega t} dt \quad (1)$$

Existe además una relación inversa que permite obtener $f(t)$ a partir de $F(\omega)$, si $f(t) \in L^2$,

es decir $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty$:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{2\pi i \omega t} d\omega \quad (2)$$

De acuerdo con el teorema de Parseval (Papoulis, 1962), la potencia total de una señal es la misma si se estima en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia:

$$Potencia_total \equiv \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega, \quad (3)$$

Y de esta manera, el espectro de potencias $P(\omega)$ estará dado por:

$$P(\omega) = |\hat{f}(\omega)|^2 \quad (4)$$

Cuando no se trabaja con procesos continuos, sino señales de tiempo discretas, con N datos separados cierta unidad de tiempo Δt se recurre a la Transformada Discreta de Fourier (TDF), que permite aplicar la transformada de Fourier en funciones con un número finito de elementos. La TDF se define como:

$$F_n(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f_k(t) e^{-\frac{2\pi i \omega nk}{N}}, \text{ con } n = -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (5)$$

Teniendo un número finito de observaciones N con una tasa de muestreo Δt , es posible estimar la transformada a lo sumo para N frecuencias comprendidas en el intervalo desde $-\omega_c$ hasta ω_c , donde ω_c es la frecuencia más alta de la cual se puede obtener respuesta o frecuencia de Nyquist, definida como $\frac{\Omega}{2} = \frac{1}{2\Delta t}$, debido a que el muestreo crítico para una onda sinusoidal es de 2 datos por ciclo (Press *et al.*, 1986,1992). Esto surge a partir del teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, que dice que para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. De esta manera las frecuencias que se pueden estudiar son las que corresponden a todos los modos de oscilación que tengan un número entero de períodos en el intervalo de la serie de datos, uno de los cuales es la onda con el período más grande posible (modo fundamental) $N\Delta t$, asociado a la frecuencia más baja.

Es importante tener en cuenta que el análisis espectral mediante la transformada de Fourier tiene algunas restricciones: primero, el sistema a analizar debe ser lineal y los datos deben ser estrictamente periódicos o estacionarios, de otra manera, el resultado del espectro no tiene ningún significado físico. Por otra parte, el espectro de Fourier define componentes armónicos uniformes globalmente, por lo tanto necesita de muchos componentes armónicos adicionales para poder simular los datos que son no estacionarios y como resultado este procedimiento propaga la energía a través de una

amplia gama de frecuencias. Consecuentemente, las componentes de Fourier tienen sentido matemático, pero en realidad no tienen un sentido físico (Huang y Wu, 2008). Finalmente, la transformada de Fourier sólo localiza las frecuencias más importantes de la señal, pero no permite identificar esas frecuencias en el tiempo, pues su espectro de potencias es unidimensional y se representa en una gráfica de frecuencia contra potencia (Hoyos, 1999).

2.1.1 Transformada de Fourier Por Ventanas

Con el fin de superar la restricción de estacionariedad que deben tener los datos para poder ser analizados mediante la transformada de Fourier, se planteó lo que se conoce como la transformada de Fourier por ventanas, en la cual se concentra la señal en un intervalo finito usando ventanas acotadas por funciones adecuadas conocidas y finalmente se aplica la transformada de Fourier. Luego, con el fin de cubrir toda la señal las ventanas escogidas se van desplazando a lo largo de la serie (Hoyos, 1999). “La transformada de Fourier por ventanas o de ventana deslizante se define de la siguiente manera:

$$Gf(\omega, u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-u)e^{-i2\pi\omega t} dt, \quad (6)$$

con semilla de integración $g_{\omega, u}(t) \equiv g(t-u)e^{-i2\pi\omega t}$. La función que se utiliza como ventana $g(u)$ usualmente tiene concentrada la energía en las componentes de baja frecuencia. Esta transformada mide localmente alrededor del punto u la amplitud de onda sinusoidal de frecuencia ω . Mientras en la transformada de Fourier la base para la representación de funciones es una senoide, en la transformada de Fourier por ventanas es una senoide que decae de la misma manera que decae la función ventana” (Hoyos, 1999).

Una de las restricciones principales de la transformada de Fourier por ventanas es que cuando la señal analizada tiene características importantes en diferentes escalas, no es posible hallar una función $g(u)$ óptima, por lo tanto, esta transformada es útil cuando todos los procesos ocurren aproximadamente a la misma escala (Hoyos, 1999).

2.2 Transformada en Onditas

La transformada de Fourier por ventanas constituyó un punto de partida para la Transformada en Onditas, la cual utiliza una “onda pequeña” o pulso, en la cual la energía está concentrada en un intervalo de tiempo, permitiendo desarrollar una herramienta de análisis de fenómenos transitorios y no estacionarios simultáneamente en el tiempo y la frecuencia” (Hoyos, 1999).

Con el fin de obtener la localización de las señales con frecuencias altas, es necesario tener una función $\psi(t)$, tal que su desviación estándar, σ_ψ sea pequeña cuando $\psi(t)$ caracterice altas frecuencias y viceversa. Para esto se usan familias de funciones de dos parámetros llamadas “onditas”, donde uno de los parámetros es la traslación (como en la transformada de Fourier por ventanas) y el otro es la dilatación, (**Figura 1**) (Daubechies, 1992; Torrence y Compo, 1998, Hoyos, 1999). La transformada en onditas de una función $f(t)$ con energía finita, se define como la transformada integral con una familia de

funciones $\psi_{\lambda,t}(u) \equiv \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \psi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right)$ (onditas), de la siguiente manera:

$$W(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \psi_{\lambda,t}(u) du \quad \text{para } \lambda > 0, \quad (7)$$

En la cual t es el parámetro de traslación o localización, λ el de dilatación o escala y $\psi(t)$ es la ondita madre.

La constante de normalización $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$, se escoge de manera que $\int |\psi_{\lambda,t}(u)|^2 du = \int |\psi(t)|^2 dt$, para todas las escalas. La escogencia de la ondita madre $\psi(t)$ no es única. Ésta se selecciona de tal manera que tenga soporte compacto (o decaimiento suficientemente rápido) para obtener localización en espacio y media cero,

es decir $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ (condición de admisibilidad)” (Hoyos, 1999).

En esta investigación se trabajó con la ondita Morlet, debido a que ofrece buenos resultados, especialmente en localización en frecuencias. Además tiene una expresión muy simple, que consiste de una onda plana modulada por una Gaussiana (**Figura 2**).

De igual manera como se trabaja la transformada discreta de Fourier, existe la transformada discreta en onditas, en donde se define la transformada como la convolución de X_n con una versión trasladada y escalada de la ondita madre $\psi_0(\eta)$. El argumento η es un parámetro adimensional del tiempo.

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^* \left(\frac{(n' - n)\Delta t}{s} \right), \quad (8)$$

En donde ψ hace referencia al conjugado complejo, s es el parámetro de escala y n el parámetro de localización. Finalmente, la función de energía se define como el cuadrado de la magnitud de la transformada en onditas:

$$E(\lambda, t) = |W(\lambda, t)|^2 \quad (9)$$

La transformada en onditas localiza temporal y frecuencialmente la señal, pues su espectro de potencias es un mapa de curvas de nivel (dos dimensiones) representadas en un marco definido por un eje temporal y uno frecuencial (Daubechies, 1992, Torrence y Compo, 1998). El espectro de potencias se refiere a la descomposición en el espacio de las frecuencias, de las contribuciones a la varianza total de cada componente, a cierta escala (relacionada con un período) y para un tiempo específico de una señal, es decir, cuándo y en qué períodos la serie contribuye más a la varianza total.

La transformada en onditas tiene ventajas sobre el análisis de Fourier ya que permite estudiar la señal en cualquier punto en el tiempo usando el parámetro de localización t . Además la escala λ puede usarse para hacer “zoom” en una parte específica de la señal, teniendo en cuenta que las operaciones de translación y dilatación se efectúan sobre la ondita madre para hallar los coeficientes en onditas de una señal, los cuales representan la correlación entre la ondita y una sección localizada de la señal. Sin embargo la transformada en onditas también tiene restricciones, entre ellas que existe una pérdida generada por la extensión limitada de ondita madre, teniendo en cuenta que estas onditas no son de naturaleza adaptativa, es decir, no son intrínsecas a la señal (Huang et al. 1998).

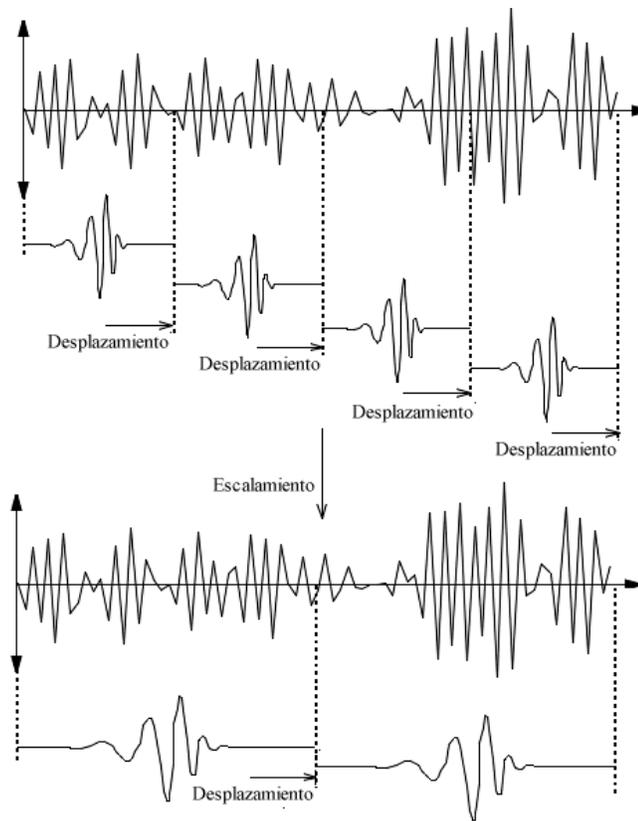


Figura 1 Proceso de desplazamiento y escalamiento de la transformada en onditas, (Hoyos, 1999).

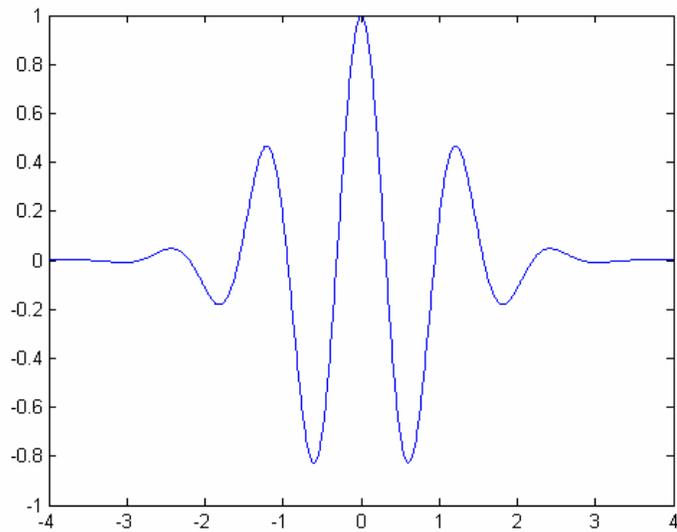


Figura 2 Ondita tipo Morlet.

2.3 Transformada de Hilbert-Huang

Las metodologías tradicionales expuestas en los apartes anteriores han sido ampliamente utilizadas a través de los años, sin embargo sus requerimientos de linealidad y estacionariedad limitan su uso, lo cual hace necesario el desarrollo de nuevas metodologías para el análisis de series. La transformada de Hilbert-Huang, que lleva su nombre debido a la combinación del análisis espectral de Hilbert y la Descomposición en Modos Empíricos (DME), desarrollada por Norden Huang (Huang *et al.*, 1998, 1999, Huang y Hu, 2008), fue diseñada específicamente para el análisis de datos no lineales y no estacionarios y consiste en descomponer primero la serie de datos en Funciones de Modos Intrínsecos (FMI) mediante la metodología de DME, la cual expande la serie en modos base derivados de los propios datos y luego aplica la transformada de Hilbert para estimar la distribución Tiempo-Frecuencia-Energía, denominada Espectro de Hilbert (Huang *et al.*, 1998).

2.3.1 Análisis Espectral de Hilbert

Una manera de enfrentar la no-estacionariedad en un proceso estocástico, es encontrando la frecuencia instantánea y la amplitud instantánea. Ésta es la razón por la cual se involucra el análisis espectral de Hilbert como parte de la THH (Huang y Wu, 2008) pues en el análisis tradicional de Fourier, la frecuencia se define mediante el ajuste de una función sinusoidal de amplitud constante para todo el periodo de registros, mientras que con la THH se busca identificar la frecuencia en cualquier instante de tiempo y no de manera general o global (Huang *et al.* 1998).

Para cualquier función $x(t)$ de clase L^p , es decir $x(t) \in L^p = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^p dt < \infty$, su transformada de Hilbert, $y(t)$, es un caso especial de convolución de la función $x(t)$ y una función $g(t)=1/t$ y se define como:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (10)$$

donde P es el valor principal de Cauchy de la integral singular, es decir que el límite definido por la ecuación 11, existe:

$$P \int_{-a}^a \frac{1}{x} dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \left(\int_{-a}^{-\varepsilon} \frac{1}{x} dx + \int_{\varepsilon}^a \frac{1}{x} dx \right) = 0. \quad (11)$$

La función $x(t)$ y su transformada de Hilbert, $y(t)$, forman un par conjugado complejo, y por lo tanto es posible definir una señal analítica $z(t)$:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)}, \text{ con } i = \sqrt{-1}, \quad (12)$$

$$a(t) = (x^2 + y^2)^{1/2}, \quad (13)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{y}{x}, \quad (14)$$

En las ecuaciones (12) y (13), la variable a representa la amplitud instantánea y θ la función de fase instantánea. La frecuencia instantánea, única para un tiempo dado, es:

$$w = \frac{d\theta}{dt}, \quad (15)$$

Dado que tanto la amplitud como la frecuencia son funciones del tiempo, es posible expresar la amplitud, o la energía, definida como el cuadrado de la amplitud (Huang y Wu, 2008) en términos de una función del tiempo y la frecuencia $H(w,t)$. El espectro marginal se puede definir como:

$$h(w) = \int_0^T H(w,t) dt, \quad (16)$$

Donde $[0, T]$ es el dominio temporal en el cual están definidos los datos. El espectro marginal representa la amplitud acumulada (energía) sobre toda la extensión de los datos en un sentido probabilístico y ofrece una medida de la contribución de cada valor de

frecuencia a la amplitud total, por lo tanto es una forma alternativa de representar el espectro a la del análisis tradicional de Fourier.

Sin embargo, para un proceso estocástico $x(t)$ arbitrario, la frecuencia obtenida a partir de la transformada de Hilbert no tiene necesariamente significado físico. Huang *et al.* (1998), demostraron que para una adecuada estimación de la frecuencia instantánea mediante la transformada de Hilbert, la función $x(t)$ debe ser una función puramente oscilatoria con un nivel de referencia cero. De hecho, la búsqueda de la expresión para una $x(t)$ arbitraria en términos de una suma de un pequeño número de funciones puramente oscilatorias para las cuales la transformada de Hilbert tuviera sentido físicamente, fue la motivación para el desarrollo de la Descomposición en Modos Empíricos (Huang y Wu, 2008).

2.3.2 Descomposición en Modos Empíricos (DME)

El procedimiento clave de la transformada de Hilbert-Huang es la descomposición en modos empíricos (Huang y Wu, 2008), mediante la cual, cualquier conjunto de datos puede ser descompuesto en un número finito de Funciones de Modos Intrínsecos (FMI), asumiendo que en cualquier tiempo dado, la serie de tiempo puede contener diversos modos oscilatorios simples de diferente frecuencia, coexistiendo simultáneamente en la señal. En esta metodología se adopta el término “función de modos intrínsecos (FMI)” debido a que estas funciones representan las oscilaciones embebidas en los datos que son propias de la señal.

Cada FMI debe satisfacer dos condiciones básicas: 1) en toda la serie, el número de valores extremos y el número de cruces por cero deben ser iguales o diferentes al menos en uno. 2) en cualquier punto de los datos, el valor medio de la envolvente definida usando el máximo local y el mínimo local es cero (Huang y Wu, 2008) y a diferencia de las funciones armónicas que tienen frecuencia y amplitud constante, las FMI pueden tener amplitud y frecuencias variables como función del tiempo.

La descomposición en modos empíricos (DME) es adaptativa, es decir, que la base de la descomposición se estima exclusivamente a partir de los datos, basada en las características locales de la señal. Esto hace que la metodología sea aplicable a

procesos no lineales y no-estacionarios, ya que no impone ninguna base a priori, tal como otros métodos de descomposición existentes; por ejemplo, la transformada de Fourier que utiliza las funciones trigonométricas. Una de las características principales de la DME es que se aplica directamente en el espacio temporal y no en el espacio frecuencial.

El proceso de la DME se designa como un proceso de filtrado mediante el cual se separan los modos de oscilación de más alta frecuencia, con base en la escala de tiempo característica, suavizando las amplitudes desiguales, y según las siguientes suposiciones: (i) la señal tiene por lo menos dos extremos (valores máximos o mínimos); (ii) la escala de tiempo característica se define por el tiempo transcurrido entre los extremos. Tal proceso de filtración consiste en los siguientes pasos (Rao y Hsu, 2008):

- 1) Se identifican todos los extremos (máximos y mínimos) de la señal $x(t)$.
- 2) Se conectan todos los valores máximos mediante un spline cúbico y se construye la envolvente superior $e_{max}(t)$. Luego se usa el mismo procedimiento para construir la envolvente inferior $e_{min}(t)$.
- 3) Se halla la media entre la envolvente superior y la envolvente inferior:
 $m(t)=[e_{max}(t)- e_{min}(t)]/2$.
- 4) Se calcula $d(t)=x(t)-m(t)$
- 5) Se considera $d(t)$ como la nueva señal $x(t)$. Se sigue el procedimiento anterior hasta que $d(t)$ sea una señal con media cero de acuerdo con un criterio de convergencia. Para este trabajo se usa el test de convergencia de tipo Cauchy (Huang *et al.*,1998), definido por la diferencia normalizada al cuadrado entre dos operaciones de filtrado sucesivas (Huang *et al.*,1999, 2003):

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^Y h^2_{k-1}(t)} \quad (17)$$

- 6) Una vez se tiene la señal $d(t)$ de media cero, ésta se designa como la primera función de modos intrínsecos (FMI), c_1 .
- 7) Esta primera FMI se extrae de la señal original, y el residuo se convierte en una nueva señal $x(t)$. Se repite el proceso de filtrado con el fin de obtener la siguiente FMI, c_2 .
- 8) Se continúa con el proceso de filtrado para obtener las siguientes FMI. El proceso final se detiene cuando el residuo es una función monótona que tiene sólo un máximo o sólo un mínimo y ya no es posible extraer más funciones a partir de éstas.

Es importante tener en cuenta que es posible reconstruir la señal original a partir de las FMI generadas mediante el proceso de descomposición:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n, \quad (18)$$

Una vez descompuesta la señal original, en sus FMI se aplica la transformada de Hilbert para cada una de ellas, determinando de esta manera la amplitud y la frecuencia instantánea de las series producto de la descomposición.

2.3.3 Estado del Arte de la aplicación de la Transformada de Hilbert-Huang

El análisis de series de tiempo mediante la transformada de Hilbert-Huang se ha aplicado en diferentes campos desde la introducción del método (Huang *et al.*, 1998), ya que permite determinar las frecuencias coexistentes en un mismo fenómeno. Además, esta metodología ha conducido a nuevos descubrimientos y al entendimiento de procesos en las ciencias y la ingeniería. Tal es el caso de la aplicación de la THH en el campo de la sismología, donde Huang *et al.* (1998) sugirieron que la representación mediante el espectro de Hilbert podía revelar la no estacionariedad y la naturaleza no lineal de los fenómenos sísmicos. P. ej., la transformada de Hilbert-Huang fue utilizada para estudiar

el terremoto en Chi-Chi, Taiwan en 1999 (Huang *et al.*, 2001). En ese estudio, se demostró que el análisis de las señales sísmicas mediante la transformada de Fourier no representaba de manera adecuada las frecuencias más bajas, especialmente cuando las señales son altamente no estacionarias.

En el campo de las ciencias atmosféricas, la THH ha sido utilizada (Lundquist, 2003) para el estudio de las oscilaciones inerciales elípticas de la capa límite atmosférica a partir de datos de perfiles de vientos. Lundquist demuestra, además, que la THH es una herramienta adecuada para identificar simultáneamente el ciclo diurno de la temperatura y además, eventos de enfriamiento intermitentes y no estacionarios debidos a frentes pasajeros y corrientes de densidad.

El estudio de fenómenos altamente intermitentes y no lineales como la precipitación se han beneficiado también de la aplicación de la THH. El-Askary *et al.* (2004) estudiaron los impactos locales y regionales del fenómeno ENSO sobre los patrones de precipitación en Virginia, Estados Unidos, encontrando que los ciclos de precipitación de 3-5 años en la zona estudiada, tienen una buena correlación (0.68 con un nivel de confiabilidad del 95%) con el índice de Oscilación del Sur (SOI). Se concluye entonces en este estudio que el sistema ENSO está fuertemente teleconectado con la costa este de Estados Unidos.

Salsbury & Wimbush, (2002) también estudiaron el sistema ENSO. Estos investigadores analizaron la posibilidad de predecir este fenómeno a partir de la descomposición en modos empíricos de la serie de tiempo SOI (Índice de Oscilación del Sur), considerando la FMI cuya frecuencia está fuertemente asociada con el fenómeno.

Por otra parte, Baines (2005) encontró que las variaciones de largo plazo en la lluvia del occidente de Australia están directamente relacionadas con las variaciones en la lluvia del monzón Africano, a pesar de que las variaciones de ambas cantidades en la escala interanual están afectadas por otros factores.

Molla *et al.* (2005) estudiaron el comportamiento de la lluvia en la India a través de la descomposición en modos empíricos. Demostraron que la mayoría de las FMI tienen una distribución Normal y que su energía sigue una distribución χ^2 estadísticamente

significativa. Ese trabajo sugiere que el calentamiento global reciente, conjuntamente con la variabilidad decadal contribuye no sólo a la ocurrencia de eventos cálidos más extremos, sino también a épocas de sequía e inundaciones más frecuentes y más duraderas.

Posteriormente, Molla *et al.* (2006), utilizan la descomposición en modos empíricos con el fin de explorar las propiedades de las series de temperatura superficial del aire en la India y observar los efectos del cambio climático bajo la perspectiva del cambio global.

Hu y Wu (2004) utilizan la THH para estudiar el impacto del calentamiento global en la variabilidad de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) e identifican cambios en los centros de acción de la NAO asociados con patrones de ondas de gran escala.

Teniendo en cuenta que el sistema climático terrestre está conectado con el Sol en casi todas las escalas temporales (Huang y Wu 2008), Coughlin y Tung (2003) analizaron señales de altura geopotencial en el hemisferio norte, para extraer la FMI con frecuencia correspondiente al ciclo solar de 11 años.

A pesar del amplio reconocimiento y aplicaciones que ha tenido el método a nivel mundial, el estudio de la THH en países tropicales, especialmente en nuestro país, ha sido limitado. Osorio (2005) implementa la metodología para el estudio de series hidrológicas; su trabajo constituye una primera aproximación a la metodología y una base para el presente trabajo.

De acuerdo con lo reportado en la literatura, el método de la Transformada de Hilbert ha ido ganando popularidad. Sin embargo, la mayoría de su desarrollo se ha llevado a cabo a través de las áreas de aplicación (sismología, ciencias atmosféricas, entre otras) mientras que los problemas matemáticos subyacentes, como su fundamentación analítica, han sido dejados de lado. Por tanto, el estado actual de la THH es similar al estado de la transformada en Onditas en la década de 1980 (Huang y Wu, 2008).

Capítulo 2

Información Utilizada

En este trabajo de investigación se utilizan series colombianas de precipitación mensual y diaria, así como de caudales medios mensuales y temperaturas medias y mínimas mensuales provenientes del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), obtenidas a través del Grupo Red de Cooperación en Investigación Del Agua (GRECIA; Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Universidad de Antioquia, IDEAM, 2009). También se emplean series de precipitación horaria proporcionadas por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ) localizadas en Colombia. Las estaciones correspondientes a región Amazónica provienen del IDEAM (en territorio colombiano), así como del Proyecto “Large-scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia” (LBA) y del Global Historical Climatology Network (GHCN), en las demás regiones de la cuenca Amazónica. La información del GHCN se encuentra disponible en la base de datos de HydroSIG 4.0 MapWindow (<http://poseidon.medellin.unal.edu.co/~hidrosig/>).del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Para la parte colombiana se trabajó con registros de un total de 227 estaciones distribuidas de la siguiente manera: 100 de precipitación mensual (**Tabla 3**), 26 de precipitación diaria (**Tabla 4**), 22 de precipitación horaria (**Tabla 5**), 42 de caudales mensuales (**Tabla 6**), 22 de temperatura media mensual (**Tabla 7**), y 15 de temperatura mínima mensual (**Tabla 8**). Se escogieron estaciones que no sólo tuvieran una buena distribución espacial a través del territorio colombiano sino que además contaran con un período de registro superior a 25 años y el menor número de datos faltantes posible.

Las estaciones colombianas de precipitación mensual (**Figura 4**) fueron escogidas tomando como base un mapa de regiones con precipitación homogénea, identificadas en la Tesis de Maestría “Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano” (Hurtado, 2009), en la cual se definen regiones considerando las diferencias latitudinales, por efecto del paso de la ZCIT, diferenciando cada una de las laderas de las tres cordilleras y teniendo en cuenta los valles de los ríos Cauca y Magdalena. De esta manera se estudiaron 20 de las 22 regiones (**Tabla 2**) con 3 a 7 estaciones en cada una de ellas. Las dos regiones que no se estudiaron fueron, la región 19 (Pacífica-Ecuador) por falta de información y la 18, correspondiente a la Amazonía, pues ésta se estudió por aparte, considerando la parte colombiana y las de los demás países Amazónicos (Brasil, Perú, Ecuador) (**Figura 3**). De esta manera se utilizaron 29 estaciones para el análisis de la cuenca Amazónica, con un período de registro ente 9 y 85 años (**Tabla 1**).

Las estaciones de precipitación diaria (**Figura 5**) se tomaron de la información disponible del proyecto del grupo GRECIA y están localizadas en las regiones 1, 11, 12 y 22 (**Tabla 2**), en las cuencas de los ríos Atrato, Catatumbo, Patía, y Orinoco.

Por otra parte, se usaron las estaciones de precipitación horaria (**Figura 6**) y temperatura media y mínima (**Figura 8**) localizadas principalmente en la parte central del país, en la región cafetera de Colombia.

Adicionalmente, para las estaciones de caudal, se seleccionaron ríos que tuvieran un mínimo de 3 estaciones sobre la misma corriente, con el fin de cuantificar la variación de los procesos a lo largo de una misma cuenca. De esta manera fueron estudiados 10 ríos colombianos: Atrato, Catatumbo, Lebrija, Nechí, Negro, Patía, Saldaña, San Juan, Sinú y Sumapaz (**Figura 7**).

Tabla 1 Estaciones de precipitación mensual en la cuenca Amazónica.

N°	Código	Fuente	Nombre	Corriente	País	Lat	Long	Altura msnm	Año Inicio	Año Final
1	155001	LBA	OBIDOS	AMAZONAS	BRA	-1.9	-55.5	37	1971	1998
2	160000	LBA	POSTO ABONARI-FUNAI	AMAZONAS	BRA	-1.3	-60.4	0	1992	2002
3	758000	LBA	BARRA DO SAO MANUEL	AMAZONAS	BRA	-7.3	-58.2	0	1993	2002
4	763000	LBA	HUMAITA	AMAZONAS	BRA	-7.5	-63	50	1961	1970
5	1065002	LBA	GUAJARA-MIRIM)	AMAZONAS	BRA	-11	-65.4	0	1972	2001
6	1152000	LBA	SUIA LIQUILANDIA	AMAZONAS	BRA	-12	-51.7	0	1994	2002
7	1559006	LBA	VILA BELA DA SS. TRINDADE	AMAZONAS	BRA	-15	-59.9	200	1977	2002
8	549002	LBA	MARABA	ARAGUAIA	BRA	-5.4	-49.1	95	1976	1998
9	1452000	LBA	XAVANTINA	ARAGUAIA	BRA	-15	-52.4	0	1968	1998
10	8052000	LBA	SERRA DO NAVIO	ATLANTICO NORTE	BRA	0.9	-52	189	1972	1999
11	62000	LBA	BARCELOS	SOLIMOEES	BRA	-1	-62.9	40	1976	1990
12	8069000	LBA	IAUARETE CACHOEIRA	SOLIMOEES	BRA	0.6	-69.2	120	1976	1998
13	4206501	IDEAM	APTO MITU	VAUPES	COL	1.27	-70.2	207	1976	1998
14	4411502	IDEAM	TAGUA LA	CAQUETA	COL	0.07	-74.7	153	1974	2006
15	4413501	IDEAM	ARARACUARA	CAQUETA	COL	0.6	-72.4	150	1979	2006
16	4601501	IDEAM	SAN VICENTE CAGUAN	CAGUAN	COL	2.15	-74.8	300	1970	2006
17	4701002	IDEAM	BALSAYACO	PUTUMAYO	COL	1.12	-77	2070	1970	2006
18	30382067000	GHCN	NO DISPONIBLE	VAUPES	COL	0.6	-69.2	91	1930	1992
19	30382100001	GHCN	NO DISPONIBLE	APAPORIS	COL	-1.4	-69.4	69	1978	1996
20	30382106000	GHCN	NO DISPONIBLE	NEGRO	BRA	-0.1	-67.1	55	1922	2006
21	30382212000	GHCN	NO DISPONIBLE	SOLIMOEES	BRA	-2.5	-66.2	36	1925	2003
22	30382410000	GHCN	NO DISPONIBLE	AMAZONAS	BRA	-4.4	-70	60	1932	2006
23	30382418000	GHCN	NO DISPONIBLE	JURUA	BRA	-4.9	-66.9	64	1931	1988
24	30684160000	GHCN	NO DISPONIBLE	AMBATO	ECU	-1.3	-78.6	2450	1914	1984
25	30684270000	GHCN	NO DISPONIBLE	MALACATOS	ECU	-4	-79.2	2078	1929	1984
26	30984331002	GHCN	NO DISPONIBLE	TIGRE	PER	-2.5	-75.8	155	1963	1980
27	30984377000	GHCN	NO DISPONIBLE	AMAZONAS	PER	-3.8	-73.3	85	1947	2007
28	30984377010	GHCN	NO DISPONIBLE	AMAZONAS	PER	-3.8	-73.3	85	1963	1981
29	30984435002	GHCN	NO DISPONIBLE	MARAÑON	PER	-4.8	-76.7	125	1966	1982

Tabla 2 Regiones de precipitación homogénea en Colombia (Hurtado, 2009).

Región	Nombre	Rango de latitudes	Región	Nombre	Rango de latitudes
1	Llanura del Pacífico	0.5-8	12	Atlántico	7.2-15
2	Cordillera Oriental-Ladera Oriental	-5-4	13	Río Cauca	6-7.5
3	Meseta de Popayán-Río Cauca	2-4	14	Panamá	6.5-10
4	Río Magdalena	1.5-3	15	Río Magdalena	7.3-11
5	Cordillera Central-Ladera Oriental	3-5.5	16	Río Magdalena	7-11
6	Valle del Magdalena	3-5.5	17	Península de la Guajira	8.8-12.5
7	Cordillera Oriental-Ladera Oriental	4-5	18	Amazonas	-5-3
8	Piedemonte llanero	2-10	19	Pacífica-Ecuador	-5-1.7
9	Valle del Cauca	4-6	20	Cordillera Oriental-Ladera Occidental	3-5.5
10	Río Magdalena	5.5-7	21	Río Cauca	6.5-9
11	Cordillera Oriental-Ladera Oriental	5-7.5	22	Llanos Orientales	1.5-10.5

Tabla 3 Estaciones colombianas de precipitación mensual.

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final	Región
1	1102001	CARMEN DE ATRATO	CHOCO	5.9	-76.2	1850	1959	2007	1
2	5204503	SAN BERNARDO	NARIÑO	1.55	-77.03	2190	1972	2005	1
3	5102001	JUNIN	NARIÑO	1.33	-78.12	950	1964	2007	1
4	5307003	PTO LOPEZ	CAUCA	2.8	-77.23	80	1960	2007	1
5	5311501	APTO BUENAVENTUR	VALLE	3.85	-76.97	14	1961	2007	1
6	5402001	ANDAGOYA	CHOCO	5.08	-76.7	35	1961	2007	1
7	5601501	PANAMERICANA	CHOCO	6.22	-77.4	4	1963	2000	1
8	3501004	CANO HONDO	META	3.9	-73.85	800	1970	2007	2
9	4401501	VILLAGARZON	PUTUMAYO	1.05	-76.6	440	1965	2006	2
10	4401503	VALENCIA	CAUCA	1.92	-76.67	2900	1970	2007	2
11	2601003	PURACE	CAUCA	2.38	-76.47	2630	1959	2007	3
12	2602020	AMPARO EL	CAUCA	2.88	-76.48	1850	1971	2007	3
13	2603005	TAMBO EL	CAUCA	2.5	-76.82	1720	1953	2003	3
14	2607076	FLORIDA	VALLE	3.35	-76.25	1038	1953	2007	3
15	2608007	VIJES	VALLE	3.7	-76.43	987	1946	2007	3
16	2101006	MEDIANIA	HUILA	2.03	-76.18	1750	1963	2007	4

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final	Región
17	2101503	PARQUE ARQUEOLOG	HUILA	1.85	-76.3	1800	1971	2007	4
18	2103005	GUADALUPE	HUILA	2.02	-75.77	950	1960	2007	4
19	2106004	PITA LA	HUILA	2.23	-75.57	1350	1959	2007	4
20	2108003	YAGUARA	HUILA	2.67	-75.52	600	1959	2007	4
21	2118004	ROVIRA 2	TOLIMA	4.25	-75.25	950	1972	2006	5
22	2121003	PASTALES	TOLIMA	4.52	-75.3	1505	1958	2006	5
23	2125011	MURILLO	TOLIMA	4.87	-75.18	2960	1960	2006	5
24	2207001	RONCESVALLES	TOLIMA	4.02	-75.62	2468	1963	2006	5
25	2301002	EDEN EL	TOLIMA	5.15	-75.05	1350	1958	2006	5
26	2111007	BARAYA	HUILA	3.15	-75.07	615	1959	2007	6
27	2116004	ACO	TOLIMA	3.75	-74.82	360	1959	2007	6
28	2125007	SIERRA LA	TOLIMA	4.8	-74.95	477	1955	2006	6
29	2205003	COLACHE HDA	TOLIMA	3.8	-75.2	370	1959	2006	6
30	3502001	MONTERREDONDO	C/AMARCA	4.32	-73.97	1300	1951	1980	7
31	3506005	JUNIN	C/MARCA	4.8	-73.67	2323	1962	2007	7
32	3507010	SOMONDOCO	BOYACA	4.98	-73.45	1600	1962	2006	7
33	3507019	CHIVOR	BOYACA	4.88	-73.37	1850	1966	2006	7
34	3501009	SAN MARTIN	META	3.72	-73.68	420	1978	2007	8
35	3503502	APTO VANGUARDIA	META	4.17	-73.62	423	1943	2007	8
36	3512001	PTO GAITAN	META	4.33	-72.1	150	1963	2006	8
37	3521002	YOPAL	CASANARE	5.35	-72.4	320	1960	1994	8
38	3522003	OROCUE	CASANARE	4.8	-71.33	130	1979	2007	8
39	3705501	APTO ARAUCA	ARAUCA	7.07	-70.73	128	1945	2007	8
40	2610516	APTO FARFAN	VALLE	4.1	-76.22	955	1949	2004	9
41	2613002	TERMALES	RISARALDA	4.83	-75.55	2060	1971	2007	9
42	2615006	ARAUCA	CALDAS	5.12	-75.7	890	1962	2007	9
43	2618018	SONSON	ANTIOQUIA	5.72	-75.3	2530	1970	2006	9
44	2619009	BETANIA-LAS GUAC	ANTIOQUIA	5.75	-75.98	1580	1970	2006	9
45	2308504	SELVA LA	ANTIOQUIA	6.13	-75.42	2090	1970	2006	10
46	2308508	NUS GJA EXP EL	ANTIOQUIA	6.48	-74.83	835	1972	2006	10
47	2313001	CHUCURI	SANTANDER	6.88	-74.03	100	1959	2006	10
48	2402008	VALLE DE SAN JOS	SANTANDER	6.43	-73.12	1300	1958	2006	10
49	2403029	MACARAVITA	SANTANDER	6.5	-72.6	1856	1958	2006	10
50	2403512	SURBATA BONZA	BOYACA	5.82	-73.07	2485	1944	2006	10
51	3507002	VENTAQUEMADA	BOYACA	5.37	-73.52	2630	1957	2006	11
52	3701501	SILOS	NORTE. SANTAND	7.2	-72.75	2765	1972	2006	11
53	3702003	CAMPO HERMOSO	NORTE. SANTAND	7.12	-72.32	1660	1958	2005	11
54	1601004	STA RITA	NORTE. SANTAND	8.23	-72.38	72	1963	2005	12

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final	Región
55	1601501	A. CAMILO DAZA	NORTE. SANTAND	7.93	-72.52	250	1944	2007	12
56	1602008	CUCUTILLA	NORTE. SANTAND	7.55	-72.78	1280	1955	2005	12
57	1603501	TIBU	NORTE. SANTAND	8.65	-72.73	50	1957	2006	12
58	2621007	CAICEDO	ANTIOQUIA	6.42	-75.98	1750	1970	2006	13
59	2621501	CONCORDIA	ANTIOQUIA	6.03	-75.93	2032	1970	2006	13
60	2623016	BRICENO	ANTIOQUIA	7.12	-75.52	1440	1970	2006	13
61	2701509	TULIO OSPINA	ANTIOQUIA	6.32	-75.55	1438	1950	1999	13
62	2701519	GUAYABITO	ANTIOQUIA	6.55	-75.15	1700	1970	2006	13
63	2702022	LLANOS D CUIBA L	ANTIOQUIA	6.82	-75.48	2750	1970	2006	13
64	1110002	DOMINGODO	CHOCO	7.18	-77.03	11	1967	2002	14
65	1112004	RIOSUCIO	CHOCO	7.47	-77.12	8	1960	2006	14
66	1201501	VILLARTEAGA	ANTIOQUIA	7.35	-76.48	132	1958	1997	14
67	1202001	PUEBLO BELLO	ANTIOQUIA	8.27	-76.43	80	1972	2006	14
68	1204501	ARBOLETES	ANTIOQUIA	8.85	-76.42	4	1972	2006	14
69	1307012	CALLEMAR	CORDOBA	8.67	-75.67	95	1963	2007	15
70	2502510	APTO BARACOA	BOLIVAR	9.27	-74.82	18	1969	2007	15
71	2904007	PONEDERA	ATLANTICO	10.63	-74.77	8	1957	2007	15
72	2901502	CARMEN DE BOLIVA	BOLIVAR	9.72	-75.12	152	1955	2006	15
73	2903020	SAN CAYETANO	BOLIVAR	10.08	-75.13	70	1978	2007	15
74	1605017	BROTARE	N. SANTAND	8.42	-73.43	1545	1960	2006	16
75	2315503	APTO YARIGUIES	SANTANDER	7.02	-73.8	126	1931	2007	16
76	2319014	PLAYON EL	SANTANDER	7.47	-73.2	500	1958	2006	16
77	2321001	PTO MOSQUITO	CESAR	8.2	-73.75	90	1960	2004	16
78	2502009	TAMALAMEQUE	CESAR	8.87	-73.82	20	1960	2004	16
79	2801004	MANAURE	CESAR	10.38	-73.03	740	1975	2007	16
80	1501001	MINCA	MAGDALENA	11.13	-74.03	640	1963	2007	17
81	1506002	CUESTECITA	LA GUAJIRA	11.2	-72.62	93	1959	2007	17
82	1507503	MANAURE	LA GUAJIRA	11.77	-72.45	1	1953	2006	17
83	2502023	JAGUA LA	CESAR	9.58	-73.28	170	1963	2007	17
84	2502509	APTO LAS FLORES	MAGDALENA	9	-73.97	34	1968	2007	17
85	2804007	PALMARIGUANI	CESAR	9.93	-73.95	80	1963	2007	17
86	2901005	ZAMBRANO	BOLIVAR	9.75	-74.82	15	1958	2007	17
87	2116007	VILLARRICA	TOLIMA	3.93	-74.6	975	1961	2007	20
88	2120572	SAN JORGE GJA	C/AMARCA	4.52	-74.2	2900	1960	2007	20
89	2306016	SAN PABLO	C/AMARCA	5.43	-74.47	1200	1974	2007	20
90	2306017	PALMA LA	C/AMARCA	5.35	-74.4	1462	1974	2007	20
91	2401512	ISLA DEL SANTUAR	C/AMARCA	5.47	-73.73	2580	1957	2007	20
92	2502035	GUARANDA	BOLIVAR	8.47	-74.53	25	1966	2006	21

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final	Región
93	2502139	CAUCASIA	ANTIOQUIA	8	-75.2	70	1963	2004	21
94	2625006	PTO RAUDAL	ANTIOQUIA	7.37	-75.33	125	1971	2007	21
95	2703021	ZARAGOZA	ANTIOQUIA	7.5	-74.87	50	1970	2006	21
96	3109501	PTO INIRIDA	GUAINIA	3.83	-67.92	100	1973	2007	22
97	3303501	CARIMAGUA	META	4.58	-71.37	200	1972	2007	22
98	3403501	TUPARRO BOCAS TO	VICHADA	5.35	-67.87	250	1972	2006	22
99	3403502	TAPON EL	VICHADA	5.12	-69.15	315	1972	2007	22
100	3801503	APTO PTO CARRENO	VICHADA	6.18	-67.48	50	1968	2007	22

Tabla 4 Estaciones colombianas de precipitación diaria.

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final	Región
1	1104001	TUTUNENDO	CHOCO	5.75	-76.55	54	1969	2007	1
2	1105001	TAGACHI	CHOCO	6.22	-76.72	20	1969	2007	1
3	1108001	BELLAVISTA	CHOCO	6.57	-76.57	15	1969	2007	1
4	1111001	NORMAL STATERES	ANTIOQUIA	6.77	-76.15	1370	1969	2007	1
5	5402004	VALENCIA LA DIVI	CHOCO	5.9	-76.38	470	1969	2007	1
6	3701003	CACOTA	NORTE. SANTAND	7.28	-72.65	2645	1969	2008	11
7	3702004	STA MARIA-ABASTO	NORTE. SANTAND	7.1	-72.25	850	1972	2008	11
8	1602012	BALCONES LOS	NORTE. SANTAND	8.13	-72.45	200	1969	2002	12
9	1601002	DONJUANA LA N 2	NORTE. SANTAND	7.7	-72.6	770	1973	2008	12
10	1602006	BAGUECHE	NORTE. SANTAND	7.6	-72.87	1750	1973	2008	12
11	3109001	GUAVIARE	GUAINIA	3.97	-67.82	92	1984	2008	22
12	3212001	SAN IGNACIO	META	3.28	-72.2	325	1983	2008	22
13	3215004	PUEBLO NUEVO	GUAINIA	3.42	-69.88	100	1983	2009	22
14	3305002	RAYA LA	VICHADA	4.43	-69.48	90	1983	2008	22
15	3306001	STA RITA	VICHADA	4.85	-68.4	87	1983	2009	22
16	3522004	MACUCUANA	CASANARE	5.02	-71	117	1983	2008	22
17	3525004	ACEITICO	VICHADA	6.18	-68.45	67	1983	2008	22
18	3603002	PARAISO EL	ARAUCA	6.05	-69.72	87	1983	2008	22
19	4701002	BALSAYACO	PUTUMAYO	1.12	-76.95	2070	1980	2008	2

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final	Región
20	5203006	HIDROMAYO	NARIÑO	1.67	-77.02	1820	1969	2009	1
21	5205002	SAMANIEGO	NARIÑO	1.33	-77.6	1700	1969	2008	1
22	5205008	TANGUA	NARIÑO	1.08	-77.4	2420	1969	2009	1
23	5205011	CUMBAL	NARIÑO	0.9	-77.8	3092	1969	2009	1
24	5208001	PISANDA	NARIÑO	1.65	-77.5	350	1969	2008	1
25	5102001	JUNIN	NARIÑO	1.33	-78.12	950	1969	2009	1
26	5201005	PARRAGA	CAUCA	2.25	-76.78	1290	1969	2009	1

Tabla 5 Estaciones colombianas de precipitación horaria.

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final	Años Registro
1	2106503	JORGE VILLAMIL	HUILA	2.37	-75.55	1500	1972	1999	28
2	2115502	LA MONTAÑA	TOLIMA	3.55	-74.9	1260	1973	1999	27
3	2116502	LUIS BUSTAMANTE	TOLIMA	3.9	-74.57	1643	1972	1999	28
4	2206505	EL LIMÓN	TOLIMA	3.67	-75.58	990	1971	1996	26
5	2302501	LLANADAS	CALDAS	5.08	-75.68	1020	1972	1999	28
6	2306513	YACOPI	CUNDINAMARCA	5.47	-74.37	1340	1972	1999	28
7	2308506	BIZCOCHO	ANTIOQUIA	6.3	-75.08	1070	1971	1999	29
8	2308517	PEÑOL	ANTIOQUIA	6.4	-75.85	1880	1960	1999	40
9	2401502	BERTHA	BOYACÁ	5.88	-73.57	1700	1972	1999	28
10	2405505	AGUAS BLANCAS	SANTANDER	6.83	-73.48	920	1972	1999	28
11	2603506	MANUEL MEJÍA	CAUCA	2.42	-76.75	1700	1972	1999	28
12	2608511	MANUEL MARIA MALLARINO	VALLE	4.22	-76.32	1380	1973	1999	27
13	2610512	LA SIRENA	VALLE	4.28	-75.92	1500	1971	1999	29
14	2612010	BREMEN	QUINDÍO	4.67	-75.62	2040	1972	1999	28
15	2612509	EL SENA	QUINDÍO	4.57	-75.65	1550	1971	1999	29
16	2613016	SANTA ANA	CALDAS	5.02	-75.67	1250	1972	1999	28
17	2613505	NARANJAL	CALDAS	4.98	-75.65	1400	1971	1999	29
18	2613506	EL JAZMIN	RISARALDA	4.92	-75.63	1600	1972	1999	28
19	2613507	EL CEDRAL	RISARALDA	4.7	-75.53	2120	1973	1999	27
20	2615502	CENICAFÉ	CALDAS	5	-75.6	1310	1972	1999	28
21	2615505	AGRONOMÍA	CALDAS	5.05	-75.48	2150	1972	1999	28
22	2615514	LUKER	CALDAS	5.2	-76.47	1420	1970	1999	30

Tabla 6 Estaciones colombianas de caudales medios mensuales.

N°	Código	Nombre	Corriente	Departamento	Latitud	Longitud	Año Inicio	Año Final
0	1107701	BELLAVISTA	ATRATO	CHOCO	6.57	-76.57	1965	2002
1	1102701	PTE LAS SANCHEZ	ATRATO	CHOCO	5.85	-76.25	1965	2002
2	1104701	BELEN	ATRATO	CHOCO	5.77	-76.67	1965	2002
3	1105701	TAGACHI	ATRATO	CHOCO	6.22	-76.72	1966	2002
4	1105702	SAN ANTONIO PADU	ATRATO	ANTIOQUIA	6.28	-76.77	1965	2002
5	1605704	QUINCE LETRAS	CATATUMBO	N. SANTANDER	8.5	-73.25	1965	2003
6	1606701	PTO BARCO-GABARR	CATATUMBO	N. SANTANDER	9.02	-72.85	1965	2002
7	1606702	CABLE EL	CATATUMBO	N.SANTANDER	8.68	-72.95	1965	2000
8	2319729	CAFE MADRID	LEBRIJA	SANTANDER	7.28	-73.13	1965	2003
9	2319737	SAN RAFAEL	LEBRIJA	SANTANDER	7.58	-73.55	1965	2003
10	2319740	ANGOSTURAS	LEBRIJA	SANTANDER	7.42	-73.35	1965	2000
11	2702706	BRISAS DEL NECHI	NECHI	ANTIOQUIA	6.93	-75.33	1975	2001
12	2702709	PTE ANORI	NECHI	ANTIOQUIA	7.2	-75.32	1965	2002
13	2703701	ESPERANZA LA	NECHI	ANTIOQUIA	8.02	-74.78	1965	2002
14	2703703	SAN JUAN	NECHI	ANTIOQUIA	7.48	-74.92	1965	2002
15	2306704	PTO LIBRE	NEGRO	BOYACA	5.77	-74.63	1965	2002
16	2306705	GUADUERO	NEGRO	CUNDINAMARCA	5.2	-74.57	1965	2002
17	2306706	TOBIA	NEGRO	CUNDINAMARCA	5.13	-74.45	1965	2001
18	2306708	CHARCO LARGO	NEGRO	CUNDINAMARCA	5.25	-74.35	1965	2001
19	2308715	PTE REAL	NEGRO	ANTIOQUIA	6.15	-75.38	1965	2002
20	3506701	GLORIA LA	NEGRO	CUNDINAMARCA	4.82	-73.42	1963	2002
21	5201701	PTE GUASCAS	PATIA	NARIÑO	1.6	-77.43	1965	2002
22	5201702	PTO NUEVO	PATIA	NARIÑO	1.9	-77.25	1965	1998
23	5201703	FONDA LA	PATIA	CAUCA	2.15	-77.05	1965	2002
24	5207701	PTE PUSMEO	PATIA	NARIÑO	1.62	-77.48	1965	2002
25	2201702	SARDINAS LAS	SALDANA	TOLIMA	3.45	-75.7	1965	2001
26	2205701	PIEDRAS DE COBRE	SALDANA	TOLIMA	3.92	-75.1	1952	2005
27	2205704	PALMALARGA	SALDANA	TOLIMA	3.68	-75.33	1965	2005
28	2205706	MURALLA LA	SALDANA	TOLIMA	3.53	-75.42	1965	2005
29	2619701	CAMPAMENTO	SAN JUAN	ANTIOQUIA	5.68	-75.88	1965	2002
30	2619703	REMOLINO EL	SAN JUAN	ANTIOQUIA	5.87	-75.92	1965	2002
31	5401703	ISTMINA	SAN JUAN	CHOCO	5.15	-76.68	1965	1999
32	5402703	SALADO EL	SAN JUAN	CHOCO	4.92	-76.83	1965	2003
33	5405701	NOANAMA ASERRIO	SAN JUAN	CHOCO	4.67	-76.95	1965	2003
34	1301701	DESPENSA LA	SINU	CORDOBA	7.87	-76.28	1966	1998

N°	Código	Nombre	Corriente	Departamento	Latitud	Longitud	Año Inicio	Año Final
35	1301702	LIMON EL	SINU	CORDOBA	7.83	-76.27	1966	1998
36	1303701	ANGOSTURA DE URR	SINU	CORDOBA	8	-76.25	1959	1995
37	1306702	MONTERIA	SINU	CORDOBA	8.77	-75.87	1963	2005
38	1307706	COTUCA ABAJO	SINU	CORDOBA	9.22	-75.85	1965	2005
39	2119701	PROFUNDO EL	SUMAPAZ	CUNDINAMARCA	4	-74.5	1959	2001
40	2119703	PLAYA LA	SUMAPAZ	CUNDINAMARCA	4.2	-74.5	1959	2001
41	2119715	LIMONAR EL	SUMAPAZ	TOLIMA	4.22	-74.62	1965	2002

Tabla 7 Estaciones colombianas de temperatura media mensual.

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final
0	1104501	APTO EL CARANO	CHOCÓ	5.72	-76.62	53	1961	2006
1	1501505	APTO SIMON BOLIVAR	MAGDALENA	11.13	-74.23	4	1952	2006
2	1601501	APTO CAMILO DAZA	N. SANTANDER	7.93	-72.52	250	1944	2006
3	2111502	APTO BENITO SALAS	HUILA	2.97	-75.30	439	1964	2006
4	2118503	GUAMO	TOLIMA	4.05	-74.97	360	1958	2005
5	2120523	OBS.METEOROLÓGICO NACIONAL	C/MARCA	4.63	-74.10	2556	1941	1993
6	2120542	TIBAITATA	C/MARCA	4.70	-74.20	2543	1954	2006
7	2315503	APTO YARIGUIES	SANTANDER	7.02	-73.80	126	1943	2006
8	2315504	CENTRO EL	SANTANDER	6.87	-73.77	162	1972	2006
9	2401512	ISLA DEL SANTUARIO	C/MARCA	5.47	-73.73	2580	1957	2005
10	2402502	CUCHARO EL	SANTANDER	6.52	-73.22	975	1957	2006
11	2403512	SURBATA BONZA	BOYACÁ	5.82	-73.07	2485	1954	2005
12	2610516	APTO FARFAN	VALLE	4.10	-76.22	955	1950	2004
13	2612506	APTO EL EDEN	QUINDÍO	4.45	-75.77	1204	1952	2005
14	2613504	APTO MATECANA	RISARALDA	4.82	-75.73	1342	1948	2005
15	2701507	APTO OLAYA HERRERA	ANTIOQUIA	6.22	-75.60	1490	1941	2006
16	2701509	TIULIO OSPINA	ANTIOQUIA	6.32	-75.53	1438	1954	2003
17	2901502	CARMEN DE BOLIVAR	BOLIVAR	9.72	-75.12	152	1955	2005
18	2904502	APTO E CORTISSOZ	ATLANTICO	10.88	-74.78	14	1957	2006

N°	Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final
19	3503502	APTO VANGUARDIA	META	4.17	-73.62	423	1945	2006
20	3705501	APTO ARAUCA	ARAUCA	7.07	-76.95	128	1951	2006
21	5204501	OBONUCO	NARIÑO	1.20	-77.30	2710	1956	2006

Tabla 8 Estaciones colombianas de temperatura mínima mensual.

Código	Nombre	Departamento	Latitud	Longitud	Altura msnm	Año Inicio	Año Final
1104501	APTO EL CARANO	CHOCÓ	5.72	-76.62	53	1959	2007
1501505	APTO SIMON BOLIVAR	MAGDALENA	11.13	-74.23	4	1968	2003
1601501	APTO CAMILO DAZA	N.SANTANDER	7.93	-72.52	250	1973	2006
2111502	APTO BENITO SALAS	HUILA	2.97	-75.30	439	1969	2006
2120523	OBSERV. METEOROLÓGICO NACIONAL	CUNDINAMARCA	4.63	-74.10	2556	1941	1993
2402502	CUCHARO EL	SANTANDER	6.52	-73.22	975	1970	2006
2403512	SURBATA BONZA	BOYACÁ	5.82	-73.07	2485	1954	2005
2610516	APTO FARFAN	VALLE	4.10	-76.22	955	1959	2004
2612506	APTO EL EDEN	QUINDÍO	4.45	-75.77	1204	1970	2005
2701507	APTO OLAYA HERRERA	ANTIOQUIA	6.22	-75.60	1490	1941	2006
2701509	TIULIO OSPINA	ANTIOQUIA	6.32	-75.53	1438	1968	2006
2901502	CARMEN DE BOLIVAR	BOLIVAR	9.72	-75.12	152	1955	2000
3503502	APTO VANGUARDIA	META	4.17	-73.62	423	1975	2006
3705501	APTO ARAUCA	ARAUCA	7.07	-76.95	128	1975	2006
5204501	OBONUCO	NARIÑO	1.20	-77.30	2710	1956	2006

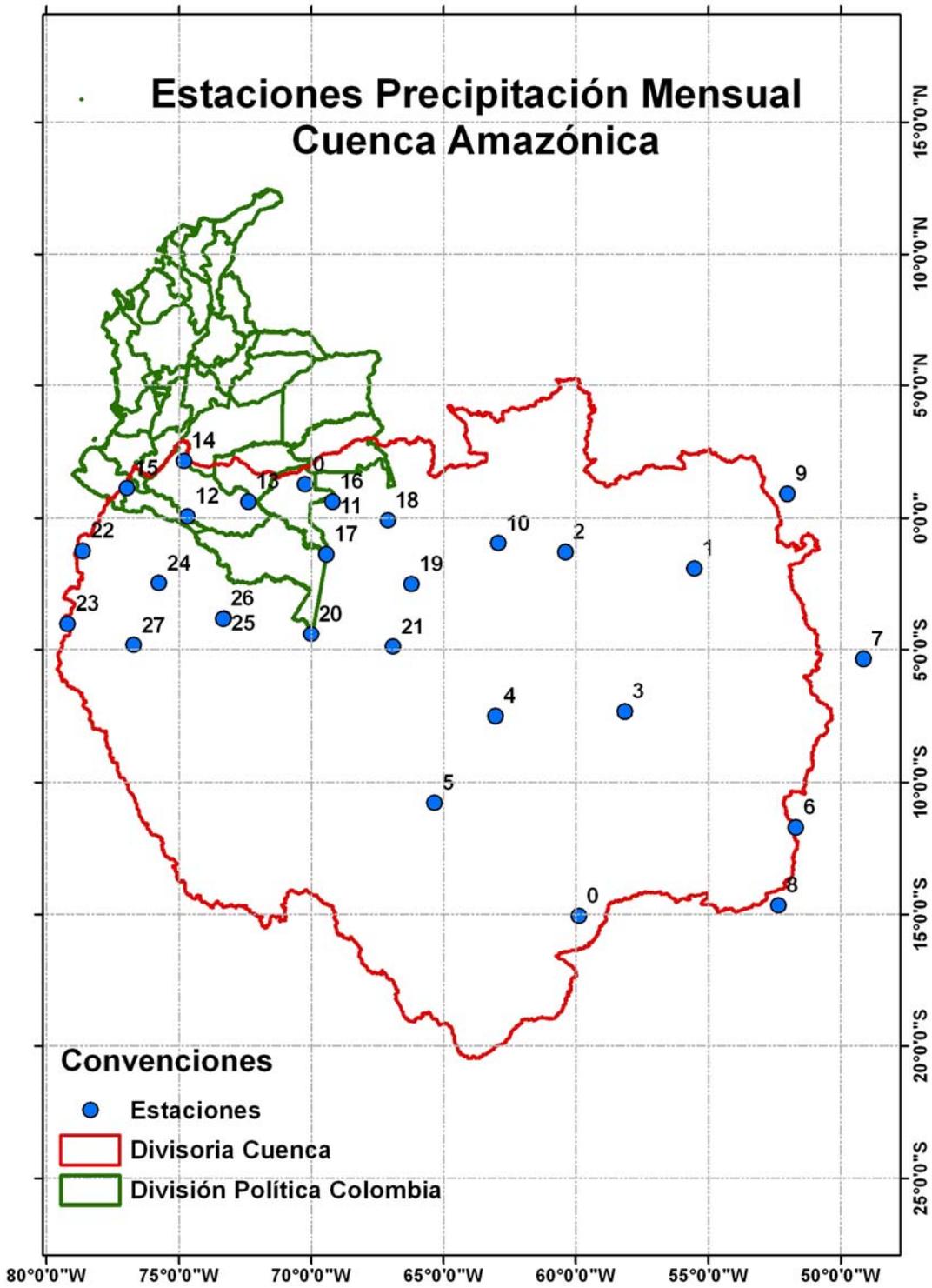


Figura 3 Localización de las estaciones de precipitación mensual en la cuenca Amazónica.

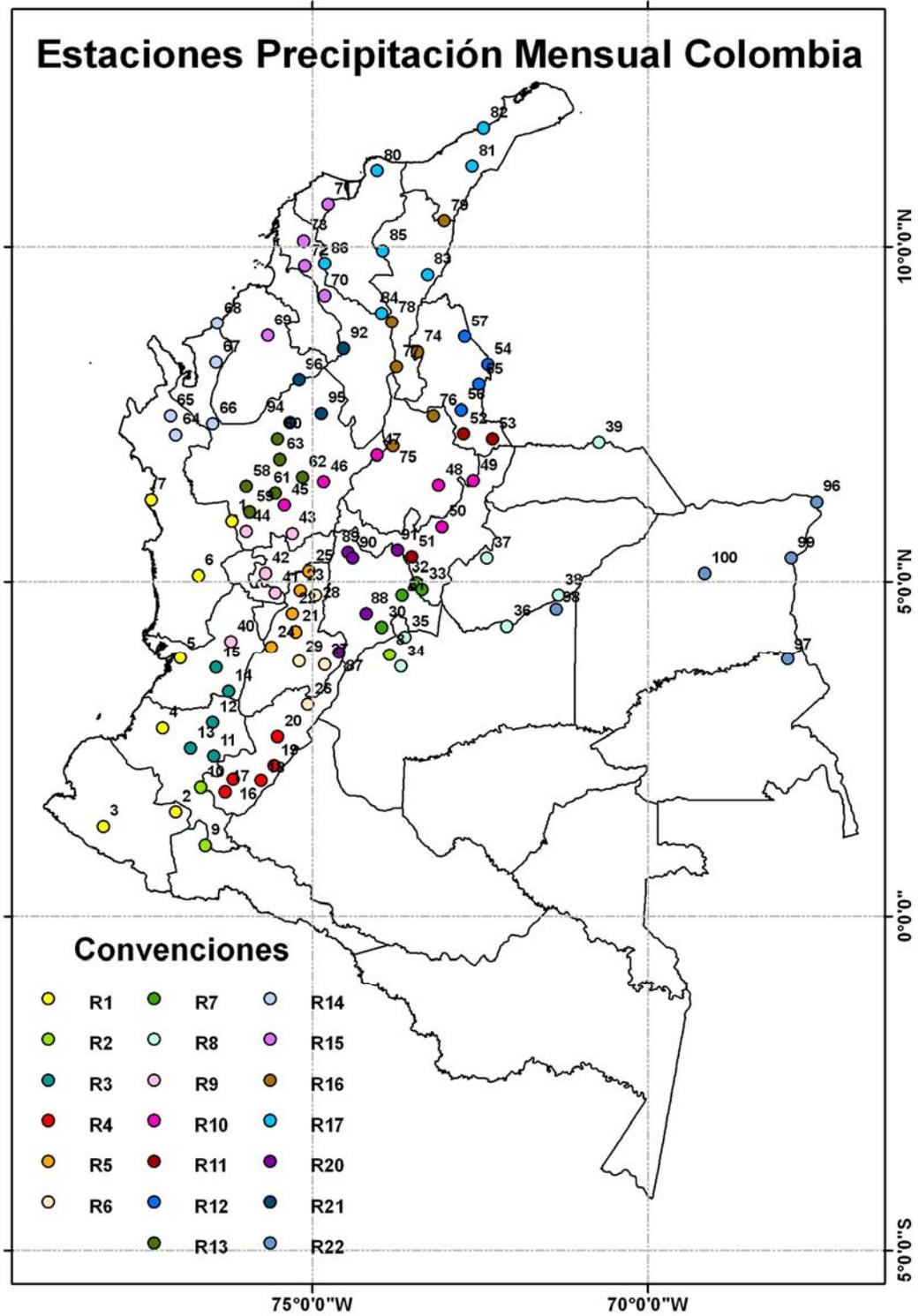


Figura 4 Localización de las estaciones de precipitación mensual en Colombia.

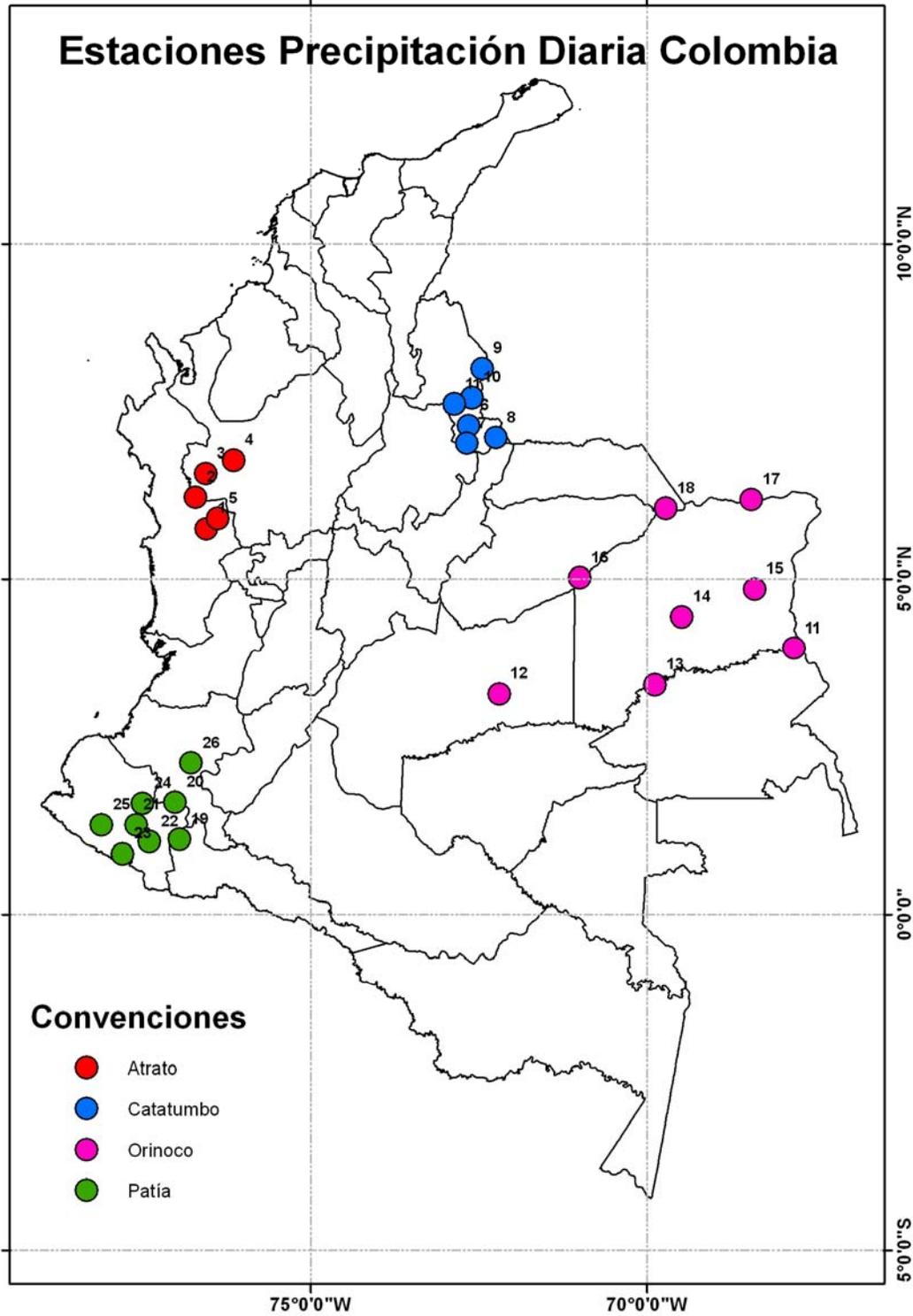


Figura 5 Localización de las estaciones de precipitación diaria en Colombia.

Estaciones Precipitación Horaria Colombia

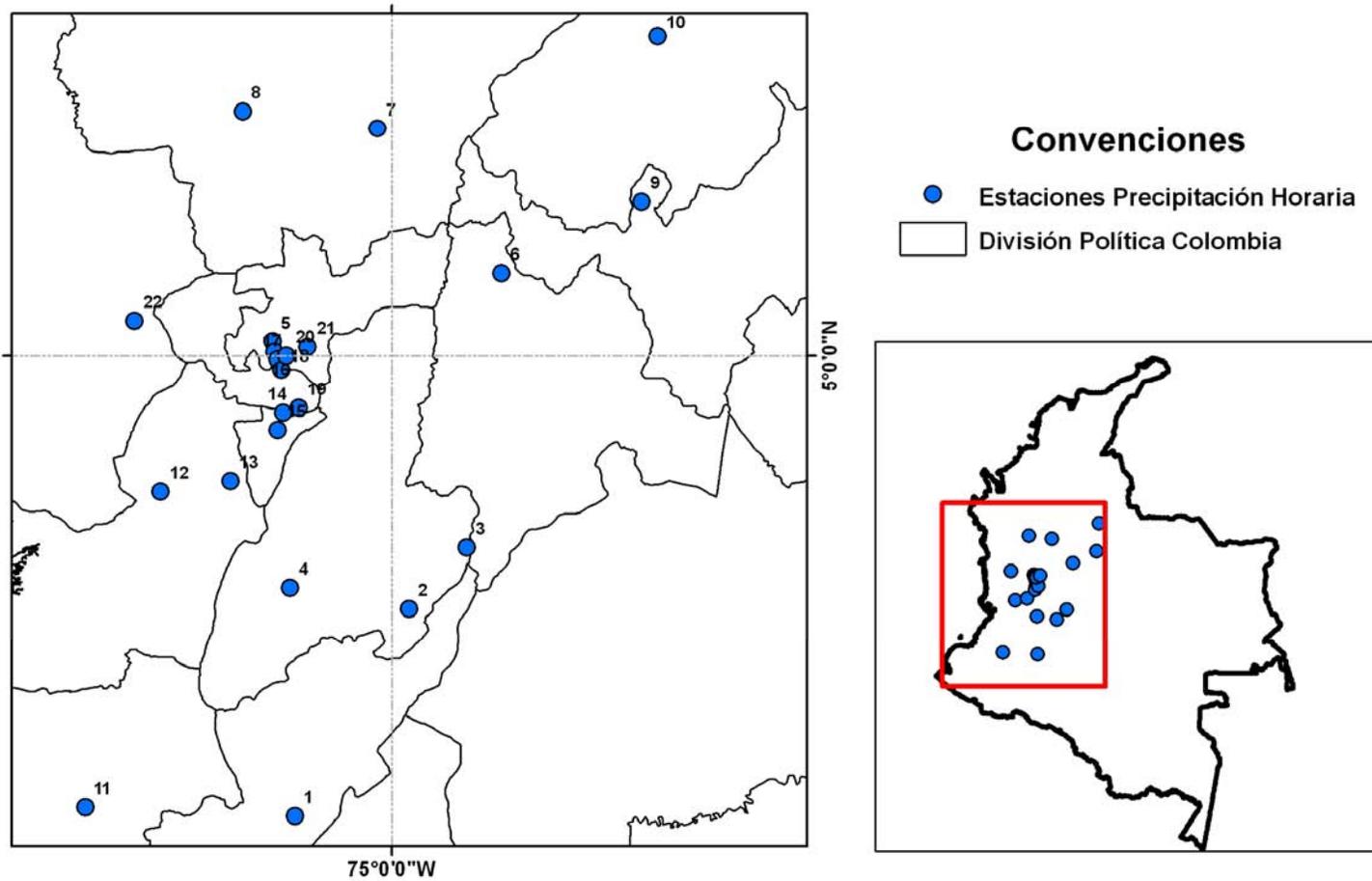


Figura 6 Localización de las estaciones de precipitación horaria en Colombia.

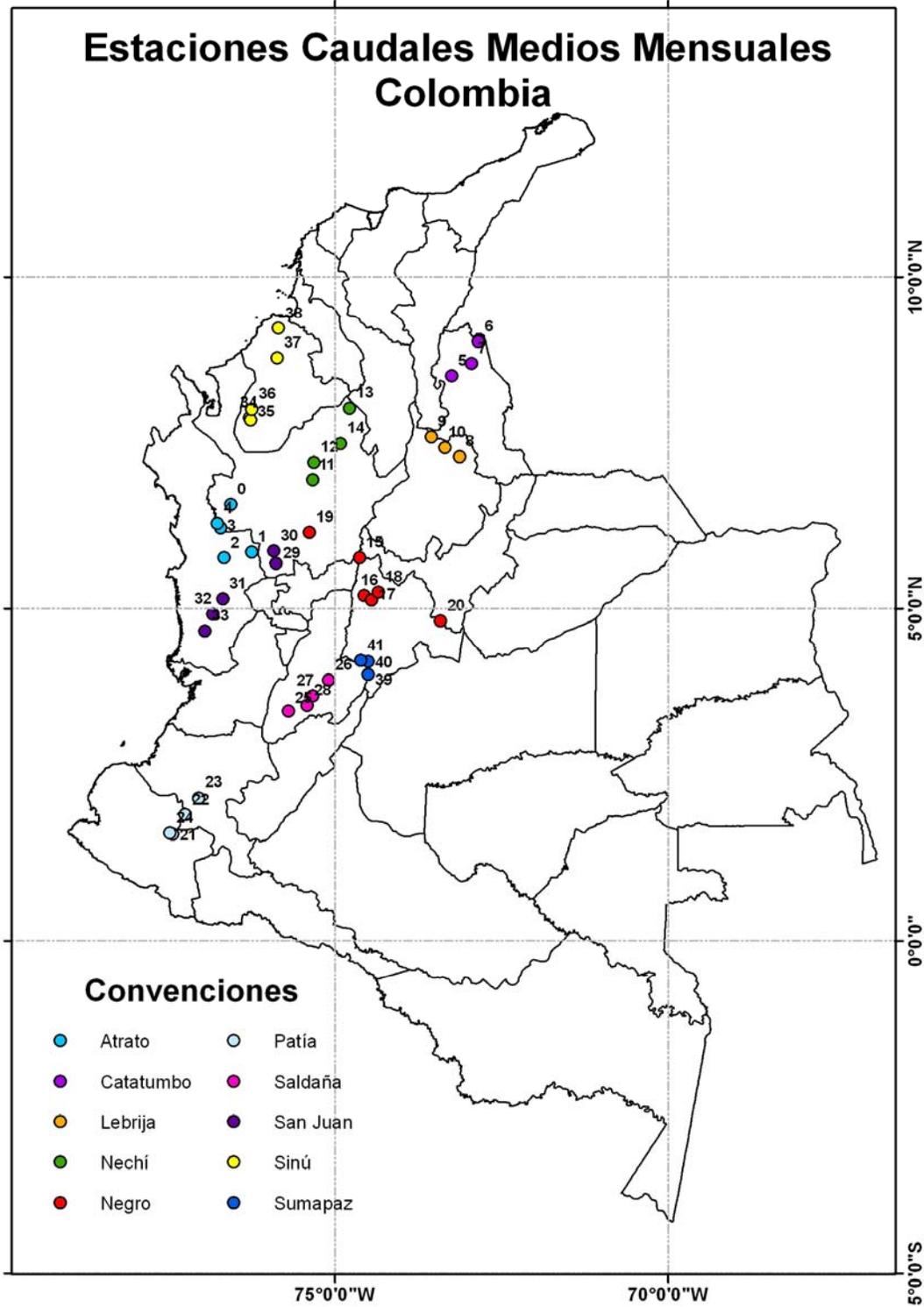


Figura 7 Localización de las estaciones de caudales medios mensuales en Colombia.

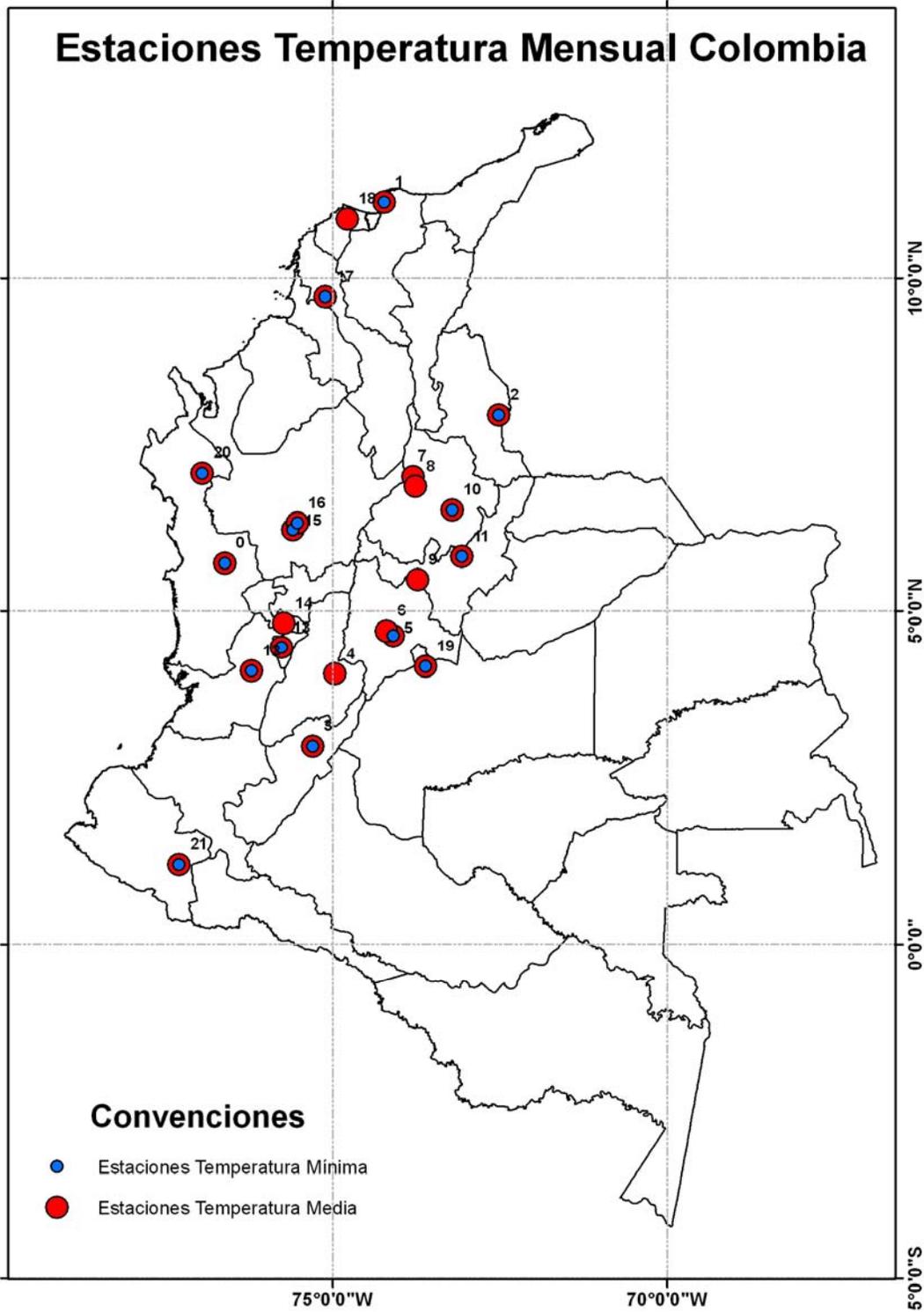


Figura 8 Localización de las estaciones de Temperatura Media y Mínima mensual en Colombia.

Capítulo 3

Aplicación en Series Hidrometeorológicas en Colombia y la Cuenca Amazónica

Las señales hidrológicas y climáticas representan el resultado de la interacción de diferentes procesos físicos y modos de variabilidad periódicos y cuasi-periodicos, que interactúan en un conjunto amplio de escalas espaciales y temporales. Es por esto que estas series son no-estacionarias, lo cual se ve reflejado en una FDP que cambia con el tiempo. Algunos de los distintos regímenes frecuenciales son localizados y otros están presentes a lo largo del tiempo (Osorio, 2005). La transformada de Hilbert-Huang constituye una herramienta de análisis versátil que permite no sólo identificar las señales co-existentes en los datos, sino que también permite descomponer la serie en modos de oscilación asociados a diferentes frecuencias, a partir de los cuales se pueden realizar estudios de detección de tendencias y periodicidades de largo plazo y ejercicios aplicados a la predicción, como los que se presentan en este capítulo.

3.1 Identificación de Modos Principales de Variabilidad Hidroclimática

La transformada de Hilbert-Huang es aplicada en este trabajo a series de precipitación mensual, diaria y horaria, caudales medios mensuales y temperatura media y mínima, según lo descrito en el Capítulo 2 (Información Utilizada). De igual manera estas series también fueron analizadas bajo las transformadas de Fourier y Onditas, con el fin de comparar los resultados de las tres metodologías.

Para la implementación de la transformada de Hilbert-Huang se ha utilizado el software DATADEMON V1.2 cuya licencia fue otorgada por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de Estados Unidos, al profesor Germán Poveda Jaramillo, para fines académicos exclusivamente. El software permite realizar la descomposición en modos empíricos de la serie, así como calcular la transformada de Hilbert a las funciones de modos intrínsecos (FMI) y estimar el espectro de Hilbert. El software también contiene los módulos para el cálculo de las transformadas de Fourier y Onditas, entre otras herramientas, como se puede estudiar en su manual de usuario que se adjunta en los anexos digitales.

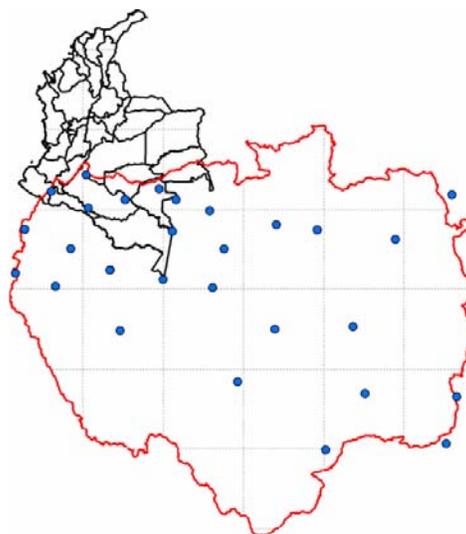
A continuación se presenta un diagnóstico de los resultados obtenidos regionalmente, primero para la cuenca amazónica y luego para Colombia. En cada una de las tablas se encuentran las frecuencias predominantes halladas en las señales estudiadas y los períodos asociados a cada una de dichas frecuencias. Además se presentan los gráficos que ilustran la descomposición en modos empíricos y los espectros de Hilbert, Fourier y Onditas para estaciones características o estaciones en las que se obtuvieron resultados importantes.

3.1.1 Precipitación Mensual

Primero se analizaron las 29 estaciones localizadas en la cuenca Amazónica (ver capítulo 2, Información Utilizada). Para cada una de ellas se implementó la DME, luego se obtuvieron las FMI y los espectros de Potencias, de Onditas y de Hilbert. Luego se identificaron las frecuencias presentes en todas las series. Estas frecuencias comunes fueron asociadas a un periodo promedio. En la **Tabla 9** se presenta un consolidado de los resultados obtenidos para todas las estaciones en la cuenca Amazónica. Además, adyacente a la tabla puede encontrarse un gráfico con la localización de las estaciones.

Tabla 9 Frecuencias predominantes detectadas en la señales de precipitación mensual, Amazonas.

Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (años)
THH	Onditas	Fourier		
0.310	0.339	-	3	0.25
0.154	0.169	0.167	6	0.5
0.103	-	-	9.6	0.8
0.076	0.083	0.086	12	1
0.035	-	0.037	28	2.4
0.014	-	-	70	5.8
0.006	-	-	170	14
-	0.004	0.004	254	21
0.002	-	-	510	42



Las **Figuras 9 a 13** presentan los resultados gráficos de la aplicación de la THH para una de las estaciones con resultados representativos en la cuenca Amazónica (Estación 155001). Los resultados gráficos de las demás estaciones pueden encontrarse en el anexo digital.

Para la estación 155001, cuyo período de registro inicia en enero de 1971 y finaliza en diciembre de 1998, se identifican las frecuencias predominantes que aparecen en la **Tabla 10**. Esta tabla presenta las propiedades de las FMI, sus frecuencias promedio, el período al que está asociada cada frecuencia y el porcentaje de potencia de cada FMI. Este porcentaje de potencia representa el porcentaje de energía de cada FMI comparado con el de la señal original, es decir, es una medida de la contribución de cada FMI a la varianza la serie.

En esta estación, así como en todas las estaciones de la Amazonía, es evidente la frecuencia asociada al ciclo anual, visible en los espectros de potencias (**Figura 11**), de Onditas (**Figura 12**), de Hilbert (**Figura 13**) y en la **Tabla 10** en la que se muestra que la FMI asociada al ciclo anual (h_2) contribuye al 57% de la potencia de la serie. Sin embargo, la transformada de Hilbert-Huang permite identificar además, otros modos de oscilación presentes en la serie de datos, entre ellos el asociado a un período de 18

meses con un porcentaje de potencia del 20.6% y el correspondiente a un período de 3 meses con una contribución a la energía del 14.9% (Tabla 10).

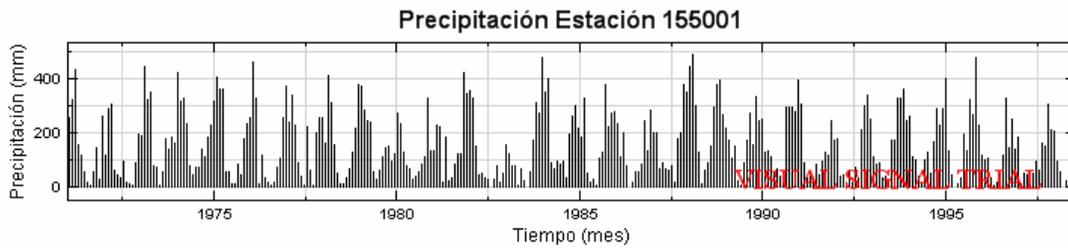


Figura 9 Serie de precipitación mensual estación 155001, Cuenca Amazónica.

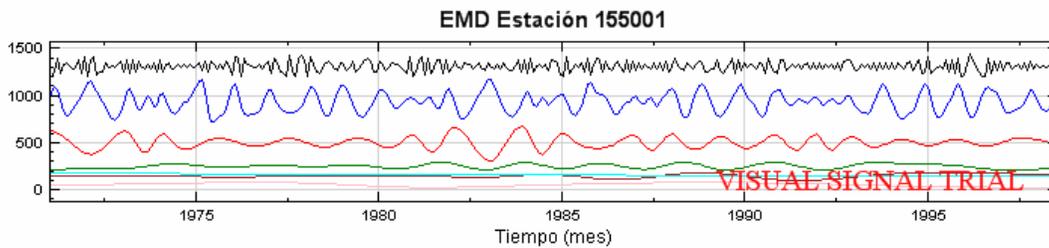


Figura 10 Descomposición en modos empíricos, estación 155001, Cuenca Amazónica.

Tabla 10 Propiedades de las FMI, Estación 155001.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio Año	Potencia (%)
h1	0.338	3	0.2	14.9
h2	0.103	10	0.8	57.0
h3	0.0565	18	1.5	20.6
h4	0.0283	35	2.9	3.2
h5	0.0179	56	4.7	2.4
h6	0.00595	168	14.0	1.9
Residuo	0.00149	671	55.9	0.0

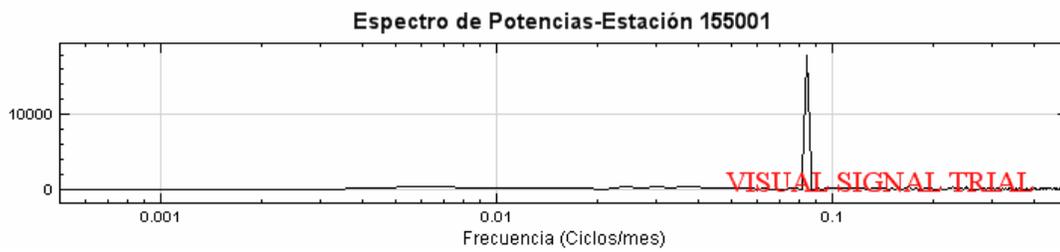


Figura 11 Espectro de potencias (Fourier), estación 155001, Cuenca Amazónica.

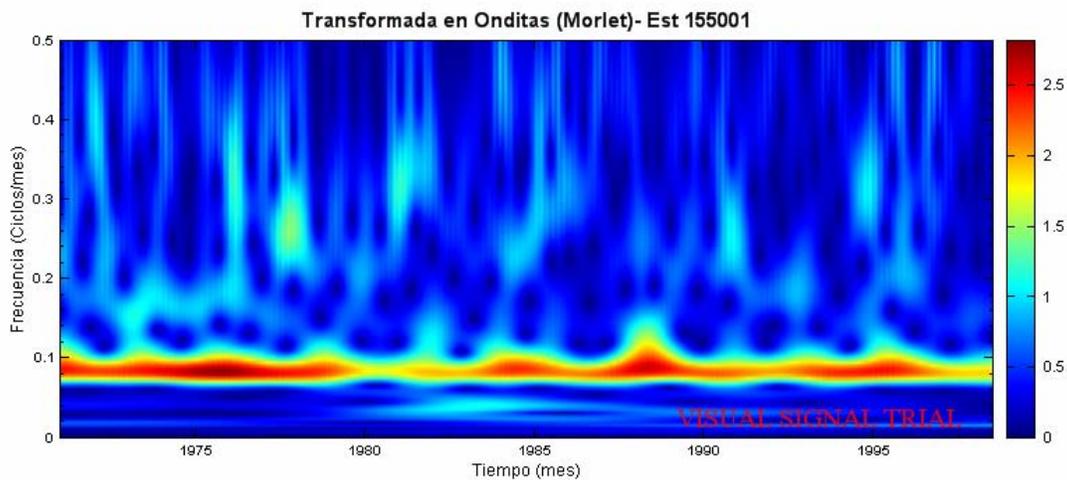


Figura 12 Espectro de Onditas, estación 155001, Cuenca Amazónica.

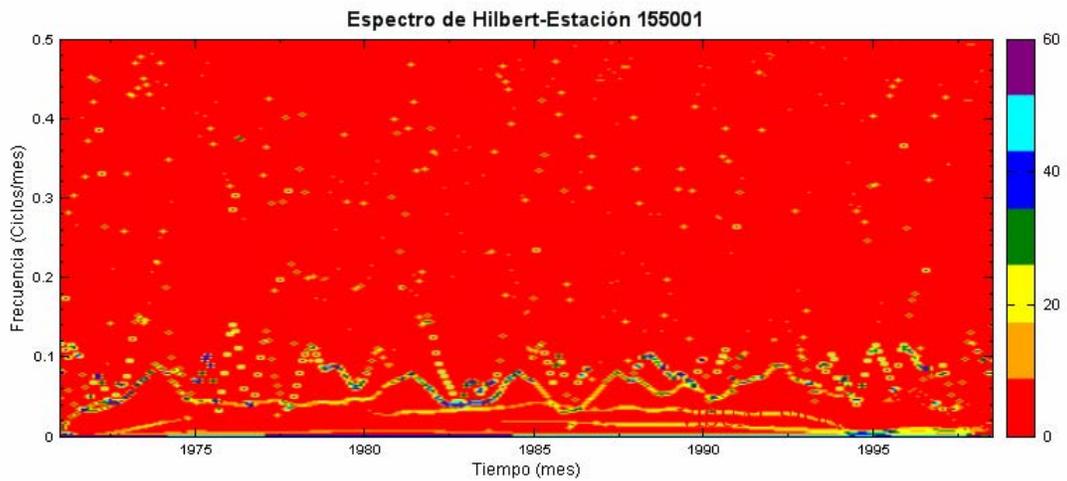


Figura 13 Espectro de Hilbert, estación 155001, Cuenca Amazónica.

En las **Tablas 11 a 30** se presenta un consolidado de las frecuencias predominantes detectadas mediante las tres metodologías empleadas para las 20 regiones de precipitación homogénea estudiadas en Colombia (Ver Capítulo 2, Información Utilizada). Además, contiguo a cada tabla puede observarse la localización de las estaciones en cada una de las regiones.

Tabla 11 Frecuencias predominantes en la región 1, Llanura del Pacífico.

R1				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.33	-	-	3	0.3
-	0.289	-	3.5	0.3
0.143	0.167	0.167	6	0.5
0.076	0.084	0.084	12	1
0.059	-	-	17	1.4
-	-	0.040	24	2
0.033	-	-	30	2.5
-	0.020	-	50	4.2
0.014	-	-	72	6
-	0.039	-	254	21

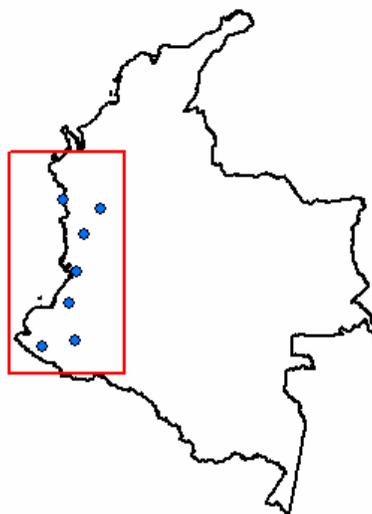


Tabla 12 Frecuencias predominantes en la región 2, Cordillera Oriental-Ladera Oriental.

R2				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.3	-	-	3	0.3
-	0.165	0.167	6	0.5
0.081	0.085	0.086	12	1
0.033	-	-	30	2.5
0.014	-	-	72	6

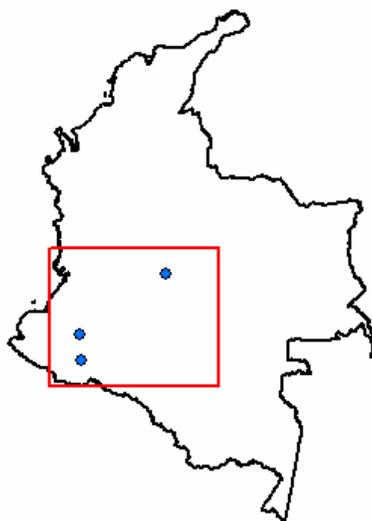


Tabla 13 Frecuencias predominantes en la región 3, Meseta de Popayán-Río Cauca.

R3				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.3	-	-	3	0.3
-	0.165	0.165	6	0.5
0.075	0.082	0.083	12	1
0.025	-	-	39	3.3
0.017	-	-	60	5
-	-	0.006	164	14

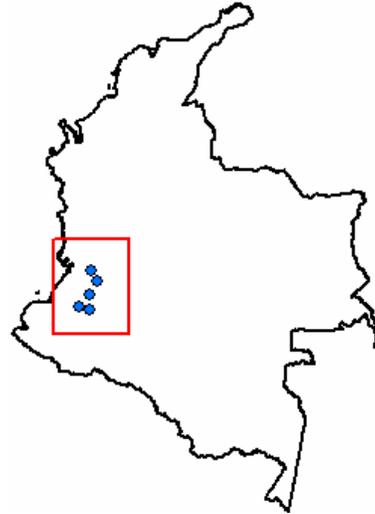


Tabla 14 Frecuencias predominantes en la región 4, Río Magdalena.

R4				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.33	-	-	3	0.3
-	0.250	0.252	4	0.3
-	0.167	0.164	6	0.5
0.079	0.082	0.083	12	1
-	-	0.015	66	5.5
0.014	-	-	71	5.9



Tabla 15 Frecuencias predominantes en la región 5, Cordillera Central-Ladera Oriental.

R5				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.31	-	-	3	0.3
0.170	0.165	0.164	6	0.5
0.082	0.082	0.083	12	1
0.037	-	-	27	2.3
0.014	-	-	73	6



Tabla 16 Frecuencias predominantes en la región 6, Valle del Magdalena.

R6				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.31	-	-	3	0.3
0.151	0.162	0.165	6	0.5
0.761	0.759	0.793	12	1
0.038	-	-	26	2.2
0.014	-	-	72	6

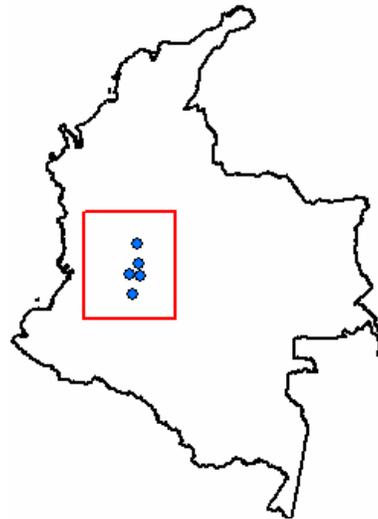


Tabla 17 Frecuencias predominantes en la región 7, Cordillera Oriental-Ladera Oriental.

R7				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.32	-	-	3	0.3
-	0.177	-	6	0.5
0.077	0.084	0.081	12	1
0.017	-	-	58	4.8
0.04	-	-	25	2



Tabla 18 Frecuencias predominantes en la región 8, Piedemonte llanero.

R8				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.33	-	-	3	0.3
-	0.165	-	6	0.5
0.079	0.082	0.083	12	1
0.022	-	-	45	3.8
0.035	-	-	28	2.4

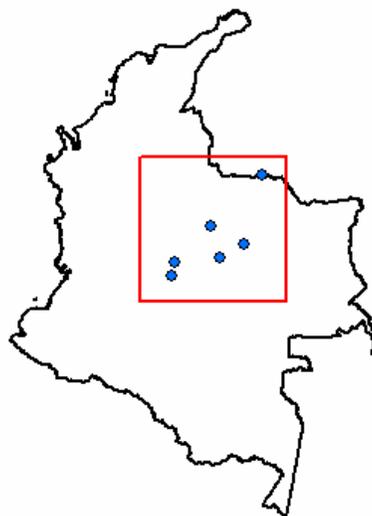


Tabla 19 Frecuencias predominantes en la región 9, Valle del Cauca.

R9				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.31	-	-	3	0.3
0.155	0.165	0.165	6	0.5
0.080	0.083	-	12	1
0.040	-	-	25	2
0.021	-	-	49	4

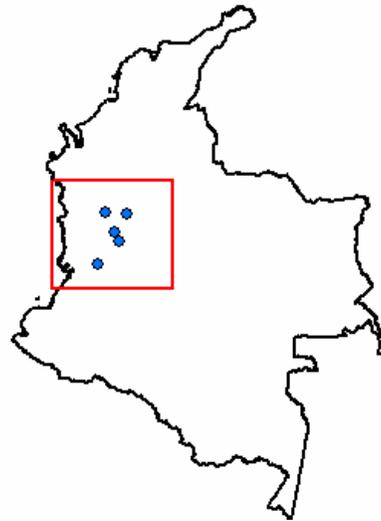


Tabla 20 Frecuencias predominantes en la región 10, Río Magdalena.

R10				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.31	-	-	3	0.3
0.160	0.165	0.166	6	0.5
0.078	0.082	0.082	12	1
0.037	-	-	27	2.2
0.016	-	-	63	5.3

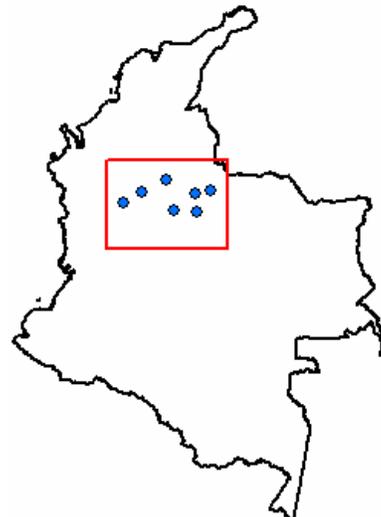


Tabla 21 Frecuencias predominantes en la región 11, Cordillera Oriental-Ladera Oriental.

R11				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.34	-	-	3	0.3
0.13	-	-	7	0.6
0.072	0.082	0.083	12	1
0.036	-	-	28	2.3
0.015	-	-	68	5.6
	0.042	-	233	20

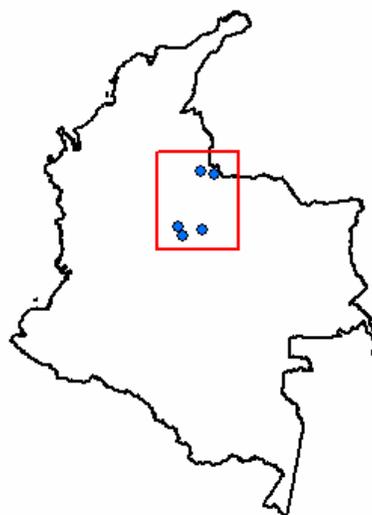


Tabla 22 Frecuencias predominantes en la región 12, Atlántico.

R12				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.31	-	-	3	0.3
0.148	0.166	0.165	6	0.5
0.070	0.082	0.082	12	1
0.036	-	-	28	2.3
0.018	-	-	54	4.5



Tabla 23 Frecuencias predominantes en la región 13, Río Cauca.

R13				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.34	-	-	3	0.3
0.130	0.165	0.164	6	0.5
0.075	0.030	0.082	12	1
0.032	-	-	31	2.6
0.013	-	-	75	6.3

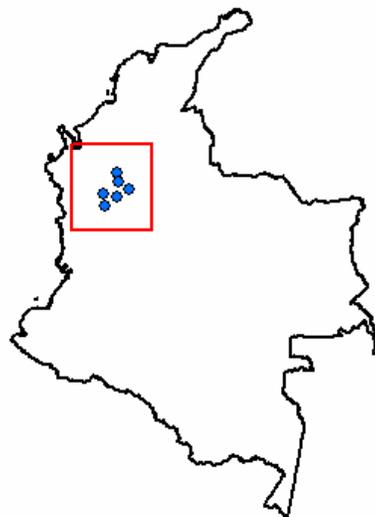


Tabla 24 Frecuencias predominantes en la región 14, Panamá.

R14				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.32	-	-	3	0.3
0.152	0.164	0.166	6	0.5
0.075	0.084	0.083	12	1
0.027	-	-	37	3



Tabla 25 Frecuencias predominantes en la región 15, Río Magdalena.

R15				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.33	-	-	3	0.3
-	0.165	0.165	6	0.5
0.13	-	-	8	0.6
0.075	0.084	0.083	12	1
0.014	-	-	70	5.8
0.010	-	-	102	8.5

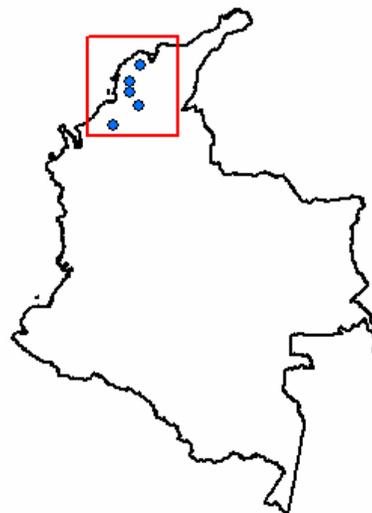


Tabla 26 Frecuencias predominantes en la región 16, Río Magdalena.

R16				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.3	-	-	3	0.3
0.150	0.165	0.017	6	0.5
0.077	0.083	0.083	12	1
0.030	-	-	33	2.8
-	0.018	0.018	55	4.6

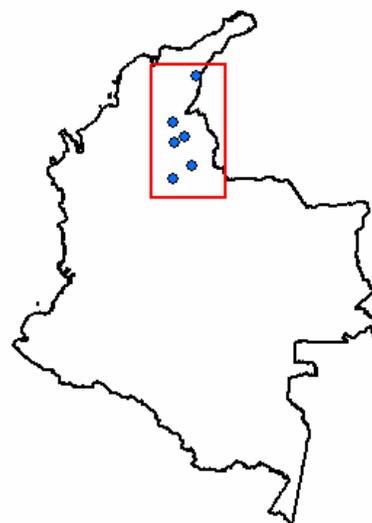


Tabla 27 Frecuencias predominantes en la región 17, Península de la Guajira.

R17				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
00.3	-	-	3	0.3
0.150	0.162	0.165	6	0.5
0.069	0.082	0.081	12	1
0.031	-	-	32	2.7
0.013	-	-	79	6.6

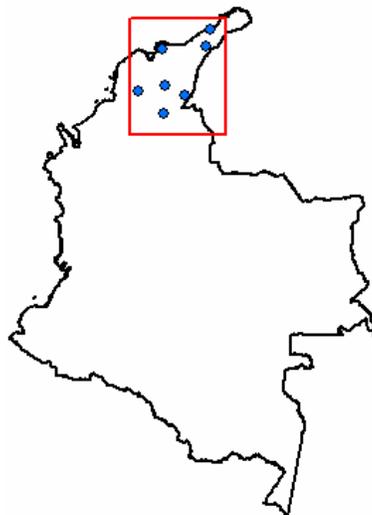


Tabla 28 Frecuencias predominantes en la región 20, Cordillera Oriental-Ladera Occidental.

R20				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.31	-	-	3	0.3
0.156	0.165	0.166	6	0.5
0.077	-	-	12	1
0.035	-	-	29	2.4
0.012	-	-	87	7.2

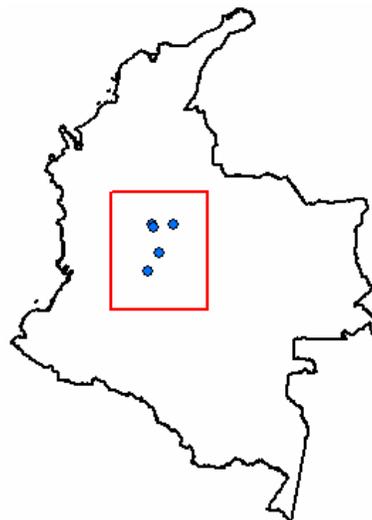


Tabla 29 Frecuencias predominantes en la región 21, Río Cauca.

R21				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
0.34	-	-	3	0.3
0.165	0.165	0.165	6	0.5
0.071	0.081	0.082	12	1
0.032	-	-	32	2.6
0.014	-	-	70	5.8

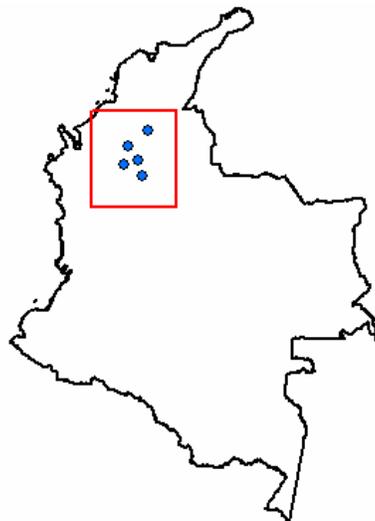
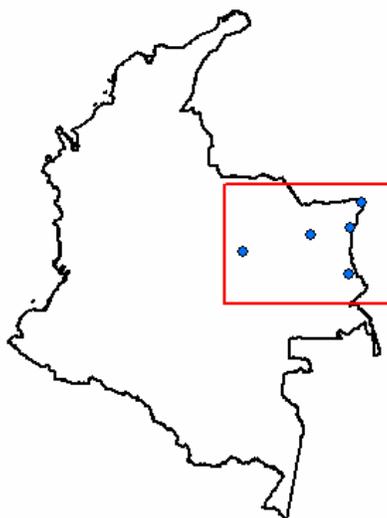


Tabla 30 Frecuencias predominantes en la región 22, Llanos Orientales.

R22				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (años)
HHT	Onditas	Fourier		
-	0.164	-	6	0.5
0.075	0.083	0.082	12	1
0.010	-	-	102	8.5



Las **Figuras 14 a 18** presentan los gráficos correspondientes a los resultados para la estación 5311501 en la Región 1 (Llanura del Pacífico) en Colombia. (Ver Capítulo 1, Información Utilizada). Primero se presenta el gráfico de la variación de la precipitación a través de los años, teniendo en cuenta que el período de registro para estación inicia en enero de 1960 y finaliza en julio de 2007 (**Figura 14**). Luego se presentan gráficamente las 6 FMI y el residuo, resultantes del proceso de descomposición en modos empíricos (**Figura 15**) junto con la tabla que muestra las propiedades de cada una de las FMI (**Tabla 31**). Luego se presentan los espectros de potencias (**Figura 16**), Onditas (**Figura 17**) y el de Hilbert (**Figura 18**). El espectro de potencias identifica dos modos de oscilación principales de frecuencia $f_1=0.084 \text{ mes}^{-1}$ y $f_2=0.167 \text{ mes}^{-1}$, representados en los dos picos que se observan en la (**Figura 16**), asociados al ciclo anual y semi-anual respectivamente. En el espectro en Onditas es posible identificar, además de los dos ciclos mencionados anteriormente, un tercer modo asociado a un período de 3 meses con una energía particularmente fuerte en las siguientes fechas: junio de 1963, septiembre de 1989 y noviembre de 2002 (**Figura 17**). La transformada de Hilbert-Huang, detecta 6 modos de oscilación principales con frecuencias asociadas a períodos de 3, 7, 14, 28, 53 meses, de los cuales los primeros tres son los que aportan mayor contribución a la varianza de la serie (**Tabla 31**). Particularmente en la **Figura 18** se observa que la frecuencia asociada a un período de 53 meses, presenta mayor energía en los siguientes años: 1963-1964-1966-1972-1975-1981-1982-1988-1996-1998-1999-2004-2005, coincidiendo con los años que han sido reportados como años con fenómeno El Niño o La Niña y por lo tanto esta frecuencia puede ser asociada al sistema ENSO.

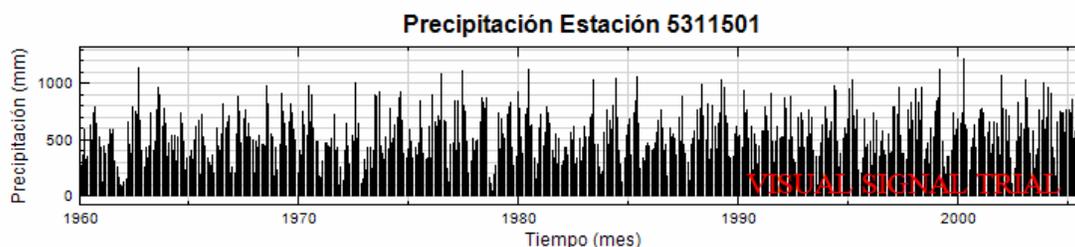


Figura 14 Precipitación mensual, estación 5311501, región 1, Colombia

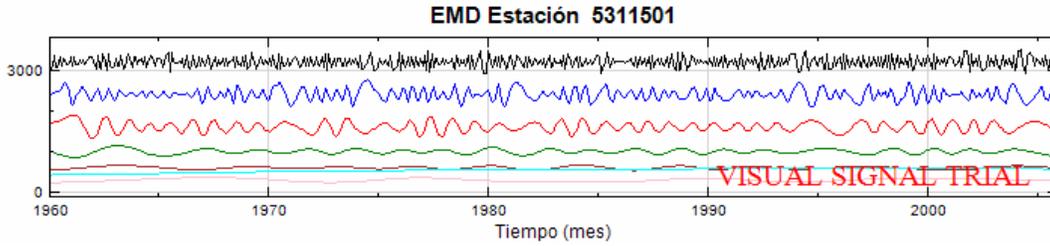


Figura 15 Descomposición en modos empíricos, estación 5311501, región 1, Colombia

Tabla 31 Propiedades de las FMI, Estación 5311501

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.337	3	0.2	30.2
h2	0.141	7	0.6	33.3
h3	0.0698	14	1.2	25.6
h4	0.0358	28	2.3	6.22
h5	0.0188	53	4.4	2.06
h6	0.00805	124	10.4	2.68
Residuo	0.000894	1119	93.2	0

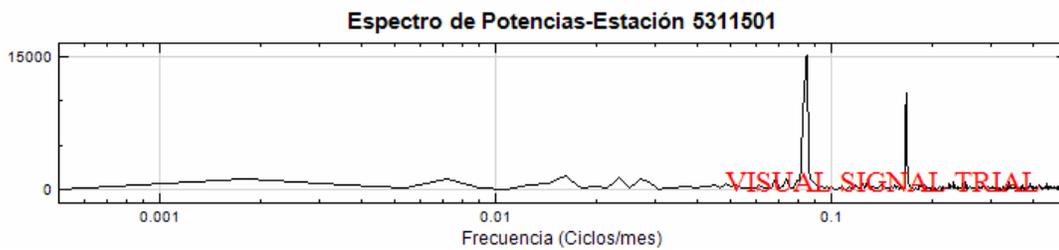


Figura 16 Espectro de potencias (Fourier), estación 5311501, región 1, Colombia

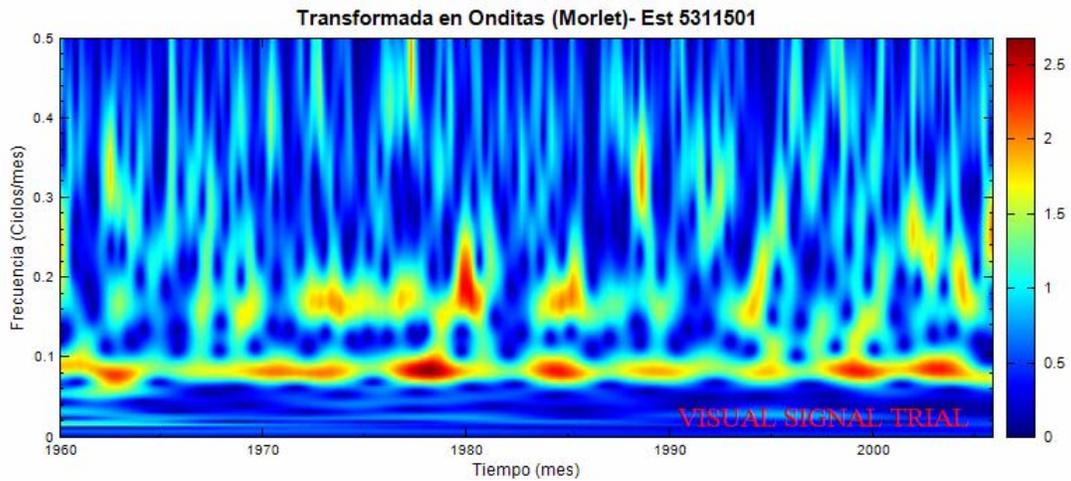


Figura 17 Espectro de Onditas, estación 5311501, región 1, Colombia

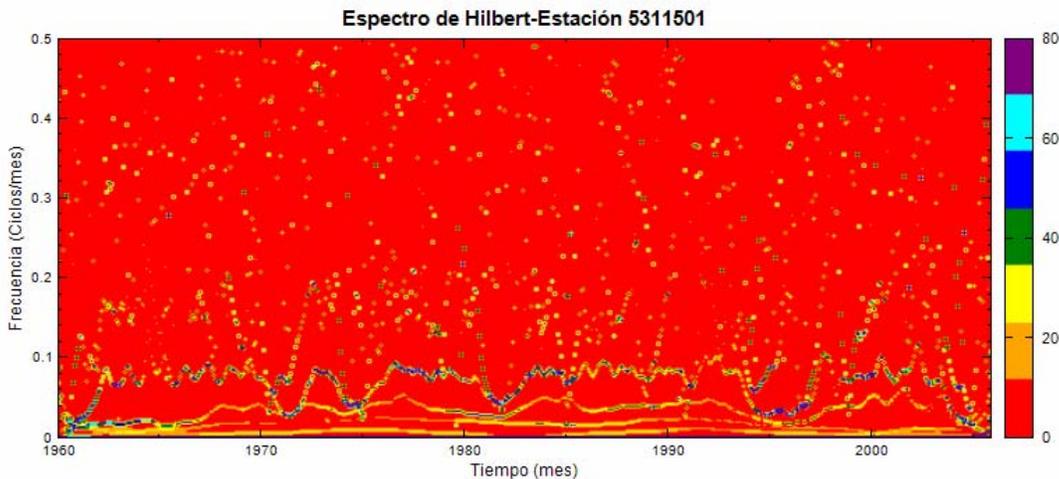


Figura 18 Espectro de Hilbert, estación 5311501, región 1, Colombia

También es posible observar a partir de la **Tabla 31** la presencia de un modo de oscilación con un período de 10 años aproximadamente (h6). Se realizó un análisis de correlación de esta FMI con las series de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) obtenidas de la página web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y se construyó la **Figura 19**, en la cual se superponen las tres señales (h6, PDO y AMO). Se obtuvo que los porcentajes de correlación de la FMI h6 con la PDO y con la serie de la AMO no son estadísticamente significativos para un nivel de significancia $\alpha=0.05$, siendo del 21 % y del 17% respectivamente.

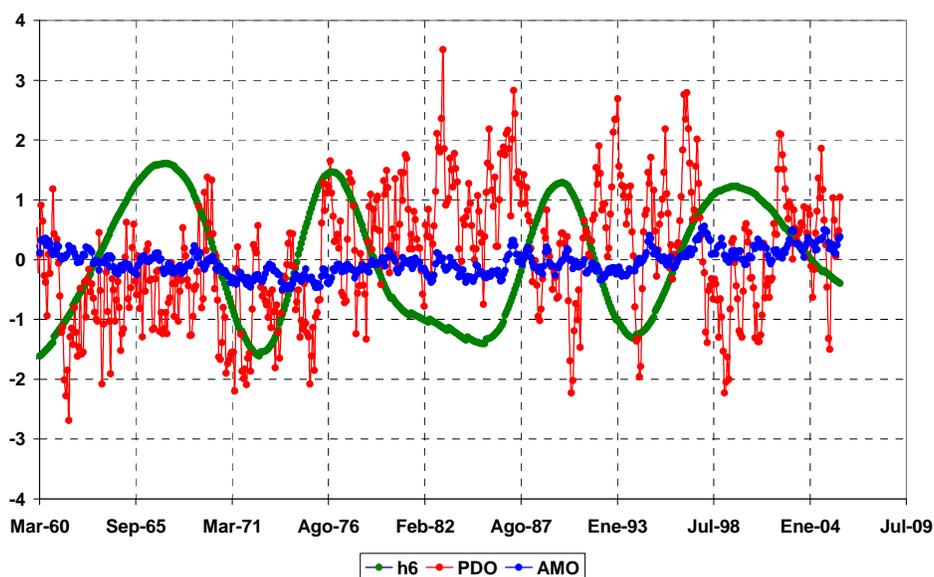


Figura 19 Series FMI h6 de la estación 5311501 (verde), PDO (rojo) y AMO (azul).

En las **Figuras 20-24** se muestran resultados gráficos obtenidos para la estación 2118004, correspondiente a la Región 5 (Cordillera Central-Ladera Oriental) en Colombia (Ver Capítulo 1, Información Utilizada). En esta estación se detectó un fuerte ciclo semi-anual (asociado al doble paso de la ZCIT), como se observa en los espectros de potencias de Fourier (**Figura 22**) y Onditas (**Figura 23**). En el espectro de Hilbert (**Figura 24**) este fenómeno se hace también visible, como también la presencia de otras frecuencias importantes dentro de la señal (**Tabla 32**). También se detecta que la frecuencia predominante en esta estación es la asociada a un período de 3 meses (con un porcentaje de potencia del 47%), seguida por la frecuencia asociada a un período de 6 meses (con un porcentaje de potencia del 32%). Estos resultados se presentan en la **Tabla 32**.

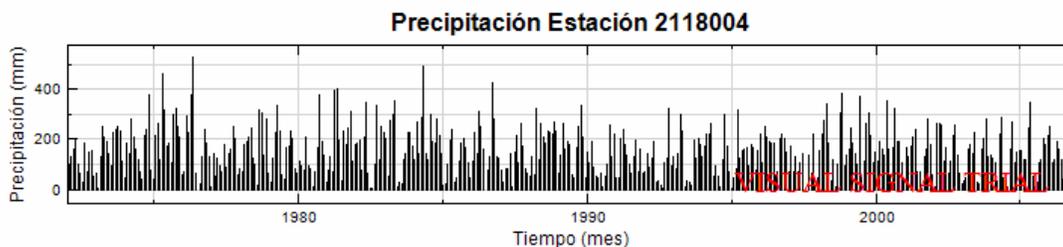


Figura 20 Precipitación mensual, estación 2118004, región 5, Colombia.

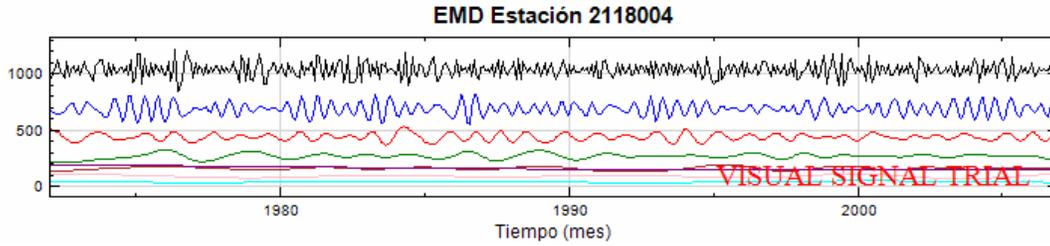


Figura 21 Descomposición en modos empíricos, estación 2118004, región 5, Colombia.

Tabla 32 Propiedades de las FMI, Estación 2118004.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.039	3	0.2	47.5
h2	0.158	6	0.5	32.5
h3	0.0798	13	1.0	11.0
h4	0.0417	24	2.0	4.3
h5	0.019	53	4.4	2.9
h6	0.0119	84	7.0	0.7
h7	0.00476	210	17.5	1.1
Residuo	0.00119	840	70.0	0.0

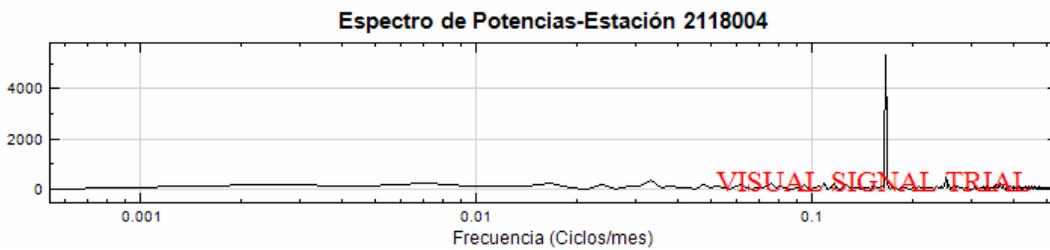


Figura 22 Espectro de potencias (Fourier), estación 2118004, región 5, Colombia.

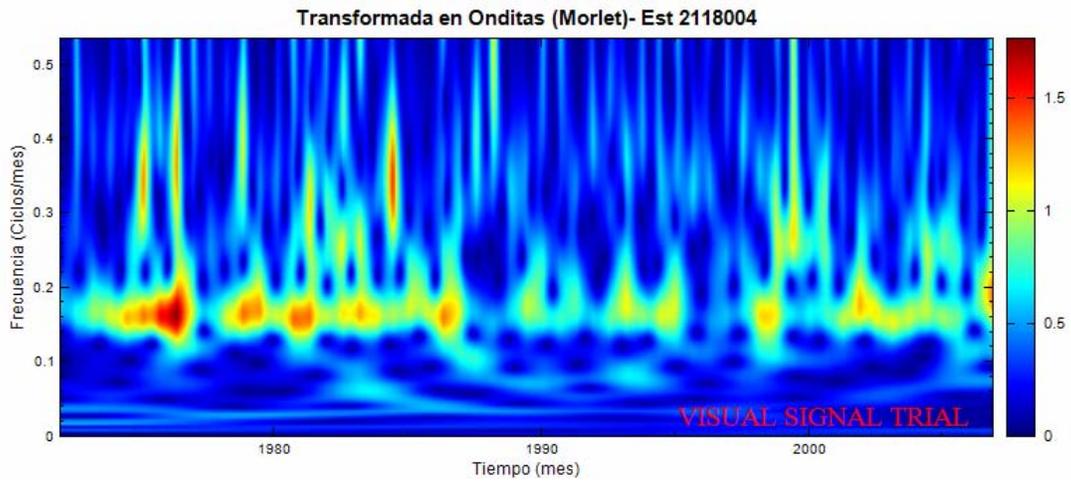


Figura 23 Espectro de Onditas, estación 2118004, región 5, Colombia.

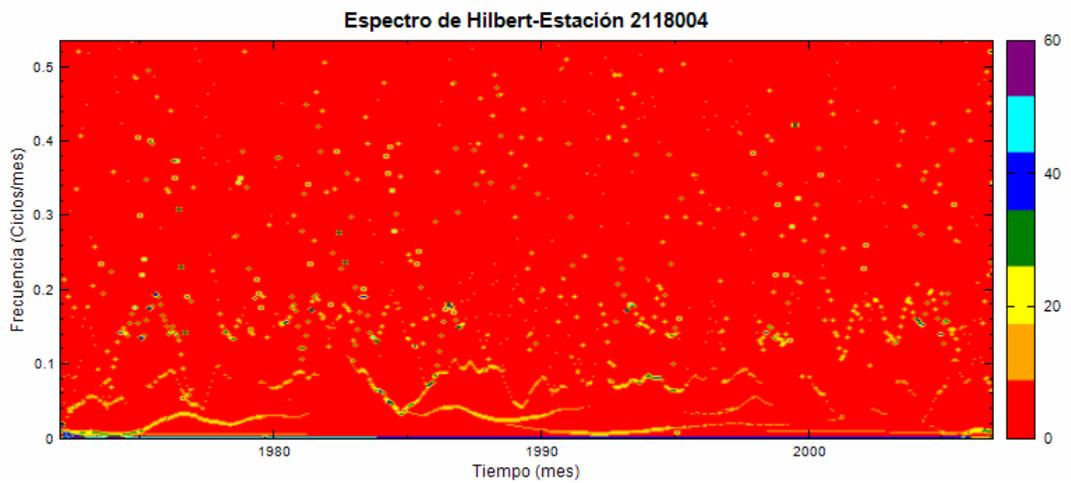


Figura 24 Espectro de Hilbert, estación 2118004, región 5, Colombia.

Las **Figuras 25 a 29** muestran los resultados gráficos obtenidos para la estación 5307003 de la Región 1 (Llanura del Pacífico), en Colombia (ver Capítulo 1, Información Utilizada). En tal estación se identifica una temporada de lluvias inusualmente altas (probablemente debidas a un error de medición) alrededor del año 1990 la cual es detectada por las tres metodologías. Sin embargo, mientras que las transformadas de Fourier (**Figura 27**) y Onditas (**Figura 28**) se concentran sólo en mostrar que hay datos atípicos (“Outliers”), la transformada de Hilbert-Huang los muestra y localiza temporalmente (**Figura 29**), pero además identifica las demás frecuencias de oscilación en la señal (**Tabla 33**). La

transformada de Hilbert detecta que la frecuencia predominante en esta estación es la asociada a un período de 7 meses, con un porcentaje de potencia del 42%.

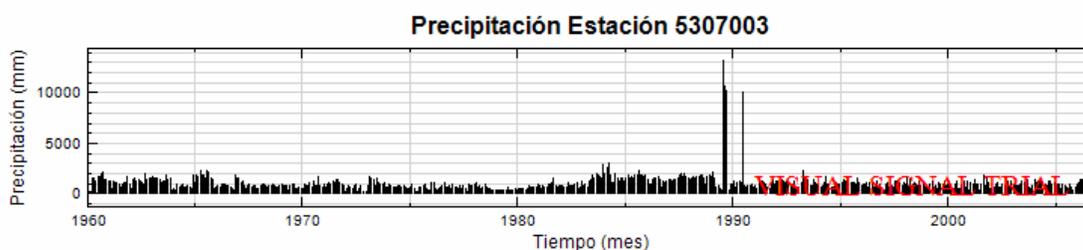


Figura 25 Precipitación mensual, estación 5307003, región 1, Colombia.

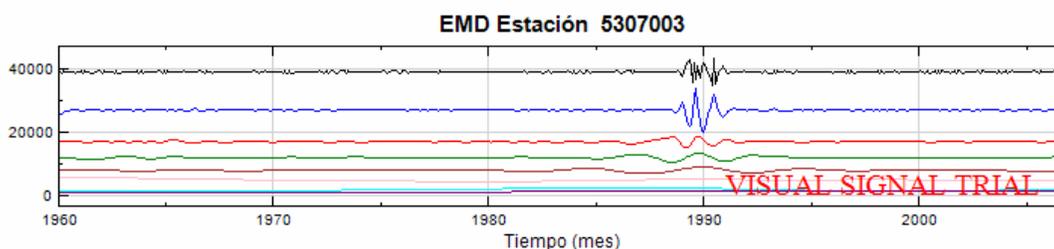


Figura 26 Descomposición en modos empíricos, estación 5307003, región 1, Colombia.

Tabla 33 Propiedades de las FMI, Estación 5307003.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.315	3	0.3	18.0
h2	0.145	7	0.6	42.0
h3	0.0648	15	1.3	7.5
h4	0.0306	33	2.7	8.3
h5	0.0175	57	4.8	7.1
h6	0.00525	190	15.9	8.6
h7	0.00263	380	31.7	7.7
Residuo	0.000876	1142	95.1	0.0

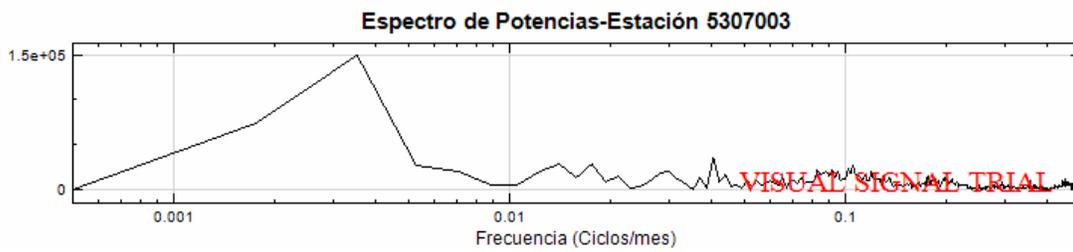


Figura 27 Espectro de potencias (Fourier), estación 5307003, región 1, Colombia.

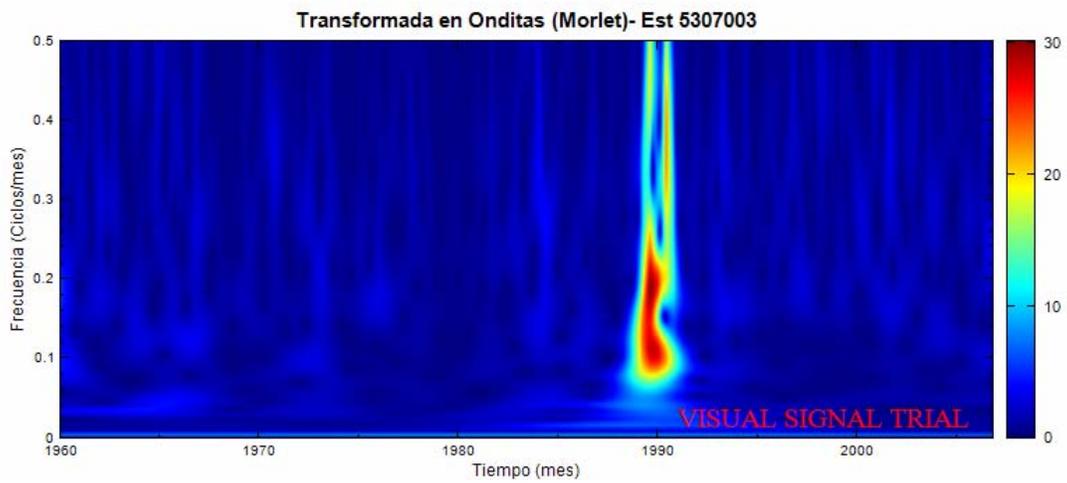


Figura 28 Espectro de Onditas, estación 5307003, región 1, Colombia.

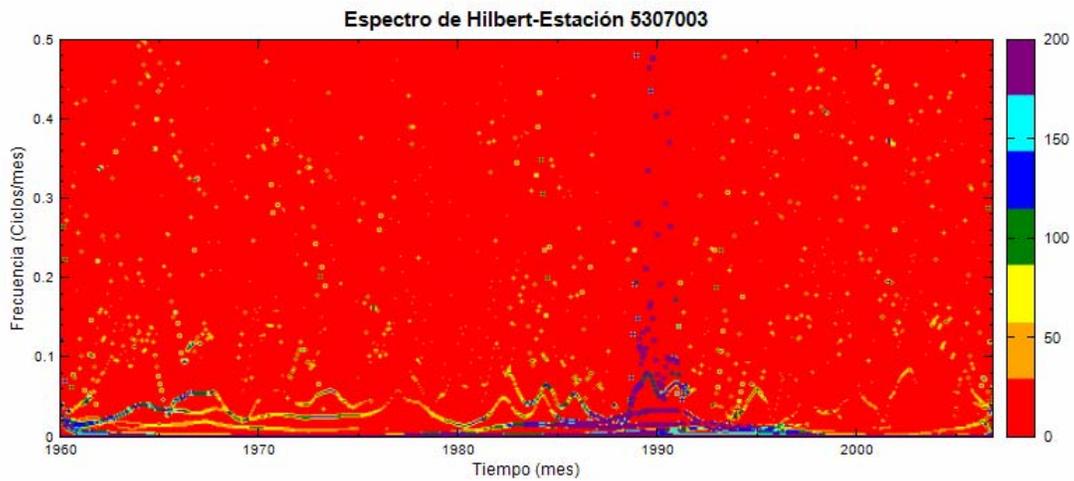


Figura 29 Espectro de Hilbert, estación 5307003, región 1, Colombia.

En este trabajo también se hizo el ejercicio de comparar los resultados obtenidos por las tres metodologías al remover el ciclo anual de las series estudiadas, es decir, con series mensuales estandarizadas. Las **Figuras 30 a 39** presentan los resultados gráficos obtenidos tanto para las series de datos originales como para las series estandarizadas. Las **Tablas 34 y 35** presentan las propiedades de las FMI para la serie original y estandarizada respectivamente.

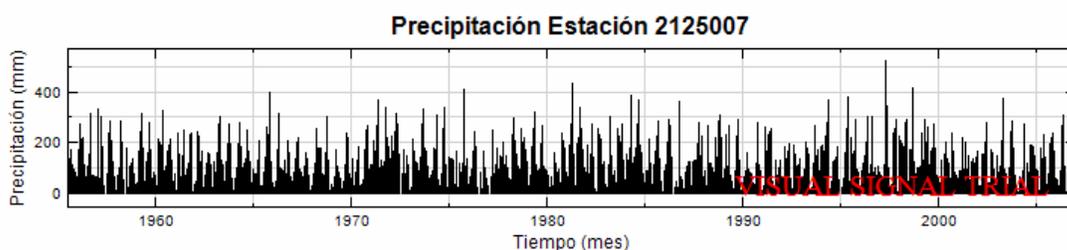


Figura 30 Precipitación mensual, estación 2125007, región 6, Colombia.

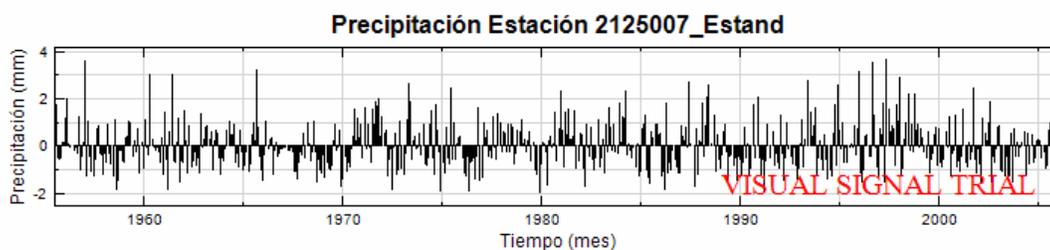


Figura 31 Serie estandarizada de precipitación mensual, estación 2125007, región 6, Colombia.

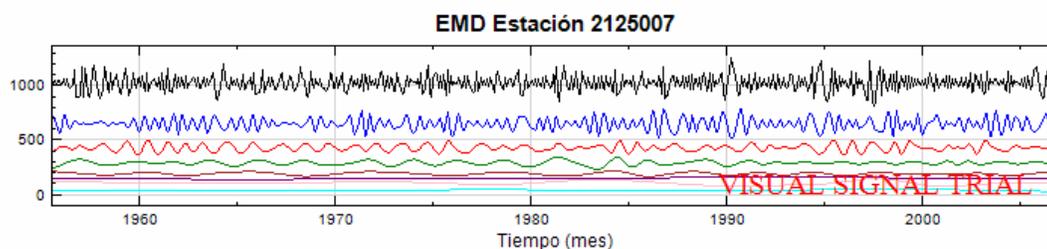


Figura 32 Descomposición en modos empíricos, estación 2125007, región 6, Colombia.

Tabla 34 Propiedades de las FMI, Estación 2125007.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.302	3	0.3	53.1
h2	0.146	7	0.6	28.6
h3	0.0744	13	1.1	8.5
h4	0.0372	27	2.2	4.1
h5	0.0194	52	4.3	1.6
h6	0.0105	95	7.9	1.8
h7	0.00405	247	20.6	2.3
Residuo	0.00081	1236	103.0	0.0

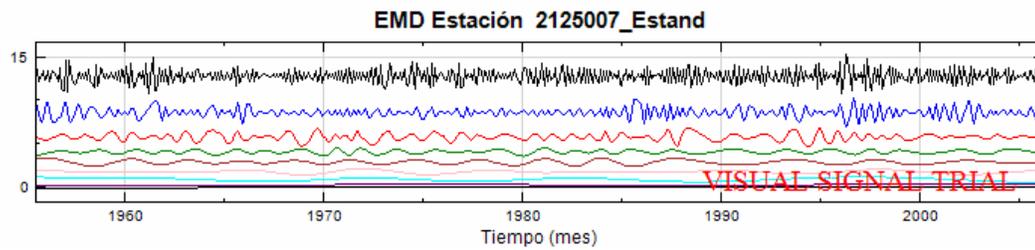


Figura 33 Descomposición en modos empíricos de la serie estandarizada, estación 2125007, región 6, Colombia.

Tabla 35 Propiedades de las FMI de la serie estandarizada, Estación 2125007.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.347	3	0.2	50.0
h2	0.166	6	0.5	22.3
h3	0.0769	13	1.1	12.9
h4	0.0429	23	1.9	3.8
h5	0.0227	44	3.7	5.3
h6	0.0138	72	6.0	2.5
h7	0.00647	155	12.9	2.9
h8	0.00324	309	25.7	0.4
Residuo	0.00162	617	51.4	0.0

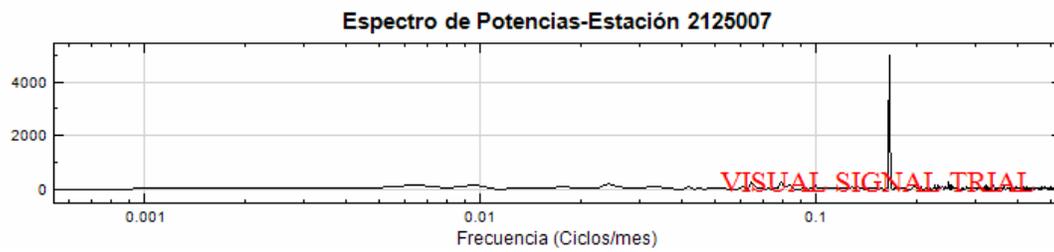


Figura 34 Espectro de potencias (Fourier), estación 2125007, región 6, Colombia.

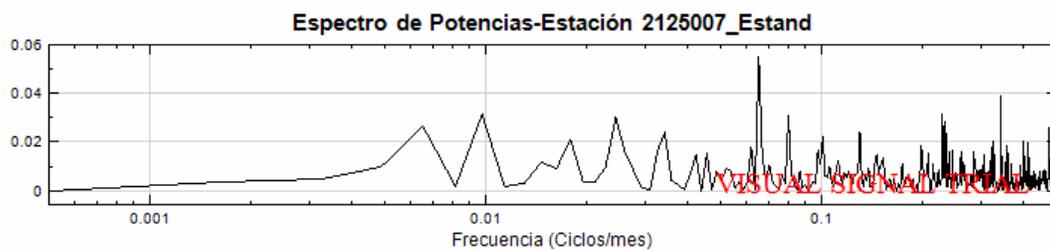


Figura 35 Espectro de potencias (Fourier) de la serie estandarizada, estación 2125007, región 6, Colombia.

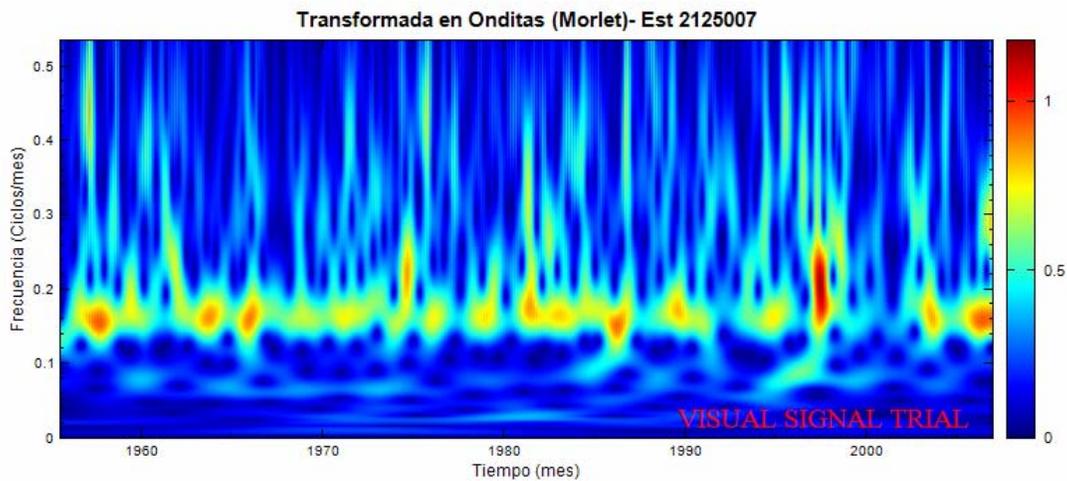


Figura 36 Espectro de Onditas, estación 2125007, región 6, Colombia.

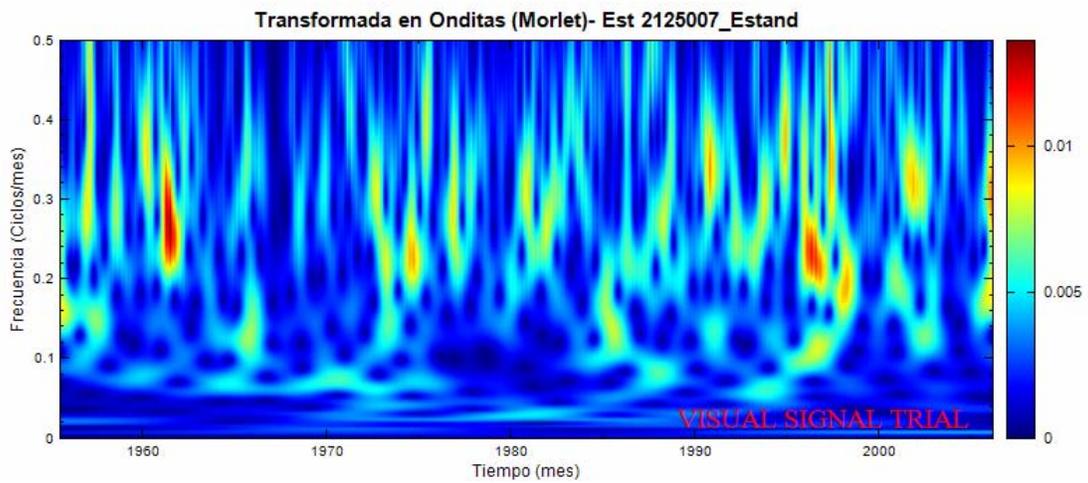


Figura 37 Espectro de Onditas de la serie estandarizada, estación 2125007, región 6, Colombia.

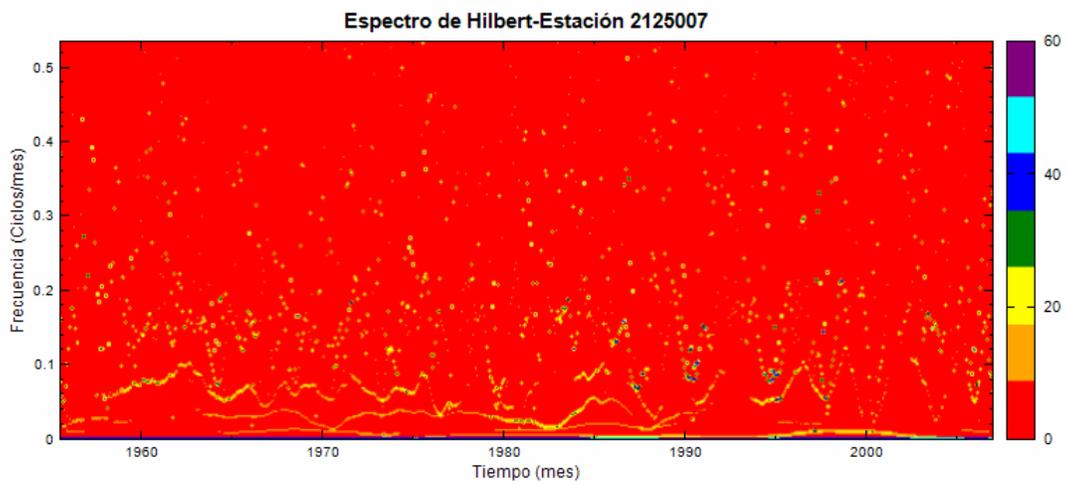


Figura 38 Espectro de Hilbert, estación 2125007, región 6, Colombia.

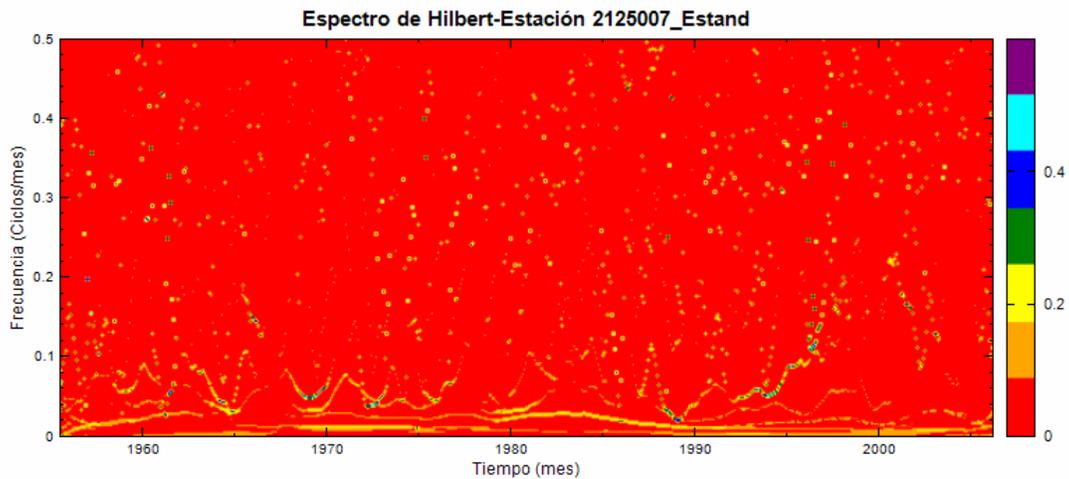


Figura 39 Espectro de Hilbert de la serie estandarizada, estación 2125007, región 6, Colombia.

Figuras 30 a 39 evidencian que las transformadas de Fourier y Onditas de las series estandarizadas exhiben resultados muy diferentes. En el caso de la transformada de Fourier de la serie original detecta una frecuencia predominante $f=0.165 \text{ mes}^{-1}$, mientras que la misma transformada detecta una frecuencia predominante $f=0.065 \text{ mes}^{-1}$ para la serie estandarizada. La transformada en Onditas detecta una frecuencia principal $f=0.165 \text{ mes}^{-1}$ para la serie original, mientras que para la serie estandarizada detecta $f=0.33 \text{ mes}^{-1}$. Sin embargo, la transformada de Hilbert-Huang no presenta mayor variación, es decir, se detectan prácticamente las mismas frecuencias y porcentajes de potencia (**Tablas 34 y 35**). Esto pone de manifiesto que la transformada de Hilbert-Huang está en capacidad de detectar no sólo los ciclos anuales y semi-anuales de las series mensuales, (que generalmente son las periodicidades más fuertes dentro de las señales), sino además otras frecuencias co-existentes en las señales, independientemente del proceso de estandarización de los datos.

En general, se encuentra que para todas las estaciones de precipitación mensual, tanto en Colombia como en la cuenca Amazónica, la frecuencia predominante es la asociada con el ciclo anual (12 meses). Luego se identifica, específicamente en las regiones que están expuestas al doble paso de la ZCIT, una frecuencia asociada al ciclo semi-anual (6 meses). También se identifican en algunas de las estaciones frecuencias asociadas con períodos entre 3.5 y 6 años que pueden relacionarse con el sistema ENSO ya que en el espectro de Hilbert es posible visualizar los años con fenómenos El Niño o La Niña. Otra

frecuencia menos común, pero igualmente detectada en las señales estudiadas, fue una correspondiente a un período entre 2-3 años, que podría estar relacionada a la Oscilación Cuasi-bienal, ó con otra componente significativa del ENSO en tal banda frecuencial.

En todos los casos se observa que la Transformada de Hilbert tiene una mejor capacidad para detectar más frecuencias significativas que las otras dos metodologías empleadas (Fourier y Onditas), tal como puede observarse en las **Tablas 11 a 30**. De igual manera se pone de presente la superioridad de la transformada de Hilbert-Huang, pues es capaz de detectar todos los modos de oscilación de la señal cuando hay frecuencias particularmente fuertes, como ciclos anuales, semi-anuales y datos atípicos.

3.1.2 Precipitación Diaria

Se estudiaron 26 estaciones de precipitación diaria localizadas en las cuencas de los ríos Atrato, Catatumbo, Patía y Orinoco. Para cada una de ellas se obtuvieron las FMI y los espectros de Potencias, de Onditas y de Hilbert. Las **Tablas 36 a 39** presentan un consolidado de las frecuencias presentes en todas las estaciones para cada una de las regiones analizadas, junto con un gráfico que señala la localización de las estaciones.

Tabla 36 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Atrato Colombia.

Atrato				
Frecuencia (días ⁻¹)			Período (días)	Período (años)
THH	Onditas	Fourier		
0.3	0.239		4	0.01
0.066	-	-	15	0.04
0.027	-	-	37	0.1
0.013	-	-	78	0.21
-	-	0.0055	183	0.5
-	-	0.0028	365	1
-	-	0.0011	925	2.5
-	-	0.0008	1325	3.7



Tabla 37 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Catatumbo, Colombia.

Catatumbo				
Frecuencia (días ⁻¹)			Período (días)	Período (años)
THH	Onditas	Fourier		
-	0.198		5	
0.073	-	-	14	-
0.036	-	-	28	-
0.014	-	-	71	-
-	-	0.0055	182	0.5
-	-	0.0024	413	1

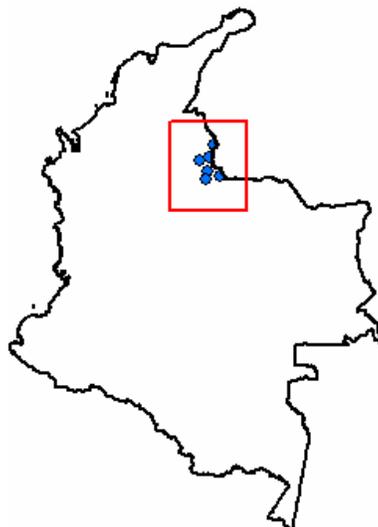


Tabla 38 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Patía, Colombia.

Patía				
Frecuencia (días ⁻¹)			Período (días)	Período (años)
THH	Onditas	Fourier		
0.33			3	0.01
-	0.2047	-	5	0.01
0.160	0.15	-	7	0.02
0.0603	-	-	17	0.05
0.0286	-	-	35	0.10
0.0144	-	-	69	0.19
-	0.0039	-	254	0.70
-	-	0.0055	183	0.5
0.00263	-	0.0027	367	1

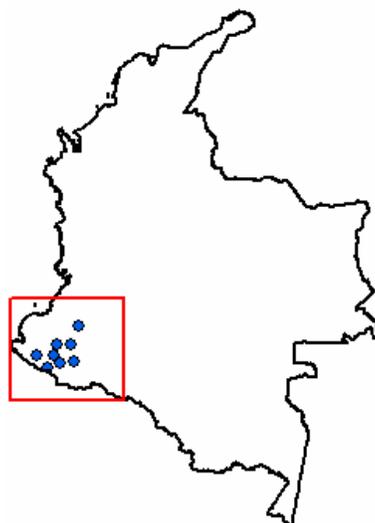
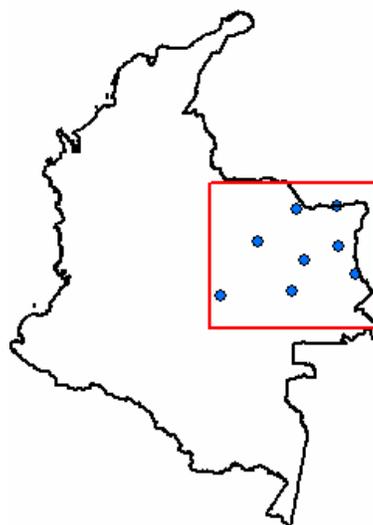


Tabla 39 Frecuencias predominantes en las series de precipitación diaria, Cuenca del río Orinoco, Colombia.

Orinoco				
Frecuencia (días ⁻¹)			Período (días)	Período (años)
THH	Onditas	Fourier		
0.3155	0.2819	-	3.5	0.01
0.1387	-	-	7.2	0.02
0.062	-	-	16	0.04
0.0323	-	-	31	0.09
0.0155	-	-	64	0.18
0.0039	0.0394	-	254	
-	-	0.0055	183	0.5
-	-	0.0027	363	1



Las **Figuras 40 a 44** presentan los resultados gráficos obtenidos para la estación 5102001 de precipitación diaria localizada en la región de la cuenca del río Patía. Los resultados gráficos de las demás estaciones de precipitación diaria pueden encontrarse en el anexo digital. En esta estación la transformada de Fourier (**Figura 42**) detectó frecuencias predominantes asociadas a períodos de 183 días (semi-anual), 365 días (anual) , 813 (cuasi-bienal) y 1464 días (interanual asociada la ENSO), mientras que la transformada en Onditas (**Figura 43**) detectó frecuencias asociadas a períodos de 4 y 254 días. La THH (**Figura 44, Tabla 40**) detectó que en esta estación el modo de oscilación principal es el asociado a un período de 3 días con un porcentaje de potencia de 44.4%, seguido por períodos de 6 y 13 días con porcentajes de potencia de 19.4% y 13.1% respectivamente.

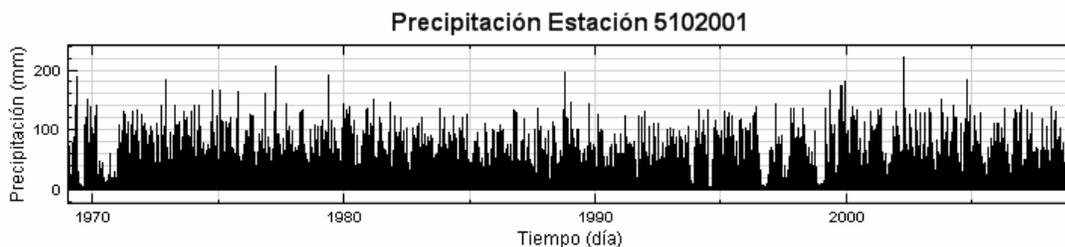


Figura 40 Precipitación Diaria, estación 5102001, Colombia.

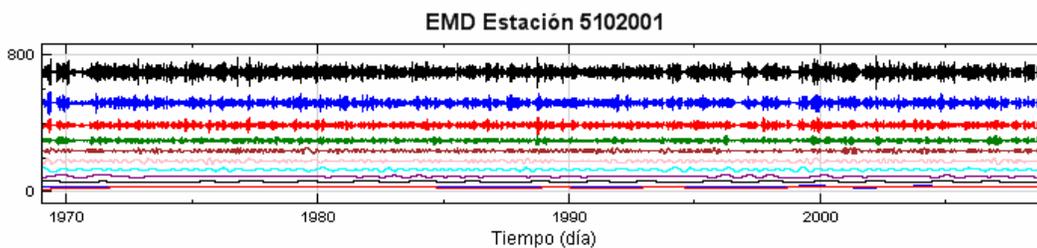


Figura 41 Descomposición en modos empíricos, estación 5102001, Colombia.

Tabla 40 Propiedades de las FMI, Estación 5102001.

FMI	Frecuencia Promedio (día ⁻¹)	Período Promedio (día)	Período Promedio (mes)	Potencia (%)
h1	0.33	3	0.1	44.4
h2	0.16	6	0.2	19.4
h3	0.0794	13	0.4	13.1
h4	0.0401	25	0.8	7.1
h5	0.021	48	1.6	4.7
h6	0.0097	103	3.4	4.4
h7	0.00516	194	6.5	3.3
h8	0.00263	380	12.7	2.2
h9	0.0014	714	23.8	0.7
h10	0.00068	1471	49.0	0.8
Residuo	3.40E-05	29412	980.4	0

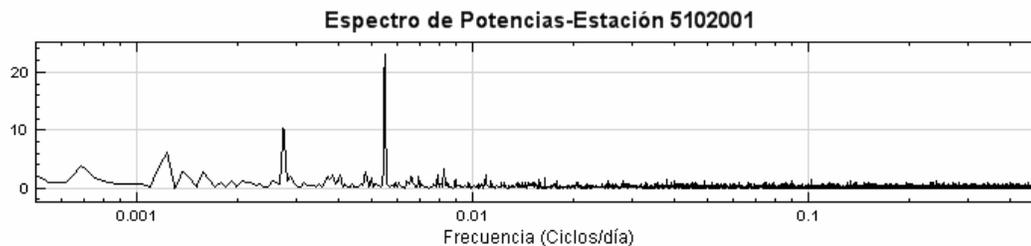


Figura 42 Espectro de potencias (Fourier), estación 5102001, Colombia.

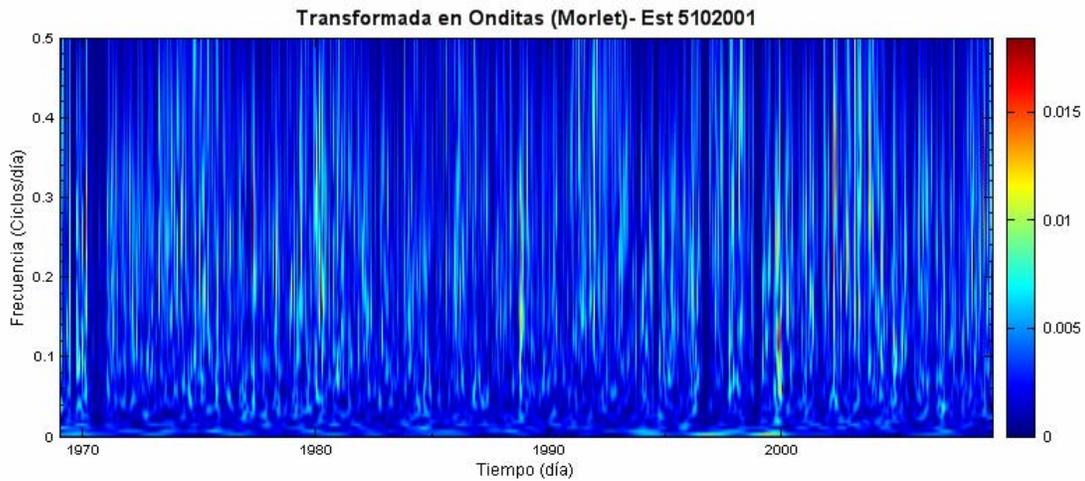


Figura 43 Espectro de Onditas, estación 5102001, Colombia.

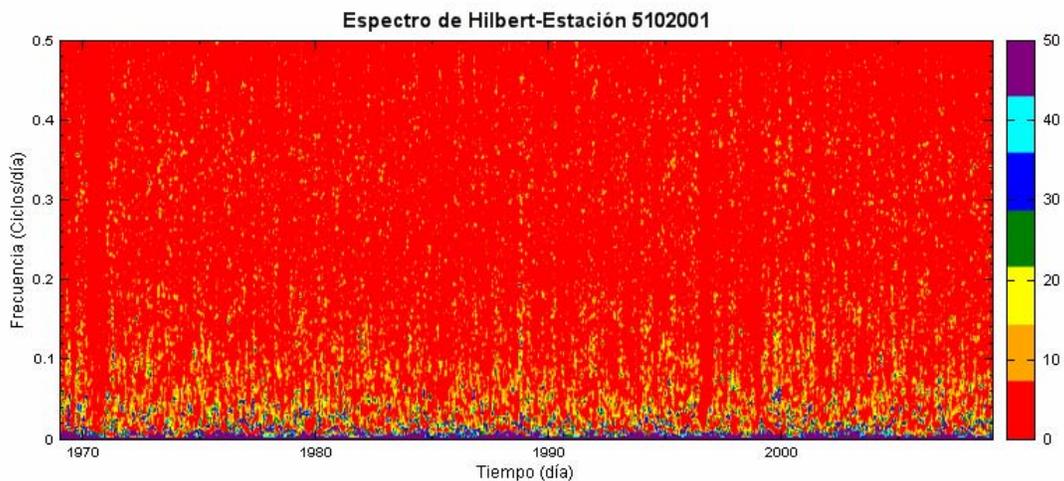


Figura 44 Espectro de Hilbert, estación 5102001, Colombia.

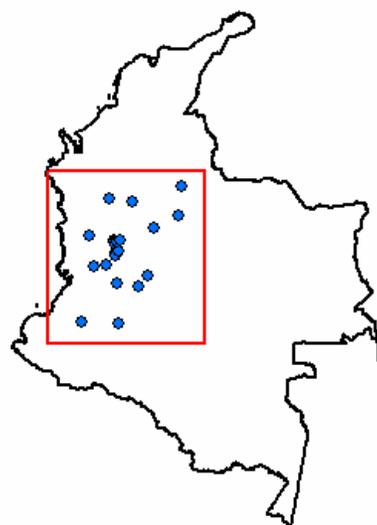
Al igual que en las series de precipitación mensual, en las series de precipitación diaria se detectaron las frecuencias asociadas con los ciclos semi-anual y anual. También se identifican frecuencias asociadas con períodos de 3.5 a 5 días y otras asociadas a un período entre 69-78 días que podrían estar relacionadas con la oscilación intra-estacional u oscilación de Madden-Julian (Arias, 2005). Finalmente, en algunas estaciones se detectaron frecuencias 0.0008 día^{-1} con un período equivalente a 1250 días o 3.4 años, que sugieren la asociación con el sistema ENSO.

3.1.3 Precipitación Horaria

Se identificaron las frecuencias presentes en todas las 22 estaciones de precipitación horaria estudiadas. Estas frecuencias comunes fueron asociadas a un periodo promedio y a partir de estos resultados se construyó la **Tabla 41**, que presenta un consolidado de los resultados de todas las estaciones, la cual se muestra conjunto con un mapa que muestra la localización de las estaciones.

Tabla 41 Frecuencias predominantes en las series de precipitación horaria, Región Cenicafé Colombia.

CENICAFÉ				
Frecuencia (horas ⁻¹)			Período (horas)	Período (días)
THH	Onditas	Fourier		
0.146	-	0.126	8	0.3
0.08	0.083	0.084	12	0.5
0.043	-	0.042	24	1
-	0.038	-	26	1.1
0.033	-	-	30	1.3
0.017	0.017	-	59	2.5
0.073	0.008	-	131	6
-	0.039	-	254	10



Las **Figuras 45 a 49** presentan los resultados gráficos obtenidos para la estación 2308517. Los resultados de las demás estaciones de precipitación horaria pueden encontrarse en el archivo de anexos digital. Para esta estación la transformada de Fourier (**Figura 47**) detectó frecuencias asociadas a ciclos semi-diario y diario (12 y 24 horas) al igual que la transformada en Onditas (**Figura 48**) La THH encontró 10 modos de oscilación en la señal (**Tabla 42**), de los cuales el asociado a un período de 7 horas es el predominante (porcentaje de potencia de 35.6%), el cual es necesario entender desde el punto de vista físico, seguido por las frecuencias asociadas a los ciclos semi-diario y diario.

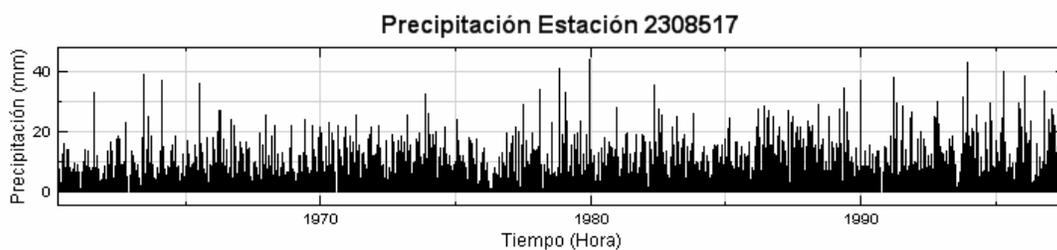


Figura 45 Precipitación Horaria, estación 2308517, Colombia.

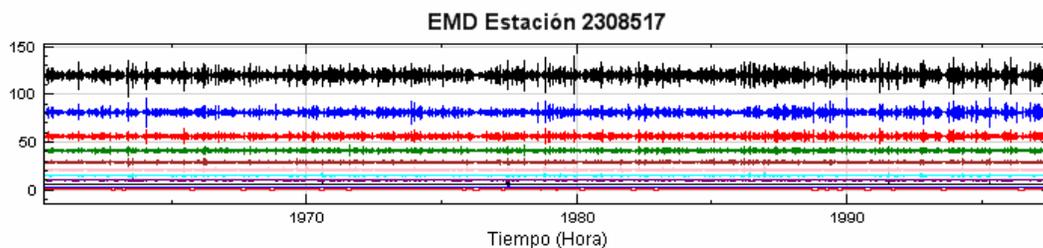


Figura 46 Descomposición en modos empíricos, estación 2308517, Colombia.

Tabla 42 Propiedades de las FMI, Estación 2308517.

FMI	Frecuencia Promedio (hora ⁻¹)	Período Promedio (hora)	Período Promedio (día)	Potencia (%)
h1	0.146	7	0.3	35.6
h2	0.0782	13	0.5	18.9
h3	0.043	23	1.0	16.9
h4	0.0244	41	1.7	10.7
h5	0.0133	75	3.1	6.8
h6	0.00707	141	5.9	4.4
h7	0.00375	267	11.1	3.0
h8	0.0019	526	21.9	2.0
h9	0.001	1000	41.7	1.0
h10	0.000497	2012	83.8	0.5
Residuo	0.00000459	217865	9077.7	0.0

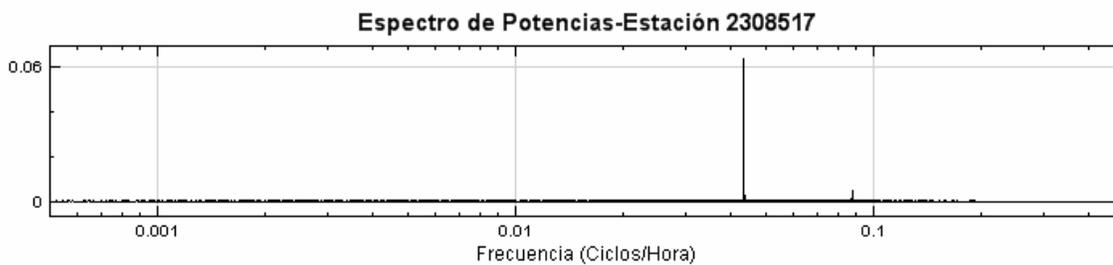


Figura 47 Espectro de potencias (Fourier), estación 2308517, Colombia.

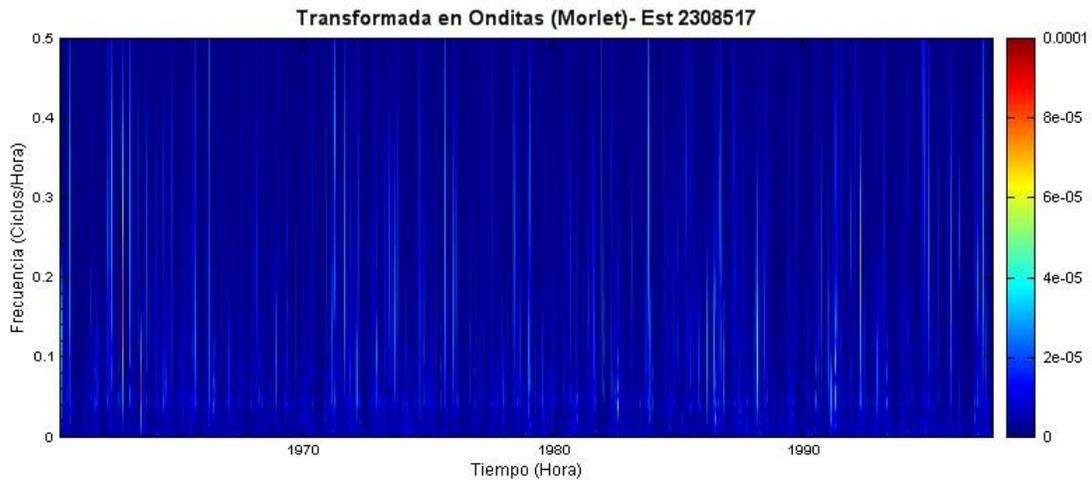


Figura 48 Espectro de Onditas, estación 2308517, Colombia.

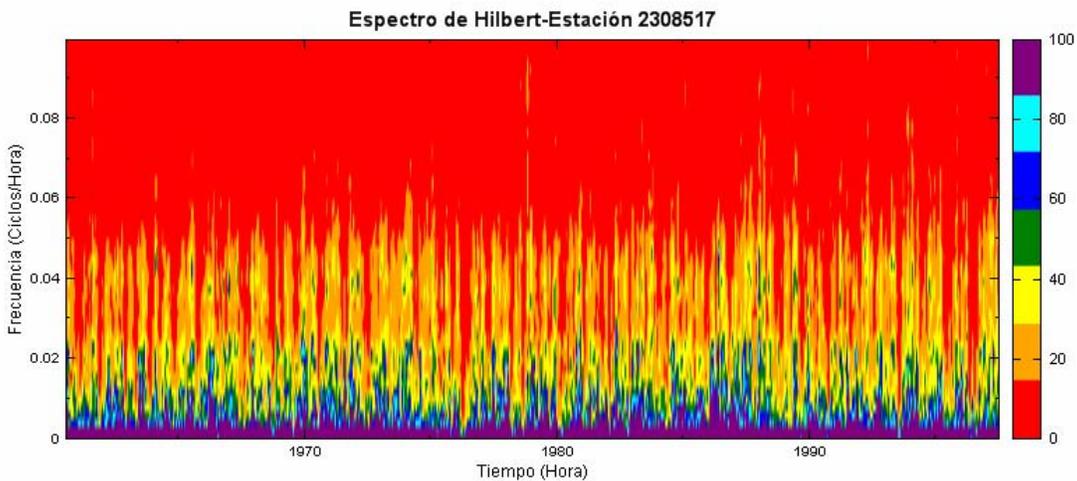


Figura 49 Espectro de Hilbert, estación 2308517, Colombia.

Las frecuencias predominantes encontradas en las series de precipitación horaria en la región de CENICAFÉ, son principalmente aquellas asociadas con períodos de 12 y 24 horas, seguidas por frecuencias de 0.146 h^{-1} y 0.017 h^{-1} equivalentes 7 horas y 59 horas (2.5 días), respectivamente, las cuales merecen explicarse en términos físicos.

Teniendo en cuenta que para la variable Precipitación se contaba con información en tres diferentes resoluciones temporales (mensual, diaria y horaria), es posible decir que en cada una de las resoluciones se encontró información significativa dependiente de la resolución. En los registros mensuales se detectan frecuencias del orden de meses hasta

años (siendo la frecuencia máxima asociada a un período de 3 meses), en los datos diarios del orden de días hasta meses (siendo el período máximo de hasta 3.7 años) y en los horarios se detectaron frecuencias máximas asociadas a 7 horas y mínimas asociadas a 10 días.

3.1.4 Caudales Medios Mensuales

Las **Tablas 43 a 52** presentan las frecuencias comunes encontradas en todas las estaciones en cada uno de los ríos estudiados: Atrato, Catatumbo, Lebrija, Nechí, Negro, Patía, Saldaña, San Juan, Sinú y Sumapaz. Cada tabla se presenta con un mapa que indica la localización de las estaciones.

Tabla 43 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Atrato.

Atrato				
Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.33	-	-	3	0.3
0.144	0.165	0.165	6	0.5
0.076	0.082	0.082	12	1
0.003	-	-	35	2.9
-	0.023	-	43	3.6
-	-	0.018	57	4.7



Tabla 44 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Catatumbo.

Catatumbo				
Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.27	-	-	4	0.3
0.149	0.165	0.166	6	0.5
0.075	0.085	0.083	12	1
-	0.022	-	46	3.8
-	-	0.023	42	3.6
0.017	-	-	56	4.8

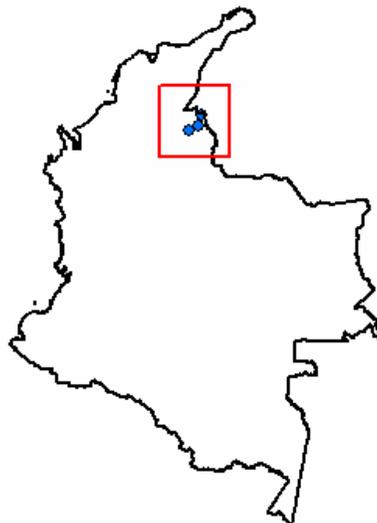


Tabla 45 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Lebrija.

Lebrija				
Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.27	-	-	4	0.3
0.153	0.163	0.165	6	0.5
0.076	0.066	-	12	1
0.021	-	-	48	3.9
-	-	0.019	53	4.4



Tabla 46 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Negro.

Negro				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.26	-	-	4	0.3
0.151	0.163	0.166	6	0.5
0.007	0.082	0.082	12	1
-	0.024	-	41	3.4
0.022	-	-	46	3.8
-	0.004	-	240	20

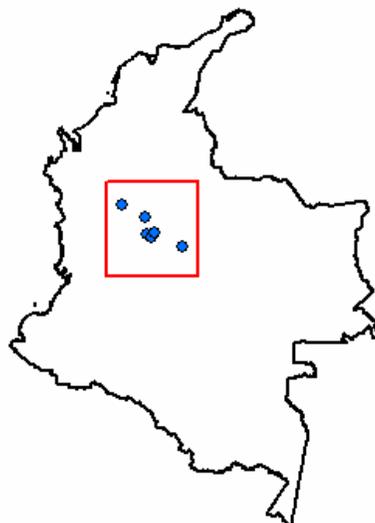


Tabla 47 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Henchí.

Nechí				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.38	-	-	4	0.3
-	0.165	0.165	6	0.5
0.077	0.082	0.083	12	1
0.042	-	-	24	2
-	0.027	-	36	3
0.023	-	-	43	3.6
-	-	0.02267	44	3.7
0.01261	-	-	80	6

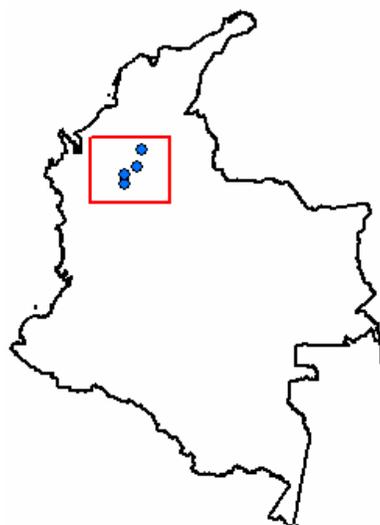


Tabla 48 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Patía.

Patía				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.24	-	-	4	0.3
0.154	0.162	0.168	6	0.5
0.075	0.082	0.082	12	1
-	0.034	-	30	2.5
0.003	-	-	32	2.7
-	0.019	-	53	4.4
0.014	-	-	73	6
0.006	-	-	158	13



Tabla 49 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Saldaña.

Saldaña				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.28	-	-	4	0.3
0.157	0.162	0.165	6	0.5
0.077	0.083	0.082	12	1
0.032	-	-	32	2.6
-	0.025	-	39	3.3
-	-	0.016	61	5
0.015	-	-	68	5.7
-	0.004	-	237	20



Tabla 50 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río San Juan.

San Juan				
Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.28	-	-	4	0.3
0.147	0.162	0.165	6	0.5
0.071	0.083	0.083	12	1
-	0.035	-	28	2.4
0.032	-	-	31	2.6
-	-	0.027	37	3
-	0.022	-	46	3.8
-	-	0.0149	67	5.6
0.013	-	-	79	6.6
0.008	-	-	122	10
-	0.004	-	237	20

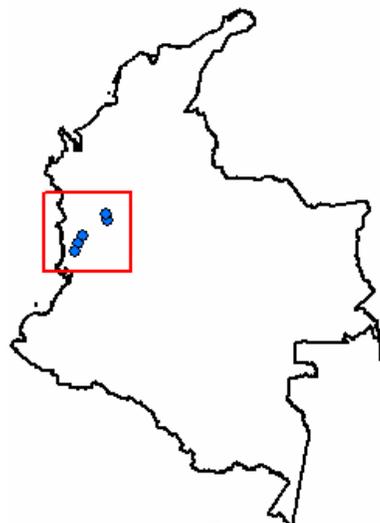


Tabla 51 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Sinú.

Sinú				
Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.27	-	-	4	0.3
-	0.165	0.165	6	0.5
0.081	0.082	0.083	12	1
0.036	-	-	28	2.3
0.021	-	-	48	4
0.05	-	-	20	1.7



Tabla 52 Frecuencias predominantes, caudales medios mensuales, Río Sumapaz.

Sumapaz				
Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (año)
HHT	Onditas	Fourier		
0.29	-	-	3	0.5
0.151	0.165	0.165	6	0.5
0.074	0.082	0.082	12	1
0.033	-	-	30	2.5
-	0.028	-	36	3
0.008	-	-	119	10



Las Figuras 50 a 54 muestran los análisis correspondientes a la serie de caudales promedios mensuales para la estación 2205701, localizada en el río Saldaña (desde enero de 1952 hasta diciembre de 2005) (Figura 50), las funciones de modos intrínsecos (Figura 51), los espectros de Potencias (Figura 52), Onditas (Figura 53) y de Hilbert (Figura 54). En esta estación se encontró que la transformada de Fourier detectó frecuencias asociadas a períodos de 6 y 12 meses principalmente al igual que la transformada en Onditas. La transformada de Hilbert-Huang, permitió revelar 7 modos principales de oscilación en la señal (Figura 54, Tabla 53), entre ellos los asociados a períodos de 4, 8 y 16 meses.

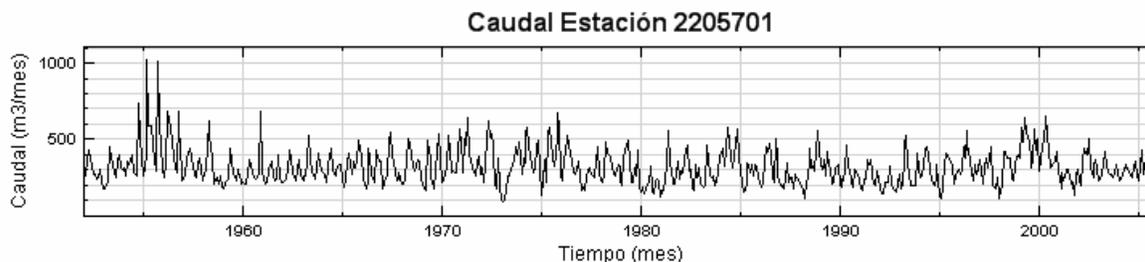


Figura 50 Caudales medios mensuales, estación 2205701, Río Saldaña.

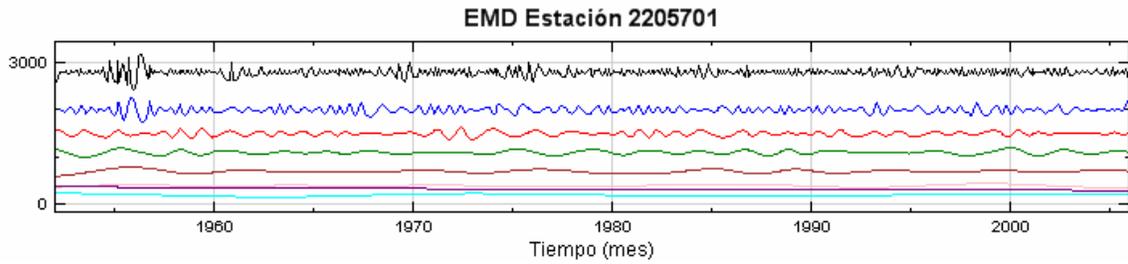


Figura 51 Descomposición en modos empíricos, estación 2205701, Río Saldaña.

Tabla 53 Propiedades de las FMI, Estación 2205701, Río Saldaña.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.28	4	0.3	38.3
h2	0.13	8	0.6	27.3
h3	0.0633	16	1.3	12.0
h4	0.0301	33	2.8	9.0
h5	0.0154	65	5.4	6.6
h6	0.00849	118	9.8	2.2
h7	0.00386	259	21.6	4.7
Residuo	0.00077	1295	107.9	0.0

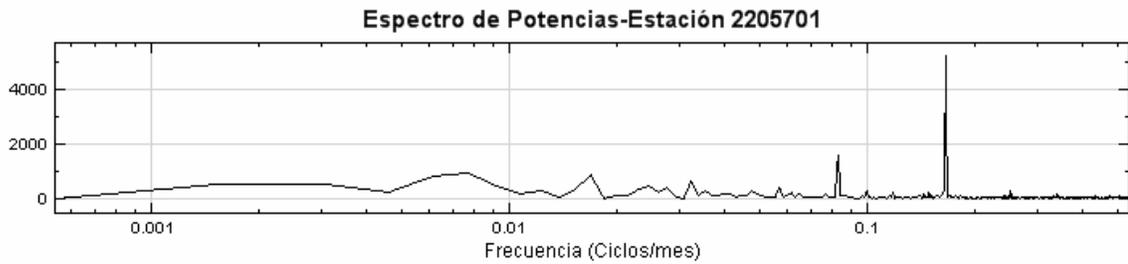


Figura 52 Espectro de potencias (Fourier), estación 2205701, Río Saldaña.

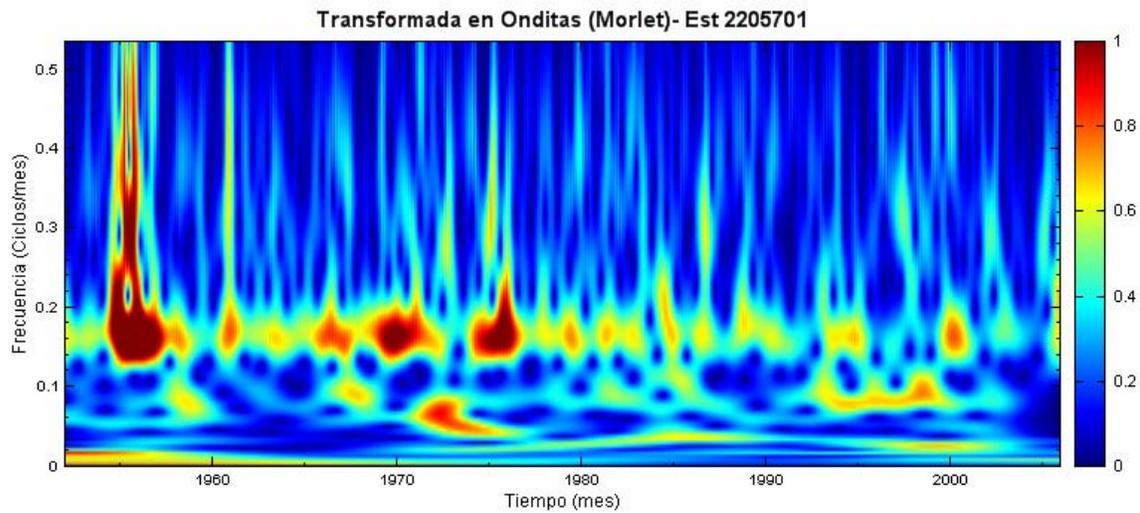


Figura 53 Espectro de Onditas, estación 2205701, Río Saldaña.

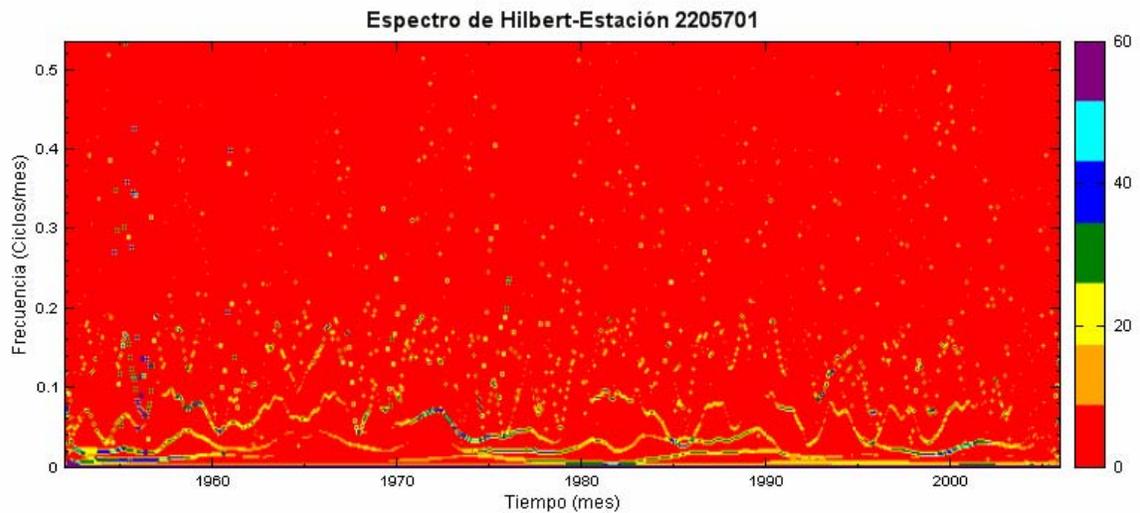


Figura 54 Espectro de Hilbert, estación 2205701, Río Saldaña.

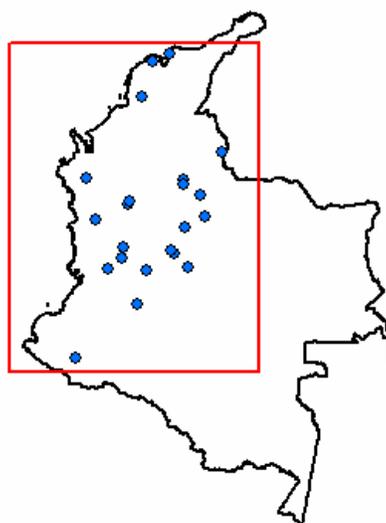
En los registros de caudales medios mensuales se identifican de nuevo frecuencias predominantes asociadas con los ciclos anuales y semi-anuales (12 y 6 meses), especialmente mediante las transformadas en Onditas y Fourier. Una vez más se observa que la transformada de Hilbert-Huang permite identificar otras frecuencias en los datos, como aquellas asociadas posiblemente con las ondas de Madden-Julian (0.33 mes^{-1}), el sistema ENSO ($0.014\text{-}0.022 \text{ mes}^{-1}$), y probablemente con la Oscilación Cuasi-Bienal ($0.024\text{-}0.036 \text{ mes}^{-1}$).

3.1.5 Temperatura Media Mensual

La **Tabla 54** presenta las frecuencias comunes en todas las 22 estaciones de temperatura media mensual estudiadas junto con gráfico que indica la ubicación de las estaciones.

Tabla 54 Frecuencias predominantes en las series de temperatura media mensual.

GENICAFÉ				
Frecuencia (mes^{-1})			Período (mes)	Período (año)
THH	Onditas	Fourier		
0.33	-	-	3	0.3
0.149	0.164	0.164	6	0.5
0.074	0.082	0.082	12	1
0.030	-	-	32	2.7
-	-	0.024	41	3.5
-	-	0.016	61	5
0.013	-	-	74	6.2
-	0.004	-	237	20



Las **Figuras 55 a 59** presentan los resultados gráficos para la estación de temperatura media mensual con código 23115503. En esta estación, las transformadas de Fourier (**Figura 57**) y Onditas (**Figura 58**) encontraron dos frecuencias dominantes, asociadas a períodos de 6 y 12 meses. La transformada de Hilbert-Huang por su parte encontró que la frecuencias entre los 3 meses y 16 años (**Tabla 55**). Ente ellas se destaca la frecuencia asociada a un período promedio de 6 años con un porcentaje de potencia del 12.3% , que en el espectro de Hilbert (**Figura 59**) es particularmente fuerte en los años 1956, 1972-1973, 1982-1983, y 1997-1999, que al parecer podría estar asociada con el sistema ENSO.

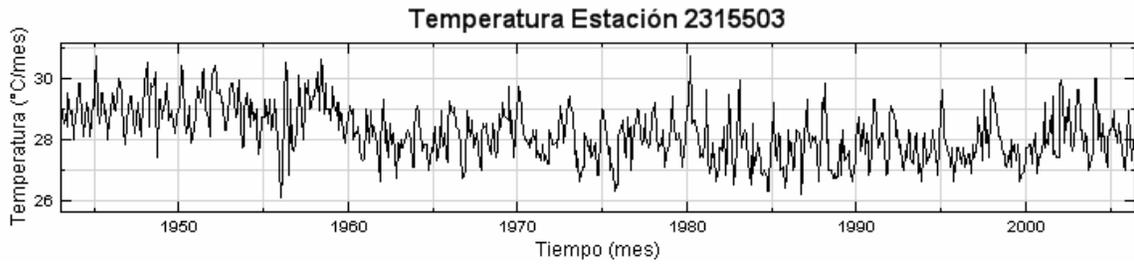


Figura 55 Temperatura media mensual, estación 2315503.

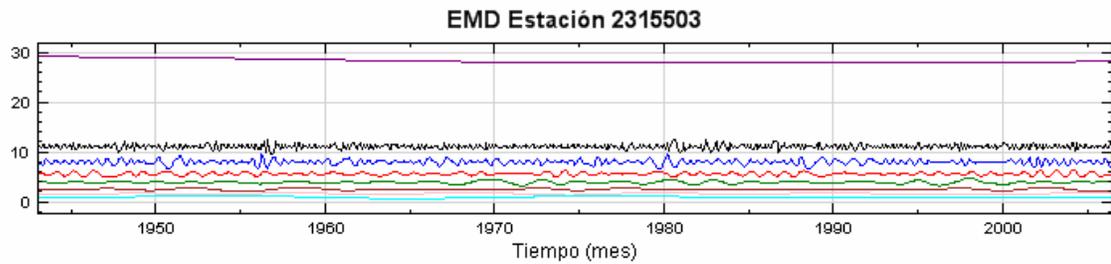


Figura 56 Descomposición en modos empíricos, estación 2315503.

Tabla 55 Propiedades de las FMI, Estación 2315503.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.304	3	0.3	31.0
h2	0.135	7	0.6	28.9
h3	0.0676	15	1.2	12.7
h4	0.0328	30	2.5	7.95
h5	0.0138	72	6	12.3
h6	0.00525	190	15.9	7.25
Residuo	0.00066	1524	127.0	0.0

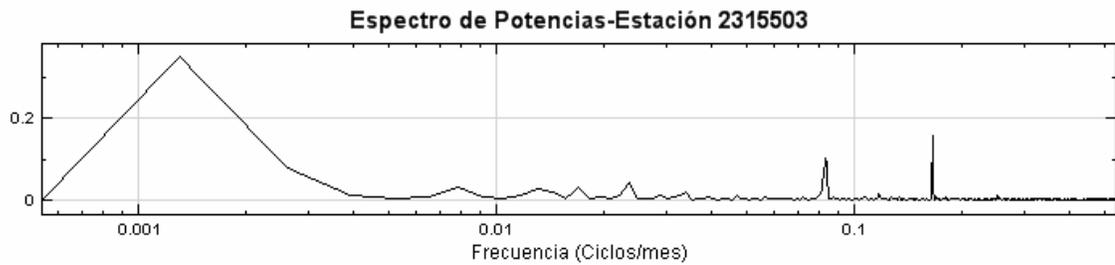


Figura 57 Espectro de potencias (Fourier), estación 2315503.

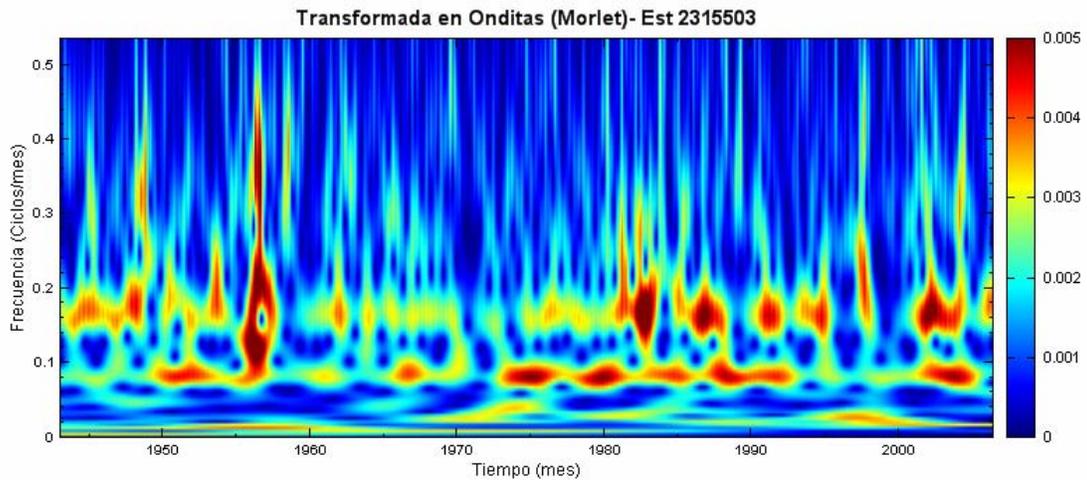


Figura 58 Espectro de Onditas, estación 2315503.

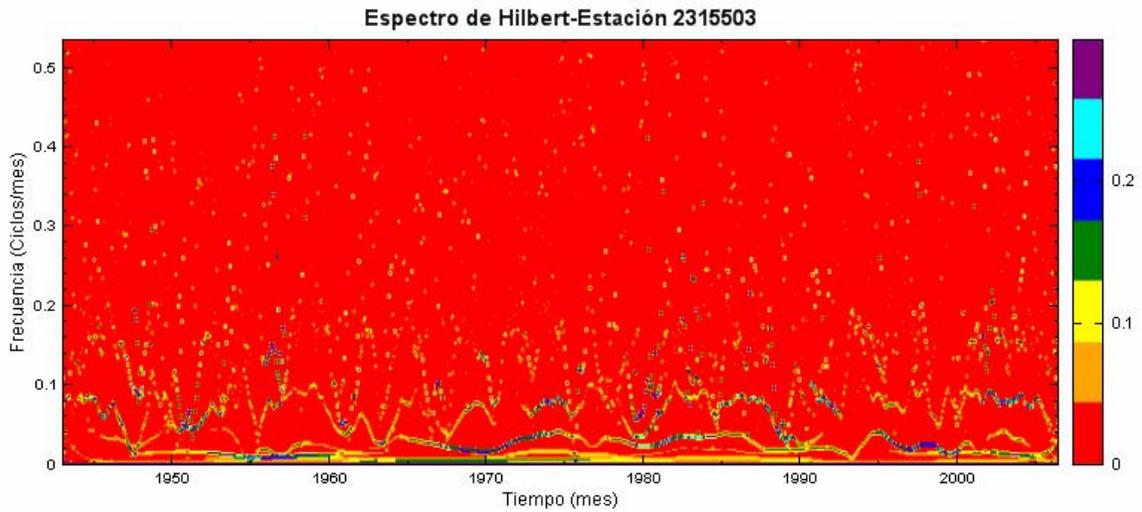


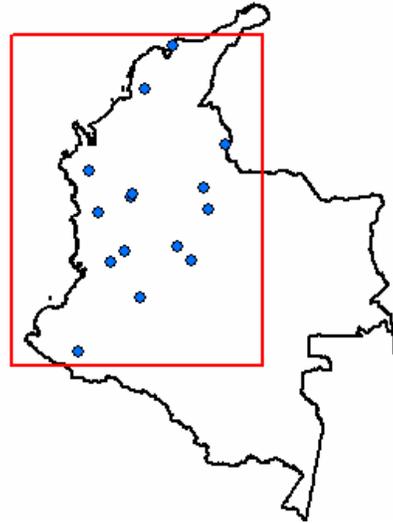
Figura 59 Espectro de Hilbert, estación 2315503.

3.1.6 Temperatura Mínima Mensual

En la **Tabla 56** se pueden observar las frecuencias comunes en todas las 15 estaciones de temperatura mínima mensual estudiadas, sus respectivos períodos y la localización de las estaciones.

Tabla 56 Frecuencias predominantes en las series de temperatura mínima mensual.

CENICAFÉ				
Frecuencia (mes ⁻¹)			Período (mes)	Período (año)
THH	Onditas	Fourier		
0.33	-	-	3	0.3
0.159	0.165	0.165	6	0.5
0.081	0.082	0.082	12	1
0.032	-	-	31	2.6
-	0.023	0.023	43	3.6
0.013	-	-	79	6.6
0.008	-	-	125	10.4
-	0.004	-	237	20



En las **Figuras 60 a 64** se presentan los resultados gráficos obtenidos para la estación 2403512. En esta estación, los espectros de potencias y de Onditas detectaron frecuencias asociadas a períodos de 6, 12 y decadales entre 13 y 19 años, mientras que la THH identificó 7 modos de variabilidad entre 3 meses y 26 años, teniendo en cuenta que esta estación cuenta con una longitud de registro de 52 años.

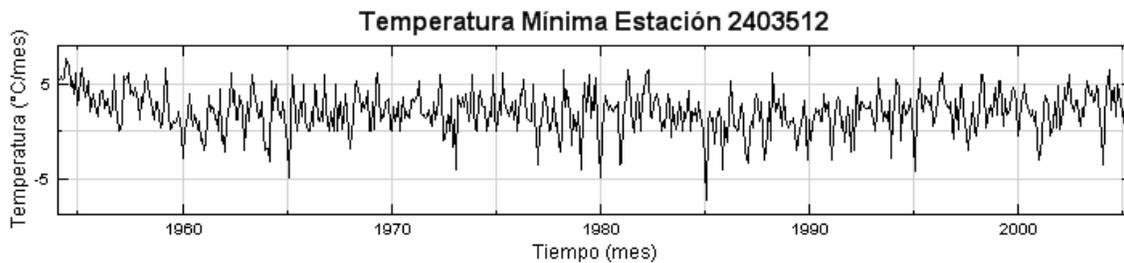


Figura 60 Temperatura mínima mensual, estación 2403512.

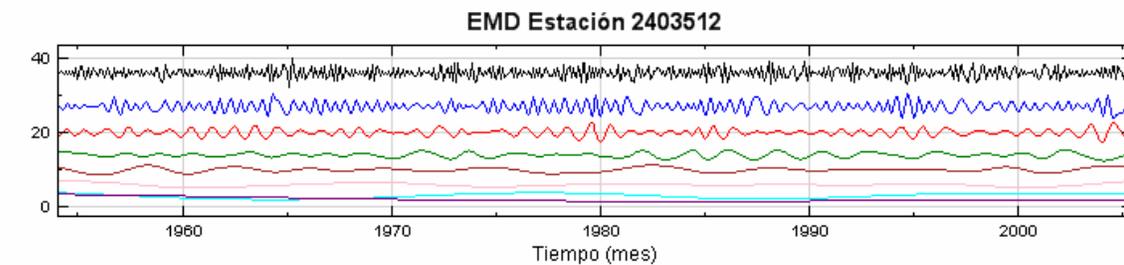


Figura 61 Descomposición en modos empíricos, estación 2403512.

Tabla 57 Propiedades de las FMI, Estación 2403512.

FMI	Frecuencia Promedio (mes ⁻¹)	Período Promedio (mes)	Período Promedio (año)	Potencia (%)
h1	0.326	3	0.3	35.8
h2	0.159	6	0.5	24.4
h3	0.0833	12	1.0	17.5
h4	0.0429	23	1.9	6.3
h5	0.0218	46	3.8	6.3
h6	0.0105	95	7.9	3.0
h7	0.00324	309	25.7	6.6
Residuo	0.00081	1236	103.0	0.0

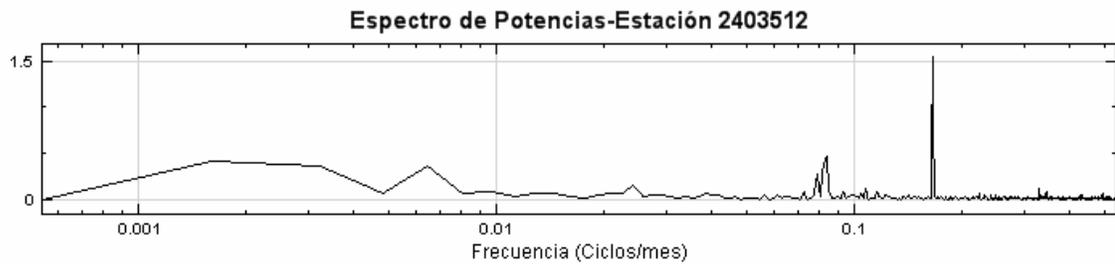


Figura 62 Espectro de potencias (Fourier), estación 2403512.

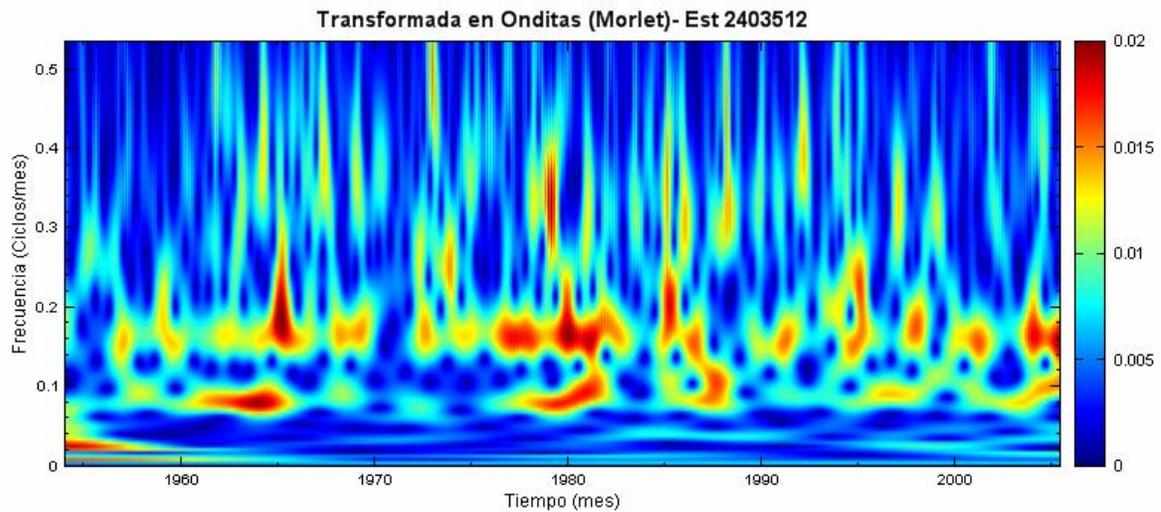


Figura 63 Espectro de Onditas, estación 2403512.

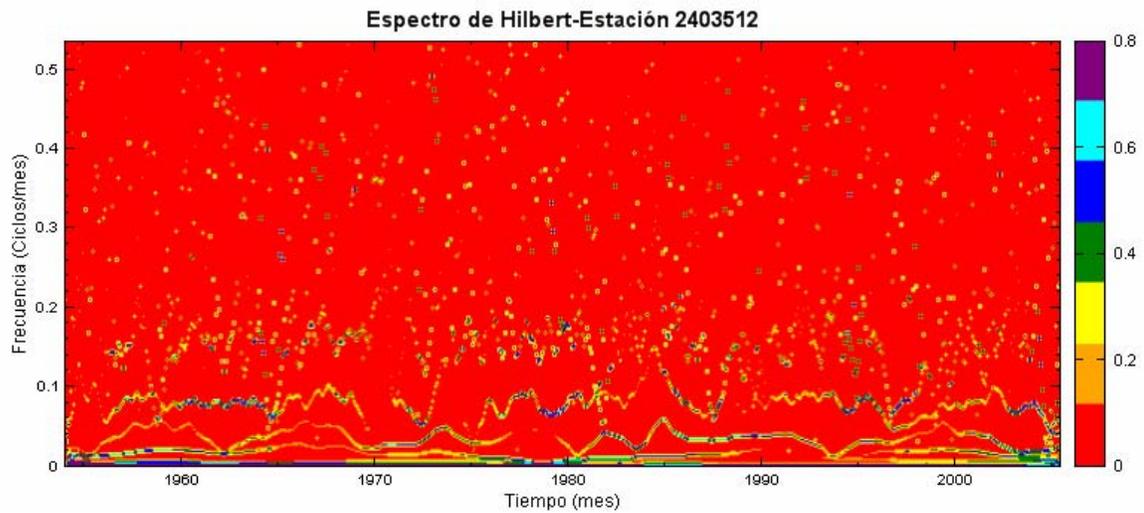


Figura 64 Espectro de Hilbert, estación 2403512.

Tanto en los registros de temperatura media como en los de temperatura mínima se encontraron frecuencias asociadas a los siguientes períodos: 3 meses (probablemente asociado a las ondas de Madden-Julian), 6 meses (ZCIT), 12 meses (ciclo anual), 2.6-2.7 años (posiblemente asociada con la oscilación Cuasi-bienal), 3.6-6 años (probablemente relacionada al sistema ENSO) y otras frecuencias asociadas a períodos decadales entre 10-20 años.

3.2 Detección de señales de cambio climático

Una de las herramientas más comunes para detectar cambios en las series de tiempo climatológicas e hidrológicas es el análisis de tendencias. Sin embargo, cuando las series de tiempo exhiben una fuerte auto-correlación temporal, pueden aparecer tendencias artificiales, cuando éstas en realidad no existen o son no significativas. La prueba de Mann-Kendall modificada tiene en cuenta la autocorrelación de las series (Hamed y Rao, 1998). El primer paso en la aplicación de la prueba de Mann-Kendall para datos autocorrelacionados es la estimación del estadístico S:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (19)$$

donde

$$\begin{aligned} \text{sign}(x_j - x_k) &= 1 & \text{si} & \quad x_j - x_k > 0 \\ &= 0 & \text{si} & \quad x_j - x_k = 0 \\ &= -1 & \text{si} & \quad x_j - x_k < 0 \end{aligned} \quad (20)$$

El paso siguiente es determinar la varianza del estadístico S:

$$V^*(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} * \frac{n}{n_s^*}, \quad (21)$$

Donde

$$\frac{n}{n_s^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} * \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2) \rho_s(i) \quad (22)$$

Luego se estima un estadístico de prueba Z:

$$\begin{aligned}
Z &= \frac{S - 1}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}} & \text{si } S > 0 \\
&= 0 & \text{si } S = 0 \\
&= \frac{S + 1}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}} & \text{si } S < 0
\end{aligned}
\tag{23}$$

Finalmente, se calcula la probabilidad asociada a Z (Z_{critico}) con un nivel de significancia determinado previamente. Este nivel de significancia es un umbral de probabilidad que se determina antes de realizar la prueba (en este caso $\alpha=0.05$, para un nivel de confiabilidad del 95%). De esta manera si el estadístico de prueba Z es menor que el estadístico Z_{critico} entonces la tendencia encontrada en la serie no es significativa.

Una vez detectada la tendencia en la series se procedió a cuantificar su magnitud a través de la prueba de Sen. Esta prueba requiere datos igualmente espaciados y no hace suposiciones sobre la distribución estadística de los datos (Sen, 1968). La pendiente se estima mediante:

$$m = \frac{X_{i+1} - X_i}{(i + 1) - i},
\tag{24}$$

donde m es la pendiente entre el punto X_{i+1} y X_i , X_i es el dato en el tiempo i , X_{i+1} es el dato en el tiempo $i+1$. La pendiente general de la serie estudiada es entonces la media de las pendientes dato por dato. (Sen, 1968).

En las **Figuras 53 a 56** se presentan los resultados obtenidos para la estación de temperatura mínima del Aeropuerto Olaya Herrera de Medellín (código 2701507). La **Figura 65** muestra el gráfico de la variación de los datos de temperatura mínima a través del tiempo, la **Figura 66** muestra las FMI resultantes del proceso DME. En la **Figura 67** es posible apreciar la serie original de temperatura mínima superpuesta con el residuo producto de la descomposición, denotando la tendencia presente en la serie temporal. Finalmente, en la **Figura 68** se muestra en detalle el análisis del residuo, en la cual se observa que la prueba de Mann Kendall confirma la presencia de tendencia en la serie

con un nivel de confiabilidad del 95%, igualmente la prueba de Sen estima que la magnitud de la tendencia para esta serie es de $0.07\text{ }^{\circ}\text{C/año}$.

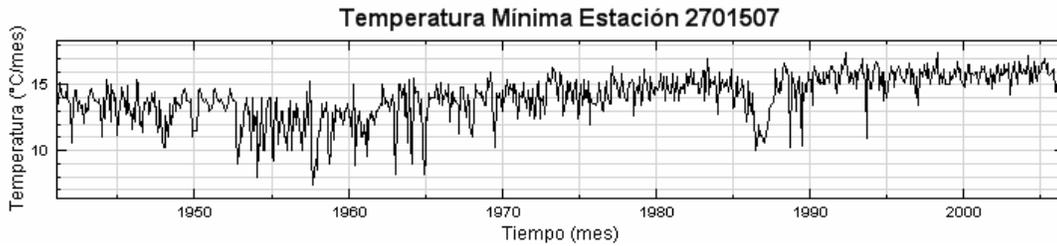


Figura 65 Serie de Temperatura Mínima Mensual Aeropuerto Olaya Herrera, Medellín.

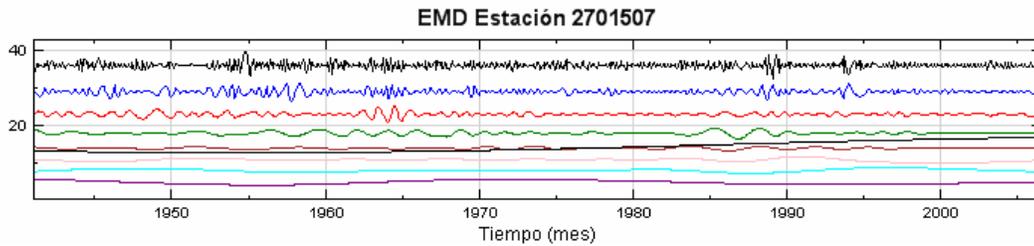


Figura 66 Descomposición en modos empíricos, Aeropuerto Olaya Herrera.

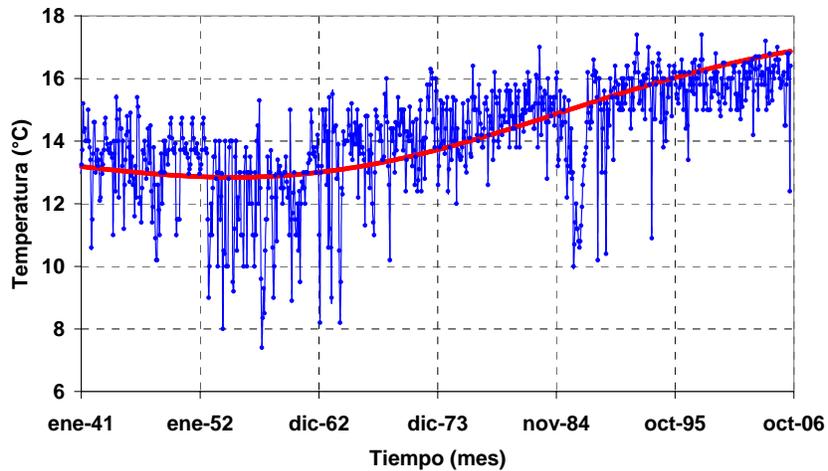


Figura 67 Serie temperatura Mínima Aeropuerto Olaya Herrera + Residuo.

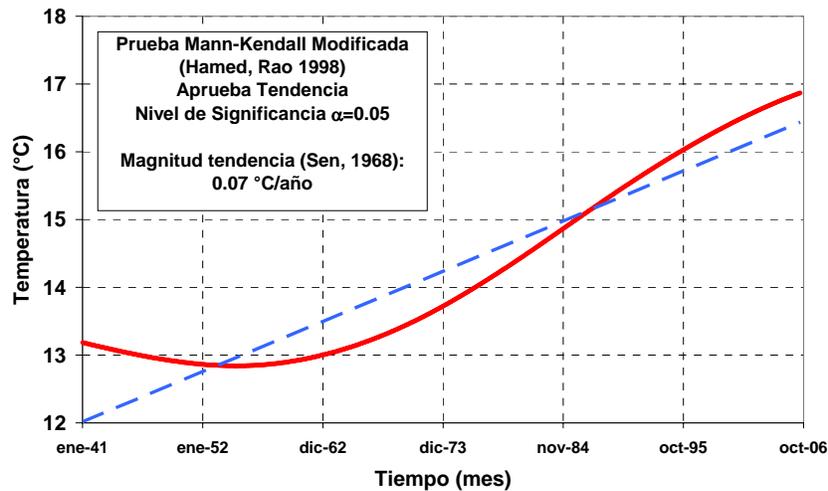


Figura 68 Residuo descomposición en modos empíricos.

Los resultados generales para cada una de las variables estudiadas en Colombia y la cuenca Amazónica se presentan en las **Tablas 58 a 62**. Allí se consignan los resultados que se obtienen al disminuir la muestra de estaciones analizadas, escogiendo las estaciones con un periodo de registro superior a 25, 30, 40 y 50 años, respectivamente. De esta manera se obtuvo, para cada una de las variables, el porcentaje de estaciones con tendencia decreciente, creciente y sin tendencia.

Tabla 58 Estaciones con un registro superior a 25 años en Colombia.

VARIABLE	TOTAL ESTACIONES	TENDENCIA CRECIENTE	TENDENCIA DECRECIENTE	TENDENCIA RECHAZADA
Precipitación	100	41%	44%	15%
Caudal	42	33%	62%	5%
Temp. Media	22	32%	59%	9%
Temp Mínima	15	87%	7%	7%

Tabla 59 Estaciones con un registro superior a 30 años en Colombia.

VARIABLE	TOTAL ESTACIONES	TENDENCIA CRECIENTE	TENDENCIA DECRECIENTE	TENDENCIA RECHAZADA
Precipitación	99	41%	43%	15%
Caudal	41	34%	61%	5%
Temp. Media	22	32%	59%	9%
Temp Mínima	15	87%	7%	7%

Tabla 60 Estaciones con un registro superior a 40 años en Colombia.

VARIABLE	TOTAL ESTACIONES	TENDENCIA CRECIENTE	TENDENCIA DECRECIENTE	TENDENCIA RECHAZADA
Precipitación	64	42%	42%	16%
Caudal	8	25%	63%	13%
Temp. Media	21	29%	62%	10%
Temp Mínima	7	71%	14%	14%

Tabla 61 Estaciones con un registro superior a 50 años en Colombia.

VARIABLE	TOTAL ESTACIONES	TENDENCIA CRECIENTE	TENDENCIA DECRECIENTE	TENDENCIA RECHAZADA
Precipitación	19	63%	21%	16%
Caudal	1	0%	100%	0%
Temp. Media	17	24%	71%	6%
Temp Mínima	4	75%	25%	0%

Tabla 62 Resultados tendencias en la precipitación, Cuenca Amazónica.

Precipitación Amazonas	Período de Registro	TOTAL ESTACIONES	TENDENCIA CRECIENTE	TENDENCIA DECRECIENTE	SIN TENDENCIA
	25 años	17	29%	53%	18%
	30 años	13	38%	54%	8%
	40 años	8	50%	50%	0%
	50 años	8	50%	50%	0%

Con respecto al análisis sobre la longitud de las series (**Tablas 58-62**) se observa que para la precipitación mensual en Colombia, los resultados de las series con períodos de registro entre 25-50 años no presentan un patrón claro, con porcentajes similares de estaciones con tendencias crecientes y decrecientes. Sin embargo, al analizar sólo las estaciones de precipitación con un período de registro superior a 50 años se encontró que predominan las estaciones con tendencia creciente (**Tabla 61**). En el caso de las estaciones de caudales medios mensuales y de temperaturas medias mensuales se encontró que, sin importar la longitud de registro de las estaciones analizadas, siempre el número de estaciones con tendencia decreciente superan el de estaciones con tendencia creciente. Finalmente, para las estaciones de temperatura mínima mensual se encontró que para todos los períodos de registro (desde 25 años hasta más de 50 años) las estaciones con tendencia creciente superan en número las estaciones con tendencia

decreciente. En el caso de las estaciones de precipitación mensual en la cuenca Amazónica se encontró que para las estaciones con un período de registro entre 25 y 40 años, las estaciones con tendencia decreciente superan las estaciones con tendencia creciente, mientras que al disminuir la muestra de estaciones analizadas, tomando solo aquellas con período de registro superior a 40 años, el porcentaje de estaciones con tendencia creciente y decreciente es el mismo.

Con el fin de apreciar de mejor manera los resultados distribuidos en todo el territorio colombiano y en la cuenca Amazónica, se construyeron mapas (**Figuras 69 a 72**) para cada una de las variables, en los cuales se muestra la localización de las estaciones analizadas y la magnitud de la tendencia encontrada (proporcional al diámetro de la circunferencia), en color rojo si la tendencia es creciente y en azul si es decreciente para todas las variables: precipitación (Cuenca Amazónica: **Figura 69**, Colombia: **Figura 70**), caudal (**Figura 71**), temperatura media y mínima (**Figura 72**). En todos los mapas los puntos en color verde representan las estaciones para las cuales se rechaza la hipótesis de existencia de tendencia.

En las **Figuras 73 y 74** se muestra la variación de la magnitud de las tendencias con la elevación (msnm). La **Figura 75** muestra la variación de la magnitud de la tendencia normalizada con respecto al caudal promedio de las series de los ríos Negro, Saldaña, Atrato y San Juan (en porcentaje) y su variación con el caudal de estos ríos. Finalmente la **Figura 76** muestra la variación de las temperaturas medias y mínimas y la magnitud de la tendencia con la elevación de las estaciones.

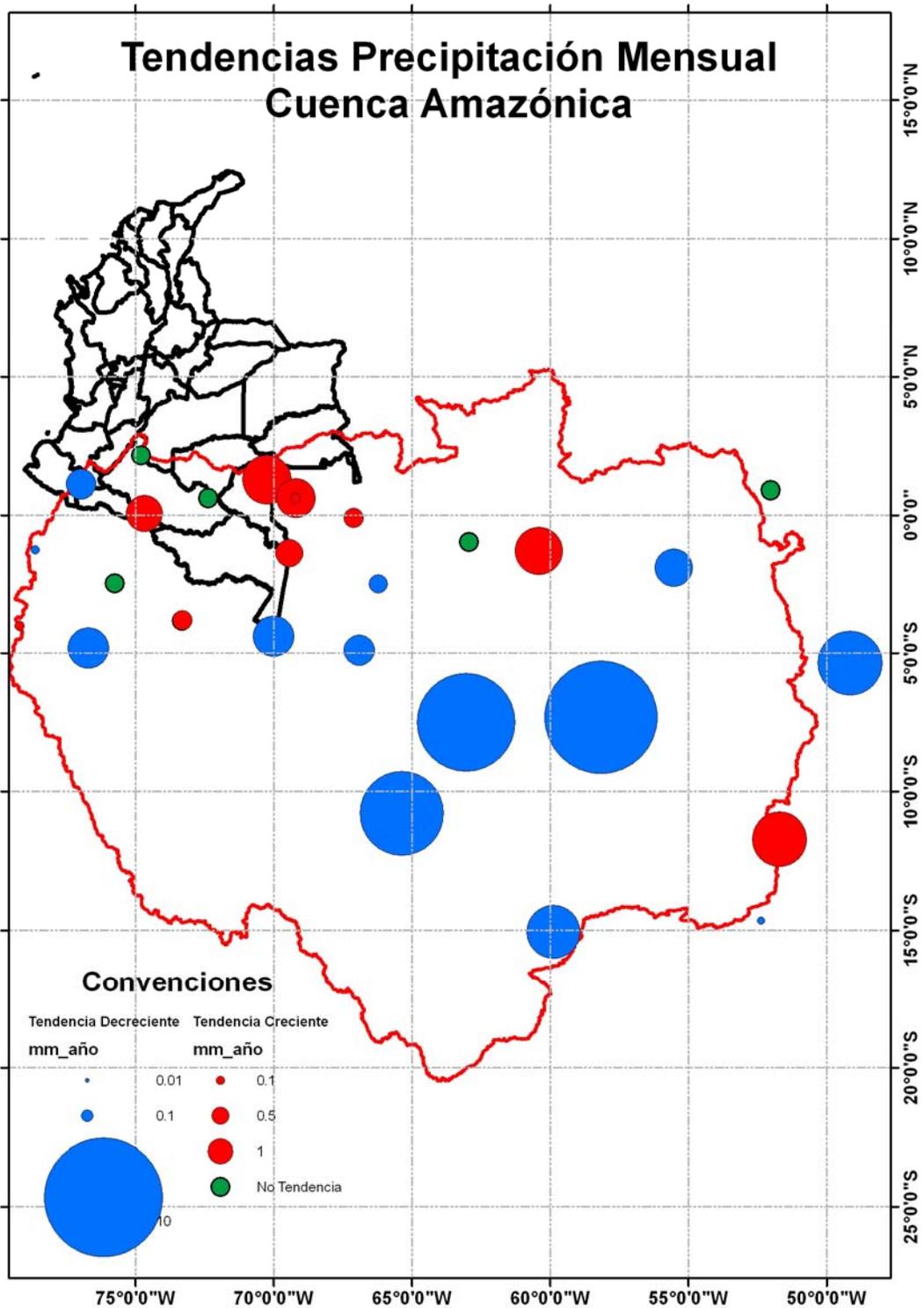


Figura 69 Tendencias en las estaciones de precipitación mensual en la cuenca Amazónica

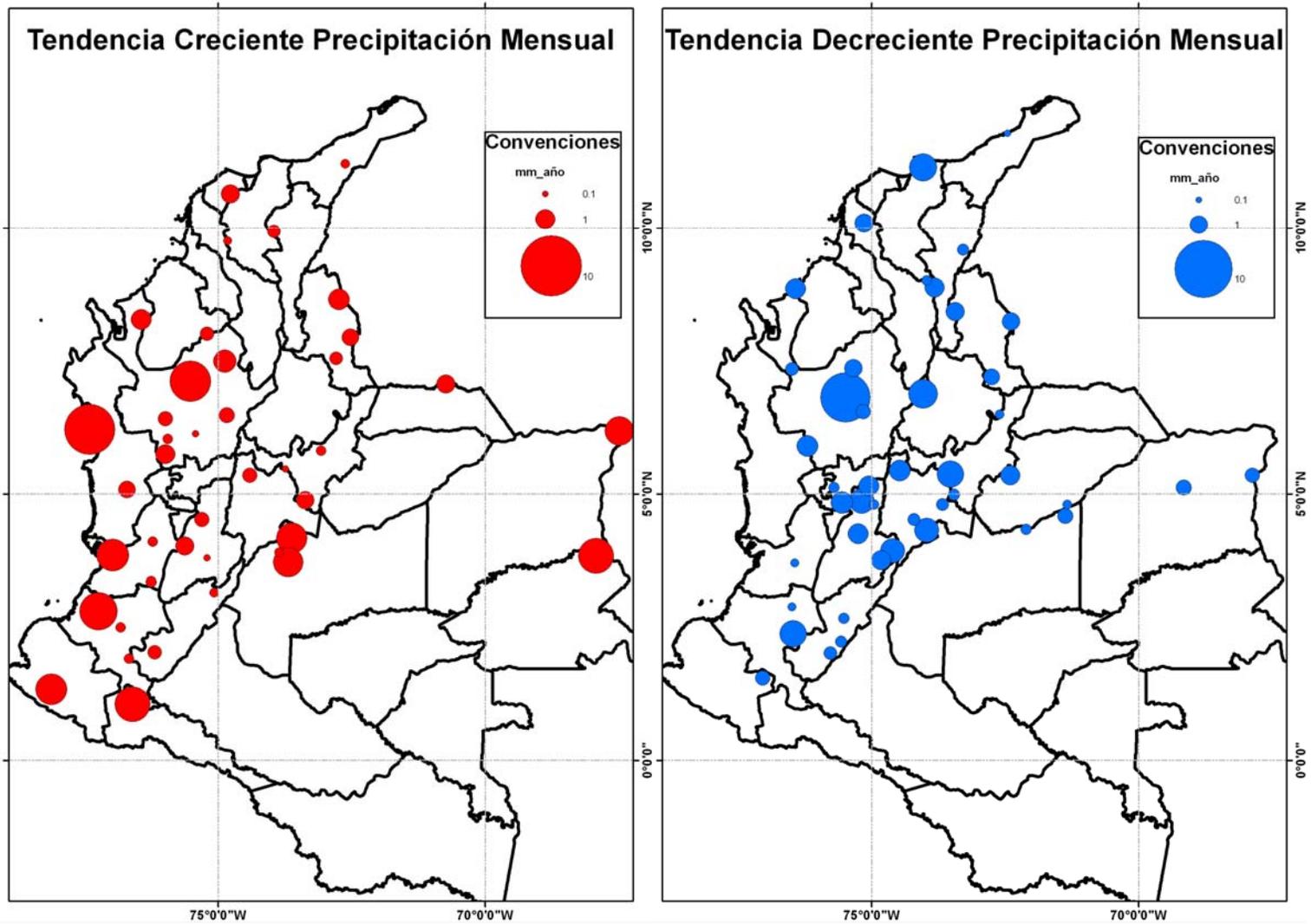


Figura 70 Tendencias en las estaciones de precipitación mensual, tendencia creciente (izquierda), tendencia decreciente (derecha).

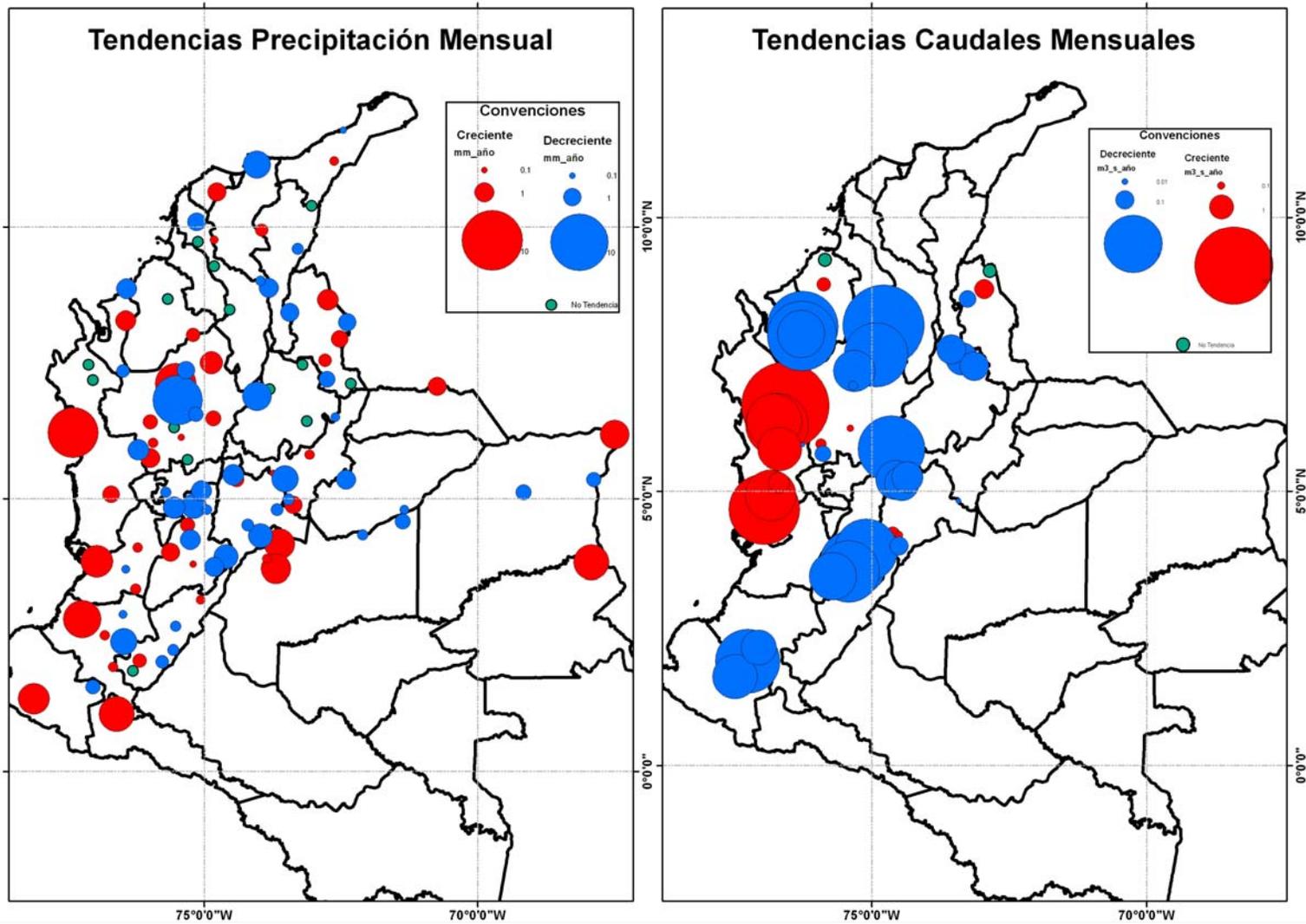


Figura 71 Tendencias en las estaciones de precipitación mensual (izquierda) y tendencias en las estaciones de caudal (derecha).

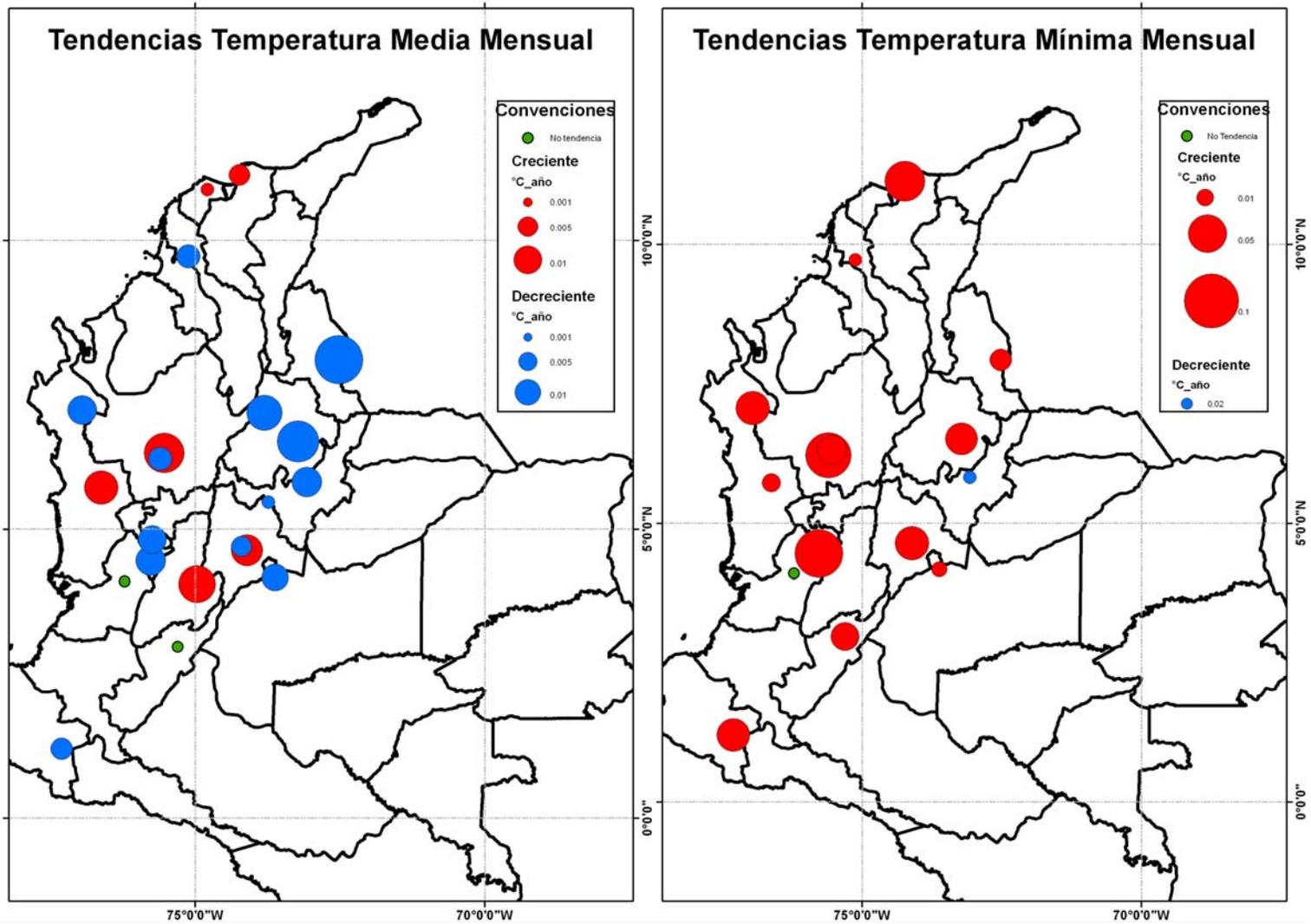
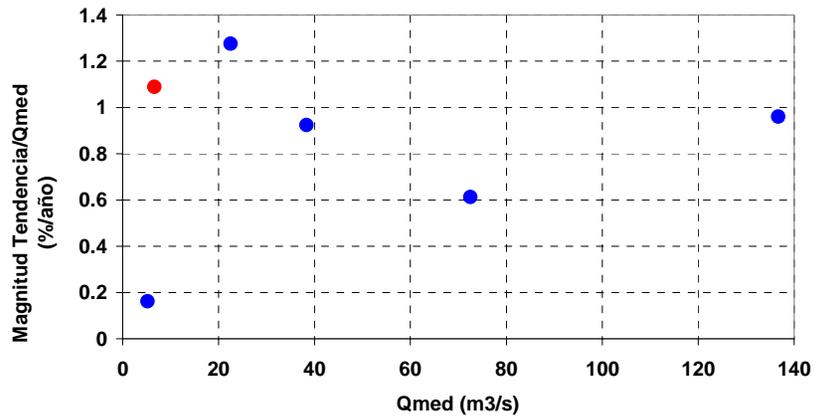
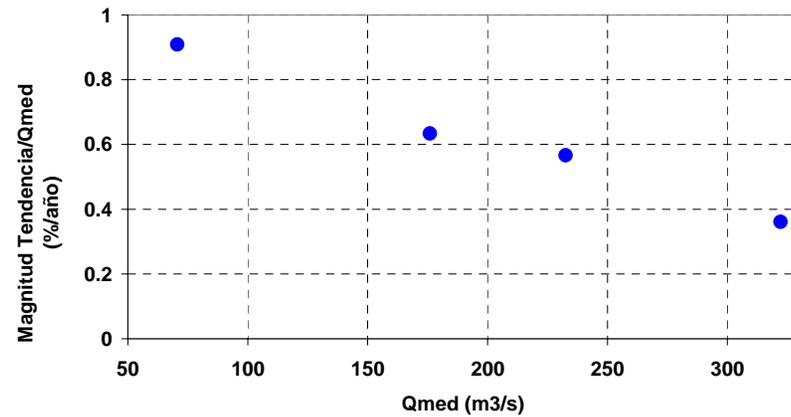


Figura 72 Tendencias en las estaciones de temperatura media (izquierda) y temperatura mínima (derecha).

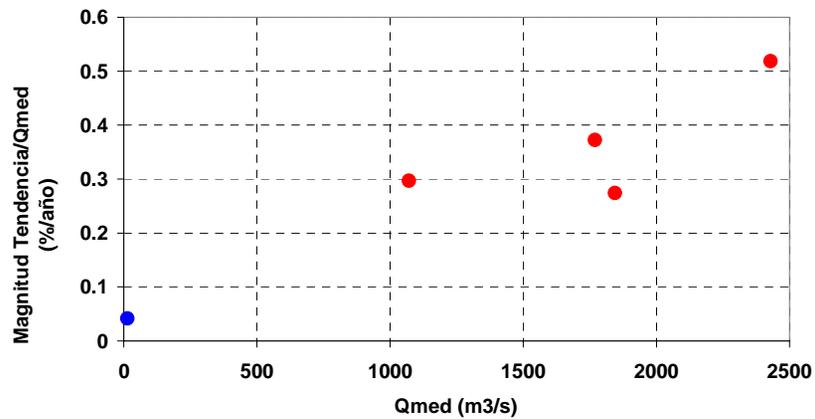
Variación de la tendencia de los Caudales, Río Negro



Variación de la tendencia de los Caudales, Río Saldaña



Variación de la tendencia de los Caudales, Río Atrato



Variación de la tendencia de los Caudales, Río San Juan

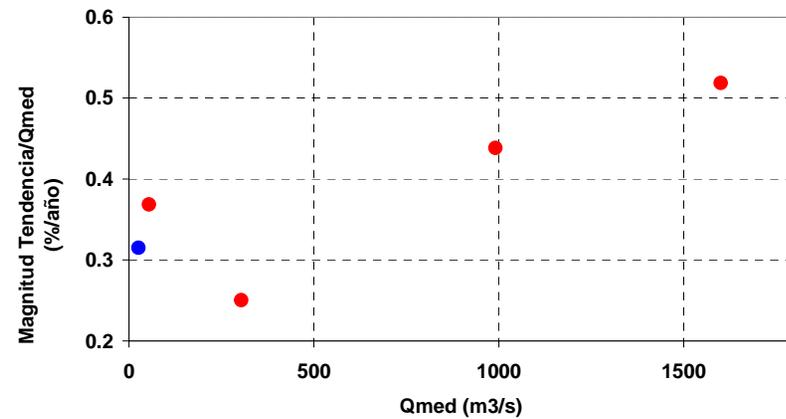


Figura 75 Variación de la tendencia de los caudales de los ríos Negro, Saldaña, Atrato y San Juan.

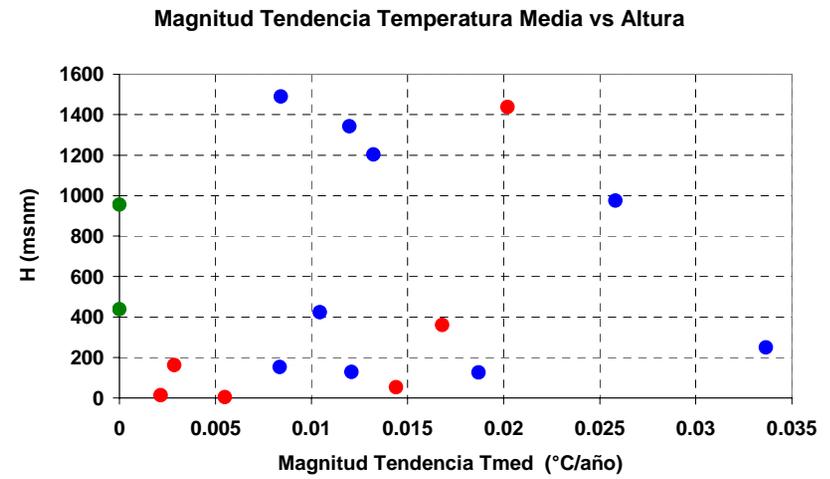
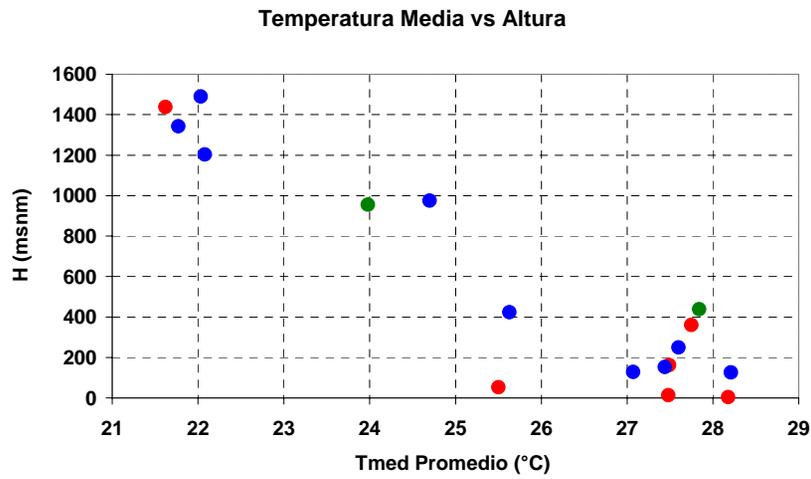
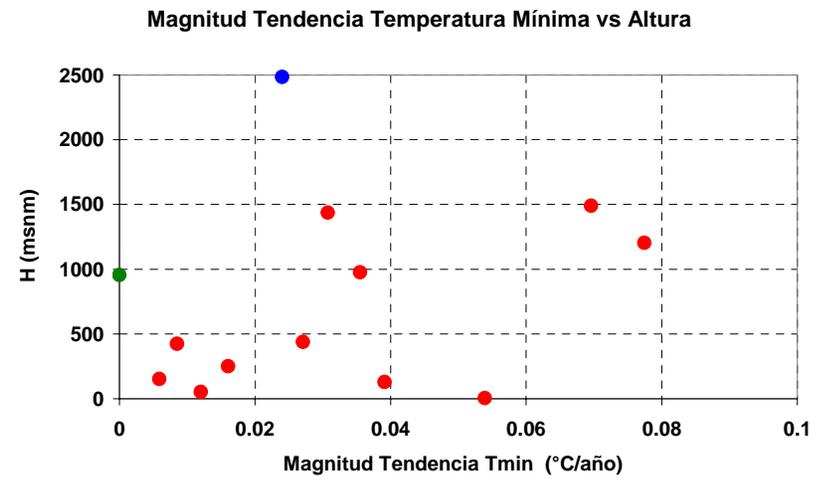
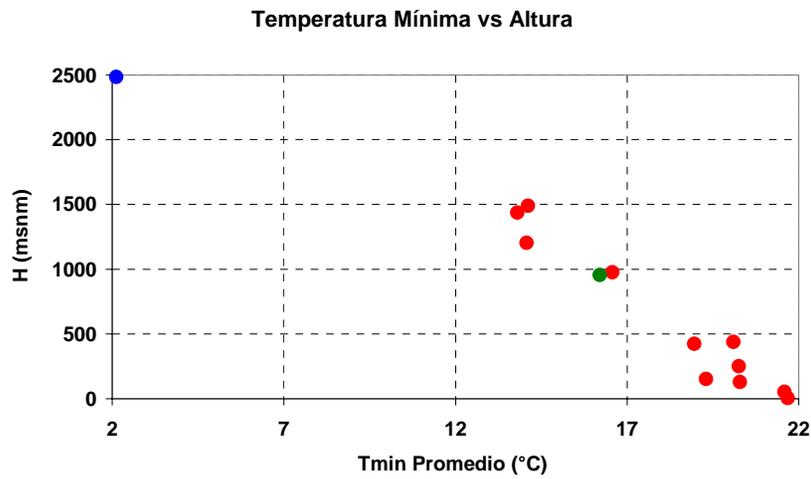


Figura 76 Variación de las temperaturas media y mínima y de la magnitud de la tendencia con la elevación.

En la **Figura 71** es posible apreciar la coherencia espacial de los resultados de las tendencias estimadas en las variables de precipitación mensual y caudales medios mensuales. Específicamente se puede observar que la tendencia creciente encontrada para los ríos Atrato y San Juan, coincide con un aumento de la precipitación en esa zona cercana al Océano Pacífico. Este resultado conduce a la pregunta de la existencia de una tendencia en la advección de humedad en esa zona. Para responderla se analizó la serie de tiempo de advección de humedad por el Chorro del Chocó (obtenidas de la página web de la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), encontrando en ésta una tendencia creciente de $0.0002 [(kg_{\text{agua}}/m^3_{\text{aire}})*(m/s)]/\text{mes}$ (**Figura 77**).

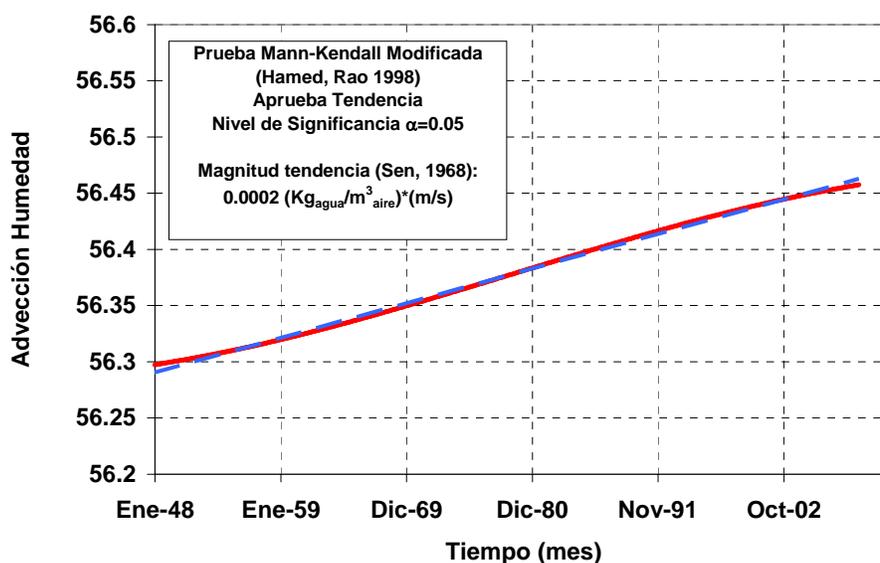


Figura 77 Tendencia en la serie de tiempo del promedio mensual de advección de humedad por el Chorro del Chocó.

A partir de los resultados mostrados en las **Tablas 58 a 62** y en las **Figuras 69 a 72**, es posible concluir que, en general, la mayoría de las estaciones de registro de caudal y temperatura media mensual presentan una tendencia decreciente, mientras que la temperatura mínima presenta una tendencia creciente. En el caso de las estaciones de precipitación no hay un resultado general claro, pues el número de estaciones con tendencias crecientes y decrecientes es similar. Los valores más críticos de las tendencias son los siguientes: -9.1 mm/año en la precipitación en la Cuenca Amazónica, -

7.4 mm/año en la precipitación colombiana, 12.6 m³/s/año en los caudales, -0.034°C/año en la temperatura media y 0.077 °C/año en temperatura mínima.

Se encontró además que en general en Colombia, las mayores magnitudes de las tendencias en las series de precipitación se localizan en la región Pacífico y presentaron una tendencia creciente, mientras que hacia el centro del país hay estaciones con tendencia creciente y decreciente y no se evidencia un patrón claro. Por su parte en la Cuenca Amazónica las mayores magnitudes de las tendencias en las series de precipitación se localizan en la parte centro y sur-oriental de la cuenca y presentan una tendencia decreciente.

A partir de las **Figuras 73 y 74** no es posible identificar una altura a partir de la cual todas las tendencias sean crecientes o decrecientes, evidenciando una vez más la alta variabilidad temporal y espacial de la lluvia.

Al graficar la magnitud de la tendencia normalizada con el caudal medio (en porcentaje) y su variación con el caudal medio de la serie (**Figura 75**) se esperaba encontrar un patrón que permitiera concluir sobre la variación de la tendencia a lo largo de las estaciones de un mismo río. Sin embargo, a pesar que en general todas las estaciones del río coinciden en ser crecientes o decrecientes, se encontró que en algunos ríos la magnitud aumenta conforme aumenta el caudal medio, mientras que en otras esta magnitud tiende a disminuir.

Finalmente, en la **Figura 76** se observa la variación de la temperatura media y mínima con la elevación. En esta gráfica se observa que la única estación de temperatura mínima que exhibe una tendencia decreciente se localiza por encima de los 2000 msnm y corresponde a una estación localizada en el atliplano cundiboyacense, por lo tanto podría pensarse en atribuir esta tendencia a la ocurrencia de heladas.

Teniendo en cuenta que muchas de las estaciones colombianas analizadas en este trabajo fueron estudiadas también en el trabajo de Mesa, Poveda y Carvajal (1997), se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos. Las **Tablas 63 a 66** presentan las estaciones de precipitación, caudal y temperatura media y mínima comunes en ambos

estudios, con sus respectivas tendencias (+ si es positiva, - si es negativa y R si la tendencia fue rechazada) así como la magnitud de la tendencia.

Tabla 63 Estaciones de precipitación mensual comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010).

Código	Nombre	Departamento	Altura msn m	Estudio Actual		Mesa, Poveda, Carvajal 1997	
				Tendenci a	Magnitud (mm/año)	Tendenci a	Magnitud (mm/año)
531150 1	APTO BUENAVENTUR	VALLE	14	+	2.76	+	2.5
540200 1	ANDAGOYA	CHOCO	35	+	0.79	R	NA
260300 5	TAMBO EL	CAUCA	1720	+	0.29	R	NA
260707 6	FLORIDA	VALLE	1038	+	0.3	R	NA
260800 7	VIJES	VALLE	987	-	0.2	R	NA
212500 7	SIERRA LA	TOLIMA	477	-	0.31	R	NA
350200 1	MONTERREDOND O	C/MARCA	1300	-	1.77	R	NA
350350 2	APTO VANGUARDIA	META	423	+	2.62	R	NA
261051 6	APTO FARFAN	VALLE	955	+	0.28	+	0.55
230850 4	SELVA LA	ANTIOQUIA	2090	+	0.12	+	2.06
160200 8	CUCUTILLA	N. SANTANDER	1280	+	0.48	R	NA
160350 1	TIBU	N. SANTANDER	50	+	1.19	+	1.6
270150 9	TULIO OSPINA	ANTIOQUIA	1438	R	NA	+	1.39
290150 2	CARMEN DE BOLIVA	BOLIVAR	152	R	NA	R	NA
231550 3	APTO YARIGUIES	SANTANDER	126	R	NA	R	NA
150750 3	MANAURE	LA GUAJIRA	1	-	0.13	R	NA
250250 9	APTO LAS FLORES	MAGDALENA	34	-	0.3	+	2.75
240151 2	ISLA DEL SANTUAR	C/MARCA	2580	+	0.14	+	1.4
250213 9	CAUCASIA	ANTIOQUIA	70	+	0.53	R	NA

Tabla 64 Estaciones de caudales medios mensuales comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010).

Código	Nombre	Corriente	Departamento	Estudio Actual (2010)		Mesa, Poveda, Carvajal 1997	
				Tendencia	Magnitud (mm/año)	Tendencia	Magnitud (mm/año)
2319729	CAFE MADRID	LEBRIJA	SANTANDER	-	0.24	R	NA
2703701	ESPERANZA LA	NECHI	ANTIOQUIA	-	1.92	R	NA
5207701	PTE PUSMEO	PATIA	NARIÑO	-	0.6	R	NA
2205701	PIEDRAS DE COBRE	SALDANA	TOLIMA	-	1.16	-	1.42
1303701	ANGOSTURA DE URR	SINU	CORDOBA	-	1.49	-	2.61
2119701	PROFUNDO EL	SUMAPAZ	C/MARCA	-	0.1	R	NA

Tabla 65 Estaciones de temperatura media mensual comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010).

Código	Nombre	Departamento	Altura msnm	Estudio Actual (2010)		Mesa, Poveda, Carvajal 1997	
				Tendencia	Magnitud (mm/año)	Tendencia	Magnitud (mm/año)
1501505	APTO SIMON BOLIVAR	MAGDALENA	4	+	0.005	R	NA
1601501	APTO CAMILO DAZA	N SANTANDER	250	-	0.034	-	0.03
2111502	APTO BENITO SALAS	HUILA	439	R	NA	R	NA
2118503	GUAMO	TOLIMA	360	+	0.017	R	NA
2120523	OBS.METEOROLÓGICO NACIONAL	C/MARCA	2556	+	0.012	+	0.01
2120542	TIBAITATA	C/MARCA	2543	-	0.006	-	0.03
2315503	APTO YARIGUIES	SANTANDER	126	-	0.019	-	0.03
2401512	ISLA DEL SANTUARIO	C/MARCA	2580	-	0.003	+	0.01
2402502	CUCHARO EL	SANTANDER	975	-	0.026	-	0.03
2403512	SURBATA BONZA	BOYACÁ	2485	-	0.013	-	0.03
2610516	APTO FARFAN	VALLE	955	R	NA	-	0.02
2612506	APTO EL EDEN	QUINDÍO	1204	-	0.013	-	0.01
2613504	APTO MATECANA	RISARALDA	1342	-	0.012	-	0.03
2701507	APTO OLAYA HERRERA	ANTIOQUIA	1490	-	0.008	R	NA
2701509	TUL. OSPINA	ANTIOQUIA	1438	+	0.02	+	0.04

Código	Nombre	Departamento	Altura msnm	Estudio Actual (2010)		Mesa, Poveda, Carvajal 1997	
				Tendencia	Magnitud (mm/año)	Tendencia	Magnitud (mm/año)
2904502	APTO E CORTISSOZ	ATLANTICO	14	+	0.002	R	NA
3503502	APTO VANGUARDIA	META	423	-	0.01	-	0.03
3705501	APTO ARAUCA	ARAUCA	128	-	0.012	-	0.02
5204501	OBONUCO	NARIÑO	2710	-	0.007	-	0.02

Tabla 66 Estaciones de temperatura mínima mensual comunes en los estudios de Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y Estudio Actual (2010).

Código	Nombre	Departamento	Altura msnm	Estudio Actual (2010)		Mesa, Poveda, Carvajal 1997	
				Tendencia	Magnitud (mm/año)	Tendencia	Magnitud (mm/año)
1104501	APTO EL CARANO	CHOCÓ	53	+	0.012	R	NA
1501505	APTO SIMON BOLIVAR	MAGDALENA	4	+	0.054	+	0.06
1601501	APTO CAMILO DAZA	N. SANTANDER	250	+	0.016	+	0.09
2111502	APTO BENITO SALAS	HUILA	439	+	0.027	+	0.04
2120523	OBSERV. METEOROLÓGICO NACIONAL	C/MARCA	2556	+	0.038	+	0.03
2402502	CUCHARO EL	SANTANDER	975	+	0.035	R	NA
2403512	SURBATA BONZA	BOYACÁ	2485	-	0.024	-	0.04
2610516	APTO FARFAN	VALLE	955	R	NA	+	0.01
2612506	APTO EL EDEN	QUINDÍO	1204	+	0.077	+	0.05
2701507	APTO OLAYA HERRERA	ANTIOQUIA	1490	+	0.07	+	0.05
2701509	TIULIO OSPINA	ANTIOQUIA	1438	+	0.031	+	0.03
2901502	CARMEN DE BOLIVAR	BOLIVAR	152	+	0.006	R	NA
3705501	APTO ARAUCA	ARAUCA	128	+	0.039	+	0.06
5204501	OBONUCO	NARIÑO	2710	+	0.037	+	0.05

A partir de análisis comparativo entre ambos estudios se encontró que de las 19 estaciones comunes de precipitación mensual, 7 estaciones presentaron tendencias

iguales en ambos estudios (crecientes o decrecientes), 10 estaciones que en 1997 no presentaban tendencia, en 2010 si la presentan, 1 estación presentó tendencia en 1997 y ahora ya no es significativa y 1 estación exhibió tendencia diferente en ambos estudios (positiva en 1997 y negativa en 2010). En cuanto a las estaciones de caudal se obtuvo que 2 estaciones presentaron tendencias iguales en ambos estudios y 4 estaciones no presentaron tendencia en 1997, pero sí ahora en el año 2010. De las 20 estaciones de temperatura media mensual analizadas en ambos estudios, 14 presentaron un resultado de tendencia igual en 1997 y 2010, 4 estaciones no tenían tendencia significativa en 1997 y ahora si presentan, 1 estación presentaba tendencia significativa en 1997 y ahora en el 2010 ya no es significativa, y sólo 1 estación presentó resultados diferentes. Finalmente, de las 14 estaciones de temperatura mínima comunes, 11 presentaron resultados iguales, 3 que no presentaron tendencias significativas en 1997 ahora si exhiben y 1 estación que en 1997 presentó tendencia significativa, ya no la tiene.

En general se encontró que los resultados de ambos estudios son coherentes pues coinciden en la tendencia de la mayoría de las estaciones. Por otra parte, el hecho de que se haya encontrado tendencia en estaciones que en 1997 no presentaban, puede ser una evidencia de cambio climático, teniendo en cuenta que en el presente estudio se contó con hasta 10 años más de registros con respecto al estudio de Mesa, Poveda y Carvajal (1997). De igual manera el que algunas estaciones que en 1997 presentaron tendencia estadísticamente significativa, ya no la tengan, puede ser un indicio de que estas estaciones están sometidas más a variabilidad climática y periodicidades de largo plazo y no a cambio climático como tal.

3.3 Aplicación de la Transformada de Hilbert-Huang a la Predicción de Caudales Medios Mensuales

La predicción de caudales medios mensuales tiene múltiples aplicaciones en aprovechamiento de recursos hídricos, entre ellos la generación de energía eléctrica, agricultura, navegación fluvial, salud humana, etc. En esta sección se presenta e implementa un método novedoso en la literatura de predicción de series de caudales medios mensuales, con base en la Descomposición en Modos Empíricos. Los resultados obtenidos se comparan con dos metodologías ampliamente reconocidas y utilizadas en predicción hidrológica: los Modelos Autorregresivos Univariados (AR) y las Redes Neuronales. Específicamente, se comparan predicciones en 10 ríos de Colombia aplicando estas metodologías en conjunto con la descomposición en modos empíricos (DME), bajo la suposición de que es más sencillo descomponer cada una de las funciones en modos intrínsecos (FMI) y luego agregar tales predicciones, que pronosticar la serie original, teniendo en cuenta la definición de las FMI y la teoría de la DME.

3.3.1 Modelos Auto-regresivos Univariados AR(p)

Los modelos estocásticos auto-regresivos han sido comúnmente usados en la predicción de caudales desde principios de los años 60, debido a que su forma auto-regresiva tiene dependencia en el tiempo y son de fácil aplicación (Salas *et al.*, 1980).

Estos modelos suponen una dependencia lineal entre las variables que intervienen en el proceso, de manera que el comportamiento de la variable en un tiempo dado, depende de su ocurrencia en el tiempo pasado y de una componente aleatoria que sigue las leyes del azar (Jaramillo, 2007). El argumento de estos procesos se denomina p y corresponde al número de periodos precedentes que tienen influencia en el valor presente de la variable.

La ecuación general de los procesos $AR(p)$ es:

$$\bar{Z}_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + a_t, \quad (25)$$

matemático que explique el comportamiento de la serie y 2) Permite trabajar series que no son homogéneas, es decir, trabaja con registros no lineales.

Un esquema de red neuronal básico se compone de (**Figura 78**):

- Una o varias entradas, que pueden corresponder a datos externos o resultados de otras neuronas, a cada una de las cuales se les asigna un peso w de acuerdo con su participación en el resultado final.
- Un parámetro b que participa en el procesamiento y le da libertad a la neurona de hacer la traslación.
- Una etapa de procesamiento, en la cual se suma la participación de todas las entradas con su respectivo peso y se tiene como resultado una señal.
- Una función de transferencia que interpreta la señal y la convierte en el resultado o salida final, que igualmente puede ser la entrada de otra neurona.

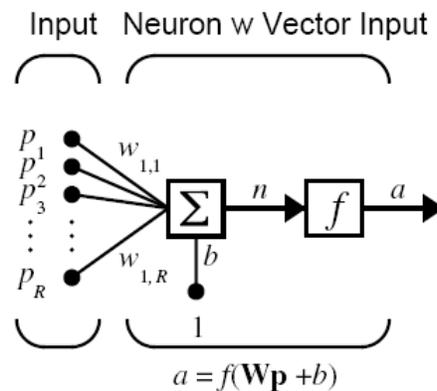


Figura 78 Esquema de Neurona Simple (Demuth, Beale y Hagan, 2007).

Es posible combinar varias neuronas simples, como las mostradas en la **Figura 78** con el fin de crear una capa. Una red neuronal en particular puede estar constituida por una o varias de estas capas. En la **Figura 79** se muestra un ejemplo de red neuronal compuesta de una sola capa, en la cual cada elemento del vector de entrada p está conectado a cada entrada de la neurona a través de la matriz de pesos W .

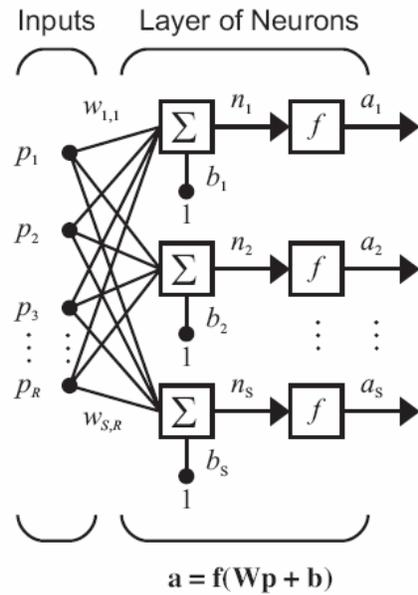
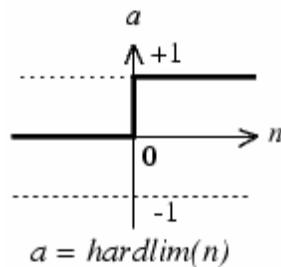


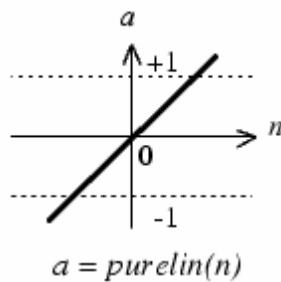
Figura 79 Esquema una red compuesta por una sola capa (Demuth, Beale y Hagan, 2007).

Las funciones de transferencia f más comúnmente utilizadas en las redes neuronales son las que se describen a continuación (Demuth, Beale y Hagan, 2007):

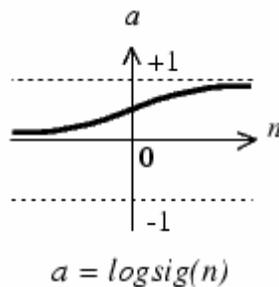
- Función de transferencia Umbral: Limita la salida de la neurona (a) a 0, si el argumento de entrada neta n es menor que cero, ó 1 si n es mayor o igual que cero.



- Función de transferencia Lineal: La relación entrada-salida es $a=n$



- Función de transferencia Sigmoide: La cual toma el valor de entrada, que puede tener cualquier valor en toda la escala de números reales y acota el resultado en el rango de 0 a 1.



El esquema de las redes neuronales más utilizado para predicción y que es empleado en este capítulo se denomina Perceptrón Multicapa (**Figura 80**). Este esquema está compuesto por (Jaramillo, 2007):

- Una capa de entrada de neuronas que reciben la señal del exterior y a las cuales se les asigna un peso w que corresponde a su participación en el resultado final.
- Una capa oculta en donde se procesa la información y se reciben las entradas ponderadas y se aplica la función de transferencia.
- Una capa de salida que recibe el resultado de la capa oculta y corresponde al resultado de la red.

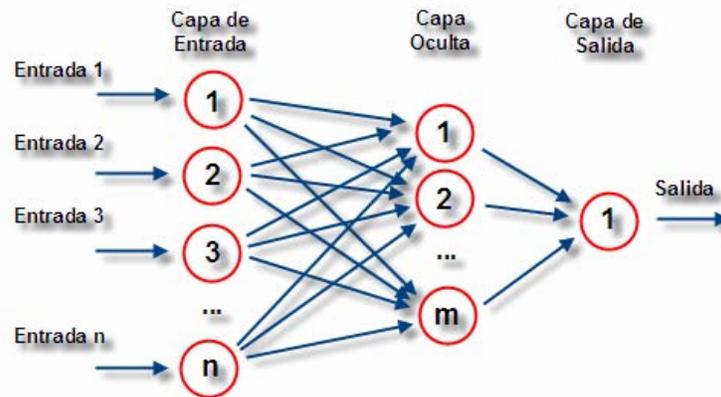


Figura 80 Esquema de perceptrón multicapa, (http://es.wikipedia.org/wiki/Perceptrón_multicapa).

Para que la red neuronal de los resultados esperados es necesario que haya un proceso de entrenamiento o aprendizaje (Jaramillo, 2007). Teniendo en cuenta que el conocimiento en las redes neuronales artificiales se encuentra representado en los pesos w de las conexiones entre las neuronas, es preciso decir que una red neuronal “aprende” al modificar los valores de los pesos de la red. En el presente trabajo se empleó un algoritmo de aprendizaje denominado “backpropagation” o de retropropagación, el cual es un algoritmo de aprendizaje supervisado que consiste en alimentar la red neuronal con entradas de las cuales se tiene información de salida real (equivalente al proceso de calibración de los modelos autorregresivos). La red neuronal ajusta todos sus parámetros internos, los pesos asignados a cada neurona a través de un algoritmo de optimización, en este caso el objetivo fue minimizar el error cuadrático medio de las salidas de la red.

3.3.3 Predicción de Caudales Medios Mensuales en Ríos Colombianos

En el presente trabajo se emplearon dos metodologías de predicción que fueron acopladas con el algoritmo de Descomposición en modos empíricos, propiamente un modelo autorregresivo de orden 1, AR(1), y Redes Neuronales. A continuación se describe el proceso de predicción para cada modelo:

- Predicción con AR(1) + Descomposición en Modos Empíricos:

El primer paso es evaluar la longitud de la serie que se va a predecir con el fin de escoger los períodos de calibración, a partir del cual se estimarán los parámetros del modelo y el de validación, que permitirá evaluar los resultados obtenidos con valores reales observados. En este caso se tomaron las dos terceras partes de la longitud de la serie para el período de calibración, y el tercio restante para la validación. Una vez definidos ambos períodos se toma la serie de caudales medios mensuales a predecir y se descompone en modos empíricos. Luego se toma cada FMI por separado desde la fecha inicial de registro hasta la fecha en la que termina el período de calibración y se estandariza con respecto promedio mensual de largo plazo $\mu(i)$ y la desviación típica mensual $\sigma(i)$:

$$q(i, t) = \frac{Q(i, t) - \mu_i}{\sigma_i} , i = 1, 2, \dots, 12 \quad (26)$$

Luego a cada FMI estandarizada se le calculan la función de autocorrelación, para de esta manera obtener los parámetros para el modelo autorregresivo (ϕ) y finalmente se predice cada FMI de la siguiente manera:

$$\bar{Z}_t = \phi_1 Z_{t-1} + (1 - \phi_1 \rho_1)^{1/2} * a_t \quad (27)$$

Donde, ϕ_1 es el primer coeficiente de correlación, $\phi_1 = \rho_1$ de acuerdo con las ecuaciones de Yule-Walker y a_t es un proceso aleatorio, con media $\mu=0$, y varianza $\sigma=1$. Esta predicción se hace desde la fecha inicial del período de validación hasta la fecha final del mismo período, definidas previamente. Se procede entonces a desestandarizar cada FMI y se obtiene entonces una predicción para cada una de ellas. Teniendo en cuenta que es posible reconstruir la señal original a partir de las FMI (ecuación 18) también es posible obtener una predicción para la serie de caudales que se está estudiando a partir de la suma de las predicciones de cada FMI. Finalmente se compara esta predicción producto de la suma de las predicciones de las FMI con la serie original (serie histórica) en el período de validación y se evalúa el desempeño del modelo.

- Predicción con Redes Neuronales + Descomposición en Modos Empíricos:

Análogamente como se hizo con el modelo AR(1), primero se definen los períodos de calibración y validación. En este caso, el período de calibración es que el permitirá que se lleve a cabo el proceso de “aprendizaje” de la red. Luego se obtienen las FMI a partir de la serie de caudales medios mensuales que se quiere predecir, mediante el proceso de descomposición en modos empíricos. A continuación se predice cada una de las FMI utilizando el algoritmo de redes neuronales. En este estudio en particular se utilizaron los siguientes parámetros:

- Tipo de Red: Perceptrón Multicapa con una capa oculta.
- Número de capas ocultas: 1
- Función de Transferencia: Lineal (purelin)
- Algoritmo de Aprendizaje: Retropropagación.

Se realizaron predicciones de los caudales medios mensuales de los ríos Atrato, Catatumbo, Lebrija, Nechí, Negro, Patía, Saldaña, San Juan, Sinú y Sumapaz (Ver capítulo 1, Información Utilizada). En la **Tabla 67** se presentan los períodos de calibración y validación para cada uno de los ríos estudiados:

Tabla 67 Períodos de calibración y validación de los ríos estudiados.

Río	Período Calibración		Período Validación	
	Inicio	Final	Inicio	Final
Atrato	01/01/1965	01/12/1989	01/01/1990	01/12/2002
Catatumbo	01/01/1965	01/12/1990	01/01/1991	01/12/2003
Lebrija	01/01/1965	01/12/1990	01/01/1991	01/12/2003
Nechí	01/01/1965	01/12/1989	01/01/1990	01/12/2002
Negro	01/01/1965	01/12/1989	01/01/1990	01/12/2002
Saldaña	01/01/1952	01/12/1987	01/01/1988	01/12/2005
San Juan	01/01/1965	01/12/1990	01/01/1991	01/12/2003
Sinú	01/01/1963	01/12/1990	01/01/1991	01/12/2003
Sumapaz	01/01/1959	01/12/1986	01/01/1987	01/12/2001

La predicción se llevo a cabo para cada uno de estos ríos con y sin descomposición en modos empíricos, utilizando los modelos AR(1) y Redes Neuronales, de manera que para cada río se obtuvieron 4 resultados de predicción, es decir: AR(1) con la serie sin descomposición, AR(1) con la serie descompuesta, Redes Neuronales con la serie sin descomposición y Redes Neuronales con la serie descompuesta. Se hicieron predicciones

para ventanas de pronóstico de 1, 3, 6 y 12 meses. En todos los casos el desempeño de cada metodología con y sin la Descomposición en Modos Empíricos fue evaluada a partir del error cuadrático medio adimensional (RMS) definido como:

$$RMS(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_{real} - Q_{predicho})^2}}{\overline{Q_{real}}} \times 100, \quad (28)$$

Los errores de predicción para cada uno de los 4 escenarios evaluados se presentan en las **Tablas 68-77**.

Tabla 68 Errores de predicción, río Atrato.

ATRATO				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	24.3	19.8	17.9	11.6
3	28.9	23.8	22.2	14.5
6	32.5	28.7	23.5	16.4
12	32.4	31.8	24.3	17.9

Tabla 69 Errores de predicción, río Catatumbo.

CATATUMBO				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	62.3	50.8	53.0	40.3
3	79.2	66.1	59.0	40.8
6	80.8	73.3	61.9	44.8
12	79.4	79.1	62.7	49.3

Tabla 70 Errores de predicción, río Lebrija.

LEBRIJA				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	50.6	48.2	31.9	23.6
3	59.1	57.1	37.6	25.9
6	60.0	54.6	37.9	28.0
12	62.8	59.8	38.5	31.4

Tabla 71 Errores de predicción, río Henchí.

NECHÍ				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	34.1	31.8	22.0	14.5
3	48.3	44.4	31.4	21.0
6	51.4	49.3	35.5	24.0
12	53.6	53.0	35.8	24.9

Tabla 72 Errores de predicción, río Negro.

NEGRO				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	67.1	65.7	44.5	33.7
3	85.3	78.6	54.1	37.3
6	84.2	82.1	56.6	42.0
12	88.8	86.4	56.9	48.0

Tabla 73 Errores de predicción, río Patía.

PATÍA				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	48.6	44.9	34.3	31.0
3	62.6	56.5	43.2	29.9
6	67.7	61.0	47.3	34.4
12	69.8	67.1	49.3	39.2

Tabla 74 Errores de predicción, río Saldaña.

SALDAÑA				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	41.6	36.0	25.7	18.6
3	45.0	43.7	31.2	20.8
6	48.1	43.4	32.9	22.9
12	48.3	46.5	34.0	25.3

Tabla 75 Errores de predicción, río San Juan.

SAN JUAN				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	28.4	24.3	19.4	14.1
3	31.6	28.7	24.3	17.1
6	33.9	30.2	25.8	18.8
12	34.7	32.3	26.3	20.0

Tabla 76 Errores de predicción, río Sinú.

SINÚ				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	41.3	37.1	26.8	17.1
3	53.4	52.8	36.3	24.4
6	64.3	61.2	38.8	27.6
12	67.2	65.0	39.1	30.5

Tabla 77 Errores de predicción, río Sumapaz.

SUMAPAZ				
Ventana	ERRORES AR1		ERRORES REDES NEURONALES	
	Sin DME (%)	Con DME (%)	Sin DME (%)	Con DME (%)
1	77.8	69.2	54.4	43.1
3	82.0	79.5	56.5	41.6
6	87.0	81.8	56.8	43.6
12	86.2	83.8	56.8	46.9

Las **Figuras 81 y 82** presentan el resultado de la predicción para el río Atrato, con una ventana de pronóstico de 1 mes. Específicamente, la **Figura 81** presenta la serie histórica observada de caudales medios mensuales (azul) superpuesta con la serie predicha utilizando el modelo AR(1) sin descomponer la serie (verde) y la serie predicha con el modelo AR(1) en conjunto con la descomposición en modos empíricos (rojo). La **Figura 82** presenta la serie observada de caudales medios mensuales (azul) superpuesta con la serie predicha utilizando Redes Neuronales sin descomponer la serie (verde) y la serie predicha utilizando Redes Neuronales en conjunto con la descomposición en modos empíricos (rojo).

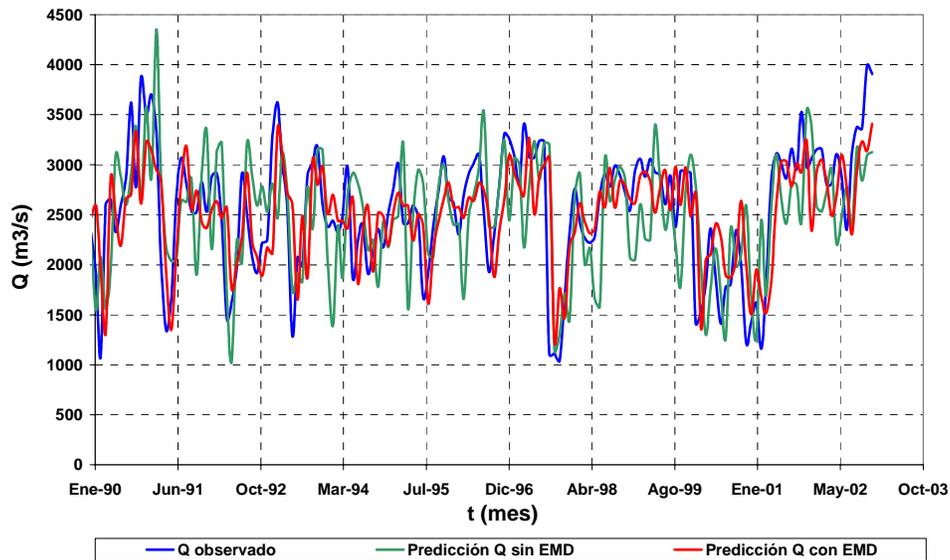


Figura 81. Predicción de la serie de caudales medios mensuales del río Atrato con el modelo AR(1).

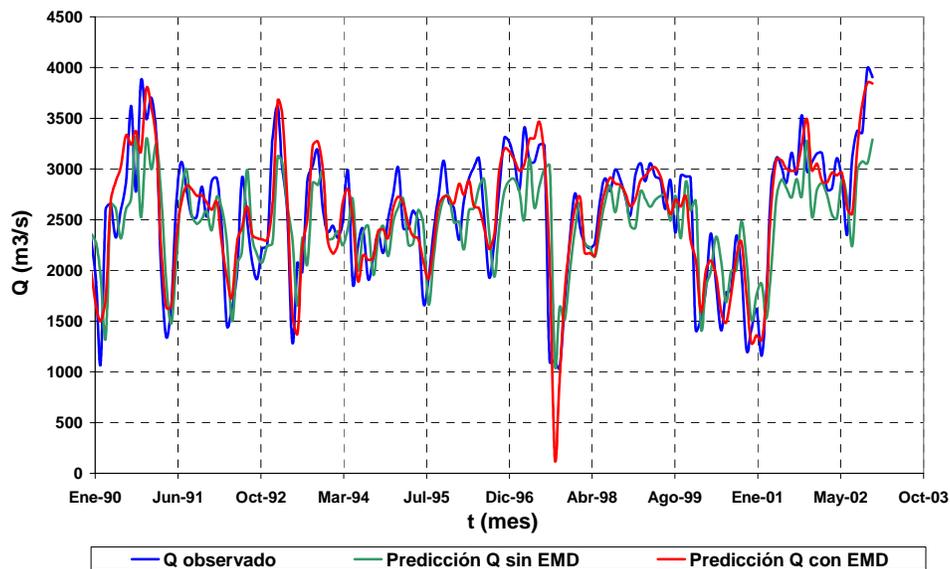


Figura 82 Predicción de la serie de caudales medios mensuales del río Atrato con Redes Neuronales

A partir de las **Figuras 81 y 82** es posible observar la mejoría en las predicciones cuando se incluye la Descomposición en Modos Empíricos en la metodología de pronóstico, siendo la línea roja que representa la predicción con DME más similar a la serie histórica (azul) que la predicción sin DME (verde). Este resultado fue encontrado en forma unánime para los 10 ríos estudiados, tal como se observa en las **Tablas 68 a 77**. Se observa que

el error disminuye hasta un 13% cuando la metodología empleada es el modelo AR(1) junto con la descomposición, y hasta un 18% cuando se utilizan las Redes Neuronales en combinación con la DME para el pronóstico. En algunos casos se logran errores de predicción mínimos como en el caso del río Atrato (11.6% para una ventana de pronóstico de 1 mes). Finalmente, la **Figura 83** permiten visualizar los resultados presentados en las **Tablas 68 y 69** (ríos Atrato y Catatumbo) para una ventana de predicción de 12 meses. Los resultados gráficos para los demás ríos pueden encontrarse en el anexo digital. En este tipo de gráfico, se presenta el RMS promedio teniendo en cuenta el mes en el que se inicia la predicción (abscisas) y los 12 meses (ordenadas) que se predicen a partir de ese mes. De esta manera, mientras más oscuro el cuadrante, menor es el error y mejor es la predicción.

A partir de la **Figura 83** se observa que los errores disminuyen al incluir en la predicción la metodología de Descomposición en Modos Empíricos, y de cierta manera también muestran cómo el modelo de predicción de redes neuronales supera el desempeño de modelo autorregresivo AR(1), siendo los “tableros” correspondientes a las redes neuronales los que presentan los menores errores. También se encontró que los menores errores de predicción tanto para los ríos Atrato y Catatumbo, como en general para los 10 ríos analizados, se localizan en la diagonal de los diagramas. Esta diagonal del “tablero” corresponde al error cuando se predice el mes inmediatamente posterior al mes de inicio de la predicción.

Teniendo en cuenta que el “tablero” se obtiene a partir de una matriz que contiene los errores de predicción (RMS) mes a mes, se calculó el promedio del error para cada uno de los meses de inicio de las predicciones (promedio por columna en la matriz de errores). Para el río Atrato por ejemplo se encontró que los menores errores se obtienen cuando se inicia a predecir en los meses de Abril y Septiembre, mientras que el error de predicción aumenta cuando el mes de inicio es Enero, Junio o Diciembre. Este análisis se efectuó para los 10 ríos estudiados y se encontró, en general, que los menores errores se obtienen cuando las predicciones se inician en un mes de la temporada invernal, específicamente mayo y septiembre, mientras que los errores tienden a ser mayores cuando la predicción inicia en un mes de verano como febrero y agosto.

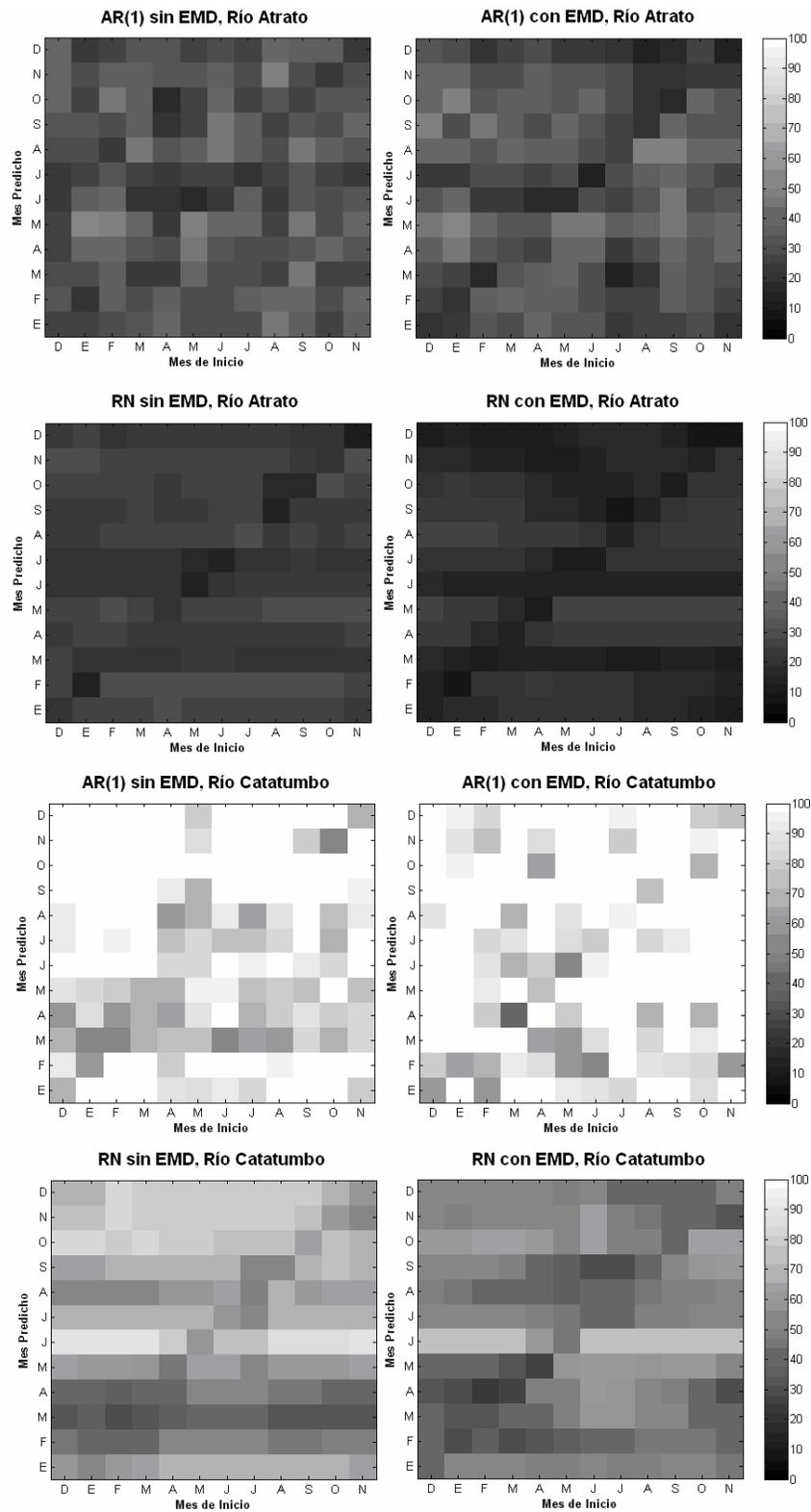


Figura 83 Errores de predicción (RMS) ríos Atrato y Cataumbo.

CONCLUSIONES

La aplicación de las metodologías de Descomposición en Modos Empíricos y de la Transformada de Hilbert-Huang ha permitido confirmar que los principales modos de oscilación hidro-climática en las variables con resolución mensual en Colombia (Precipitación, Caudal y Temperatura) están asociadas con períodos de 3 meses, 6 meses, 12 meses, 2-3 años, 3.5-6 años. Por otra parte, en los registros diarios, además de los períodos ya mencionados se encontraron además frecuencias asociadas a períodos de 3.5-5 días y 69-78 días. Finalmente, en las series horarias se encontraron frecuencias asociadas a períodos de 12 y 24 horas, seguidas de una frecuencia de 0.017 h^{-1} equivalente a 59 horas (2.5 días). Estas frecuencias corresponden a la Migración de la ZCIT (que influye en los ciclos anuales y semi-anuales), el sistema ENSO, la Oscilación Cuasi-Bienal, las Oscilaciones de Madden-Julian y las Ondas Tropicales del Este.

En los registros de precipitación en la Cuenca Amazónica se encontró influencia del paso de las oscilaciones intra-estacional ó de Madden-Julian (3 meses), de la ZCIT (evidenciado en las frecuencias encontradas asociadas a 6 y 12 meses), de la Oscilación Cuasi-Bienal (2.4 años), del sistema ENSO (5.8 años) y finalmente de fenómenos decadales con períodos entre 14 y 42 años, cuyo origen debe estudiarse con registros de mayor longitud.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados mediante las Transformadas de Fourier, Onditas y de Hilbert-Huang, es posible concluir que la THH es una herramienta más potente que las otras dos transformadas para detectar los más importantes modos temporales en las señales hidrológicas estudiadas. Por otra parte, se evidenció que mientras que las Transformadas de Fourier y Onditas se concentran en mostrar que hay datos atípicos ("Outliers") o alguna frecuencia particularmente fuerte, el espectro de Hilbert los muestra y los localiza temporalmente, pero al mismo tiempo está en capacidad

de detectar otras frecuencias de oscilación en la señal. Estos resultados denotan la superioridad de la transformada de Hilbert-Huang. Así mismo, este trabajo demuestra que la THH está en capacidad de detectar modos de oscilación significativos de frecuencia más baja que la anual, aún para series de registros que no han sido previamente estandarizados, lo cual no ocurre con las Transformadas de Fourier y Onditas, para las cuales se hace necesario estandarizar las series, dada la significancia de los ciclos anuales y semi-anuales que absorben la totalidad de la varianza de la señal.

Gracias a la posibilidad de contar con información de precipitación en tres escalas de resolución temporal (mensual, diaria y horaria), fue posible determinar que las frecuencias detectadas dependen de la resolución: desde meses hasta años para los registros mensuales, de días hasta meses para los diarios y desde horas hasta días para los horarios. Esto indica que es necesario analizar las variables con una resolución temporal coherente con la pregunta de investigación que se esté desarrollando y con el período de los fenómenos en los que se quiera hacer énfasis. De igual manera se encontró que las frecuencias encontradas también dependen de la longitud de la serie de registros.

Los resultados de detección de tendencias en la señales hidro-climáticas estudiadas demuestran la potencia de la Descomposición en Modos Empíricos para extraer un residuo a partir de los datos. Al superponer la serie histórica observada de las variables con el residuo producto de DME, se observó que este residuo representa la tendencia general de la serie.

La búsqueda de señales de cambio climático permite concluir que la mayoría de las estaciones de caudales y temperatura media presentan una tendencia decreciente, mientras que las series de temperatura mínima presentan, casi en forma unánime, una tendencia creciente.

Para las series de precipitación mensual no hubo un resultado claro, ya que el número de estaciones con tendencia positiva y negativa fue similar. Sin embargo, para esta variable si fue posible apreciar que las mayores magnitudes de las tendencias en las series de precipitación colombianas se localizan en la región Pacífico con tendencias crecientes, mientras que hacia el centro del país hay estaciones con tendencia creciente y

decreciente y no se evidencia un patrón claro. De igual manera hay una coherencia entre los resultados obtenidos para las estaciones de precipitación y caudal ya que precisamente son los ríos localizados hacia la región del pacífico los que muestran una tendencia creciente, mientras que la tendencia del resto de los ríos es decreciente. Esto concuerda con la tendencia creciente hallada en la serie del Chorro del Chocó, que evidencia un aumento en la advección de humedad hacia esta zona.

Por otra parte, las mayores magnitudes de las tendencias en las series de precipitación en la Cuenca Amazónica fueron decrecientes y se encontraron en las regiones central y sur-oriental de la cuenca.

En las estaciones de precipitación, tanto de Colombia como de la Cuenca Amazónica, no fue posible identificar una altura a partir de la cual todas las tendencias son crecientes o decrecientes, evidenciando una vez más la alta variabilidad espacial y temporal de la lluvia.

Se esperaba encontrar un patrón que permitiera concluir sobre la variación de la tendencia a lo largo de las estaciones de un mismo río, teniendo en cuenta que la búsqueda de tendencias en las series de caudales se realizó sobre estaciones en una misma corriente. Sin embargo, a pesar que en general todas las estaciones pertenecientes a un mismo río coinciden una tendencia positiva ó negativa, se encontró que en algunos ríos la magnitud aumenta conforme aumenta el caudal medio, mientras que en otras esta magnitud tiende a disminuir.

En los resultados de las tendencias en series de temperatura mínimas mensual, se encontró que a pesar de que la mayoría de las estaciones presentaron tendencias crecientes, la única estación que presentó una tendencia decreciente, se localiza por encima de los 2000 msnm y corresponde a una estación localizada en el altiplano Cundiboyacense, por lo tanto podría pensarse en atribuir esta tendencia a la ocurrencia de heladas.

Es importante indicar que los resultados referentes a la búsqueda de señales de cambio climático y tendencias, encontrados a partir de este trabajo, confirman los resultados de

trabajos previos (Mesa, Poveda, Carvajal 1997; Ochoa y Poveda, 2008), realizados mediante otras metodologías. Se encontró que mientras que para la mayoría de las estaciones se mantienen las tendencias, hubo estaciones las cuales en el estudio de Mesa et al. (1997) presentaban tendencias estadísticamente significativas y ahora con hasta 10 años más de registros ya no las presentan, lo cual puede ser un indicativo de que estas estaciones pueden estar afectadas más por periodicidades de largo plazo y variabilidad climática, que por cambio climático. Por otra parte, se encontraron estaciones en las que en el estudio de 1997 no se detectó tendencia pero ahora sí presentan lo cual puede ser un indicio de cambio climático, sin embargo se deben continuar las investigaciones para determinar si estas tendencias se mantienen en el tiempo, desaparecen, o son parte de ciclos de más largo plazo. Estas evidencias de cambio ambiental (cambio climático aunado a deforestación y a cambios en los usos del suelo) deberán ser incorporados en los planes de adaptación de Colombia al cambio ambiental, así como en la planeación de la utilización de los recursos hídricos.

La aplicación de la transformada de Hilbert-Huang al pronóstico de caudales medios mensuales condujo a mejorar los pronósticos de los métodos AR(1) y Redes Neuronales, para todas las ventanas de predicción, siendo la ventana de pronóstico de 1 mes la que menores errores exhibe.

A partir de los “tableros” de error para ventanas de pronóstico de 12 meses, se encontró que los menores errores de predicción para los 10 ríos analizados, se localizan en la diagonal de los diagramas. Esta diagonal de los “tableros” corresponde al error cuando se predice el mes inmediatamente siguiente al mes de inicio de la predicción.

Teniendo en cuenta que los “tableros” de error se obtienen a partir de una matriz que contiene los errores de predicción (RMS) mes a mes, se encuentra que los menores errores se obtienen cuando las predicciones se inician en un mes de la temporada invernal (Mayo y Septiembre), mientras que los errores tienden a ser mayores cuando la predicción inicia en un mes de verano como Febrero y Agosto.

Se recomienda emplear en estudios posteriores las metodologías de predicción en conjunto con la Descomposición en Modos Empíricos con el fin de potenciar los resultados y mejorar los pronósticos.

Este trabajo ha permitido evidenciar las grandes ventajas que tiene la transformada de Hilbert-Huang con respecto a otras metodologías y pone de presente las múltiples aplicaciones que tiene este método en estudios de cambio climático, de variabilidad hidroclimática, y de pronóstico, entre otros.

Referencias

Arias P. (2005). Diagnóstico y predicción de la variabilidad intra-annual de la hidrología colombiana. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Baines, P. G. (2005), Long-term variations in winter rainfall of southwest Australia and the African monsoon, *Aust. Meteorol. Mag.*, 54, 91–102.

Coughlin K.T, Tung K.K (2003). Eleven year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method. *Advances in Space Research*.

Daubechies I. (1992). Ten lectures on wavelets. Series in applied mathematics. Vol 61. 357p.

Demuth H, Beale M, Hagan M. (2007). *Neural Network Toolbox, User's guide, Version 5*, TheMathWorks.

Duffy, D. G. (2004), The application of Hilbert-Huang transforms to meteorological datasets, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21, 599–611, doi:10.1175/1520-0426(2004)021<0599:TAOHTT>2.0.CO;2.

El-Askary, H., S. Sarkar, L. Chiu, M. Kafatos, y T. El-Ghazawi (2004). Rain gauge derived precipitation variability over Virginia and its relation with the El Nino Southern Oscillation, *Adv. Space Res.*, 33, 338–342.

Hamed y Rao, (1998). A Modified Mann Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204. 182-196.

- Hastenrath S. (1991). *Climate Dynamics of the Tropics*. Kluwer, Dordrecht. 488pp.
- Hense, A., Krahe, P. y Flohn H. (1988). Recent fluctuations of tropospheric temperature and water vapor content in the tropics. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 38,215-227.
- Hoyos, F. (1996). *Glaciers of Colombia. Satellite images atlas of glaciers of the World*. U.S Geological Survey Professional paper 1386-Y, Chapter 11, Reston , VA.
- Hoyos C.D. (1999). Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y la descomposición en ondas a señales hidrológicas y sísmicas. Trabajo dirigido de grado, Ingeniería Civil. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C.Wu, H. H. Shih, Q. Zheng,N.-C. Yen, C. C. Tung, y H. H. Liu (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 454,903–993.
- Huang, N. E., Z. Shen, y S. R. Long (1999). A new view of nonlinear water waves—The Hilbert spectrum, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 31, 417–457, doi:10.1146/annurev.fluid.31.1.417.
- Huang, N. E., C. C. Chern, K. Huang, L. W. Salvino, S. R. Long, y K. L. Fan (2001). A new spectral representation of earthquake data: Hilbert spectral analysis of station TCU129, Chi-Chi, Taiwan, 21 September 1999, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91, 1310–1338, doi:10.1785/0120000735.
- Huang, N. E.,M.L.Wu, S. R. Long, S. S. Shen,W. D. Qu,P. Gloersen, y K. L. Fan (2003), A confidence limit for the position empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 459, 2317–2345.
- Huang N.E, Wu Z. (2008). A Review on Hilbert-Huang Transform: Method and its applications to geophysical studies. *Rev. Geophys.* 46. RG2006. doi:10.1029/2007/RG000228.

Hu, Z.-Z., y Z. Wu (2004). The intensification and shift of the annual North Atlantic Oscillation in a global warming scenario simulation, *Tellus, Ser. A*, 56, 112–124.

Hurtado A.F (2009). Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano. Tesis de Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The physical scientific basis. [En línea]

<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>

Jaramillo, A. (2007). Predicción de Caudales Medios Mensuales en algunos ríos de Colombia. Casos de aplicación Modelos AR(1), AR(2), ARMA(1,1), ARMAX y Redes Neuronales. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Lundquist, J. K. (2003), Intermittent and elliptical inertial oscillations in the atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 60, 2661–2673, doi:10.1175/1520-0469(2003)060<2661:IAEIOI>2.0.CO;2.

Madden R.A, Julian P.R. (1971) Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28: 702-708.

Mejía J. F, Poveda G. (2005). Ambientes atmosféricos de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia durante 1998 según la misión TRMM y el re-análisis NCEP-NCAR. *Rev. Acad Coloma Ciencias* 29 (113). 495-514.

Mesa O, Poveda G, Carvajal LF. (1997). Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Molla, M. K. I., M. S. Rahman, A. Sumi, y P. Banik (2006). Empirical mode decomposition analysis of climate changes with special reference to rainfall data, *Discrete Dyn. Nat. Soc.*, 2006, 45348, doi:10.1155/DDNS/2006/45348.

Molla M. K.I., S.Rahman, A.Sumi (2006). Analysis of temperature change under global warming impact using Empirical Mode Decomposition. International Journal of Information Technology. Vol 3.

Montoya G, Pelkowski J, Eslava J. Sobre los alisios del nordeste y la existencia de una corriente en el piedemonte oriental Andino (2001). Rev. Acad. Colomb. Ciencias. 25 (96) 363-370.

Press W, Teukolsky S, Vetterling W, Flannery B. (1992). Numerical Recipes. The art of scientific computing. Second Edition. Cambridge University Press.

Ochoa A, Poveda G. (2008). Distribución espacial de señales de cambio climático en Colombia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias.

Osorio, J.D (2005). Descomposición en modos empíricos y el espectro de Hilbert-Huang para el análisis de series de tiempo no lineales y no estacionarias. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Papoulis A. (1962). The fourier integral and its applications. Mc Graw-Hill Companies.

Poveda G. (1998). Retroalimentación dinámica entre el fenómeno ENSO y la hidrología de Colombia. Tesis Ph.D. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

Poveda G. (2002). El chorro del Chocó y su influencia sobre la hidroclimatología de la costa Pacífica y el occidente de Colombia. En: Correa, I.D & J.D Restrepo (eds.), Geología y Oceanografía del delta del Río San Juan, Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, 169-187.

Poveda G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. Revista Academia Colombiana de Ciencias. 28 (107):201-222. ISSN:0370-3908.

Poveda, G., Mesa, O.J., Salazar, L.F., Arias, P.A., Moreno, H.A.,Vieira, S.C., Agudelo, P.A., Toro, V.G., Alvarez, J.F. (2005). The diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia. *Month. Weather Rev.* 133 (1), 228– 240.

Poveda G y Pineda K. (2009), Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010–2020 decade?, *Adv. Geosci.*, 22, 107–116.

Rao A.R y Hsu E.C (2008). Hilbert-Huang transform analysis of hydrological and environmental time series. *Water Science and Technology Library*, Vol. 60. Springer.

Riehl H y Malkus J.S. (1958). On the heat balance in the equatorial trough zone. *Geophysica*, 6:505-538.

Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V., Lane, W. (1980). *Applied Modeling of Time Series*. Water resources publications, Littleton Colorado.

Salisbury, J. y Wimbush I, M (2002). Using modern time series analysis techniques to predict ENSO events from the SOI time. *Nonlinear Processes in Geophysics* 9: 341–34.

Sen P K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, No. 324. pp. 1379- 1389

Smith R.A, Poveda G, Mesa O.J, Pérez C.A, Ruiz C.D. (1996). En búsqueda de señales de cambio climático en Colombia. IV Congreso Colombiano de Meteorología, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá.

Torrence C y Compo G. (1998). A practical guide to wavelet análisis. *Bull.Amer. Meteorol. Soc.* 61-78.

Velasco, I y Frisch, M. Mesooscale convective complexes in the Ameritas, *Jour. Geoph., Res.*, 92, D8. 9591-9613.

Zuluaga M.D y Poveda G. (2004). Diagnóstico de Sistemas Convectivos de mesoescala sobre Colombia y el océano Pacífico Oriental durante 1998-2002. Avances en Recursos Hidráulicos. 11.145-160.