

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estimación de Balances Hídricos de Corto Plazo en la Cuenca del Río Cauca: Una Aproximación al Funcionamiento del Almacenamiento del Agua en el Suelo

Harol Alexander Cetre Orejuela

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2024

Estimación de Balances Hídricos de Corto Plazo en la Cuenca del Río Cauca: Una Aproximación al Funcionamiento del Almacenamiento del Agua en el Suelo

Harol Alexander Cetre Orejuela

Tesis de investigación presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Recursos Hidráulicos

Directora:

MSc., Carolina Ortiz Pimienta

Codirector:

Ph.D., Jaime Ignacio Vélez Upegui

Línea de Investigación:

Hidrología

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Facultad de Minas

Maestría en Recursos Hidráulicos

Medellín, Colombia

2024

Dedicatoria y lema

A DIOS y a mis padres Doris y Thelmo.

*La dificultad no estriba en las ideas nuevas,
sino en escapar de las viejas.
Jhon Maynard Keynes (1883-1946)*

Agradecimientos

A DIOS por la vida y la oportunidad de decidir.

A mis padres Doris y Thelmo por creer en mí y estar siempre a mi lado apoyándome incondicionalmente, los amo.

Quiero agradecer de manera muy especial a mis directores Jaime Ignacio Vélez Upegí, Carolina Ortiz Pimienta y Oscar David Álvarez Villa por las enseñanzas técnicas y personales, por la paciencia y la confianza durante el tiempo invertido en este lindo proceso de aprendizaje; este logro no habría sido posible sin ustedes.

Agradezco a mis compañeros de trabajo en la empresa Pi Épsilon S.A.S por su acompañamiento y apoyo durante todo el proceso. Agradezco a la empresa Pi Épsilon S.A.S por facilitarme el tiempo para el desarrollo de mis actividades académicas cuando lo requerí.

Resumen

Esta tesis presenta una metodología de simulación hidrológica que permite describir a escala de cuenca, la variabilidad espaciotemporal del cambio en el almacenamiento del agua en el suelo (AAS). La metodología explora el poder predictivo de un modelo hidrológico agregado (MHA) y del balance hídrico de corto plazo (BHCP), en la reproducción de la variabilidad espaciotemporal del cambio en el AAS. La metodología fue aplicada en 32 subcuencas de la cuenca del río Cauca, y como resultado se presenta la variabilidad mensual intranual e interanual del cambio en el AAS en el periodo comprendido entre los años 1990 y 2009.

A partir del análisis de la estacionalidad del cambio en el AAS en las subcuencas, se identificaron tres patrones de variabilidad intranual del cambio en el AAS y se delimitaron tres subzonas geográficas en función de los patrones de variabilidad. En las cuencas de cada subzona se determinó que la estacionalidad es controlada por el ciclo anual de la precipitación mensual, con un rezago temporal que oscila entre 10 y 60 días según la subzona. En la escala regional (suma de todas las subcuencas) se determinó que los principales efectos del ENSO sobre los cambios en el AAS se dan en la variabilidad intranual. Durante El Niño el promedio mensual del cambio en el AAS reduce entre un 75% y 85%, mientras que durante La Niña el promedio mensual del cambio en el AAS incrementa hasta un 110%.

Para validar los resultados de la metodología de simulación hidrológica se empleó la información de espesor equivalente de agua en el suelo de la misión satelital *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE). Con la comparación se determinó que el MHA reproduce las tendencias de largo plazo observadas por GRACE en la escala de cuencas, y en la escala regional reproduce la estacionalidad, la variabilidad mensual interanual y la tendencia de largo plazo.

Por último, en esta tesis también se determinó el rol de los cambios en el AAS sobre la dinámica hidrológica de las cuencas. El AAS regula la recesión de los caudales en las cuencas y aporta en promedio el 85% del caudal mínimo mensual y cerca del 57% del caudal medio mensual.

Palabras clave: Modelación hidrológica, Cambio en el almacenamiento de agua en el suelo, Agua subterránea, GRACE, Caudales.

Abstract

Estimation of short-term water balances in the Cauca River Basin: an approach to the functioning of water storage in the soil

This thesis presents a hydrological simulation methodology that allows describing, at the basin scale, the spatial and temporal variability of the change in soil water storage (AAS). The methodology explores the predictive capability of an aggregate hydrological model (MHA) and the short-term water balance (BHCP), in the reproducing of the spatial and temporal variability of the change in soil water storage. The methodology was applied in 32 sub-basins of the Cauca River basin, and as a result the monthly variability in the intra-annual and inter-annual scales of the change in the AAS in the period between 1990 and 2009 is presented.

Based in the analysis of the seasonality of the change in the AAS in the sub-basins, three patterns of intra-annual variability of the change in the AAS were identified and three geographical subzones were delimited based on the variability patterns. In the basins of each subzone, it was determined that seasonality of the change in the AAS is controlled by the annual cycle of monthly precipitation, with a temporal lag that ranges between 10 and 60 days depending on the subzone. At the regional scale (all sub-basins integrated), it was determined that the main effects of ENSO on changes in the AAS occur in intra-annual variability. During El Niño the monthly average of the change in the AAS reduces between 75% and 85%, while during La Niña the monthly average of the change in the AAS increases up to 110%.

To validate the results of the hydrological simulation methodology, the equivalent thickness of water in the soil from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) was used. With the comparison, it was determined that the MHA reproduces the long-term trends observed by GRACE in the sub-basin scale, and it reproduces the seasonality, the inter-annual monthly variability and the long-term trend in the regional scale.

Finally, in this thesis the influence of changes in the AAS on the hydrological dynamics of the sub-basins was quantified. The AAS regulates the recession of flows in the basins and contributes in close to 85% of the minimum monthly flow and close to 57% of the average monthly flow.

Keywords: Hydrological modeling, Change in soil water storage, Groundwater, GRACE, flows.

Contenido

Pág.	
Resumen	VII
Abstract.....	VIII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XIV
Introducción	1
1. Zona de estudio	6
2. Datos, métodos y metodología	12
2.1 Datos	12
2.1.1 Precipitación IDEAM.....	12
2.1.2 Precipitación CHIRPS	15
2.1.3 Series de Caudal	16
2.1.4 Modelo Digital de Elevaciones	19
2.1.5 GRACE	20
2.2 Métodos.....	21
2.2.1 Modelo Hidrológico Agregado - MHA.....	21
2.2.2 Balance hídrico para el cálculo del AAS	24
2.3 Metodología.....	26
3. Variabilidad de la precipitación, la evaporación y los caudales en la zona de estudio	27
3.1 Variabilidad de la precipitación	27
3.2 Variabilidad de la evaporación real.....	30
3.3 Red de drenaje y variabilidad de caudales.....	33
4. Variabilidad temporal y espacial del cambio en el AAS: Cálculo mediante el MHA y BHCP	35
4.1 Calibración de modelos de hidrológicos agregados.....	36
4.2 Variabilidad mensual y ciclo anual del cambio en el AAS en las cuencas de la zona de estudio.....	48
4.2.1 Variabilidad temporal del cambio en el AAS en la subzona 1	52
4.2.2 Variabilidad temporal del cambio en el AAS en la subzona 2	57
4.2.3 Variabilidad temporal del cambio en el AAS en la subzona 3	60
4.2.4 Elementos adicionales sobre la variabilidad temporal del cambio en el AAS en las subzonas 1, 2 y 3	62

4.3	Variabilidad interanual y ciclo anual del cambio en el AAS y su relación con el ENSO en la zona de estudio.....	64
4.4	Comparación entre el cambio en el AAS del MHA y el EWT de GRACE.....	68
4.4.1	Cálculo de series de AAS para cada pixel.....	68
4.4.2	Comparación entre AAS y EWT para cada pixel.....	70
4.4.3	Comparación entre AAS y EWT para toda la zona de estudio.....	77
4.4.4	Resumen de los resultados de la comparación entre AAS y EWT a escala de pixel y regional.....	79
4.5	Variabilidad espacial del cambio en el AAS: Resultados de BHCP.....	82
5.	Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica de la zona de estudio	87
5.1	Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica: cuencas de la subzona 1.....	89
5.2	Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica: cuencas de la subzona 2.....	94
5.3	Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica: cuencas de la subzona 3.....	96
6.	Conclusiones y trabajos futuros	101
6.1	Conclusiones.....	101
6.2	Trabajos futuros	105
A.	Anexo: Variabilidad espacial del AAS a escala mensual para todas las cuencas de la zona de estudio.....	107
B.	Anexo: Variabilidad temporal del AAS a escala diaria agregado para la zona de estudio y en las cuencas.....	107
C.	Anexo: Variabilidad del EWT y su relación con la precipitación mensual	107
D.	Anexo: Variabilidad temporal del AAS en las 32 cuencas de la zona de estudio	108
E.	Anexo: Participación del AAS en la dinámica hidrológica de las cuencas de la zona estudio	108
	Bibliografía	109

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 Extensión del río Cauca desde su nacimiento en el Páramo de Sotará en el Alto Cauca hasta su desembocadura en el Bajo Cauca. (a) Río Cauca y subregiones de la cuenca; (b) Perfil longitudinal del río Cauca. Tomado de (Pérez-Valbuena et al., 2015) ..	6
Figura 2 Localización de la zona de estudio en el territorio colombiano. Cuencas de escorrentías definidas para la implementación de modelos hidrológicos agregados y cálculo de la variabilidad espaciotemporal del AAS. Elaboración propia.....	9
Figura 3 Procedimiento de filtrado y selección de estaciones de precipitación dentro de la zona de estudio tomando como base la ubicación de la estación, extensión de los registros y cantidad efectiva de datos disponibles. A y B criterios de selección, C, D y E red de estaciones de precipitación del IDEAM en la zona de estudio y estaciones seleccionadas para los cálculos del AAS.....	14
Figura 4 Ciclo anual de los caudales registrados en las estaciones hidrológicas sobre el río Cauca entre las estaciones La Virginia y Margento. Elaboración propia.....	18
Figura 5 Modelo digital de elevaciones para la zona de estudio. Elaboración propia.	19
Figura 6 Representación gráfica y conceptual del modelo hidrológico agregado. Adaptado a partir de Velásquez et al., (2023) y Velez, (2013)	22
Figura 7 (a) Balance de agua en la atmosfera, (b) Balance de agua en el suelo, (c) Balance de agua acoplado atmosfera-suelo. Elaboración propia a partir de (Taikan Oki et al., 1995)	24
Figura 8 Esquema de la metodología implementada para determinar la variabilidad espaciotemporal del cambio en el AAS y su participación en la dinámica hidrológica en las cuencas de la zona de estudio.	26
Figura 9 Variabilidad de la precipitación en la zona de estudio. Elaboración propia.	29
Figura 10 Evaporación real calculada mediante modelos hidrológicos agregados en cuencas de la zona de estudio. Elaboración propia.....	32
Figura 11 Variabilidad del caudal del río Cauca entre La Virginia Risaralda y Caucasia Antioquia. Elaboración propia.....	34
Figura 12 Balance de caudales en las estaciones hidrológicas ubicadas directamente sobre el río Cauca para la validación de la calibración de los modelos hidrológicos agregados implementados en las cuencas que conforman la zona de estudio.....	38
Figura 13 Calibración de modelos hidrológicos agregados y verificación de caudales en estaciones principales sobre el río Cauca.....	41
Figura 14 Distribución de los residuales resultantes de la comparación entre las series observadas y simuladas comparando la totalidad de la serie de caudales observados. La	

línea vertical negra indica el valor residual cero, la línea vertical verde indica el valor medio de los residuales y la línea vertical amarilla indica la mediana de los residuales. En las funciones de distribución acumulada la curva azul corresponde a la serie observada y la curva roja a la serie simulada..... 43

Figura 15 Distribución de los residuales resultantes de la comparación entre las series observadas y simuladas. La comparación es realizada para los caudales con probabilidad de excedencia mayor al 80% asociados al periodo de recesión o de estiaje. La línea vertical negra indica el valor residual cero, la línea vertical cian indica el valor medio de los residuales y la línea vertical magenta indica la mediana de los residuales. En las funciones de distribución acumulada la curva azul corresponde a la serie observada y la curva roja a la serie simulada..... 46

Figura 16 Subzonas empleadas para describir la variabilidad temporal del cambio en el AAS. El cambio en el AAS muestra un patrón de variabilidad similar en las cuencas que integran cada una de las subzonas, pero un comportamiento heterogéneo entre cuencas ubicadas en subzonas diferentes. (A) Subzona 1: cuencas ubicadas en el sector sur de la zona de estudio. (B) Subzona 2: cuencas ubicadas en el sector central de la zona de estudio. (C) Subzona 3: cuencas ubicadas en el sector norte de la zona de estudio. 50

Figura 17 Variabilidad mensual y ciclo anual del cambio en el AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 1 Cauca, Bretana La, Chupaderos y Pte Carretera. (A) variabilidad mensual interanual, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del cambio en el AAS, (D) correlación entre el AAS y la precipitación..... 54

Figura 18 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 4 Cauca, Quitasueño, Sinifaná y Campamento. (A) variabilidad mensual del AAS, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del AAS, (D) nivel de correlación entre el AAS y la precipitación..... 56

Figura 19 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Cangrejo El y VECE (Valle El – Cedral El). (A) variabilidad mensual del AAS, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del AAS, (D) nivel de correlación entre el AAS y la precipitación..... 59

Figura 20 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 7 Cauca, Área 8 Cauca, Área 9 Cauca y Las Camelias Aut. (A) variabilidad mensual del AAS, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del AAS, (D) nivel de correlación entre el AAS y la precipitación..... 61

Figura 21 Variabilidad mensual interanual e intranual del cambio en el AAS para la zona de estudio. Identificación de periodos con promedio positivo y negativo en el cambio del AAS. 65

Figura 22 Determinación de periodos con cambios sobre los promedios mensuales del AAS por efectos de El Niño y La Niña e identificación de periodos de recarga y descarga del AAS. 66

Figura 23 Variabilidad mensual intranual del cambio en el AAS de la zona de estudio para las fases cálida y húmeda del ENSO y la condición promedio. La selección de los periodos con las diferentes fases del ENSO se realizó empleando el índice MEI y la clasificación de El Niño en Colombia con base en las anomalías de la temperatura superficial en el océano pacífico tropical central, región Niño 3 (IDEAM, 2014).....	67
Figura 24 Pixeles de la misión satelital GRACE con influencia sobre la zona de estudio. (A): pixeles empleados en la comparación de EWT y AAS. (B): cuencas de la zona de estudio. 69	69
Figura 25 Comparación entre el AAS calculado con MHA y series de EWT de GRACE en los pixeles 1 al 8. (A) variabilidad mensual del AAS y el EWT. (B) series de AAS y EWT estandarizadas para el análisis de estacionalidad y desfase temporal.....	73
Figura 26 Comparación entre el AAS calculado con MHA y series de EWT de GRACE en los pixeles 9 al 13. (A) variabilidad mensual del AAS y el EWT. (B) series de AAS y EWT estandarizadas para el análisis de estacionalidad y desfase temporal.....	76
Figura 27 Comparación entre el AAS del MHA y el EWT de GRACE para la zona de estudio. 78	78
Figura 28 Variabilidad espacial del almacenamiento del agua en el suelo en condiciones climáticas promedio (ciclo anual).....	83
Figura 29 Variabilidad espacial del almacenamiento del agua en el suelo en condiciones El Niño	84
Figura 30 Variabilidad espacial del almacenamiento del agua en el suelo en condiciones La Niña	85
Figura 31 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 1 (parte 1). (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.....	91
Figura 32 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 1 (Parte 2). (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.....	93
Figura 33 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 2. (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.	95
Figura 34 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 3. (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.	97

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 Cuencas de drenaje definidas para la construcción de MHA y realización de BHCP. Elaboración propia.....	11
Tabla 2 Estaciones de caudal ubicadas en las cuencas tributarias y sobre el cauce del río Cauca entre las estaciones La Virginia y Margento. Elaboración propia.	18
Tabla 3 Parámetros principales involucrados en el funcionamiento del MHA.....	23
Tabla 4 Estaciones de medición de la evaporación administradas por el IDEAM en la zona de estudio. Elaboración propia.	30
Tabla 5 Eficiencia de la reproducción de caudal por parte de los MHA. Resultado de comparar las series simuladas y observadas de las cuencas tributarias hasta el sitio de las estaciones hidrológicas ubicadas sobre el río Cauca en la zona de estudio.	47
Tabla 6 Resumen de las cuencas y el porcentaje que ocupan dentro de cada uno de los pixeles empleados para la comparación del AAS del MHA y el EWT de GRACE	69
Tabla 7 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio. Porcentaje de la precipitación que se convierte en evaporación (%E/P), porcentaje de la precipitación que se convierte en escorrentía (%R/P), porcentaje de la precipitación que genera AAS (%AAS/P), porcentaje de caudal aportado desde el AAS al caudal mínimo de cada mes (%fb/Qmin) y porcentaje de caudal aportado desde el AAS al caudal medio mensual (fb/Qmed). Elaboración propia.....	88

Introducción

El almacenamiento del agua en el suelo -AAS- forma parte del proceso de retroalimentación entre la precipitación, la escorrentía y la evapotranspiración dentro del ciclo hidrológico (Ridolfi et al., 2003). En términos de estado del arte, variables como la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía han sido abordadas con mayor frecuencia y alcance que el AAS en el estudio de la hidrología y climatología en Colombia.

El AAS tiene el mayor rezago en cuanto a la construcción de un estado del arte sobre su variabilidad espaciotemporal en el territorio colombiano y su incidencia en las cuencas hidrográficas del país. No se desconoce los avances y estudios en materia de agua subterránea realizados a la fecha en el país, y el esfuerzo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que actualmente lidera una iniciativa para construir una red nacional de monitoreo hidrogeológico. Sin embargo, el alcance de la iniciativa está fuertemente limitado por la dispersión e insuficiencia de los estudios que se tienen (Bolaños Chavarría, 2020).

De manera reciente se han adelantado contribuciones en el estudio del AAS a nivel global, a partir del análisis de la interacción entre el cambio del AAS con la evaporación y la precipitación. Estudios como los realizados por Berg & Sheffield, (2018), Santanello et al., (2018), Vicente-Serrano et al., (2018) fueron enfocados en explicar la interacción del cambio en el AAS y la humedad del suelo con la evaporación y la precipitación. Otras investigaciones tienen como objetivo determinar la variabilidad del AAS (Matthew Rodell et al., 2006), determinar cambios estacionales y en la escala interanual de niveles de agua en acuíferos (Bonsor et al., 2018) y la estimación de flujos aportados desde el almacenamiento subterráneo a las corrientes (Tourian et al., 2018).

A nivel de Suramérica es posible resaltar los hallazgos sobre el AAS de algunos trabajos enmarcados en la escala global. Investigaciones como las realizadas por Guntner et al., (2007), Humphrey et al., (2016) y de Linage et al., (2013) abarcan una escala continental y global. Sin embargo, una parte importante de dichos trabajos se centra en describir la estacionalidad del cambio en el AAS en el trópico Suramericano, en establecer la relación entre el cambio del AAS y la precipitación, y en determinar la influencia del ENSO sobre la variabilidad interanual del cambio en el AAS.

Analizando a escala global los cambios en el AAS simulados con el Modelo Hidrológico Global Watergap (WGHM por sus siglas en inglés) para el periodo 1961 – 1995, Guntner et al., (2007) determinaron que en las zonas tropicales, en particular el trópico Suramericano, la variación estacional del cambio en el AAS es controlada por el ciclo anual

de la precipitación, mientras que las variaciones interanuales están asociadas con oscilaciones de gran escala como la de El Niño Oscilación del Sur (ENSO).

Para cuencas fluviales grandes como la del río Amazonas, Güntner et al., (2007) también determinaron que, el rezago de los cambios en el almacenamiento de agua subterránea respecto a la precipitación es mayor que el rezago de los cambios en el almacenamiento agua subsuperficial. Lo anterior es explicado por el mayor tiempo que le toma al agua en llegar desde la superficie terrestre hasta recargar el agua subterránea.

Humphrey et al., (2016) evaluaron las características dominantes de la variabilidad del espesor de agua equivalente (EWT por sus siglas en inglés) de la misión satelital GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) a escala global. Humphrey et al., (2016) examinaron las principales características de la variabilidad temporal del EWT mediante la descomposición de series temporales en tendencias lineales, componentes interanuales, estacionales e intranuales, encontrando, entre otras cosas, que en las regiones tropicales ecuatoriales el ciclo estacional de la precipitación generalmente precede las variaciones del AAS con un rezago temporal de uno a dos meses.

También a partir de un análisis de espectros y correlaciones cruzadas entre registros de EWT de GRACE en la zona tropical de America del Sur y siete índices climáticos asociados a la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico Ecuatorial y el Atlántico Tropical, de Linage et al., (2013) identificaron que en la escala interanual la variabilidad del EWT en la parte norte de suramérica está influenciada principalmente por el ENSO, mientras que las regiones amazónicas central y occidental están más influenciadas por las temperaturas superficiales del mar en el Atlántico Tropical.

En Suramerica la comprensión del AAS también proviene de estudios enmarcados en mayor medida en la cuenca del río Amazonas, entre ellos, los aportes de Marengo, (2005), Carmona, (2015) y Jaramillo, (2017). Marengo, (2005) encontró que en periodos de pocas lluvias y condiciones extremas, tal como las presentadas durante El Niño de 1983, la cuenca aportó humedad al sistema hídrico, haciendo notar que en el costado sur de la cuenca los desbalances son mayores que en el sector norte.

Por su parte, Carmona, (2015) analizó la variabilidad espacio temporal del cambio en el AAS empleando balances hídricos de corto plazo con resolución mensual, calculados a partir de información puntual y distribuida de diferentes fuentes. Carmona, (2015) encontró que el almacenamiento tiene un comportamiento heterogéneo dentro de la cuenca y observó que las mayores diferencias se presentan entre los sectores noroeste y suroeste de la cuenca, lo anterior en concordancia con los desbalances reportados por Marengo, (2005).

En la misma vía de Marengo, (2005) y Carmona, (2015) y con el objetivo de entender la variabilidad del AAS en la cuenca del río Amazonas, Jaramillo, (2017) aportó otras explicaciones sobre el cambio en el AAS de la cuenca del río Amazonas. A partir de cálculos de balances de agua en el suelo, Jaramillo, (2017) considera que las posibles causas del no cierre en los balances en la cuenca pueden provenir de la deficiencia en la

calidad de los datos, longitud de los registros de las variables, cambios en el AAS, entre otras.

A nivel del territorio colombiano se han realizado estudios sobre el cambio en el AAS bajo diferentes contextos, como se discute a continuación.

Giraldo & Poveda, (2013) estudiaron la variabilidad espaciotemporal del AAS, la precipitación y su relación respecto al ENSO en las regiones climáticas Caribe, Pacífica, Andina, Orinoquía y Amazonía. En esta investigación se utilizaron las series de tiempo de EWT de la misión satelital GRACE, datos de almacenamiento de agua en el suelo obtenido del reanálisis climático del NCEP/NCAR así como los datos de precipitación de la misión TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Entre sus resultados está determinar que el ciclo anual de EWT y la humedad del suelo responden en forma rezagada (entre uno y dos meses) a la precipitación y la respuesta inversa del EWT con las variaciones del ONI.

Mogollón, (2017) también utilizó información satelital de GRACE para estudiar la variación espaciotemporal del cambio en el AAS y su interacción con el clima, tomando como zona de estudio las cuencas de los ríos Magdalena y Orinoco. Como parte de los resultados de la investigación observó coherencia entre la variación promedio mensual de la precipitación y el cambio en el AAS.

Bolaños Chavarría et al., (2018) utilizaron información de estaciones hidrológicas del IDEAM y productos como TRMM, GPCC (*Global Precipitation Climatology Centre*), MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) y GLEAM (*Global Land Evaporation Amsterdam Model*) para determinar la consistencia de los datos de GRACE en la cuenca del río Magdalena al compararlos con los resultados de balances hídricos. Como parte de los resultados de la investigación observaron que desde el 2011 se presenta una tendencia negativa en el almacenamiento total de agua (TWS por sus siglas en inglés), haciendo énfasis en la parte baja de la cuenca.

Entendiendo que en la actualidad los modelos son una herramienta poderosa para apoyar los estudios hidrológicos, Bolaños et al., (2022) evaluaron la confiabilidad de seis modelos hidrológicos globales, cuatro modelos de superficie terrestre y la información de agua en el suelo de GRACE para determinar que tan bien representan la dinámica del AAS en la cuenca del río Magdalena, cuenca clasificada como tropical de tamaño mediano. Una de las conclusiones principales del estudio es que los modelos representan pobremente la variabilidad mensual del AAS, sin embargo, muestran mejores resultados en la representación de la estacionalidad y las tendencias de largo plazo.

Bolaños et al., (2022) también resaltan la importancia de la escala de la cuenca en la representación del cambio en el AAS por parte de los modelos. Para cuencas con extensiones inferiores a 60.000 km² encontraron una marcada reducción en el rendimiento de los modelos que reproducen el TWS y las observaciones de GRACE.

En comparación con las regiones y cuencas estudiadas en las investigaciones mencionadas anteriormente, la zona de estudio de la presente tesis (conformada por los

sectores Cauca Medio y Bajo Cauca de la cuenca del río Cauca), representa un área geográfica reducida. La extensión de dicha zona dificulta describir de forma detallada la variabilidad espaciotemporal del AAS empleando fuentes de información como GRACE y los modelos hidrológicos de gran escala como los evaluados por Bolaños et al., (2022).

Por lo anterior, y en aras de aportar al entendimiento del funcionamiento del AAS en las regiones Cauca Medio y Bajo Cauca de la cuenca del río Cauca, en esta tesis se implementa una metodología de simulación hidrológica que permite describir en forma detallada la variabilidad del cambio en el AAS a escala de cuencas pequeñas y regionales.

La metodología explora el valor de la información meteorológica e hidrológica primaria, la inclusión de información secundaria y el poder predictivo de un modelo hidrológico agregado a escala de cuencas, en la reproducción espacial y temporal del cambio en el AAS. Tanto el cálculo como el análisis del cambio en el AAS ha sido realizado considerando que dichos cambios responden a la dinámica hidrológica natural de las cuencas.

El objetivo principal de esta investigación es entender el funcionamiento del AAS y su participación en la dinámica hídrica de la cuenca del río Cauca, empleando series de AAS calculadas a partir de la implementación de modelos hidrológicos agregados (MHA) en las cuencas que conforman el área de estudio y el cálculo de la distribución espacial del AAS con balances hídricos de corto plazo (BHCP) con resolución mensual.

El cálculo del cambio en el AAS mediante BHCP y la implementación de los MHA se llevó a cabo para el periodo comprendido entre los años 1990 y 2009, empleando información de la red de estaciones climáticas e hidrológicas del IDEAM y mapas de lluvia del *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS). La definición del periodo 1990 a 2009 es el resultado de la selección, procesamiento y filtrado de la información de precipitación y caudal disponible en la red de medición del IDEAM, de cara a la implementación de los modelos hidrológicos agregados. Este periodo abarcara la mayor cantidad de estaciones de caudal y precipitación con la mayor cantidad de datos disponibles en cada estación.

Una limitación del trabajo es la disponibilidad de datos primarios de evaporación real, en su lugar se empleó la evaporación real calculada con el MHA y esta última fue calculada con la expresión de evaporación potencial presentada por Chaves & Jaramillo, (1998). La evaporación real obtenida con el MHA muestra una variabilidad acorde a las condiciones hidrológicas de cada una de las cuencas.

En términos metodológicos el alcance de esta investigación contempla la implementación del MHA en las cuencas instrumentadas de la zona de estudio y la calibración de dichos modelos con base en la información de caudales medios diarios de las cuencas. Una vez implementados y calibrados los MHA se obtiene la variabilidad temporal del cambio en el AAS integrando el agua de los almacenamientos subsuperficial y subterráneo. El cálculo de mapas con la variabilidad espacial del cambio en el AAS es realizado aplicando BHCP. La precipitación del BHCP se obtuvo de las estaciones meteorológica, la evaporación real

del MHA y la escurrentía se calculó a partir del registro de caudales de las estaciones hidrológicas. También forma parte del alcance de la presente investigación evaluar el rendimiento de las observaciones de la misión Satelital GRACE en cuanto a la reproducción de la variabilidad temporal del cambio en el AAS mediante sus series mensuales de EWT.

Esta tesis aporta a la construcción del estado del arte del AAS en la cuenca del río Cauca y pretende incentivar el estudio del AAS en las diferentes cuencas hidrográficas del país. Un mayor entendimiento del funcionamiento del AAS y su rol en la hidrología permitirá a la comunidad científica, entidades gubernamentales y tomadores de decisiones, establecer estrategias y medidas orientadas a la protección de las cuencas hidrográficas.

Este documento cuenta con una introducción y seis capítulos estructurados de la siguiente manera: la introducción presenta antecedentes del estudio del AAS en el trópico Suramericano y en Colombia, así como el objetivo y alcance de la investigación. El capítulo 1 contiene la descripción del área de estudio y los criterios empleados para su delimitación.

En el capítulo 2 se presentan las bases de datos empleadas en el cálculo del cambio en el AAS, se detalla la longitud de las series de tiempo y la extensión espacial de las variables distribuidas, se describe la metodología implementada para el uso conjunto de información puntual y distribuida de precipitación y se explica el funcionamiento del MHA y el BHCP. En este capítulo también se presenta y describe la metodología de simulación hidrológica implementada en esta tesis para describir la variabilidad del cambio en el AAS a escala de cuenca.

En el capítulo 3 se describen los principales elementos de la climatología que condicionan el comportamiento hidrológico en la cuenca del río Cauca, y se describe la variabilidad climática e hidrológica en la zona de estudio.

El capítulo 4 contiene los resultados principales de la investigación, ello es, las series de tiempo del cambio en el AAS calculadas con el MHA y los mapas con la variabilidad espacial calculados con el BHCP. Se describe la variabilidad espaciotemporal del cambio en el AAS en la zona de estudio, se comparan los resultados del MHA con las series de EWT de GRACE y se describe la relación entre el cambio del AAS y la precipitación, así como la incidencia del ENSO sobre la variabilidad interanual y estacional del cambio en el AAS.

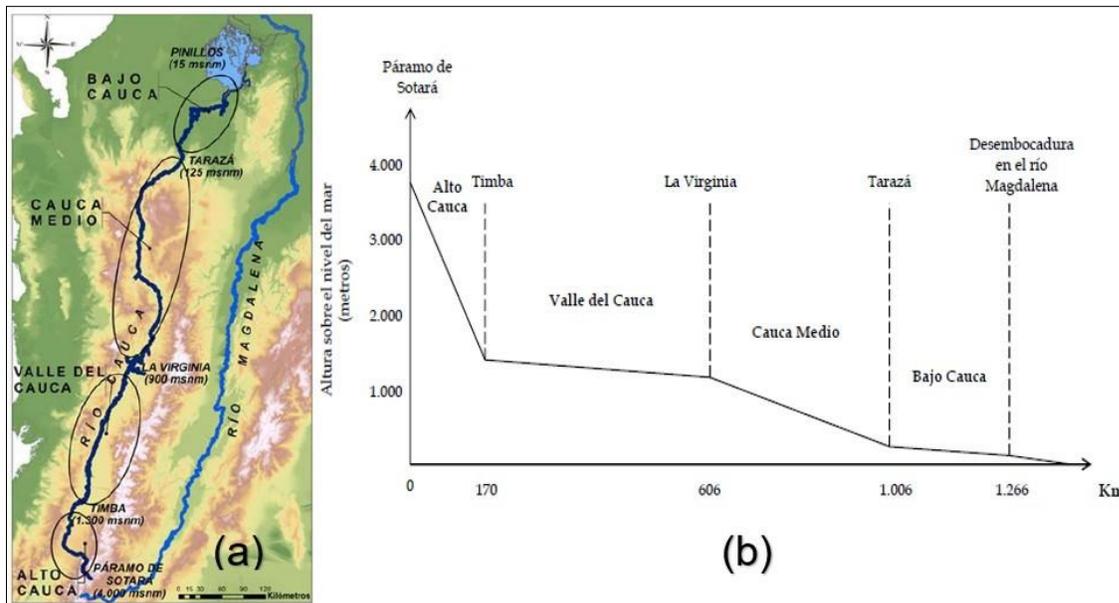
En el capítulo 5 se explica el rol del cambio en el AAS dentro de la dinámica hídrica de la zona de estudio y, por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de la investigación y algunos trabajos futuros que pueden aportar en el entendimiento del funcionamiento del AAS en cuencas hidrográficas.

1. Zona de estudio

El río Cauca forma parte del sistema fluvial Magdalena-Cauca y representa el segundo río de mayor importancia en Colombia. La cuenca de drenaje queda enmarcada entre las cordilleras central y occidental con el cauce principal extendiéndose 1.350 km desde su nacimiento en la cota 3.900 m.s.n.m en el Páramo de Sotará en el departamento de Cauca, hasta su desembocadura en el Brazo de Loba del río Magdalena en el municipio de Pinillos en el departamento de Bolivar, en una elevación cercana a los 15 m.s.n.m (Figura 1a) (Pérez-Valbuena et al., 2015).

En su extensión la cuenca del río Cauca intercepta las regiones Pácnica, Andina y Caribe y se generan cuatro zonas características en la cuenca: Alto Cauca, Valle del Cauca, Cauca Medio y Bajo Cauca, (Figura 1b). La mayor parte de la superficie de la cuenca está sobre la región Andina, región que por sus características montañosas presenta una diversidad de climas causados por la variación de pisos térmicos (Jaramillo-Robledo, 2005).

Figura 1 Extensión del río Cauca desde su nacimiento en el Páramo de Sotará en el Alto Cauca hasta su desembocadura en el Bajo Cauca. **(a)** Río Cauca y subregiones de la cuenca; **(b)** Perfil longitudinal del río Cauca. Tomado de (Pérez-Valbuena et al., 2015)



A lo largo de la cuenca del río Cauca se han desarrollado y fortalecido diversos sectores económicos en el país, entre los que se encuentran la generación de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas y la producción agrícola.

En jurisdicción de los municipios de Suarez y Morales en el departamento del Cauca se encuentra el proyecto de regulación del río Cauca con el embalse Salvajina, proyecto del cual forma parte la central hidroeléctrica Salvajina con una generación de energía de 285 MW. El embalse de agua tiene una capacidad de 960 Mm³ y una longitud aproximada de 31 km (CELSIA, 2022). El objetivo principal de la construcción del embalse Salvajina fue la recuperación de cerca de 100.000 hectáreas de zonas planas en el Valle del Cauca afectadas por las inundaciones del río Cauca, y con la recuperación de dichas zonas contribuir al desarrollo económico y social de la región Vallecaucana (INGETEC - INESCO, 1974; Montoya Hernandez, 1996).

La entrada en operación del embalse ha generado cambios en la dinámica hídrica natural de la cuenca alta del río Cauca (Alto Cauca). Durante su operación el embalse Salvajina ha modificado mediante regulación el régimen de caudales mínimos, medios y máximos del río Cauca en la zona del Valle Alto (Ramirez Callejas et al., 2010). Dado a que la ocurrencia de caudales en una cuenca es un proceso que, además de la precipitación también depende de las condiciones de humedad del suelo, la presencia de un embalse supone cambios sobre la dinámica hidrológica de una zona debido a cambios forzados en la humedad del suelo entre otros aspectos.

Si bien Ramirez Callejas et al., (2010) lograron determinar la incidencia del embalse Salvajina sobre el régimen de caudales del río Cauca en su valle alto, se desconocen los cambios originados por el embalse sobre la dinámica natural del AAS. Sin embargo, estudios como los realizados por Men et al., (2019); Nehls & Wessolek, (2011); Santiago do Vale et al., (2013); L. Sun et al., (2021); Wei et al., (2021) muestran cambios sobre los niveles de agua subterránea en la cuenca de los embalses, sumado a cambios sobre procesos del ciclo hidrológico como la evaporación y la precipitación a escala local e incluso regional.

El cambio sobre los caudales medios y mínimos en las regiones del Valle Alto y Alto Cauca, así como el comprobado cambio de los niveles de agua en el suelo debido a la presencia de embalses, son temas que afectan la variabilidad del AAS en la cuenca alta del río Cauca. Abordar el estudio del AAS en la cuenca alta del río Cauca implica realizar un análisis minucioso de los impactos del embalse Salvajina sobre la dinámica natural del agua superficial y subterránea de la cuenca alta del río Cauca, temática que se encuentra por fuera del alcance de este trabajo de investigación, por lo tanto, la zona objeto de estudio de este documento no incluye las regiones del Alto y Valle Alto del Cauca (ver Figura 1a).

Por otro lado, en el valle geográfico del río Cauca se ha producido una persistente y amplia modificación de la dinámica hidrológica y del ecosistema aluvial asociado al río Cauca y sus principales afluentes, mediante la ampliación de la frontera agrícola de la caña, materia prima del sector económico agroindustrial del Valle del Cauca (Uribe Castro, 2017). Desde

los primeros asentamientos en la región del Valle del Cauca hasta la actualidad con la fuerte presencia del urbanismo y la agroindustria, los ecosistemas hídricos han sido intervenidos para cubrir la demanda de agua de los diferentes sectores de la sociedad del Valle del Cauca.

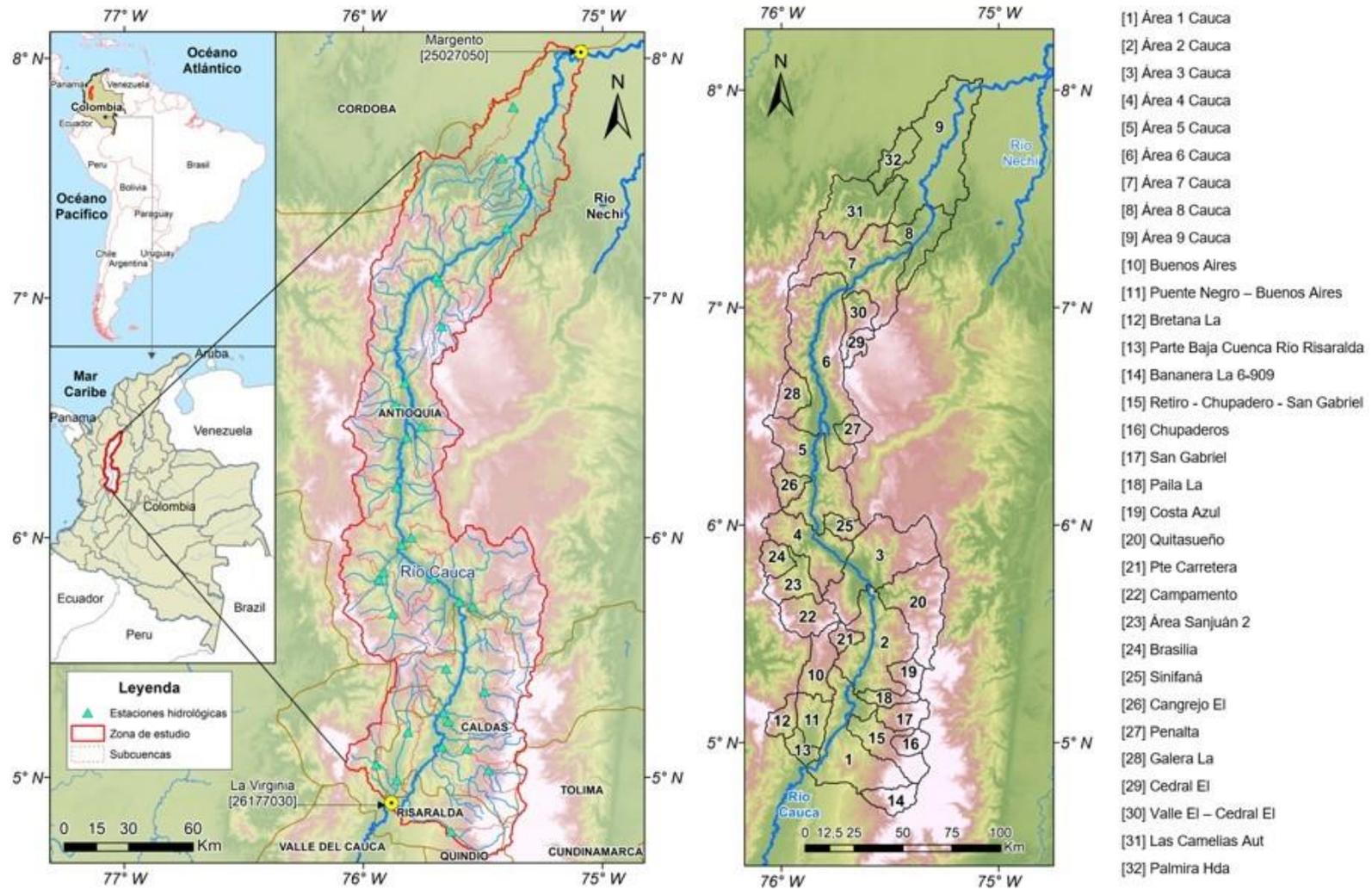
Parte de la demanda de agua de los diferentes sectores poblacionales y económicos en Valle del Cauca es cubierta empleando agua subterránea, mediante el sistema de concesiones de agua regulado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). A pesar de que la demanda de agua para el abastecimiento es suplida de manera conjunta con fuentes superficiales y subterráneas, existe una fuerte presión sobre los acuíferos aluviales por la extracción de grandes volúmenes de agua para usos agroindustriales y diversos sectores económicos.

La extracción del recurso hídrico subterráneo para satisfacer necesidades humanas altera la dinámica natural del AAS y su interacción con otros elementos del ciclo hidrológico. Evaluar la dinámica del AAS mediante la metodología que se propone en este documento supone valorar inicialmente los cambios del AAS asociados a los volúmenes totales de agua extraídos del sistema aluvial, sumándose a lo anterior una evaluación del reingreso de agua al suelo por efectos del riego y las implicaciones de esta actividad sobre la evapotranspiración de la zona. No forma parte del alcance de este trabajo de investigación cuantificar los cambios o la incidencia de la explotación de agua subterránea y el riego sobre el AAS, y su impacto sobre la dinámica hídrica de las llanuras aluviales y ríos receptores del aporte del AAS. Por lo anterior, la subregión del Valle del Cauca que se muestra en la Figura 1a es excluida del análisis de este documento.

Una vez excluidas las regiones del Alto Cauca y Valle del Cauca, la zona de estudio sobre la cual se centra la atención de esta investigación corresponde a la cuenca de drenaje del río Cauca que se genera entre los municipios de La Virginia en el departamento de Risaralda y el municipio de Caucasia en el departamento de Antioquia. En la Figura 2 se presentan mapas con la localización del área de estudio en un contexto continental y nacional, así como las cuencas de drenaje que conforman la zona de estudio y que cuentan con instrumentación hidrológica.

En la Figura 2 el mapa de la derecha muestra las 32 cuencas (o subcuencas) de drenajes definidas a partir de la ubicación de la red de estaciones de caudal del IDEAM, cuencas sobre las que fueron implementados los MHA y los BHCP. En el extremo sur de la zona de estudio se toma como punto de medición de caudales sobre el río Cauca la estación limnográfica La Virginia (26177030) ubicada en el municipio de La Virginia. En el sector del Bajo Cauca y representando la salida de la zona de estudio se encuentra la estación Margento (25027050) en jurisdicción del municipio de Caucasia. La zona de estudio tiene una extensión aproximada 20.593 km² con una longitud aproximada del cauce principal de 510 km.

Figura 2 Localización de la zona de estudio en el territorio colombiano. Cuencas de escorrentías definidas para la implementación de modelos hidrológicos agregados y cálculo de la variabilidad espaciotemporal del AAS. Elaboración propia.



La Tabla 1 presenta para cada una de las cuencas de la zona de estudio el nombre designado, la corriente, la estación de caudal, el área de drenaje y la región en la que se encuentra ubicada. Cabe anotar que, las cuencas interceptadas directamente por el río Cauca corresponden a áreas de drenajes calculadas a partir de la resta de las cuencas tributarias al río Cauca que cuentan con estaciones de caudal y la cuenca hasta el sitio de la estación de caudal sobre el río Cauca. Cada una de las cuencas interceptadas por el río Cauca cuentan en su entrada y salida con una estación de caudal, estaciones con las que fue evaluado el rendimiento de los MHA en cuanto a la reproducción de los caudales de las 32 cuencas que conforman el área de estudio.

Es importante mencionar que la cuenca nombrada como Área Sanjuán 2 en la Tabla 1 y en la Figura 2, es el resultado de restar a la cuenca Remolino El, el aporte de las cuencas Campamento y Brasília. Al igual que en el caso de la cuenca Área Sanjuán 2, las cuencas Pte_negro_BuenosAires, Retiro-Chupadero-San_Gabriel y Valle El-Cedral_El también son el resultado de restar áreas de drenaje entre estaciones de caudal.

La cuenca Pte_negro_BuenosAires (véase cuenca 11 en la Figura 2) es el resultado de restar la cuenca que se genera en el río Risaralda hasta la estación Buenos Aires a la cuenca que se genera en el mismo río hasta la estación Puente Negro; para efectos de comprensión lectora, en adelante la cuenca Pte_negro_BuenosAires será nombrada en el documento como PNBA.

La cuenca Retiro-Chupadero-San_Gabriel (véase cuenca 15 en la Figura 2) es el resultado de restar las cuencas Chupaderos (cuenca alta del río Chinchiná) y San Gabriel (cuenca alta y media del río Guacaica) a la cuenca Retiro (cuenca del río Chinchiná hasta su descarga en el río Cauca). En adelante la cuenca Retiro-Chupadero-San_Gabriel será nombrada como RCSG.

La cuenca Parte Baja cuenca río Risaralda (véase cuenca 13 en la Figura 2) es el resultado de restar las cuencas Buenos Aires, PNBA y Bretana La a la cuenca del río Risaralda hasta su desembocadura en el río Cauca. En adelante la cuenca Parte Baja cuenca río Risaralda será nombrada como PBCR.

Por último, la cuenca Valle El-Cedral_El (véase cuenca 30 en la Figura 2) es el resultado de restar a la cuenca Valle El que se genera sobre el río San Andrés cerca de su desembocadura en el río Cauca, la cuenca Cedral El que se genera en la parte alta del río San Andrés. En adelante la cuenca será nombrada como VECE.

También es importante mencionar que, con excepción de las cuencas interceptadas por el cauce del río Cauca, el nombre adoptado para las cuencas de la zona de estudio corresponde al nombre de la estación de caudal que se encuentra en la salida, esto con el objetivo de facilitar la localización de la cuenca dentro de la zona de estudio.

Tabla 1 Cuencas de drenaje definidas para la construcción de MHA y realización de BHCP.
Elaboración propia.

Subcuenca	Corriente	Estación caudal	Área [km ²]	Región
Área 1 Cauca	Cauca	Irra **	1.386,9	Cauca Medio
Área 2 Cauca	Cauca	La Pintada **	1.326,0	Cauca Medio
Área 3 Cauca	Cauca	Pte Iglesia **	1.464,4	Cauca Medio
Área 4 Cauca	Cauca	Bolombolo **	871,0	Cauca Medio
Área 5 Cauca	Cauca	Cañafisto **	1.293,9	Cauca Medio
Área 6 Cauca	Cauca	Puente Pescadero **	2.237,4	Cauca Medio
Área 7 Cauca	Cauca	Pto Valdivia **	1.507,8	Bajo Cauca
Área 8 Cauca	Cauca	Apavi **	618,0	Bajo Cauca
Área 9 Cauca	Cauca	Margento **	1.879,4	Bajo Cauca
Área Sanjuán 2	Sanjuán	*	410,3	Cauca Medio
BANANERA LA 6-909	Otún	BANANERA LA 6-909	284,1	Cauca Medio
Brasilia	Bolívar	Brasilia	242,2	Cauca Medio
BRETANA LA	Mapa	BRETANA LA	235,2	Cauca Medio
BUENOS AIRES	Risaralda	BUENOS AIRES	475,9	Cauca Medio
Campamento	Sanjuán	Campamento	465,4	Cauca Medio
Cangrejo El	San Martín	Cangrejo El	233,8	Cauca Medio
Cedral El	San Andrés	Cedral El	158,7	Cauca Medio
Chupaderos	Chinchiná	Chupaderos	180,7	Cauca Medio
Costa Azul	Chamberí	Costa Azul	208,9	Cauca Medio
Galera La	Tonusco	Galera La	317,2	Cauca Medio
Las_Camalias_Aut	Tarazá	Las Camalias Auto	959,1	Bajo Cauca
Paila La	Tápias	Paila La	189,7	Cauca Medio
Palmira Hda	Man	Palmira Hda	344,3	Bajo Cauca
Parte baja cuenca río Risaralda	Risaralda	*	178,5	Cauca Medio
Penalta	Aurrá	Penalta	192,1	Cauca Medio
Pte Carretera	Supia	Pte Carretera	148,4	Cauca Medio
Pte_negro_BuenosAires	Risaralda	*	370,3	Cauca Medio
Quitasueño	Arma	Quitasueño	1.038,6	Cauca Medio
Retiro-Chupadero- San_Gabriel	Chinchiná	*	561,1	Cauca Medio
San Gabriel	Guacaica	San Gabriel	304,9	Cauca Medio
Sinifaná	Sinifaná	Rodadero El	185,5	Cauca Medio
Valle El-Cedral_El	San Andrés	Valle El	323,6	Cauca Medio

*Cuenca con serie de caudal generada a partir de modelo hidrológico agregado y calibrado mediante balance de caudales en cuenca mayor sobre la que descarga.

**Cuenca con serie de caudal generada mediante modelo hidrológico agregado y calibrada a partir del balance de caudal a lo largo del cauce principal del río Cauca.

2. Datos, métodos y metodología

En este trabajo de investigación se empleó información de precipitación de estaciones meteorológica, precipitación distribuida proveniente de estimaciones basadas en información satelital y estaciones en tierra, e información de caudal de estaciones hidrológicas ubicadas en la red hidrográfica de la zona de estudio. La información de precipitación y de caudales fue empleada para reproducir el comportamiento hidrológico y la variabilidad espaciotemporal del cambio en el AAS en las cuencas.

2.1 Datos

La información puntual de precipitación y caudales corresponde a los registros de las estaciones consultadas en el portal web Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos, DHIME (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>) del IDEAM.

Adicional a la información puntual de las estaciones en tierra, para el cálculo de la precipitación también se empleó información espacialmente distribuida estimada por el *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*, CHIRPS v.2.0 (Funk et al., 2015). En cuanto a información del almacenamiento del agua en el suelo se emplearon los mapas de espesor equivalente de agua en el suelo de la misión satelital *Gravity Recovery and Climate Experiment*, GRACE (M. Rodell & Famiglietti, 2001).

2.1.1 Precipitación IDEAM

La red de medición de precipitación en el territorio colombiano está conformada por 3.091 estaciones, de las cuales 173 se encuentran en la zona de estudio y de estas últimas el 51% se encuentran activas y el 49% inactivas. En la zona de estudio las estaciones son de tipo Agrometeorológica AM (1,8%), Climatológica Ordinaria CO (17,4%), Climatológica Principal CP (11%), Meteorológica ME (1,1%), Pluviográfica PG (5,5%), Pluviómetrica PM (61,4%) y Sinóptica Principal SP (1,8%).

Previo al uso de la información de las estaciones ubicadas en el interior de la zona de estudio se realizó un proceso de selección de estaciones empleando como criterios la longitud del registro, el porcentaje de datos disponibles y el periodo de los registros. En la Figura 3 se presenta un mosaico de mapas y gráficos con el procedimiento de selección de las estaciones de precipitación.

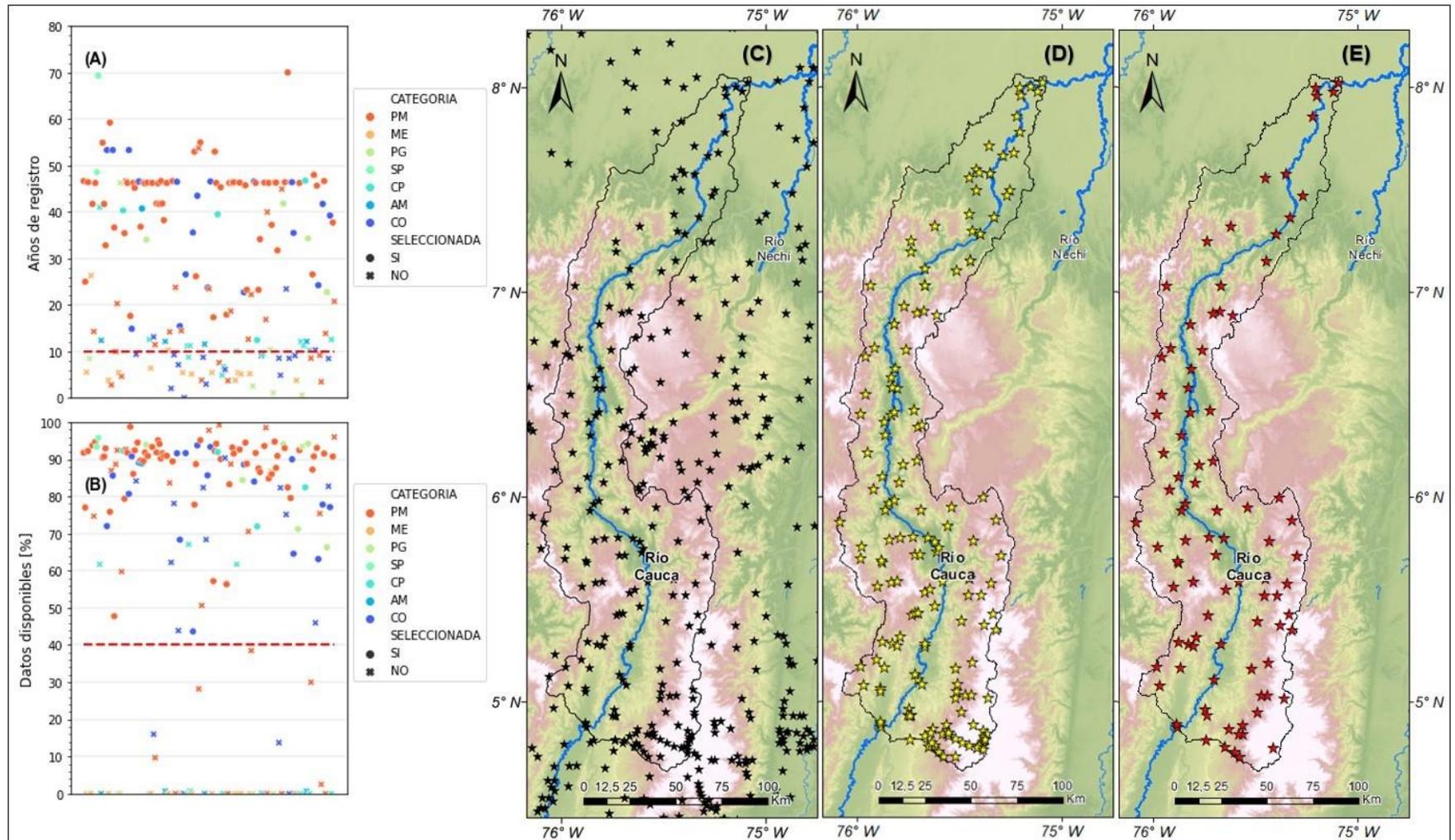
La Figura 3A muestra el periodo de los registros de cada una de las 173 estaciones de la zona de estudio, identificando para cada estación si fue o no seleccionada para su uso en el cálculo del AAS y el tipo de estación meteorológica; a lo anterior se suma la demarcación del umbral de 10 años con una línea horizontal roja, umbral que representa la cantidad mínima de años de registro aceptable. La Figura 3B muestra el porcentaje de datos que contiene cada estación, así como su aceptación o rechazo para ser empleada en el cálculo del AAS. En este criterio de selección se fijó como umbral de aceptación (línea horizontal roja) registros con al menos el 40% de datos disponibles desde la instalación de la estación.

Es importante mencionar que durante la aplicación de los criterios anteriores se logró determinar que el periodo que permite emplear la mayor cantidad de estaciones es el comprendido entre los años 1990 y 2009. Por lo anterior algunas de las estaciones que se encuentran por encima de los umbrales de aceptación han sido descartadas (marcadores tipo x), es decir, estaciones cuyos registros se encuentran por fuera del periodo de análisis.

En el mapa de la Figura 3C se presenta la distribución espacial de las estaciones de precipitación disponibles en la zona de estudio y sus alrededores, la Figura 3D contiene el mapa con la distribución espacial de las 173 estaciones que se encuentran al interior de la zona de estudio, y por último la Figura 3E contiene el mapa donde se muestran las 93 estaciones de precipitación seleccionadas como resultado de la aplicación de los diferentes criterios de selección.

Dentro del grupo de estaciones seleccionadas el 88% corresponde a estaciones activas mientras que el 12% se encuentran inactivas. Las estaciones se ubican entre los departamentos de Risaralda, Caldas y Antioquia y abarcan altitudes entre los 17 m s.n.m y los 3.341 m s.n.m.

Figura 3 Procedimiento de filtrado y selección de estaciones de precipitación dentro de la zona de estudio tomando como base la ubicación de la estación, extensión de los registros y cantidad efectiva de datos disponibles. A y B criterios de selección, C, D y E red de estaciones de precipitación del IDEAM en la zona de estudio y estaciones seleccionadas para los cálculos del AAS.



2.1.2 Precipitación CHIRPS

Para cubrir las zonas sin cobertura espacial de las estaciones de precipitación del IDEAM y completar los registros de precipitación faltantes en las series, se empleó la información de precipitación de la base de datos *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*, CHIRPS v.2.0. CHIRPS es una base de datos de precipitación distribuida con resolución espacial de 0,05° de arco y resolución temporal diaria, mensual y anual, creada por el *U.S. Geological Survey* (USGS) y *University of California, Santa Barbara* (UCSB) y puesta a disposición del público en el año 2014 (Funk et al., 2015).

CHIRPS cuenta con cobertura espacial para todas las longitudes y en el caso de las latitudes se encuentra acotada entre 50°S y 50°N. Esta base de datos cuenta con registros desde el año 1981 hasta la actualidad y la información puede ser consultada y descargada en el portal web <https://www.chc.ucsb.edu/data>.

La red de estaciones de precipitación instaladas en tierra por el IDEAM representa a la fecha la mejor forma de medición directa de la precipitación en la zona de estudio. Sin embargo, la medición mediante estaciones presenta limitaciones en la cobertura espacial e intermitencia en la continuidad de los registros (Urrea, 2017).

La implementación de los MHA requiere el ingreso de series de precipitación sin datos faltantes, lo que hace necesario emplear técnicas de completes para determinar la información faltante en los registros de las estaciones. Algunos métodos como el de la regresión lineal, razón de distancia, inverso de la distancia al cuadrado, entre otros, generan buenas aproximaciones cuando existe correlación espacial positiva y cercanía entre las estaciones involucradas en el procedimiento de completes (Teegavarapu & Chandramouli, 2005). Sin embargo, en el territorio colombiano es común encontrar estaciones meteorológicas ampliamente distante de otras y reflejando comportamientos climáticos propios de una zona y sumamente diferente de otros sitios.

Urrea, (2017) determinó que la base de datos CHIRPS reproduce de manera acertada la estacionalidad de la lluvia en gran parte del territorio colombiano, especialmente en la región Andina. También evidenció que CHIRPS reproduce las variaciones en el comportamiento de la precipitación en condiciones medias, al cambiar de posición geográfica, y en cuanto a las cantidades de lámina de agua acumulada en la región Andina se presentan sobrestimaciones no superiores al 4% en las estaciones que realizó la validación. En el análisis comparativo realizado por Urrea, (2017) se encontraron mejores resultados para las resoluciones mensual y anual.

Con base en los resultados de Urrea, (2017) sobre la representación de la lluvia en Colombia por CHIRPS, especialmente para la zona Andina, en este trabajo se construyó una metodología para realizar el cálculo de datos faltantes en las estaciones de precipitación del IDEAM, y con ello poder tener las series completas de cara a la simulación hidrológica en las cuencas.

El procedimiento implementado es el siguiente: Para cada una de las estaciones seleccionadas con el procedimiento descrito en el numeral 2.1.1, se extrajo una serie de precipitación de la base de datos CHIRPS leyendo el valor del pixel en el que se ubica la estación para cada mapa de precipitación diaria entre el 1/1/1990 y el 31/12/2009.

Posteriormente se realizó la comparación entre las series del IDEAM y las series construidas a partir de CHIRPS, la comparación incluyó el cálculo de la correlación lineal entre series para las escalas diaria, mensual y anual, siendo las escalas mensual y anual las de mayor correlación, en concordancia con los resultados de Urrea, (2017). Una vez definido el nivel de correlación entre las series se calcularon las funciones de distribución acumuladas de ambas series a escala mensual y se calculó la diferencia promedio de las distribuciones para establecer el rango de valores en los que se presentaban las mayores discrepancias entre los datos de las estaciones del IDEAM y los valores de CHIRPS.

Lo anterior asociado al hecho de que CHIRPS puede subestimar o sobrestimar el valor de la precipitación respecto a IDEAM dependiendo de la zona y debido al hecho de que la estimación corresponde a la agregación de la información presente en un pixel de $0,05^\circ$ de arco, generando variaciones de la precipitación más suave que las registradas en las estaciones.

Una vez identificados los umbrales con menor y mayor ajuste entre las series, se calcularon los coeficientes de ponderación, los cuales sirven como coeficientes de escalamiento entre las series. Dichos coeficientes corresponden a la razón entre la precipitación media mensual de ambas bases de datos para cada mes de los registros. En los casos donde la precipitación mensual es cero en las estaciones del IDEAM por falta de datos en todo el mes, el coeficiente de ponderación se calcula como la razón entre el valor de la precipitación media del ciclo anual de ambas bases de dato para el mes en cuestión.

Una vez calculados los coeficientes se realizó el cálculo de los valores faltantes en las series del IDEAM a escala diaria, multiplicando el factor del mes en el que se encuentra el día del registro faltante por la precipitación extraída de CHIRPS para el día de dicho registro.

2.1.3 Series de Caudal

La red de medición de caudal del IDEAM en la cuenca del río Cauca está compuesta por 88 estaciones hidrológicas ubicadas en corrientes tributarias como el río Otún, río Cali, río Risaralda, río Chinchiná, río Arma, río San Juan, río Cáceres, río Man, entre otros, sumado a las estaciones ubicadas directamente sobre el río Cauca.

Para la implementación y calibración de los MHA se emplearon 32 de las 88 estaciones de caudal disponibles en la cuenca del río Cauca. Las 32 estaciones seleccionadas son el producto de aplicar los criterios de selección que se mencionan a continuación sobre el conjunto de las 88 estaciones.

Primero se seleccionaron las estaciones de caudal que se encuentran al interior de la zona de estudio y luego se revisó la extensión de los registros para seleccionar las estaciones con datos disponibles en el periodo comprendido entre 1/1/1990 y 31/12/2009. En el segundo paso fueron seleccionadas las estaciones con al menos el 50% de registros disponible en el periodo de interés, lo anterior para poder realizar la calibración de los MHA.

La Tabla 2 presenta la información general sobre las 32 estaciones de caudal seleccionadas para la implementación y calibración de los MHA en las cuencas relacionadas en la Tabla 1. Es importante resaltar que, la estación Olaya [26237100] ubicada sobre el río Cauca en el municipio de Olaya en el departamento de Antioquia no cumple con la cantidad mínima de registros en el periodo de análisis. Sin embargo, en primera instancia fue seleccionada para la construcción de los modelos hidrológicos y evaluación de balance de caudales a lo largo del río Cauca.

Durante la validación de los MHA mediante la comparación entre los caudales simulados y observados en las estaciones de caudal ubicadas sobre el río Cauca, se logró determinar que en el sitio de la estación Olaya el río Cauca registra un caudal medio de 902 m³/s, caudal que presenta una reducción de 30 m³/s respecto al caudal medio registrado aguas arriba en la estación Cañafisto (caudal medio 932 m³/s).

Esta reducción en el caudal medio es contraria a lo que debería ser la dinámica natural de los caudales del río al recibir aporte de nuevas corrientes en su curso desde la estación Cañafisto hasta la estación Olaya. En el tramo comprendido entre las estaciones Cañafisto y Olaya el río Cauca recibe el aporte de caudal de corrientes como el río Aurrá y la quebrada Puna, corrientes que cuentan con caudal medio de 3,84 m³/s y 6,19 m³/s según el registro de las estaciones Penalta La [26237020] y Galera La [26217010], respectivamente. Esto sin contar con el aporte de otras corrientes como la quebrada La Miranda, quebrada La Yunada, entre otras.

La Figura 4 muestra el ciclo anual de la variación del caudal del río Cauca en las estaciones hidrológicas que cumplen con los criterios de selección y se incluye el ciclo anual para la estación Olaya. De la figura se puede determinar que, para los meses de abril, mayo y noviembre, meses con mayor humedad en la cuenca, el caudal medio en la estación Olaya es igual o inferior al caudal registrado aguas arriba en la estación Cañafisto (ubicada inmediatamente anterior). Adicional a lo anterior resalta el hecho de que siendo noviembre el mes en el que se presentan los caudales medios mensuales más altos en la cuenca, en la estación Olaya el caudal para el mes de noviembre es inferior al registrado en la estación Bolombolo, esta última localizada antes de la estación Cañafisto.

Por lo anterior, se determinó excluir la estación Olaya del análisis de los modelos hidrológicos durante la realización de los balances de caudales a lo largo de las estaciones hidrológicas del río Cauca en la zona de estudio. También vale la pena mencionar que la estación hidrológica La Coquera Aut [26247020] no fue tomada en cuenta en esta investigación debido a su cercanía con la estación Margento [25027050], cercanía que genera una redundancia innecesaria para el alcance de la investigación.

Figura 4 Ciclo anual de los caudales registrados en las estaciones hidrológicas sobre el río Cauca entre las estaciones La Virginia y Margento. Elaboración propia.

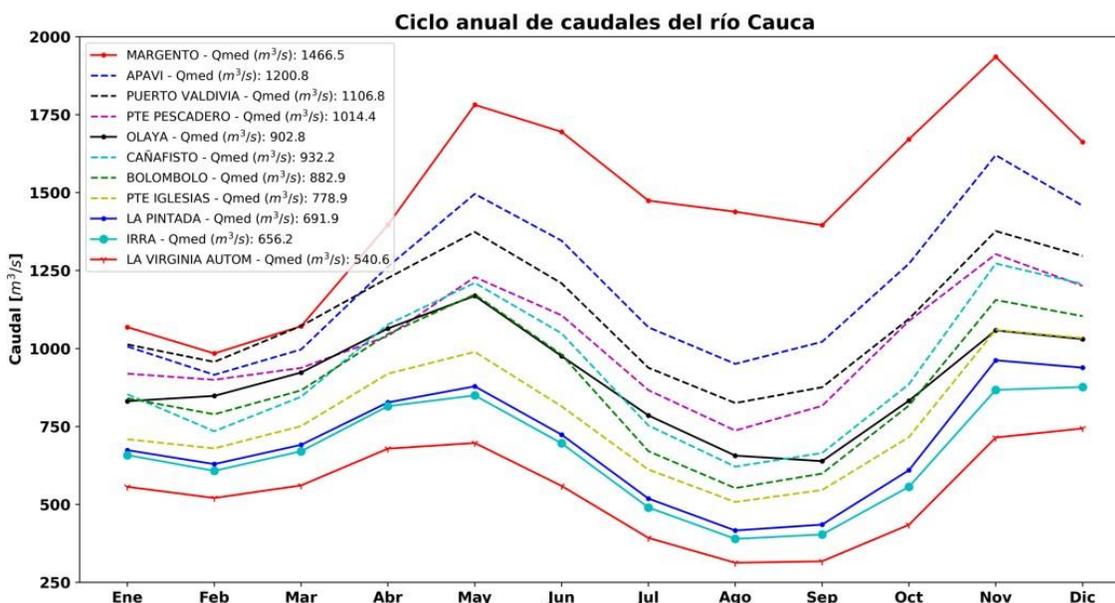


Tabla 2 Estaciones de caudal ubicadas en las cuencas tributarias y sobre el cauce del río Cauca entre las estaciones La Virginia y Margento. Elaboración propia.

Estación	Corriente	Categoría	Faltantes periodo de interés [%]
QUITASUEÑO [26187040]	Arma	LG	1,04
PENALTA [26237020]	Aurrá	LM	4,59
BRASILIA [26197020]	Bolívar	LG	30,70
MARGENTO [25027050]	Cauca	LG	5,04
PTE IGLESIAS [26207030]	Cauca	LG	3,13
CAÑAFISTO [26217050]	Cauca	LG	1,19
APAVI [26247030]	Cauca	LG	2,81
IRRA [26167070]	Cauca	LG	0,35
LA VIRGINIA AUTOM [26177030]	Cauca	LG	0,39
BOLOMBOLO [26207080]	Cauca	LG	0,04
PUERTO VALDIVIA [26237040]	Cauca	LG	13,19
PTE PESCADERO [26237050]	Cauca	LG	32,32
LA PINTADA [26187110]	Cauca	LM	0,04
COSTA AZUL [26167090]	Chamberí	LG	11,59
RETIRO EL [26157020]	Chinhiná	LG	0,20
CHUPADEROS [26157080]	Chinhiná	LG	1,89
SAN GABRIEL [26157100]	Guacaica	LM	29,63
PALMIRA HDA [26247010]	Man	LG	14,36
BRETANA LA [26147130]	Mapa	LM	0,83
BANANERA LA 6-909 [26137110]	Otún	LG	3,42
CANGREJO EL [26217040]	Quebrada San Mateo	LG	48,51
BUENOS AIRES [26147040]	Risaralda	LG	2,28
PTE NEGRO [26147140]	Risaralda	LG	3,46
VALLE EL [26237090]	San Andrés	LM	47,66
CEDRAL EL [26237110]	San Andrés	LG	26,62
CAMPAMENTO [26197010]	San Juan	LG	6,31
REMOLINO EL [26197030]	San Juan	LG	1,27
RODADERO EL [26207040]	Sinifaná	LG	43,32

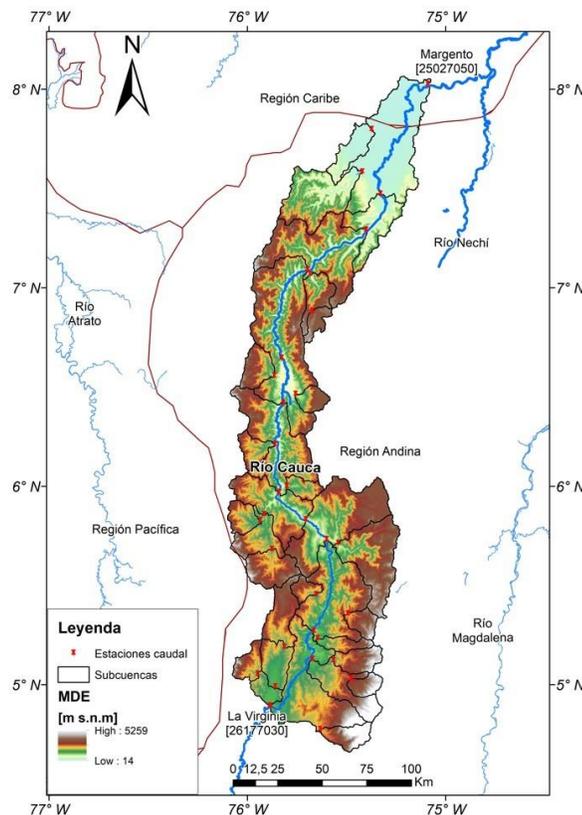
Estación	Corriente	Categoría	Faltantes periodo de interés [%]
PTE CARRETERA [26177010]	Supía	LM	12,33
PAILA LA [26167060]	Tapias	LG	11,49
LAS CAMELIAS AUTOM [26247050]	Tarazá	LG	32,19
GALERA LA [26217010]	Tonusco	LG	1,45

2.1.4 Modelo Digital de Elevaciones

Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es una representación digital de las elevaciones del terreno. En términos matemáticos corresponde a un arreglo matricial en donde el valor de cada celda es la altura para un área determinada. En esta investigación se empleó un MDE con resolución espacial de 30 m descargado de la base de datos *Alos Palsar – Radiometric Terrain Correction*.

En la hidrología los sistemas de información geográfica han sido ampliamente empleados para la determinación de variables con influencia sobre los procesos del ciclo hidrológico (Alvarez Villa, 2007). En este trabajo el modelo digital de elevaciones fue empleado en la delimitación de las cuencas de drenajes de las corrientes en las que se realizó la simulación de caudales. Las cuencas fueron delimitadas hasta el sitio donde se encuentran las estaciones hidrológicas de la Tabla 2. En la Figura 5 se muestra el modelo digital de elevaciones junto con las cuencas delimitadas a partir del modelo.

Figura 5 Modelo digital de elevaciones para la zona de estudio. Elaboración propia.



2.1.5 GRACE

Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) es una misión satelital compuesta por dos satélites que orbitan alrededor de la tierra a una distancia aproximada de 480 km y una distancia entre ellos que oscila entre 170 y 270 km (M. Rodell & Famiglietti, 2001). La misión satelital GRACE realiza mediciones de la variación del campo gravitacional de la tierra desde marzo de 2002 y a partir de las variaciones gravitacionales se estima la variabilidad espaciotemporal de anomalías del almacenamiento total de agua terrestre, (TWS por sus siglas en inglés) (Matthew Rodell et al., 2006; Shamsudduha et al., 2017).

Los valores de TWS son estimados a partir de las medidas de campos gravitacionales mensuales de GRACE, los cuales pueden representarse como coeficientes armónicos esféricos ruidosos por lo que requiere de un procesamiento previo a su presentación. Este procesamiento es realizado por los centros de investigación *Center for Space Research* (CSR), *German Research Centre for Geosciences* (GFZ) y el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) (Long et al., 2017; A. Y. Sun et al., 2017).

Para obtener los campos de espesor de agua equivalente los datos satelitales pasan por pos-procesamiento donde uno de los pasos iniciales es sustraer la componente estática del campo gravitacional, permitiendo así la separación de la componente variable en el tiempo la cual que es expresada en unidades de cabeza de agua equivalente, EWT, (Mogollón, 2017).

En este trabajo fueron revisadas las series de tiempo de EWT generadas por los centros de procesamiento CRS, GFZ y JPL para la zona de estudio, y, a pesar de que todas muestran variaciones similares a nivel mensual, se determinó el uso de la base de datos JPL. Lo anterior basado en los resultados de Bolaños Chavarría, (2020), quien identificó que JPL es mejor para representar el ciclo anual promedio del AAS en la cuenca del río Magdalena, ya que el EWT de JPL tiene correlación más alta, el error más bajo y la mejor desviación estándar cuando es comparado con los balances hídricos realizados por Bolaños a nivel regional en la cuenca del río Magdalena.

La información es presentada en archivos raster con extensión tiff (*Tagged Image File Format*), resolución espacial de 1° de arco y resolución temporal mensual. La información empleada en este estudio corresponde a la del periodo comprendido entre los meses de abril del año 2002 y diciembre de 2009 con información faltante en los meses de junio y julio del año 2002 y junio del año 2003. La información se encuentra disponible en la página web del proyecto Tellus de la NASA <https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/>.

Debido a que las series mensuales de almacenamiento de agua en el suelo calculadas con los MHA cubren el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2009, la comparación entre las series de AAS de los MHA y las series de EWT de GRACE fue realizada en el periodo comprendido entre enero de 2002 y diciembre de 2009.

2.2 Métodos

Para el cálculo de la variabilidad espacial y temporal del almacenamiento del agua en el suelo se emplearon dos métodos, el MHA y BHCP.

Mediante la implementación de los MHA en las cuencas se reprodujo la dinámica de los caudales medios diarios y caudales de recesión en las cuencas. Una vez validados los resultados del modelo en cada cuenca, se determinó la variabilidad temporal del cambio en el AAS mediante series de tiempo generadas al integrar el agua disponible en los almacenamientos subsuperficial y subterráneo en cada paso de tiempo del modelo. Con base en los resultados del modelo hidrológico y la información de las estaciones climáticas e hidrológicas se generaron mapas con la variabilidad de la precipitación, la evaporación, la escorrentía y posteriormente se efectuaron balances hídricos en la escala mensual para determinar la variabilidad espacial del cambio en el AAS en la zona de estudio.

2.2.1 Modelo Hidrológico Agregado - MHA

A pesar del continuo avance de la investigación hidrológica alrededor de la circulación del agua en la atmósfera y en el suelo, aún se tienen dificultades para medir las variables involucradas en el ciclo hidrológico. Los problemas son de diferente índole, sin embargo, en el territorio colombiano la limitación para avanzar en la medición y monitoreo de variables hidroclimáticas obedece mayormente a la dificultad para acceder a los territorios donde reviste mayor importancia realizar las observaciones y la distancia entre las estaciones hidroclimatológicas que impide una adecuada cobertura espacial (Velez, 2013).

Cuando las limitaciones anteriores o de otro tipo dificultan la determinación del comportamiento de una variable, los modelos representan una buena alternativa (y en ocasiones la única) para simular la dinámica de las variables de interés, esto sin dejar de lado las limitaciones que pueden tener los modelos para reproducir la dinámica hidrológica. Un modelo puede ser definido como una representación de la realidad (Anderson et al., 2015; Bear & Cheng, 2010; Wang & Anderson, 1982) en el que los procesos complejos naturales se expresan de manera simplificada.

El MHA es una simplificación del modelo de Simulación Hidrológica Abierta (SHIA) propuesto por (Vélez Upegui, 2001). El MHA basa su funcionamiento en la generación y transferencia de escorrentía a través de cinco tanques o almacenamiento interconectados entre sí. Cuatro tanques representan la producción de escorrentía en la columna de suelo y el acuífero y uno representa la descarga de caudal en la red de drenaje.

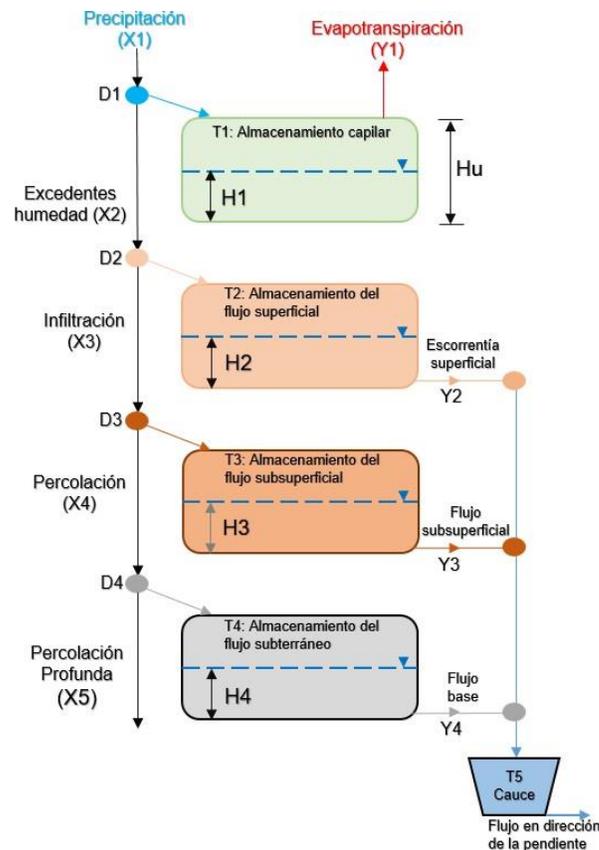
A pesar de la existencia del modelo hidrológico distribuido y sus resultados satisfactorios (Velez, 2013), el MHA también permite la obtención de resultados robustos y coherentes con la dinámica hídrica de las cuencas (Velez et al., 2010), logrando una precisión aceptable para los objetivos del trabajo. La fácil implementación y bondades al momento

de reproducir series hidrológicas hacen atractivo el uso del MHA para determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca.

Con frecuencia el MHA es usado como herramienta de simulación de caudales en cuencas con poca o nula información hidrológica. El modelo genera series de caudales medios diarios a la salida de una cuenca. Dado que la precipitación representa el ingreso de agua al modelo, es necesario que para cada día en el que se desea simular el caudal se tenga registro de precipitación, por lo que las series de precipitación diaria integradas al modelo deben estar completas para todo el periodo de simulación.

Tal como se mencionó anteriormente, la generación y transferencia de escorrentía ocurre en cinco tanques o almacenamientos. En la Figura 6 se presenta un esquema con el funcionamiento del MHA. En cada intervalo de tiempo la precipitación (X_1) ingresa al sistema y se distribuye en los almacenamientos en función del volumen almacenado en cada uno de ellos (H_i) y luego se calcula la escorrentía (Y_i) que sale hacia el cauce de la corriente.

Figura 6 Representación gráfica y conceptual del modelo hidrológico agregado. Adaptado a partir de Velásquez et al., (2023) y Velez, (2013)



En cada paso de tiempo el MHA realiza el balance de agua en los tanques, calcula la escorrentía superficial (Y_1), la escorrentía subsuperficial (Y_2), la escorrentía subterránea (Y_3), el flujo base y al final del intervalo actualiza los volúmenes H_1 , H_2 , H_3 y H_4 de los

almacenamientos capilar (T1), superficial (T2), subsuperficial (T3) y subterráneo (T4), respectivamente.

La precipitación (X1) se estima a partir de los registros diarios de las estaciones meteorológicas con influencia sobre la cuenca. La evaporación real se cuantifica en función de la cantidad de agua disponible en el almacenamiento capilar (H1) y la evaporación potencial. La cantidad de agua (X2, X3, X4 y X5) que se deriva en cada nodo (Di) hacia los estratos inferiores del suelo depende de la cantidad de agua disponible, el estado del almacenamiento del tanque y la conductividad hidráulica en el subsuelo aguas abajo del nodo.

El caudal descargado en la red de drenaje (T5) por cada uno de los niveles (Yi) es función del volumen almacenado y de las características de la cuenca, éstas últimas asociadas al tiempo de permanencia del agua en cada uno de los almacenamientos. En la Tabla 3 se presentan los parámetros involucrados en el funcionamiento del MHA y que fueron calibrados durante la implementación del modelo en las cuencas.

Durante la modelación hidrológica la calibración se enfoca en reproducir la recesión de los caudales, la variabilidad estacional y la tendencia de largo plazo, así como la relación entre la precipitación el cambio del agua almacenada en los diferentes tanques. En esta investigación el MHA es empleado para reproducir la variabilidad temporal del cambio en el AAS. Las series de tiempo de dicha variable son construidas al sumar el agua disponible en los tanques subsuperficial (T3) y subterráneo (T4) en cada paso tiempo de la simulación.

Tabla 3 Parámetros principales involucrados en el funcionamiento del MHA

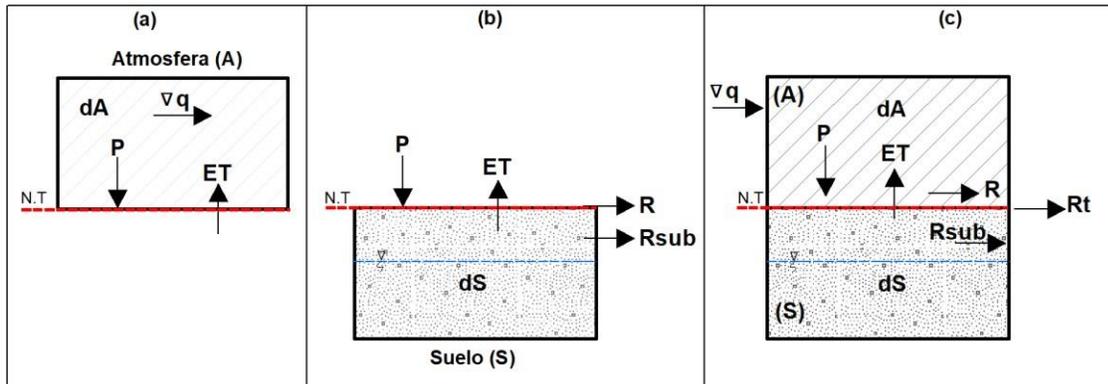
Parámetro	Definición
Almacenamiento capilar	Representa la cantidad de agua que se debe agregar a una columna de suelo seco hasta alcanzar la capacidad máxima capilar sin que el agua fluya por la acción de la gravedad.
Conductividad de la capa superior [mm/d]	Conductividad hidráulica de la capa superior del suelo, la cual controla el ingreso de agua al almacenamiento superficial.
Conductividad de la capa inferior [mm/d]	Controla el ingreso de agua en la parte inferior del suelo e Indica la capacidad de percolación en la zona saturada.
Pérdidas subterráneas [mm]	Representa la cantidad de agua que luego de percolar no se integra al almacenamiento subterráneo, sino que se mueve hacia niveles inferiores o a unidades laterales.
Tiempo de residencia flujo superficial [d]	Tiempo necesario para que el agua que se encuentra en la parte superficial de la ladera transite en forma de escorrentía directa
Tiempo de residencia flujo subsuperficial [d]	Tiempo promedio que le toma a los flujos alojados en el estrato superficial del suelo circulando horizontalmente hasta su afloramiento.
Tiempo medio de residencia flujo base [d]	Tiempo promedio que le toma a los flujos del acuífero transitar en la zona saturada hasta su afloramiento como flujo base.

2.2.2 Balance hídrico para el cálculo del AAS

El ciclo hidrológico es el conjunto de procesos de recirculación del agua dentro de la hidrósfera (Chow et al., 1994; Ray K. Linsley, Max A. Kohler, 1977). En la hidrósfera el agua se aloja y circula en almacenamientos representados por los océanos, el suelo, glaciares y la atmósfera (Singhal & Gupta, 2010).

Al considerar la atmósfera y el suelo como volúmenes de control acoplados que generan un sistema en el que se produce intercambio de agua, es posible identificar flujos de entrada y de salida que mantienen el balance de humedad del sistema. Mecanismos físicos como la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía y el cambio en el AAS mantienen el intercambio continuo de agua entre el suelo y la atmósfera (Builes-Jaramillo, 2017). La Figura 7 muestra el balance de agua en la atmósfera (a), en el suelo (b) y en el sistema acoplado (c).

Figura 7 (a) Balance de agua en la atmósfera, (b) Balance de agua en el suelo, (c) Balance de agua acoplado atmósfera-suelo. Elaboración propia a partir de (Taikan Oki et al., 1995)



En la Figura 7a la entrada de agua a la atmósfera está dada por la advección de humedad (∇q) y la humedad resultante de la evapotranspiración (ET). La salida de agua de la atmósfera está dada por la precipitación (P), y la cantidad de agua que no es evacuada se queda almacenada en la atmósfera (dA).

En el suelo, Figura 7b, la entrada de agua está dada por la precipitación, mientras que las salidas corresponden a la evapotranspiración, la escorrentía superficial (R), la escorrentía subsuperficial y la escorrentía subterránea (R_{sub}); el agua que no sale del suelo genera cambios en el AAS (dS). La Figura 7c muestra el balance de agua acoplado entre la atmósfera y el suelo, en donde el agua que ingresa al sistema corresponde a la advección de humedad, y la salida a la escorrentía total (R_t) producto de escorrentía superficial y subterránea (T Oki, 2011; Taikan Oki et al., 1995).

Si se efectúa el balance de agua en el largo plazo para el esquema (c) de la Figura 7, la advección de humedad neta que queda en el sistema es igual a la escorrentía total, sin embargo, en corto plazo se generan valores residuales que pueden ser explicados desde la variabilidad del AAS (Cuartas & Poveda, 2002). Por otro lado, si se toma en consideración que el AAS varía en función de las entradas y salidas de agua en el suelo y

que dentro del suelo (previo a la descarga) el término R_{sub} representa el movimiento del agua en el almacenamiento, entonces, el cambio del AAS en el tiempo ($dS(t)/dt$) puede ser determinado empleando la ecuación 1 (Álvarez et al., 2007; Rasmusson, 1968; Zeng, 1999).

$$P(t) - ET(t) - R(t) = \frac{dS(t)}{dt} \quad Ec. 1$$

La ecuación 1 representa el BHCP, en donde el corto plazo es un periodo de un mes. Este periodo permite determinar el cambio en los volúmenes de agua almacenados en el suelo en función de las entradas y salidas. Vale la pena mencionar que, en esta investigación la precipitación empleada en el BHCP proviene de las estaciones meteorológicas con influencia sobre la cuenca y que también son empleadas en el MHA.

En cuanto a la evapotranspiración real, esta es calculada como evaporación real en el MHA y depende de la cantidad de agua disponible en el almacenamiento capilar y la evaporación potencial. La evaporación potencial es calculada mediante la ecuación de Cenicafé (Ec.2).

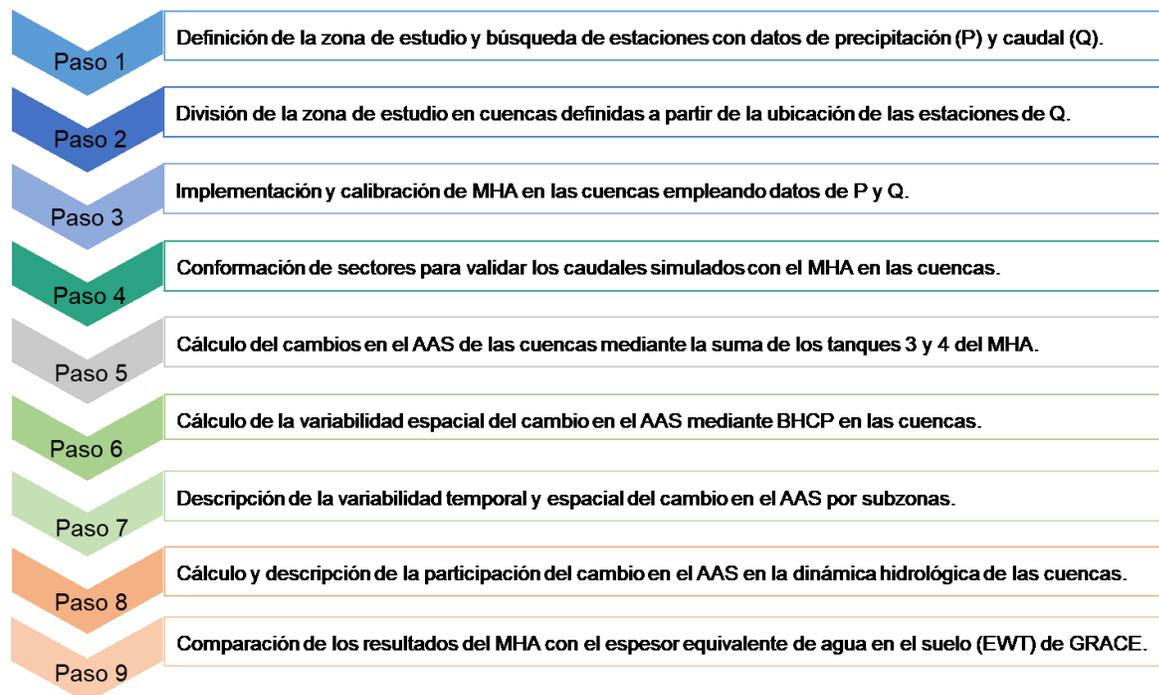
$$ETP = 4,658 \exp(-0,0002H) \quad Ec. 2$$

Donde ETP es evaporación potencial diaria y H la altura promedio de la cuenca.

2.3 Metodología

En la Figura 8 se presenta un diagrama de flujo que sintetiza en nueve pasos la metodología implementada en la zona de estudio para reproducir la variabilidad temporal y espacial del cambio en el AAS, determinar la participación del AAS en la en la dinámica hidrológica y lograr entender el funcionamiento del AAS en la cuenca del río Cauca.

Figura 8 Esquema de la metodología implementada para determinar la variabilidad espaciotemporal del cambio en el AAS y su participación en la dinámica hidrológica en las cuencas de la zona de estudio.



En el esquema metodológico de la Figura 8 se mencionan cuatro tipos de áreas, por lo que vale la pena hacer claridad sobre la jerarquía de dichas áreas. En primera instancia, la cuenca es la unidad básica de análisis de esta tesis, en las cuencas se implementaron los MHA y se hicieron los BHCP.

En segundo lugar, un sector es un conjunto de cuencas utilizado para validar los caudales simulados con el MHA en las cuencas que lo integran. En la validación por sectores se emplean las estaciones hidrológicas de las cuencas que drenan de forma directa o indirecta al río Cauca y las estaciones ubicadas directamente sobre el río Cauca.

Una subzona es el conjunto de cuencas que tienen un patrón de variabilidad similar en el cambio del AAS, y, por último, la zona de estudio es la suma todas las cuencas y para efectos de descripción de los resultados, la zona de estudio será considerada como la escala regional.

3. Variabilidad de la precipitación, la evaporación y los caudales en la zona de estudio

En este capítulo se describe la variabilidad temporal de la precipitación y la evaporación de la zona de estudio a partir de ciclos anuales de ambas variables. En el caso de la precipitación los ciclos fueron construidos a partir de los registros de precipitación diaria de las estaciones meteorológicas del IDEAM, mientras que los ciclos de la evaporación fueron construidos a partir de la evaporación real diaria obtenida de los MHA implementados en las cuencas de la zona de estudio.

La variabilidad hidrológica de la zona de estudio es descrita mediante ciclos anuales de caudales del río Cauca. Los ciclos fueron elaborados con los registros diarios de caudales de las estaciones hidrológicas del IDEAM ubicadas sobre el cauce del río Cauca. En la descripción hidrológica se mencionan los principales afluentes del río Cauca, afluentes asociados a las cuencas de análisis.

Es importante mencionar que, la descripción de la variabilidad temporal de la precipitación, la evaporación y de los caudales mediante los ciclos anuales, se hace para una escala intranual aun cuando en la descripción de la precipitación se mencionan los principales forzadores que explican en gran medida la variabilidad de la precipitación en las escalas diaria, intranual, anual e interanual.

3.1 Variabilidad de la precipitación

La ubicación geográfica de Colombia condiciona su variabilidad climática e hidrológica. La presencia de barreras orográficas asociadas a la cordillera de los Andes da origen a climas locales y regionales, y por otro lado, al estar situado en la esquina noroeste de Suramérica, se encuentra rodeado por el océano Pacífico, el mar Caribe y la cuenca amazónica, cuya circulación atmosférica incide sobre eventos climáticos en la escala temporal diaria, intranual e interanual (German Poveda et al., 2005; Germán Poveda, 2004).

En la escala diaria la variabilidad de la precipitación en Colombia está marcada por el ciclo de temperaturas que incide sobre la formación, desarrollo e intensidad de la convección profunda que genera gran parte de la lluvia en el trópico, mientras que en la escala intranual los principales rasgos que condicionan la climatología son las ondas tropicales del Este, la

oscilación de Madden-Julian, y los huracanes sobre el Caribe y el Pacífico oriental (Germán Poveda, 2004).

En la escala anual la hidroclimatología en Colombia es controlada por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Garreaud et al., 2009), el Chorro del Chocó que incide principalmente sobre la región Pacífica (German Poveda et al., 2005; German Poveda & Mesa, 1999; Rueda & Poveda, 2006), y la interacción dinámica y termodinámica de los Sistemas Convectivos de Mesoescala con el Chorro del Chocó (Zuluaga Arias & Poveda, 2004).

En la escala interanual el principal forzador de cambios es el ENSO con la ocurrencia de sus fases cálida (El Niño) y húmeda (La Niña), con una frecuencia de ocurrencia que va desde unos meses hasta los 5 o 6 años. El principal efecto del ENSO sobre la hidroclimatología colombiana es exacerbar la duración y magnitud de los periodos húmedos y secos (G. Poveda & Mesa, 1996; Germán Poveda & Mesa, 1995).

Los mayores cambios sobre la climatología colombiana suelen estar asociados a las diferentes fases del ENSO. Durante la fase El Niño se presenta el debilitamiento del Chorro del Chocó al disminuir la intensidad de los vientos en el océano Pacífico y con ello la reducción del ingreso de humedad desde el Pacífico. Se reduce también la intensidad de las ondas tropicales del este sobre el Atlántico tropical norte, se reduce la precipitación por retroalimentación positiva, entre otros efectos.

Lo contrario ocurre durante la fase La Niña, se incrementa el ingreso de humedad desde el Pacífico, se fortalecen los vientos alisios y con ellos el transporte de humedad, se da un incremento en la humedad del suelo y la precipitación reciclada, entre otros efectos (Carvajal et al., 2016; Germán Poveda, 2004).

En la cuenca del río Cauca la lluvia y la variabilidad climática depende entre otras cosas, del aporte de humedad desde el Pacífico, el paso de la ZCIT por diferentes latitudes y los efectos sobre Colombia de las fases del ENSO. La Figura 9 presenta un mapa de la zona de estudio y estaciones de precipitación con su ciclo anual construidos para explicar la variabilidad de la precipitación.

La zona de estudio tiene una orientación S-N y se extiende entre las latitudes 5°N y 8°N, haciendo que se presenten variadas condiciones climáticas. La parte sur de la zona de estudio corresponde a la región del Cauca Medio enmarcada aproximadamente entre las latitudes 5°N y 7°N, mientras que el área norte de la zona de estudio corresponde a la región del Bajo Cauca entre las latitudes 7°N y 8°N.

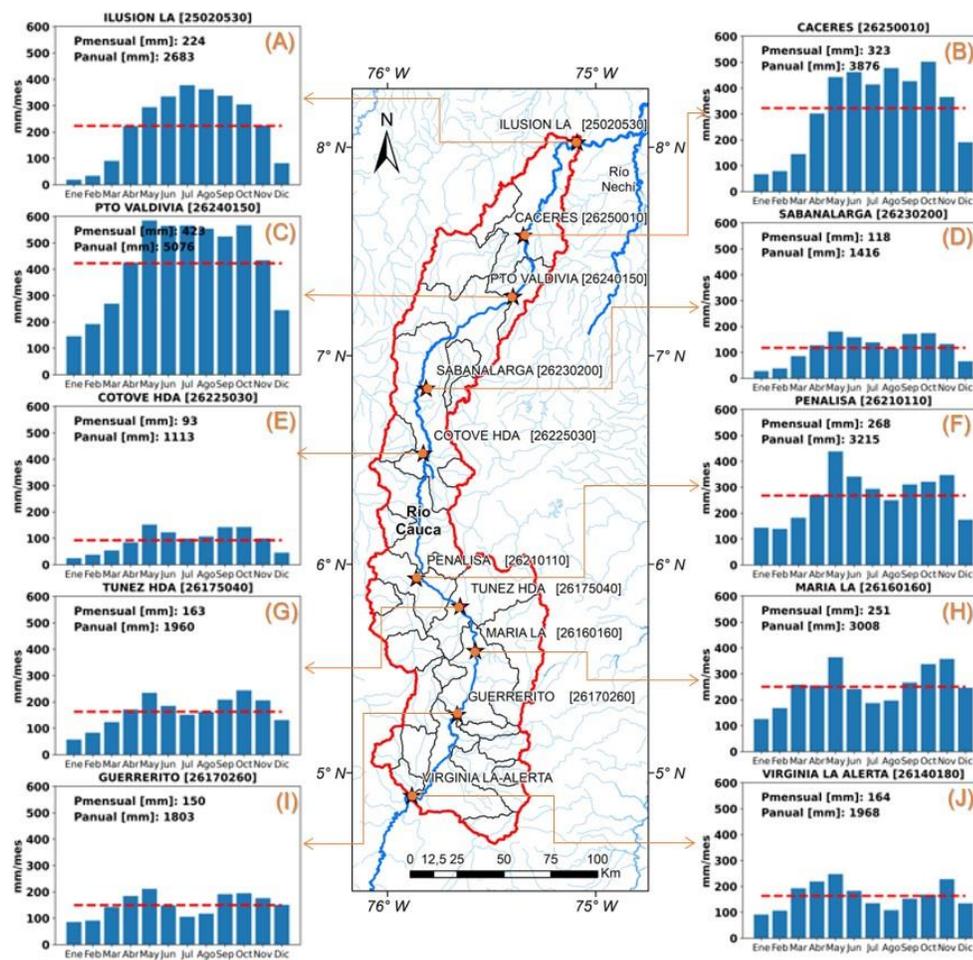
En la región del Cauca Medio la variabilidad mensual promedio de la precipitación es descrita por los ciclos presentados en los gráficos D hasta el J de la Figura 9. Por su parte, en la región del Bajo Cauca los ciclos que describen la variabilidad mensual promedio de la precipitación corresponden a los gráficos A, B y C de la Figura 9.

En la región del Cauca Medio las estaciones registran precipitación media anual entre los 1.113 mm/año y 3.215 mm/año con un patrón de variabilidad mensual bimodal. En las

estaciones La María, Guerrerito y La Virginia (gráficos H, I y J de la Figura 9, respectivamente) los trimestres MAM (marzo, abril y mayo) y SON (septiembre, octubre y noviembre) corresponden a los de mayor humedad, mientras que los trimestres DEF (diciembre, enero y febrero) y JJA (junio, julio y agosto) son periodos secos. En las estaciones Sabanalarga, Cotové, Peñalisa y Túnez (gráficos D, E, F y G de la Figura 9, respectivamente) los trimestres AMJ (abril, mayo y junio) y SON corresponden a los periodos de mayor humedad, mientras que los meses restantes corresponden a periodos secos.

En la región del Bajo Cauca las estaciones registran una precipitación media anual que varía entre 2.683 mm/año y 5.076 mm/año con un patrón de variabilidad mensual unimodal (ciclos de los gráficos A, B y C de la Figura 9). En la región del Bajo Cauca se identifica un periodo húmedo y un periodo seco. El periodo húmedo está compuesto por las precipitaciones que ocurren entre los meses de mayo y octubre mientras que el periodo seco ocurre entre los meses de enero y marzo. Los meses de abril y noviembre representan la transición entre ambas temporadas.

Figura 9 Variabilidad de la precipitación en la zona de estudio. Elaboración propia.



3.2 Variabilidad de la evaporación real

A partir de la búsqueda de información meteorológica en el portal de Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos (DHIME) del IDEAM, se logró determinar que para la zona de estudio el IDEAM solo reporta información de medición de la evaporación en cuatro estaciones, las cuales corresponden a tres estaciones Agrometeorológicas (AM) y una Climatológica Principal (CP). La Tabla 4 relaciona las estaciones de medición de evaporación administradas por el IDEAM, en la tabla se presenta el nombre y código de la estación junto con el municipio y departamento donde se ubica la estación.

Tabla 4 Estaciones de medición de la evaporación administradas por el IDEAM en la zona de estudio. Elaboración propia.

Estación	Tipo	Código	Departamento	Municipio
Santa Isabel Valdivia - Aut	AM	26255030	Antioquia	Valdivia
Hacienda Cotove - Aut	AM	26225060	Antioquia	Santa Fe
Marsella - Aut	AM	26135290	Risaralda	Marsella
Santa Emilia - Aut	CP	26145090	Risaralda	Belén de Umbría

Si bien, esta información es valiosa debido al reto que representa la medición de la evaporación, la información de las estaciones mencionadas en la Tabla 4 es insuficiente para determinar tanto la variabilidad espacial como la variabilidad temporal de la evaporación en toda la zona de estudio. En su lugar y para efectos de realizar la descripción de la variabilidad de la evaporación en la zona de estudio, en esta sección del documento se presentan ciclos anuales de evaporación para diferentes sectores de la zona de estudio.

Los ciclos anuales fueron construidos a partir de las series diarias de evaporación real calculadas con los MHA durante la reproducción de las series de caudales en las cuencas de la zona de estudio. La Figura 10 presenta gráficos de ciclo anual con la variabilidad mensual de la evaporación real en 15 cuencas distribuidas a lo largo de la zona de estudio, en los gráficos la línea roja discontinua representa la evaporación media mensual.

El mapa de la Figura 10 presenta las 15 cuencas seleccionadas para describir la variabilidad mensual de la evaporación de la zona de estudio. Fueron seleccionadas 15 de las 32 cuencas por efectos de extensión y presentación del documento. Para la selección de las cuencas se tomó en cuenta su posición latitudinal y longitudinal, así como el rango de la variabilidad de la evaporación en la zona de estudio. Las cuencas amarillas están asociadas a corrientes tributarias del río Cauca mientras que las cuencas naranjas están asociadas a áreas de drenaje interceptadas por el cauce principal del río Cauca.

En la Figura 10 cada gráfico de ciclo anual de evaporación es identificado con una letra entre la A y la O, dicha letra también es asignada en el mapa a la cuenca que corresponde el ciclo anual.

Hacia la parte sur de la zona de estudio se encuentran las cuencas Área Cauca 1 (ciclo A), Bananera La 6-909 (ciclo F) y San Gabriel (ciclo N) con evaporación media anual de 384,2 mm/año, 502,2 mm/año y 369,3 mm/año, respectivamente. En estas cuencas la evaporación muestra poca variabilidad de un mes a otro. Las cuencas ubicadas en esta zona tienen una evaporación real media cercana a los 450 mm/año.

En la parte sur de la zona de estudio se presenta la menor cantidad de evaporación real debido a que se presentan las precipitaciones más bajas de la zona de estudio, con una precipitación media anual que varía entre 1.532 mm/año (estación Esperanza La [26150160]) y 2.816 mm/año (estación Línea Porvenir [54010020]).

En las cuencas Área 3 Cauca (ciclo B), Campamento (ciclo H), Quitasueño (ciclo M), Brasília (ciclo G) y Sinifaná (ciclo O), ubicadas hacia la parte media de la zona de estudio se calculó una evaporación media anual de 822,2 mm/año, 375,2 mm/año, 784,5 mm/año, 876,3 mm/año y 875 mm/año, respectivamente. Hacia la parte media de la zona de estudio se presenta una evaporación media cercana a los 750 mm/año.

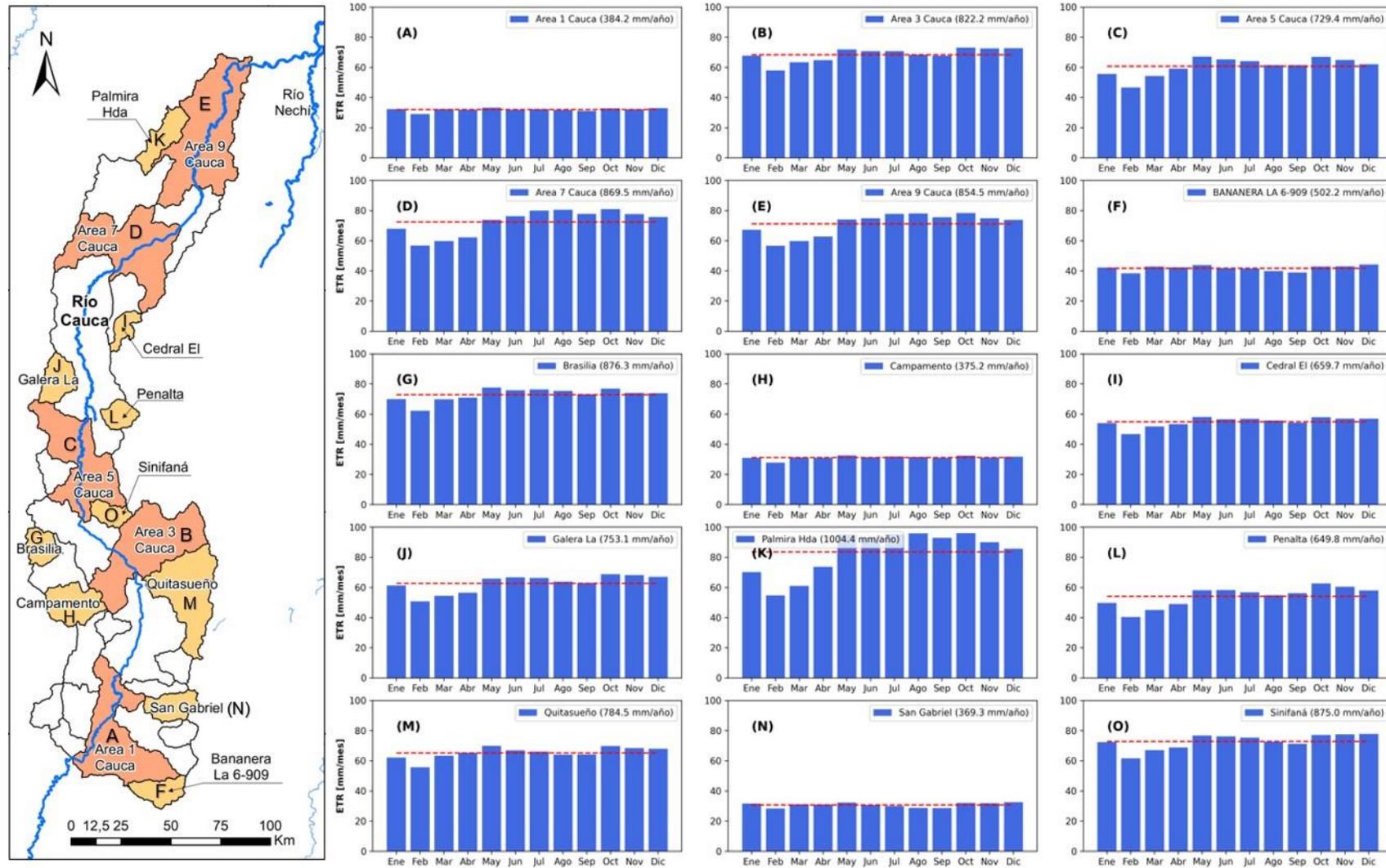
El incremento de la evaporación entre las zonas sur y central del área de estudio obedece al aumento de humedad en la zona media respecto al sur, incremento reflejado en una precipitación media anual que varía entre 1.960 mm/año (estación Tunez Hda[26175040]) y 3.215 mm/años (estación Peñalisa [26210110]), y temperaturas más altas ligadas a mayor cantidad de energía para evaporar y una mayor capacidad de la atmósfera para recibir la humedad originada por la evaporación.

En la parte alta del Cauca Medio se encuentran las cuencas Área Cauca 5 (ciclo C), Penalta (ciclo L), Galera La (ciclo J) y Cedral (ciclo I) con una evaporación media anual de 729,4 mm/año, 649,8 mm/año, 753,1 mm/año y 659,7 mm/año, respectivamente. En esta zona la evaporación media anual es aproximadamente 700 mm/año, en donde los meses de enero, febrero y marzo muestran entre un 5% y 15% menos de evaporación respecto a los meses restantes, lo cual se asocia a menor disponibilidad de agua en dicho trimestre.

Hacia la parte norte de la zona de estudio, región del Bajo Cauca, se encuentran las cuencas Área Cauca 7 (ciclo D), Área Cauca 9 (ciclo E) y Palmira Hda (ciclo K) con una evaporación media anual de 869,5 mm/año, 854,5 mm/año y 1.004,4 mm/año, respectivamente. En esta región la evaporación media anual es del orden de los 920 mm/año, siendo la mayor para la zona de estudio.

El incremento de la evaporación en la región del Bajo Cauca respecto a la zona sur obedece a una mayor cantidad de humedad asociada a una precipitación media anual que varía entre 2.683 mm/año (estación Ilusión La [25020530]) y 5.809 mm/año (estación Barro blanco [26250110]), y a mayores temperaturas que propician una mayor evaporación y almacenamiento de humedad por parte de la atmósfera. En términos promedios la evaporación más baja en la región del Bajo Cauca ocurre en los meses de enero, febrero y marzo. En el caso de los meses de enero y febrero estos forman parte del periodo más seco en la zona mientras que el mes de marzo es la transición entre el periodo seco y húmedo.

Figura 10 Evaporación real calculada mediante modelos hidrológicos agregados en cuencas de la zona de estudio. Elaboración propia.



3.3 Red de drenaje y variabilidad de caudales

En esta sección del documento se presenta la variabilidad del caudal del río Cauca con base en los registros de caudales de las estaciones hidrológicas ubicadas directamente sobre la corriente. En la presentación de los caudales se mencionan los ríos secundarios con mayor importancia dentro de la zona de estudio, sin embargo, es importante mencionar que solo se implementaron MHA en la cuenca de los ríos secundarios que cuentan con instrumentación hidrológica.

Previo a la zona de estudio, el caudal del río Cauca se debe a la escorrentía que se genera en las cuencas del Alto Cauca y Valle del Cauca. Una vez en la zona de estudio, el aporte al caudal está dado por la escorrentía que ocurre en cuencas como la de los ríos Risaralda, Otún, Chinchiná, Arma, San Juan, Cáceres, entre otros. La Figura 11 presenta ciclos anuales de caudal construidos en cada una de las estaciones hidrológicas ubicadas sobre el cauce principal del río Cauca entre las estaciones La Virginia y Margento. Los gráficos muestran el incremento gradual en la magnitud del caudal medio del río y la variabilidad del caudal en los diferentes meses del año. En términos generales los caudales muestran un patrón de variabilidad bimodal, siendo los meses de mayo y noviembre aquellos en los que se presentan los caudales medios mayores.

En el sitio de la estación La Virginia (ciclo J) el río Cauca registra un caudal medio de 541 m³/s, caudal producto del aporte de las cuencas del Alto Cauca y Valle del Cauca, así como el aporte de la cuenca del río Risaralda en el Cauca Medio. En el sitio de la estación Irra (ciclo I) el río Cauca registra un caudal medio de 656 m³/s, este incremento respecto a la estación La Virginia obedece en gran medida al aporte de caudal de los ríos Otún, Chinchiná y Campo Alegre. A la altura de la estación La Pintada (ciclo H) el río Cauca cuenta con un caudal medio de 692 m³/s, producto de sumar al caudal medio de la estación Irra el aporte de los ríos Tapias, Pozo, Supía, Pácora, Arquía, entre otros.

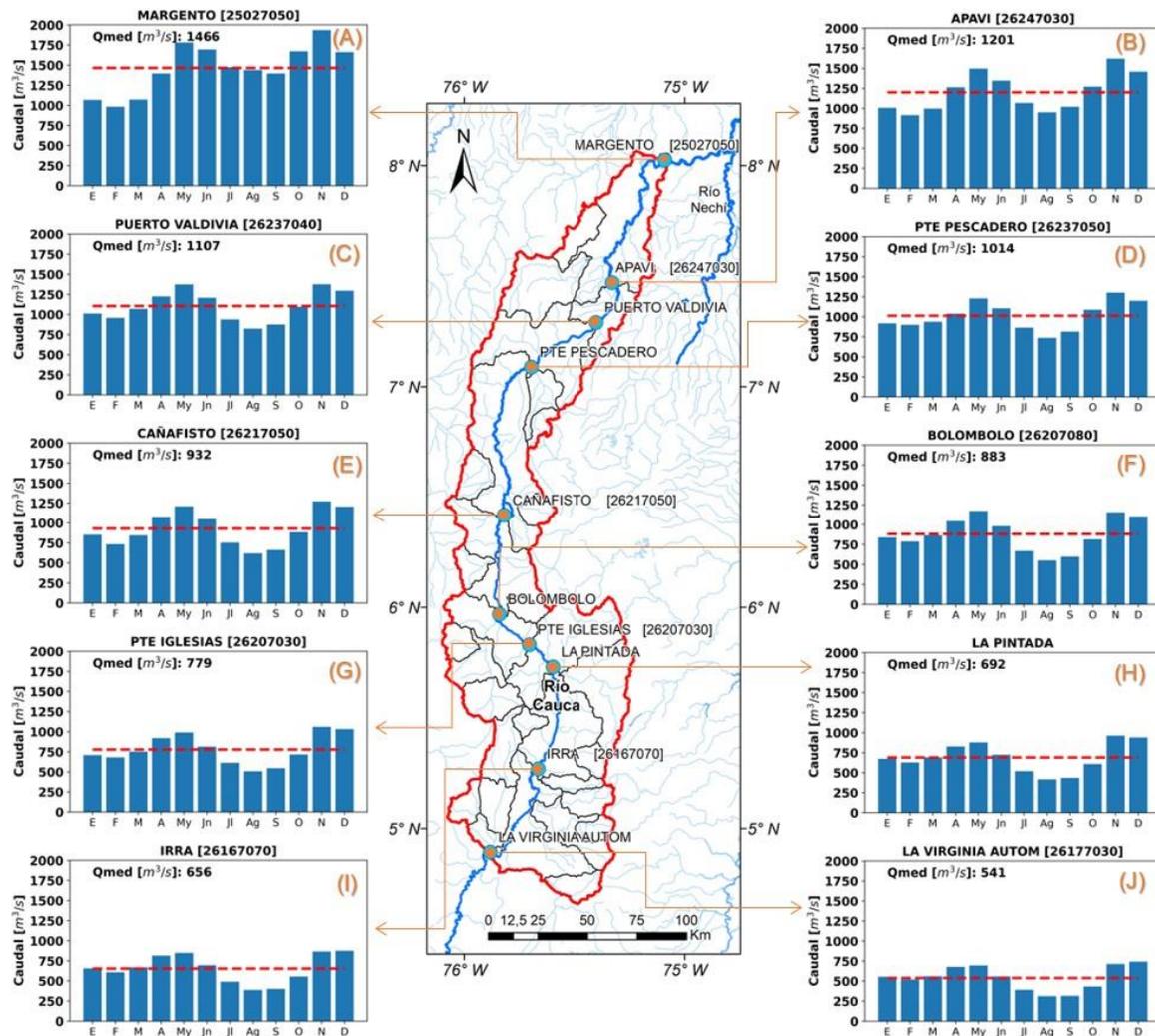
En la estación Puente Iglesias (ciclo G) el caudal medio del río Cauca asciende a 779 m³/s producto del aporte de caudal de las cuencas de los ríos Arma, Cartama y Poblano al caudal registrado en la estación La Pintada. En el sitio de la estación Bolombolo (ciclo F) el río Cauca registra un caudal medio de 883 m³/s. Entre las estaciones Puente Iglesias y Bolombolo se suma el aporte de caudal de ríos como El Pedral, Bolívar, Barroso, la quebrada Farallones, todas estas corrientes tributarias del río San Juan que finalmente desemboca al río Cauca en el municipio de Tarso. A los aportes de la cuenca del río San Juan también se suman los ríos Piedra y Mulato.

En la estación Cañafisto (ciclo E) el río Cauca registra un caudal medio de 932 m³/s. Entre las estaciones Bolombolo y Cañafisto se presenta el aporte de caudal de corrientes como la quebrada Sinifaná, río Amoyá, quebrada La Comia, quebrada San Mateo, quebrada Anocozca, entre otras. A la altura de la estación Puente Pescadero (ciclo D) en el municipio de Toledo en el departamento de Antioquia, el río Cauca cuenta con un caudal medio de 1.014 m³/s. Entre las estaciones Cañafisto y Puente Pescadero es posible identificar el

aporte de caudal de drenajes como el río Aurrá, las quebradas Puna, La Seca, Juan García, La Clara, Peque, Santa María, entre otras. En la estación Puerto Valdivia (ciclo C) el río Cauca registra un caudal medio de 1.107 m³/s. Entre las estaciones Puente Pescadero y Puerto Valdivia realizan aporte al caudal del río Cauca los ríos Ituango, Espíritu Santo y la quebrada Santa Barbara. En la estación Apaví (ciclo B) el río Cauca registra un caudal medio 1.201 m³/s. Entre las estaciones Puerto Valdivia y Apaví el río Cauca recibe el aporte de caudal de tributarios como el río Pescado, el río Pupí y las quebradas Valdivia y Pupo.

Por último, en el sitio de la estación Margento (ciclo A) el río Cauca registra un caudal medio de 1.466 m³/s. Entre las estaciones Apaví y Margento el río Cauca recibe el caudal de importantes ríos de la región del Bajo Cauca antioqueño como lo son los ríos Tarazá, Man, y otras corrientes.

Figura 11 Variabilidad del caudal del río Cauca entre La Virginia Risaralda y Caucasia Antioquia. Elaboración propia.



4. Variabilidad temporal y espacial del cambio en el AAS: Cálculo mediante el MHA y BHCP

Para determinar la variabilidad temporal del cambio en el AAS en la zona de estudio se realizó una modelación hidrológica semidistribuida. Es decir, se dividió la zona de estudio en las 32 cuencas mencionadas en la Tabla 1 y para cada cuenca se implementó un MHA. El cálculo de la variabilidad espacial del cambio en el AAS se realizó con balances hídricos de resolución mensual en las 32 cuencas de la zona de estudio. Posteriormente se integraron los resultados de las 32 cuencas para visualizar la distribución espacial del cambio en el AAS en la escala regional.

En esta sección del documento se presenta la variabilidad temporal y espacial del cambio en el AAS a escala mensual. Se describe la variabilidad mensual interanual para el periodo comprendido entre los años 1990 y 2009, y en la escala intranual se detallan los patrones de variabilidad observados a nivel de cuenca y en la escala regional. En términos de la variabilidad espacial del cambio en el AAS, se presenta la distribución espacial tomando como base las escalas intranual y regional, y se identifican las áreas con menor y mayor magnitud de cambios en el AAS para las diferentes temporadas climáticas.

También se realiza una comparación entre los cambios del AAS calculados con el MHA y la información de EWT de la misión satelital GRACE, tanto a nivel de cuencas como para toda la zona de estudio; esto para efectos de medir el rendimiento de GRACE en la zona de estudio en cuanto a la reproducción de los cambios en el AAS, y también para verificar la consistencia de los resultados del esquema metodológico de la tesis.

Vale la pena mencionar que, si bien toda la descripción de la variabilidad temporal del AAS se realiza a partir de series mensuales, y todos los mapas con la distribución espacial del AAS muestran el ciclo promedio anual, en el Anexo A se presentan mapas de AAS mensual para cada uno de los años del periodo de análisis. En cuanto a la variabilidad temporal, en el Anexo B se presentan las series de AAS a escala diaria para cada una de las cuencas y agregado para toda la zona de estudio.

También es importante mencionar que, todas las series temporales del cambio en el AAS a escala mensual fueron determinadas a partir de las series diarias del Anexo B.

4.1 Calibración de modelos de hidrológicos agregados

La calibración de los modelos hidrológicos se llevó a cabo en dos pasos. Primero se realizó la calibración de los modelos de las cuencas con estaciones hidrológicas en la salida y que no son interceptadas de manera directa por el río Cauca, para estas cuencas se variaron los parámetros hidráulicos y tiempos de residencia de los flujos en la cuenca y posteriormente se compararon las series de caudal simulada y observada. Para las cuencas que no cuentan con estación de caudal, pero se encuentran enmarcadas en una cuenca mayor instrumentada, se calibró el modelo variando los parámetros hidráulicos, los tiempos de residencia de los flujos en la cuenca y posteriormente se hizo un balance de caudales a la salida de la cuenca mayor.

La segunda etapa de la calibración fue la validación de las series simuladas con base en las series de caudales observados en las estaciones sobre el río Cauca. Este último procedimiento consistió en agregar las series simuladas de las cuencas tributarias (cuenas mencionadas en la Tabla 1) al río Cauca según el sector en el que se encuentran, y posteriormente los caudales totales simulados fueron comparados con los caudales observados en las estaciones hidrológicas del río Cauca.

En la Figura 12 se presentan nueve mapas (A hasta I) que resumen el procedimiento de agregación de caudales entre cuencas tributarias al río Cauca. Cada mapa contiene un sector en el que se realizó un balance o agregación de caudal. Se define un sector como la sumatoria de cuencas tributarias que se encuentran entre dos estaciones hidrológicas ubicadas de forma consecutiva sobre el río Cauca.

En la Figura 12 los marcadores con forma triangular representan las estaciones de caudal ubicadas en las cuencas tributarias no interceptadas de directamente por el río Cauca; las series de caudal de dichas estaciones se emplearon en la calibración de los MHA. Los marcadores con forma circular azul representan las estaciones de caudal ubicadas sobre el río Cauca, estas estaciones fueron empleadas como pivotes para realizar la comparación y cierre de los balances en cada uno de los sectores de la zona de estudio.

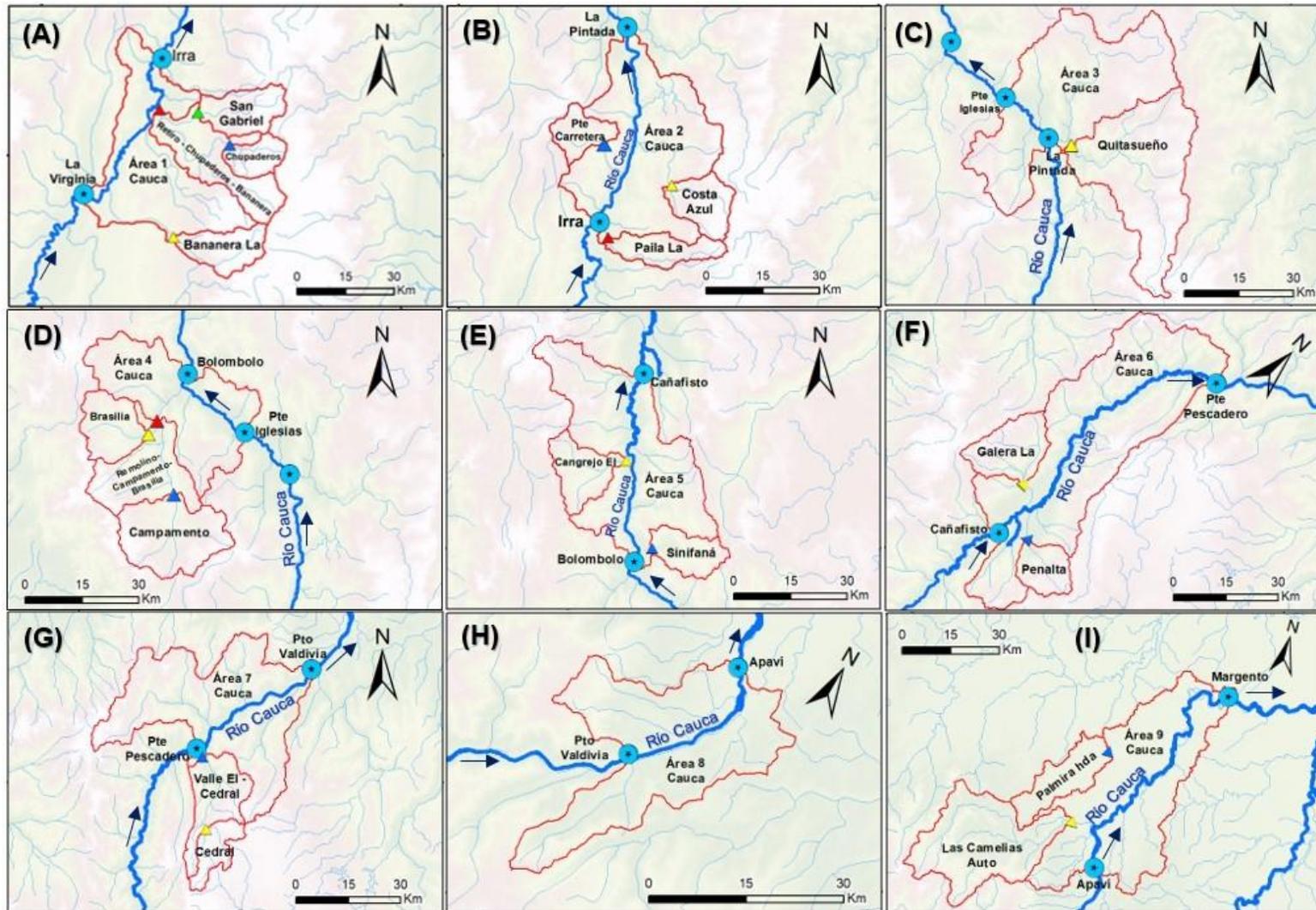
La Figura 12A muestra el balance de caudales efectuado entre las estaciones La Virginia e Irra. Para el balance se tomó como punto de partida la serie de caudales observados en la estación La Virginia y se sumaron a esta última los caudales simulados en las cuencas Área 1 Cauca (río Cauca), Bananera La 6-909 (río Otún), Chupaderos (río Chinchiná), San Gabriel (río Guacaica) y RCSG (río Chinchiná). La serie resultante fue nombrada como Irra_Simulada.

La Figura 12B muestra el balance de caudales realizado entre las estaciones Irra y La Pintada. Para el balance en el segundo sector se tomó como punto de partida la serie de caudales simulados Irra_Simulada y se sumaron a esta última los caudales simulados en las cuencas Área 2 Cauca (río Cauca), Paila La (río Tapias), Pte Carretera (río Supía) y Costa Azul (río Chamberí). La serie resultante fue nombrada como La_Pintada_Simulada.

La Figura 12C muestra el balance de caudales realizado entre las estaciones La Pintada y Pte Iglesias. Para el balance en el tercer sector se tomó como punto de partida la serie de caudales simulados La_Pintada_Simulada y se sumaron a esta última los caudales simulados en las cuencas Área 3 Cauca (río Cauca) y Quitasueño (río Arma). La serie resultante fue nombrada como Pte_Iglesias_Simulada.

La Figura 12D muestra el balance de caudales realizado entre las estaciones Pte Iglesias y Bolombolo. En el cuarto sector se tomó como punto de partida la serie de caudales simulados Pte_Iglesias_Simulada y se sumaron a esta última los caudales simulados en las cuencas Área 4 Cauca (río Cauca), Campamento (río San Juan), Brasilia (río Bolívar) y Área Sanjuán 2. La serie resultante fue nombrada como Bolombolo_Simulada.

Figura 12 Balance de caudales en las estaciones hidrológicas ubicadas directamente sobre el río Cauca para la validación de la calibración de los modelos hidrológicos agregados implementados en las cuencas que conforman la zona de estudio.



La Figura 12E muestra el balance de caudales realizado entre las estaciones Bolombolo y Cañafisto. En el quinto sector se sumó a la serie de caudales simulados Bolombolo_Simulada los caudales simulados en las cuencas Área 5 Cauca (río Cauca), Rodadero El (Quebrada Sinifaná) y Cangrejo El (Quebrada San Martín). La serie resultante fue nombrada como Cañafisto_Simulada.

La Figura 12F muestra el balance de caudales realizado entre las estaciones Cañafisto y Pte Pescadero. Para el sector seis se tomó como punto de partida la serie de caudales simulados Cañafisto_Simulada y se sumaron los caudales simulados en las cuencas Área 6 Cauca (río Cauca), Penalta (río Aurrá) y Galera La (río Tonusco). La serie resultante fue nombrada como Pte_Pescadero_Simulada.

La Figura 12G muestra el balance de caudales realizado entre las estaciones y Pte Pescadero y Pto Valdivia. En el sector siete se sumó a la serie Pte_Pescadero_Simulada los caudales simulados en las cuencas Área 7 Cauca (río Cauca), Cedral El (río San Andrés) y VECE. La serie resultante fue nombrada como Pto_Valdivia_Simulada.

El balance de caudales del sector ocho (Figura 12H) corresponde a la suma de caudales simulados de las series Pto_Valdivia_Simulada y la serie Área 8 Cauca ubicada sobre el río Cauca. La serie resultante fue nombrada como Apaví_Simulada.

Por último, La Figura 12I muestra el balance de caudales realizado entre las estaciones y Apaví y Margento. En el sector nueve se tomó como punto de partida la serie de caudales simulados Apaví_Simulada y se sumaron los caudales simulados en las cuencas Área 9 Cauca (río Cauca), Palmira Hda (río Man) y Las Camelias Auto (río Tarazá). La serie resultante fue nombrada como Margento_Simulada.

Cabe anotar que las cuencas que conforman el área de drenaje del río Risaralda hasta su desembocadura en el río Cauca, no son mencionadas en el balance de caudales del primer sector porque su aporte se encuentra reflejado en la serie de caudales de la estación La Virginia. Sin embargo, para cada una de las cuencas que conforman el área de drenaje del río Risaralda se construyó un MHA que fue calibrado con base en las series hidrológicas de las estaciones y se determinó la variabilidad espacial y temporal del AAS.

La Figura 13 presenta la comparación entre las series de caudales observados y simulados a la salida de los nueve sectores definidos a lo largo del cauce del río Cauca. En la figura los gráficos de la izquierda (A hasta I) muestran la serie de caudales observados en color azul, la serie de caudales simulados en color rojo y el caudal promedio de cada serie. Los gráficos ubicados en la parte derecha (A' hasta I') muestran para cada balance la curva de duración de caudales observados en color azul y la curva de duración de caudales simulados en color rojo.

Los gráficos A' hasta I' también contienen gráficos de tipo $Q - Q$ y de dispersión con la correlación entre las series comparadas, así como el cálculo métricas como el error relativo entre caudales medios, la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el error porcentual

medio (MAPE), métricas empleadas para establecer el nivel de ajuste de los modelos hidrológicos al momento de reproducir la variabilidad de los caudales en las cuencas.

Las series de caudales simulados y observados de la Figura 13 se superponen en gran parte del periodo de análisis, siendo esto un primer indicador de que la serie simulada conserva tanto los patrones de variabilidad como el orden de magnitud de los caudales diarios observados en las estaciones. En los gráficos de dispersión ubicados en las figuras 13A' hasta la 13I' las series tienen correlaciones entre el 81% y el 98% con nubes de punto ceñidas a la recta unitaria.

Los diagramas $Q - Q$ comparan las funciones de densidad de probabilidad empíricas de la serie de caudales observados con la función de densidad de probabilidad de la serie de caudales simulados. Las respectivas nubes de puntos se distribuyen a lo largo de la línea de pendiente unitaria con poca dispersión ($R \approx 0,99$), este resultado permite concluir que los MHA reproducen la mayoría de los patrones de variabilidad observados en las estaciones de caudal de las cuencas, lo anterior implica una reproducción precisa de los caudales en las cuencas por parte de los modelos.

Las estimaciones de RMSE nos proporcionan una cuantificación de la representatividad de la variabilidad de los caudales observados en las estaciones. El RMSE estimado para los balances varía entre 74,23 m³/s (estación Irra) y 332,61 m³/s (estación Margento), con un error porcentual medio que varía entre el 9,1% (estación Irra) y 17,68% (estación Margento), reflejando en términos promedios una buena aproximación.

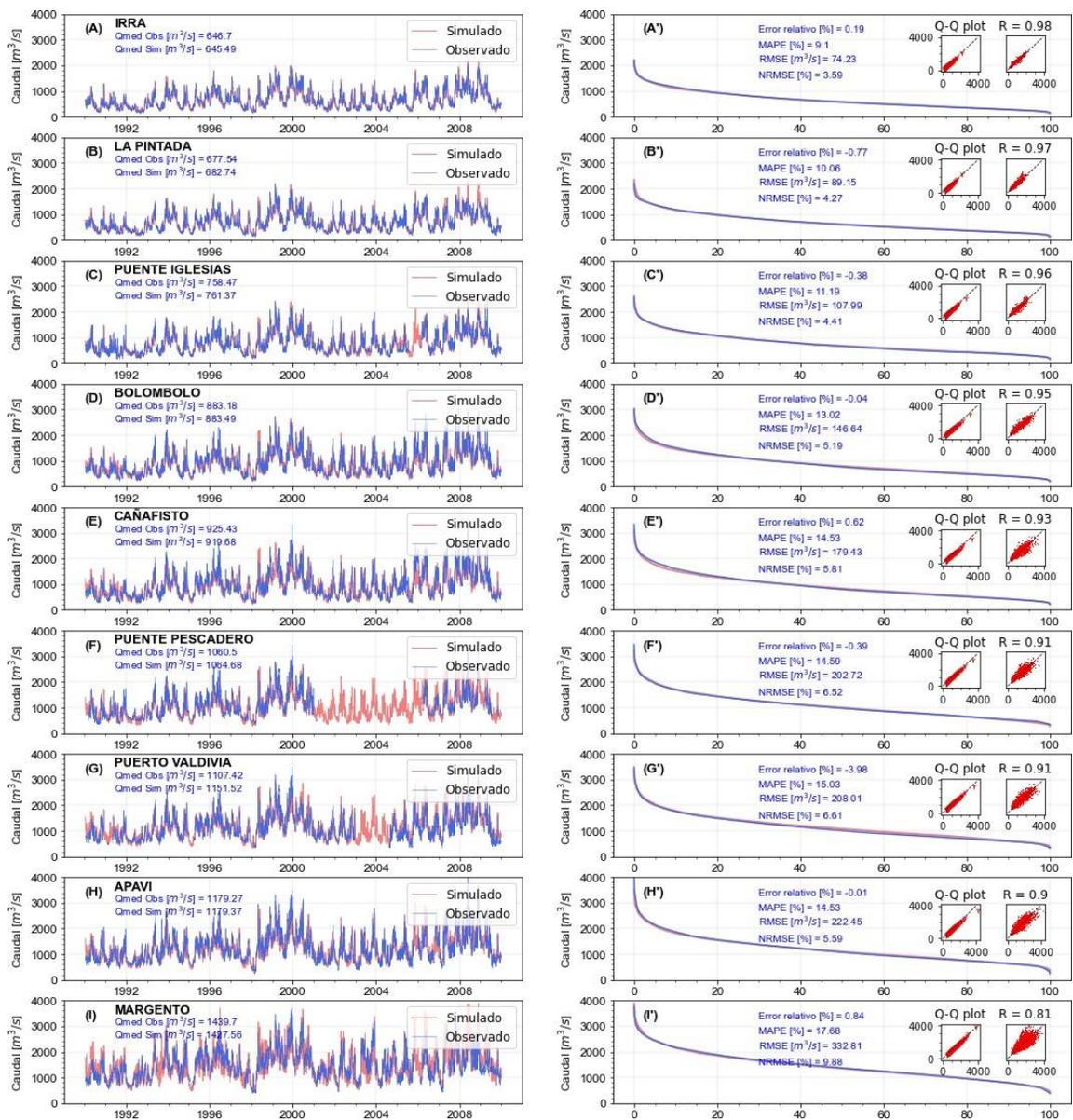
Los caudales simulados también siguen los patrones mensuales y promedio anual de la serie original. Los caudales medios simulados respecto a los observados muestran un error relativo promedio del 0,9%, siendo el error más bajo el de la estación Apaví (-0,01%) y el error máximo el de la estación Pto Valdivia (-3,98%). Un aspecto a resaltar es que el modelo hidrológico reproduce las condiciones mínimas, promedio y en gran medida los máximos, puesto que el modelo no exagera los caudales bajos de los periodos de estiaje, controla la ocurrencia de caudales máximos y mantiene el caudal promedio de la serie observada.

Ejemplo de lo anterior es lo que ocurre con la serie de caudales simulados para el río Cauca hasta el sitio de las estaciones Puente Pescadero (figuras 13F y 13F') y Pto Valdivia (figuras 13G y 13G'), en donde se puede apreciar que las estaciones no registran caudales en los periodos 2001-2006 y 2003-2005, respectivamente, y las series simuladas muestran una variabilidad que conserva los patrones mensuales y el caudal promedio sin alterar la recesión de caudales.

Tal como se mencionó previamente, las series simuladas conservan el orden de magnitud y patrones de variabilidad de los caudales observados, y lo anterior obedece a la asimilación de la variabilidad de la precipitación (ingreso de agua al modelo) por parte del modelo y la posterior redistribución del agua en los diferentes almacenamientos a partir de los procesos físicos simulados que ocurren en cada uno de los niveles del suelo.

Conforme se realiza la agregación de caudales a lo largo de los diferentes sectores se presenta la acumulación de error, esto debido a la subestimación o sobrestimación de caudal en las series simuladas con respecto a las series observadas. Sin embargo, en todos los balances el coeficiente de correlación entre la serie simulada y la observada es superior al 80%, con un promedio de 92,44%.

Figura 13 Calibración de modelos hidrológicos agregados y verificación de caudales en estaciones principales sobre el río Cauca.



La Figura 14 presenta histogramas con la distribución y resumen estadístico de los valores residuales producto de la comparación entre las series observadas y simuladas para cada uno de los balances efectuados sobre las estaciones hidrológicas del río Cauca. La figura también presenta las funciones de distribución acumulada de las series observadas (curva

azul) y simuladas (curva roja), una línea vertical negra que indica el valor residual cero, una línea vertical verde ubicada sobre el valor medio de los residuales y una línea vertical amarilla ubicada sobre la mediana de los residuales.

Todos los histogramas muestran distribuciones leptocúrticas con valores de curtosis entre 5 y 10, lo anterior producto de la concentración de los valores residuales alrededor del valor medio. El valor promedio de los residuales para todas las estaciones consideradas (ver la métrica Residual (μ) y línea vertical verde) se encuentra cercano a 0 m³/s, más aún si en la comparación se toma en consideración la magnitud de los caudales de las series y el caudal medio observado y simulados en cada estación ($Q_{med\ Obs}$ y $Q_{med\ Sim}$).

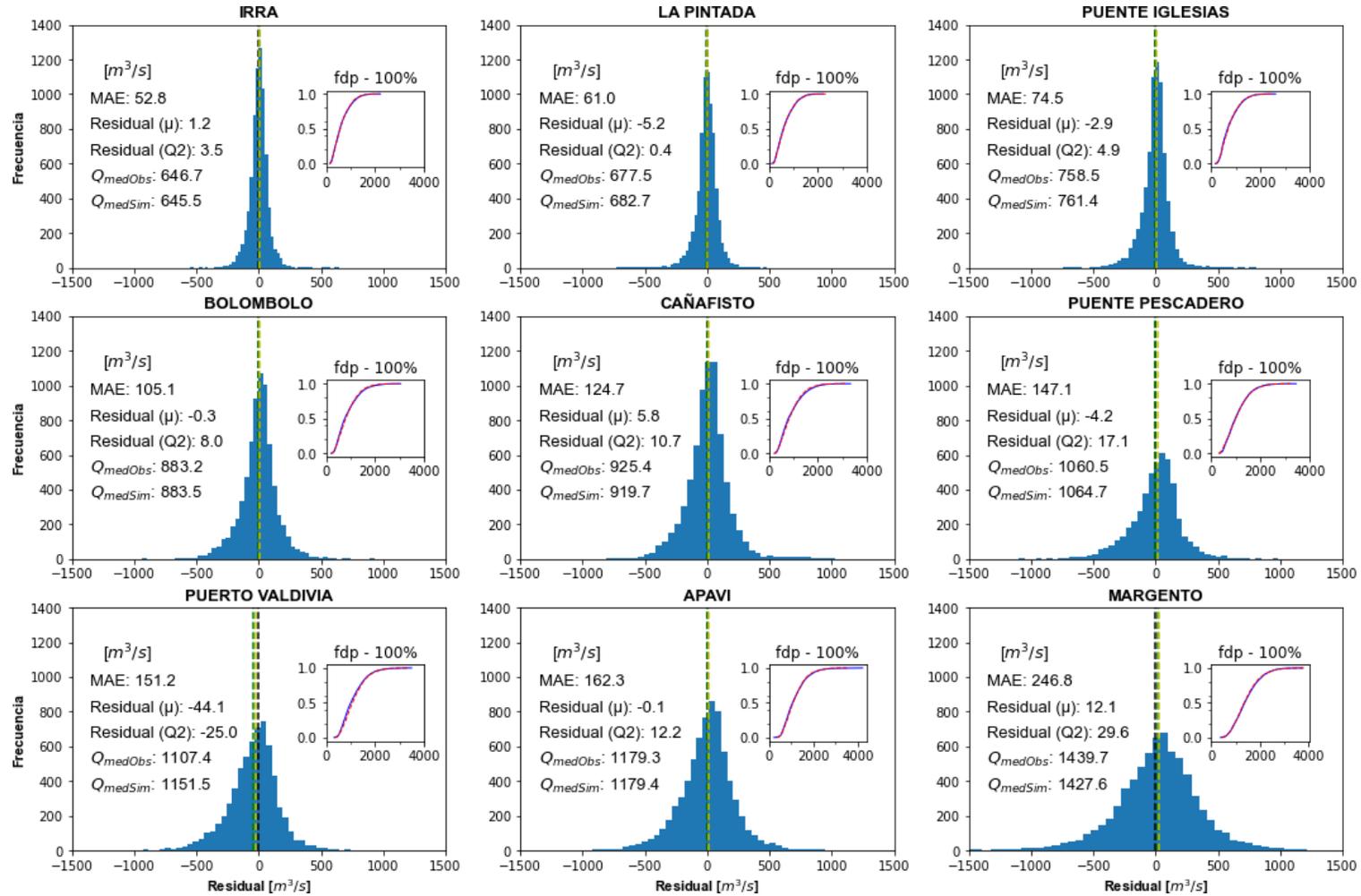
En la Figura 14 el error medio más bajo ocurre en la estación Irra con un MAE de 52,8 m³/s y error porcentual promedio del 9,1%. Lo anterior se debe a que hasta el sitio de la estación Irra, el aporte de los caudales simulados en las cuencas tributarias, es bajo en relación a los caudales registrados en la estación La Virginia. Por su parte, el error más alto se da en la estación Margento, con un MAE de 246,68 m³/s correspondiente a un error porcentual promedio del 17,5%. El incremento en el error obedece a la acumulación de residuales en cada una de las estaciones ubicadas entre La Virginia y Margento, siendo esta última el punto de salida de la zona de estudio y la que agrega las series de caudales simulados de las 32 cuencas.

Al comparar la media y mediana de los residuales respecto al orden de magnitud del caudal medio en cada uno de los balances, es posible concluir que dichas medidas de tendencia central son cercanas entre sí con un error relativo promedio del 1,9% y ambas métricas cercanas a la línea de residual cero. Prueba de lo anterior es la cercanía entre las líneas verticales negra, verde y amarilla en los histogramas, y la imposibilidad de distinguir con claridad la posición relativa de las medidas de tendencia central para algunas estaciones.

Lo anterior es el reflejo de un sesgo poco significativo en las distribuciones, la compensación de errores en las series simuladas respecto a las series observadas, y que, por lo tanto, los modelos agregados reproducen de forma precisa las condiciones hidrológicas medias de la cuenca sin sobreestimaciones o subestimaciones significativas sobre los caudales medios. La buena reproducción de los caudales también es el efecto de usar información de calidad aceptable más un procedimiento juicioso de calibración en las cuencas que tiene información.

Los gráficos con las funciones de densidad también refuerzan los resultados anteriores. En todas las estaciones las funciones de densidad de las series observadas y simuladas se ajustan una a la otra, indicando esto que los modelos hidrológicos agregados reproducen la mayoría de los patrones de variabilidad observados en las estaciones de caudal. Los resultados anteriores indican que los MHA reproducen de muy buena manera las condiciones hidrológicas medias de las cuencas.

Figura 14 Distribución de los residuales resultantes de la comparación entre las series observadas y simuladas comparando la totalidad de la serie de caudales observados. La línea vertical negra indica el valor residual cero, la línea vertical verde indica el valor medio de los residuales y la línea vertical amarilla indica la mediana de los residuales. En las funciones de distribución acumulada la curva azul corresponde a la serie observada y la curva roja a la serie simulada.



La Figura 15 presenta la distribución y resumen estadístico de los valores residuales obtenidos al comparar los caudales observados y simulados con probabilidad de excedencia mayor al 80%, es decir, los caudales ubicados en el tramo del último 20% de las curvas de duración presentadas en la Figura 13. La Figura 15 conserva en el eje vertical (frecuencia absoluta) el rango presentado en la Figura 14, lo anterior para efectos de comparar la distribución de los residuales que consideran el total de las series observadas (Figura 14) y los residuales de la comparación de los caudales con excedencia mayor al 80% del tiempo.

La Figura 15 también presenta las funciones de distribución acumulada de las series observadas (curva azul) y simuladas (curva roja) de los caudales con excedencia mayor al 80% del tiempo. En la figura la línea vertical negra indica el valor residual cero, la línea vertical cian la media de los residuales y la línea vertical magenta la mediana.

Los caudales ubicados en el tramo del último 20% de la curva de duración corresponden a los caudales de recesión o de estiaje de la cuenca. La dinámica de estos caudales se encuentra estrechamente ligada a los cambios en el AAS (Jaramillo et al., 2004), por lo tanto, es importante que el MHA reproduzca en buena medida tanto las condiciones hidrológicas medias como la etapa de recesión de los caudales; lo anterior con miras a una correcta determinación de la variabilidad espaciotemporal del AAS en la zona de estudio.

Todos los histogramas muestran distribuciones leptocúrticas con valores de curtosis entre 3,8 y 12,5; indicando concentración de los residuales alrededor de la media y esta última cercana a cero, en especial si en la comparación se incluyen los caudales medios observados y simulados (ver Residual (μ), $Q_{med\ Obs}$, $Q_{med\ Sim}$ y línea vertical cian en la Figura 15). Estos resultados confirman el buen ajuste de las series simuladas a las observadas.

Vale la pena mencionar que, en comparación con los resultados de la Figura 14, los histogramas de las estaciones Puerto Valdivia, Apaví y Margento en la Figura 15, muestran mayor dispersión en la distribución de los residuales, incluso la presencia de sesgo hacia la parte izquierda de la distribución.

Al comparar la media y mediana de los residuales respecto al orden de magnitud del caudal medio en los balances de las estaciones Irra, La Pintada, Puente Iglesias, Bolombolo, Cañafisto y Puente Pescadero, es posible concluir que dichas medidas de tendencia central son cercanas entre sí con un error relativo promedio del 3,4% y ambas métricas cercanas a la línea de residual cero. Prueba de lo anterior es la cercanía entre las líneas verticales negra, cian y magenta en la Figura 15 y la imposibilidad de distinguir con claridad la posición relativa de las medidas de tendencia central.

Lo anterior es el reflejo de un sesgo poco significativo en las distribuciones, la compensación de errores en las series simuladas respecto a las series observadas, y que, por lo tanto, los MHA reproducen de forma precisa, sin sobreestimaciones o subestimaciones significativas la variabilidad de los caudales de estiaje o recesión de las cuencas ubicadas entre las estaciones La Virginia y Puente Pescadero.

Los gráficos con la distribución acumulada también refuerzan los resultados anteriores. En las estaciones Irra, La Pintada, Puente Iglesias, Bolombolo, Cañafisto y Puente Pescadero las funciones de densidad de las series observadas y simuladas se ajustan una a la otra en al menos el 80% de los caudales comparados, indicando esto que los MHA reproducen la mayoría de los patrones de variabilidad observados en los caudales de recesión.

En las estaciones Puerto Valdivia, Apaví y Margento es posible apreciar diferencias entre las medidas de tendencia central, y la distancia de estas últimas a la línea de residual cero. En estas estaciones se produce un sesgo negativo y la compensación de los errores es menor que en las estaciones anteriores, generando en cerca del 30% de las ocasiones (ver funciones acumuladas) sobrestimaciones con un error promedio de 17,2% en los caudales de recesión.

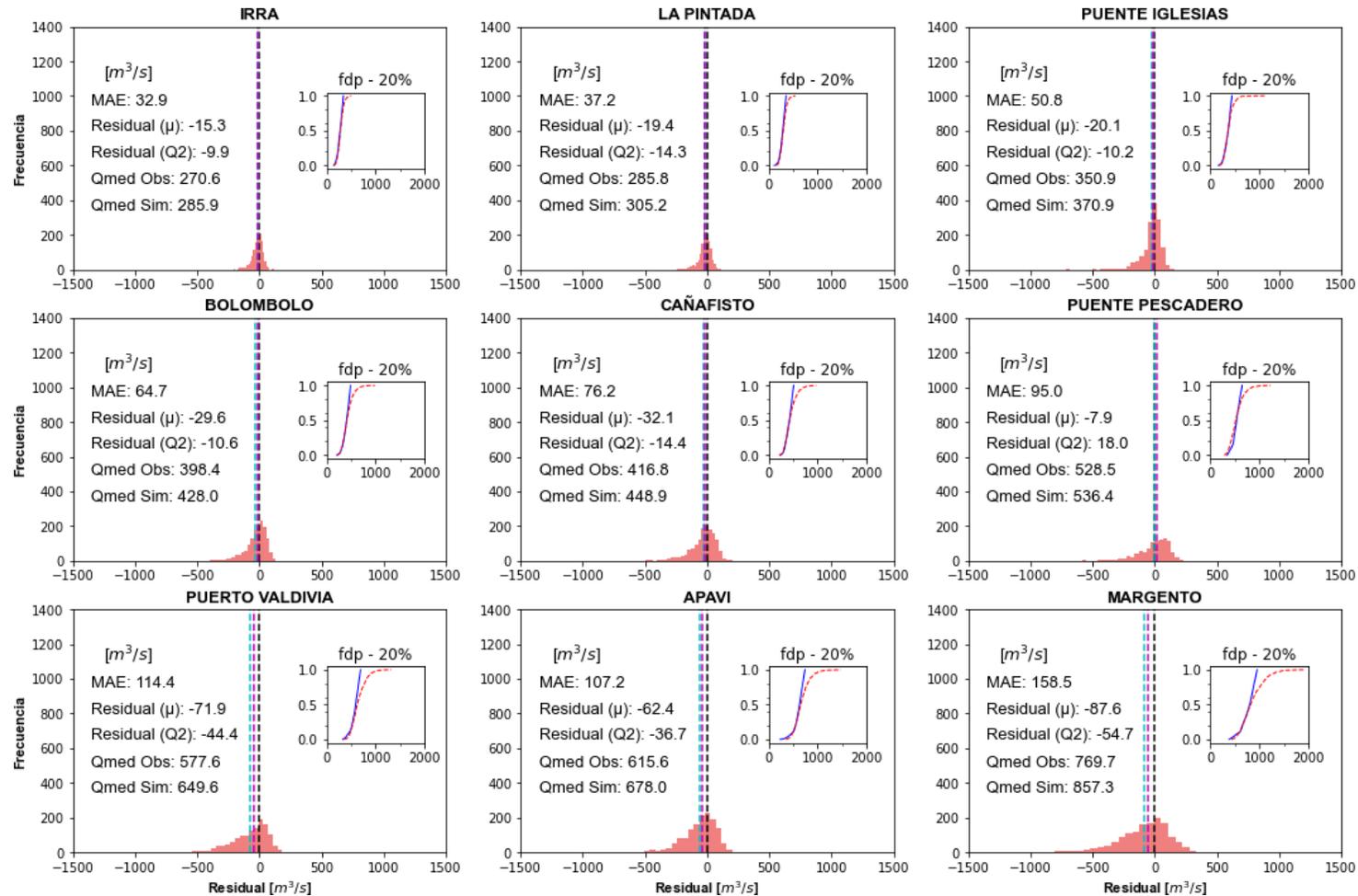
Si bien los residuales de los balances realizados en las estaciones Puerto Valdivia, Apaví y Margento indican que hay sesgo en la reproducción de los caudales de recesión de las estaciones, dichos resultados también muestran que las diferencias entre las series observadas y simuladas son aceptables, con sesgo en un porcentaje bajo de la cantidad de datos; lo anterior sumado al hecho de que las series simuladas (ver Figura 13) no exacerban los caudales de estiaje o recesión observados.

Los diagramas de dispersión y $Q - Q$ de la Figura 13 muestran que las nubes de puntos (caudales observados versus simulados) se distribuyen ceñidos a la línea de pendiente unitaria ($R \approx 0,99$), esto en el caso de los balances realizados hasta las estaciones Irra, La Pintada, Puente Iglesias, Bolombolo, Cañafisto, Puente Pescadero y Puerto Valdivia y Apaví.

La dispersión en la nube de puntos aumenta en la estación Margento debido a la acumulación del error en todas las series simuladas aguas arriba. Esto representa un deterioro en la reproducción de la magnitud de los caudales por parte del MHA, sin embargo, contar con un error porcentual medio que varía entre el 9,1% y 17,68%, sumado a los resultados presentados en las figuras 14 y 15, muestran el buen nivel de reproducción de la dinámica hidrológica (tanto a nivel de caudales medios como en los caudales de recesión o de estiaje) por parte de los MHA implementados en las cuencas.

Vale la pena recordar que los MHA conservan los patrones de variabilidad de los caudales medios diarios, conservan la magnitud de los caudales de recesión, no se exacerban de manera generalizada los caudales máximos y conservan con bajo error relativo el caudal medio multianual.

Figura 15 Distribución de los residuales resultantes de la comparación entre las series observadas y simuladas. La comparación es realizada para los caudales con probabilidad de excedencia mayor al 80% asociados al periodo de recesión o de estiaje. La línea vertical negra indica el valor residual cero, la línea vertical cian indica el valor medio de los residuales y la línea vertical magenta indica la mediana de los residuales. En las funciones de distribución acumulada la curva azul corresponde a la serie observada y la curva roja a la serie simulada.



Para complementar la comparación entre los caudales observados y simulados se calculó la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Este coeficiente es normalmente utilizado como criterio para evaluar el rendimiento de modelos hidrológicos en su capacidad de reproducir caudales.

La Tabla 5 presenta el NSE en cada una de las estaciones hidrológicas sobre las que se realizó el balance de caudales y la calificación del ajuste según el criterio del NSE. Los resultados de la tabla muestran que en términos generales el MHA tiene un excelente rendimiento al momento de reproducir las series de caudales observadas en las estaciones de zona de estudio.

Lo anterior es coherente con los resultados de las figuras 14 y 15 y valida que los MHA reproducen de forma precisa las condiciones hidrológicas de la cuenca, y que la buena reproducción de los caudales también es el efecto de usar información de calidad aceptable más un procedimiento juicioso de calibración en las cuencas que tienen información hidrometeorológica.

Tabla 5 Eficiencia de la reproducción de caudal por parte de los MHA. Resultado de comparar las series simuladas y observadas de las cuencas tributarias hasta el sitio de las estaciones hidrológicas ubicadas sobre el río Cauca en la zona de estudio.

Estación	NSE [%]	Ajuste
Irra	95,31	Excelente
La Pintada	93,53	Excelente
Puente Iglesias	91,95	Excelente
Bolombolo	89,57	Excelente
Cañafisto	85,71	Excelente
Puente Pescadero	80,89	Excelente
Puerto Valdivia	80,63	Excelente
Apaví	80,66	Excelente
Margento	61,56	Muy bueno

4.2 Variabilidad mensual y ciclo anual del cambio en el AAS en las cuencas de la zona de estudio

Una vez calibrados los MHA implementados en las 32 cuencas de la zona de estudio, se determinó la variabilidad intranual del cambio en el AAS con series mensuales. Lo anterior bajo la siguiente premisa: si la salida de los modelos hidrológicos representa en buena medida la variabilidad de los caudales en la cuenca, especialmente los caudales medios y de recesión, los almacenamientos que integran el MHA representan los procesos hidrológicos que ocurren a nivel superficial, subsuperficial y subterráneo en las cuencas.

Vale la pena mencionar que, a partir de los MHA se obtuvieron series de cambios en el AAS con resolución temporal diaria para las 32 cuencas mencionadas en la Tabla 1 y luego se realizó la agregación para toda la zona de estudio. Si bien se cuenta con series diarias, la presentación y descripción de la variabilidad temporal del AAS se realiza mediante series mensuales, esto para efectos de identificación de patrones de variabilidad, comparación con la precipitación y poder comparar los cambios del AAS calculados en el MHA con las series de EWT de GRACE.

Durante la implementación y calibración de los MHA se logró determinar una variabilidad temporal del cambio en el AAS sectorizada dentro la zona de estudio. Se identificaron tres regiones o subzonas conformadas por cuencas con patrones similar en la variabilidad temporal del cambio en el AAS. Para efectos de sintetizar la presentación de los resultados se seleccionaron algunas cuencas para subzonas.

En la Figura 16 se presentan las subzonas para las cuales se describe la variabilidad temporal del cambio en el AAS. En cada una de las subzonas las cuencas de color amarillo son empleadas para la descripción de la variabilidad temporal del cambio en el AAS y las cuencas de color gris tienen un patrón de variabilidad similar a las cuencas amarillas de la subzona a la que pertenecen. Es importante mencionar que las cuencas ubicadas en subzonas diferentes exhiben patrón de variabilidad mensual diferente, esto último asociado a la variabilidad intranual de la precipitación en diferentes latitudes.

Las cuencas que se describen para cada subzona fueron seleccionadas garantizando el cubrimiento de cada subzona. Se seleccionaron cuencas interceptadas por el cauce del río Cauca y cuencas alejadas del cauce de dicho río. En el Anexo D del documento el lector encontrará una descripción detallada del comportamiento del AAS para cada una de las 32 cuencas de la zona de estudio.

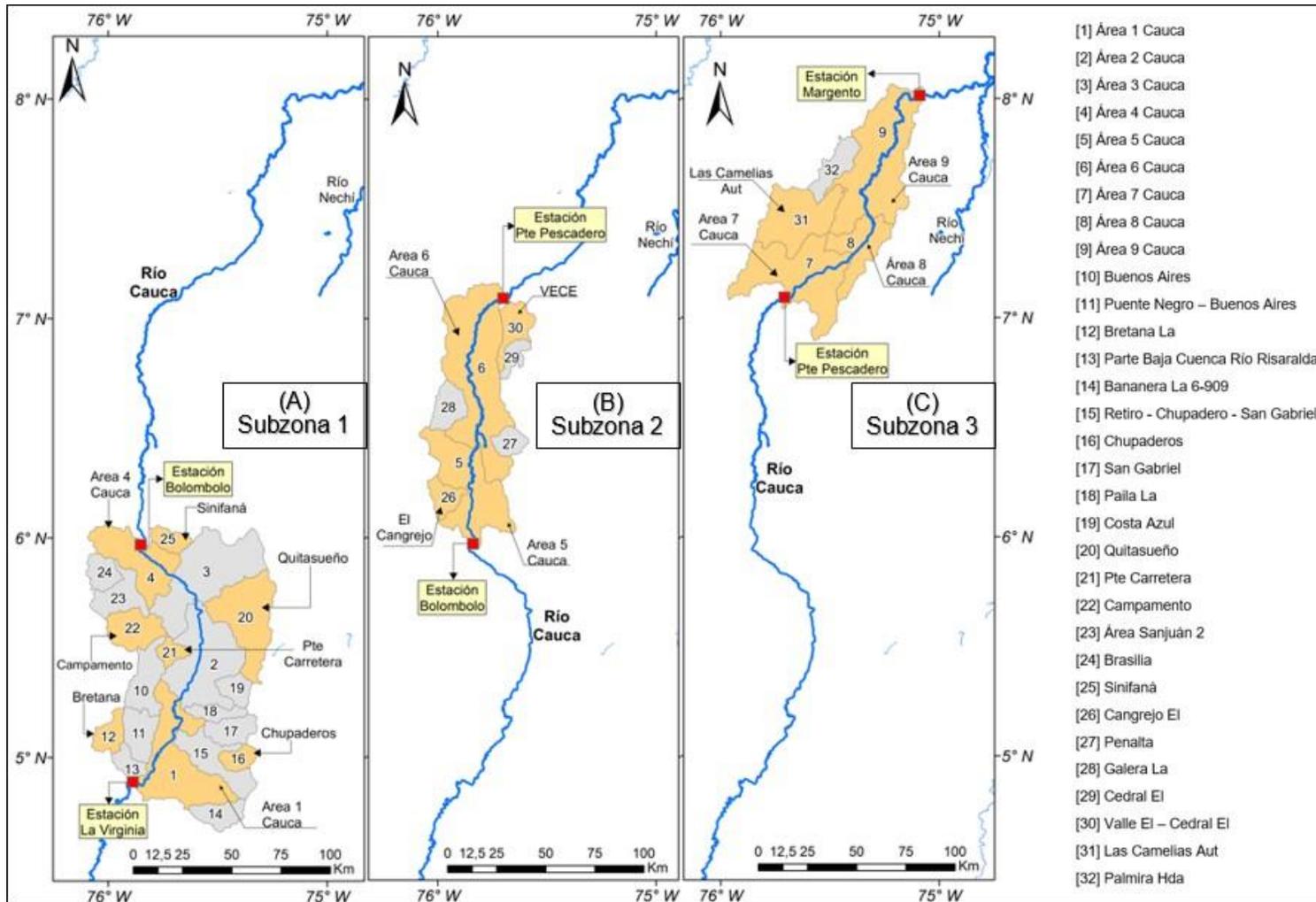
La subzona 1 está conformada por las 20 cuencas que se muestran en la Figura 16(A). En términos geográficos la subzona 1 forma parte de la región del Cauca Medio, y para efectos de esta investigación, abarca las cuencas que se encuentran en el tramo del río Cauca comprendido entre las estaciones hidrológicas La Virginia y Bolombolo. Para describir la variabilidad temporal del cambio en el AAS de la subzona 1 se emplean las cuencas Área

1 Cauca, Bretana La, Chupaderos, Pte Carretera, Área 4 Cauca, Quitasueño, Sinifaná y Campamento.

La subzona 2 está conformada por las siete cuencas que se muestran en la Figura 16(B). Esta subzona se encuentra hacia la parte baja del cañón del Cauca, estando en su totalidad en jurisdicción del departamento de Antioquia. La subzona abarca las cuencas tributarias que se encuentran en el tramo del río Cauca comprendido entre las estaciones hidrológicas Bolombolo y Pte Pescadero. Para describir la variabilidad temporal del cambio en el AAS en la subzona 2 se emplean las cuencas Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Cangrejo El y VECE.

La subzona 3 está conformada por las cinco cuencas que se muestran en la Figura 16(C). Esta subzona se encuentra en su totalidad en jurisdicción del departamento de Antioquia y geográficamente ha sido denominada como la subregión del Bajo Cauca Antioqueño. La subzona 3 abarca las cuencas tributarias que se encuentran en el tramo del río Cauca comprendido entre las estaciones hidrológicas Pte Pescadero y Margento. Para describir la variabilidad temporal del cambio en el AAS en esta subzona se emplean las cuencas Área 7 Cauca, Área 8 Cauca, Área 9 Cauca y Las Camelias Aut.

Figura 16 Subzonas empleadas para describir la variabilidad temporal del cambio en el AAS. El cambio en el AAS muestra un patrón de variabilidad similar en las cuencas que integran cada una de las subzonas, pero un comportamiento heterogéneo entre cuencas ubicadas en subzonas diferentes. (A) Subzona 1: cuencas ubicadas en el sector sur de la zona de estudio. (B) Subzona 2: cuencas ubicadas en el sector central de la zona de estudio. (C) Subzona 3: cuencas ubicadas en el sector norte de la zona de estudio.



En esta sección del documento se emplean las figuras 17, 18, 19 y 20 para presentar la variabilidad mensual del cambio en el AAS y su relación con la precipitación. Cada figura resume la variabilidad para cuatro cuencas y para cada cuenca se presentan los gráficos (A), (B), (C) y (D). Vale la pena recalcar que todos los resultados presentados en los gráficos de las figuras han sido obtenidos de los MHA calibrados (sección 4.1), y que las series de cambio en el AAS son el resultado de integrar el agua alojada en los almacenamientos subsuperficial (T3) y subterráneo (T4).

El gráfico (A) muestra la variabilidad mensual interanual del cambio en el AAS para el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2009. La zona azul del gráfico permite identificar periodos con cambios positivo y el polígono rojo cambios negativos. La connotación de cambios positivos y negativos en el AAS hace referencia a la fluctuación de esta variable respecto al valor promedio de la serie, permitiendo así la identificación de periodos de recesión en los cuales el caudal de las corrientes superficiales es mantenido principalmente por el flujo base y aportes subsuperficiales.

El gráfico (B) compara la variabilidad mensual interanual del cambio en el AAS y la precipitación en el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2009. En el eje izquierdo del gráfico se presenta el rango en el cual varía el cambio en el AAS mientras que en el eje derecho el rango en el cual varía la precipitación mensual. Este gráfico permite determinar de manera visual si los patrones de variabilidad del cambio en el AAS se acoplan con la variabilidad de la lluvia, e incluso observar desfase temporal entre las series.

El gráfico (C) muestra el ciclo anual o variabilidad intranual del cambio en el AAS construido a partir de las series diarias del Anexo B, y, en un análisis conjunto con el gráfico (A), permite identificar los periodos en los que ocurre un aporte de agua desde el suelo hacia la corriente y los periodos donde el ingreso de agua en los almacenamientos subsuperficial y subterráneo es mayor que la salida.

Por su parte, el gráfico (D) presenta el nivel de correlación entre el cambio en el AAS y la precipitación, a partir del cálculo del coeficiente de correlación lineal para las series comparadas luego de generar rezagos de tiempo entre 0 y 12 meses. Lo anterior con el objetivo de determinar el tiempo en el cual se genera la respuesta del AAS al estímulo de la precipitación. En este gráfico las barras indican el valor de la correlación para un periodo de rezago determinado, y en particular, la barra de color amarillo indica el periodo para el cual se ha obtenido la mayor correlación positiva, y con ello, el tiempo promedio que le toma al AAS responder a la precipitación.

4.2.1 Variabilidad temporal del cambio en el AAS en la subzona 1

En la Figura 17 se muestran los gráficos con la variabilidad del cambio en el AAS en las cuencas Área 1 Cauca, Bretana La, Chupaderos y Pte Carretera, y en la Figura 18 se muestran los gráficos con la variabilidad del cambio en el AAS en las cuencas Área 4 Cauca, Quitasueño, Sinifaná y Campamento.

A partir de las series mensuales se ha logrado determinar que en la subzona 1 el cambio en el AAS exhibe un patrón de variabilidad intranual bimodal, se presentan dos periodos con promedio positivo en el cambio del AAS y dos periodos con promedio negativo, tal como se muestra en los gráficos (C) de las figuras 17 y 18.

Los periodos con promedio positivo en el cambio del AAS son los meses de mayo, junio y el trimestre OND. Durante estos meses incrementa el volumen de agua en el almacenamiento subsuperficial y se da la recarga de acuíferos. Los periodos con promedio negativo del cambio en el AAS son el trimestre EFM y los meses de agosto y septiembre. Estos meses están asociados a periodos secos en los que el AAS cede agua a las corrientes superficiales.

A pesar del marcado comportamiento del cambio en el AAS en los periodos mencionados anteriormente, en los meses de abril y julio el cambio en el AAS muestra valores positivos o negativos según la ubicación de la cuenca. Este cambio en el comportamiento es explicado principalmente por el desplazamiento latitudinal de la ZCIT.

Al analizar en forma conjunta los gráficos (C) y (D) de las figuras 17 y 18 se ha logrado establecer que, los periodos con promedio positivo del cambio en el AAS son precedidos con un mes de rezago por trimestres o bimestres húmedos, mientras que los periodos con promedio negativo son precedidos con un mes de rezago por un trimestre o un bimestre seco (periodo de recesión).

Los meses de abril y julio representan meses de transición, en estos meses el cambio en el AAS puede ser cercano a 0 mm/mes, tener valores positivos o adoptar valores negativos. En los periodos en que el cambio en el AAS es cercano a 0 mm/mes se da un equilibrio entre el ingreso y la salida de agua en el suelo.

Vale la pena mencionar que, solo en la subzona 1 se identificaron cuencas con relación de rezago inferior a 1 mes. Las cuencas con este comportamiento son Área 4 Cauca, Área Sanjuán 2 y Chupaderos. En estas cuencas el cambio en el AAS ocurre entre una y dos semanas respecto a la precipitación.

En la cuenca Área 1 Cauca el cambio en el AAS varía entre los -8,5 mm/mes y 3,1 mm/mes con valores negativos en el trimestre EFM y en los meses de agosto y septiembre (gráficos A y B). Esta cuenca se encuentra en la región sur de la zona de estudio en donde los meses con menor precipitación son diciembre, enero, febrero, julio y agosto. Del gráfico D de la Figura 17 para la cuenca Área 1 Cauca es posible determinar que el cambio en el

AAS varía en función de la lluvia con 1 mes de rezago, lo que explica el desplazamiento del trimestre con promedio negativo respecto al trimestre DEF que es seco en la cuenca.

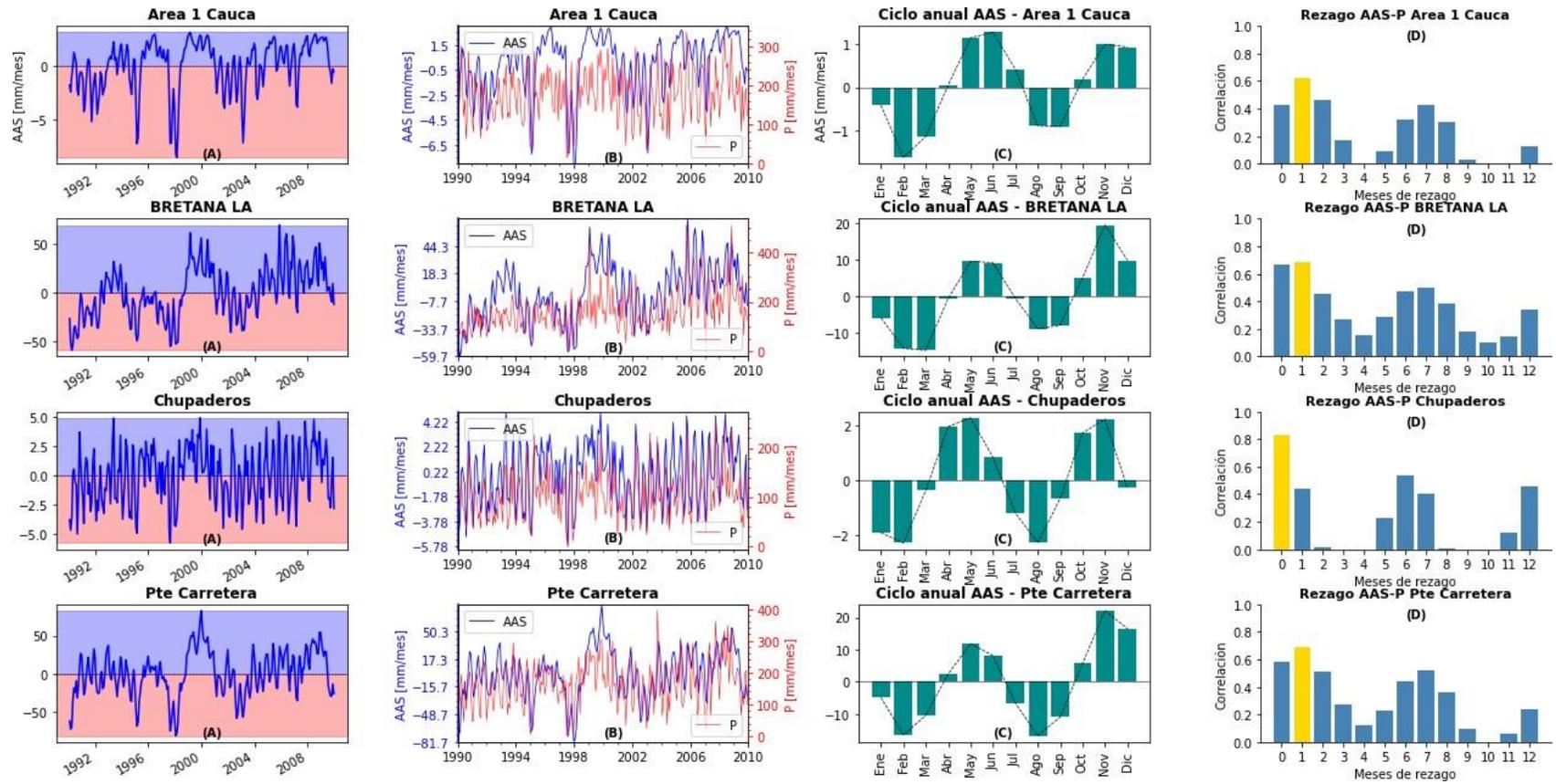
En la cuenca Bretana el cambio en el AAS varía de manera similar a la precipitación con rezago de 1 mes. En el trimestre EFM el aporte de agua desde el suelo a las corrientes mantiene el caudal de la red de drenaje durante los periodos de recesión. Durante los trimestres AMJ y SON incrementa el volumen de agua almacenado en el suelo debido al exceso de agua luego de que se genera la evaporación y la escorrentía directa.

En la cuenca Chupaderos el trimestre AMJ y los meses de octubre y noviembre tienen un cambio promedio en el AAS de 1,7 mm/mes y 2,0 mm/mes, respectivamente, mientras que en los meses de enero y febrero el cambio promedio en el AAS decrece hasta -2,1 mm/mes y en el trimestre JAS hasta -1,4 mm/mes. En esta cuenca el cambio en el AAS está rezagada entre una y dos semanas respecto a la lluvia.

En los meses con promedio negativo de cambios en el AAS el aporte de flujo desde el suelo al río Chinchiná en su cuenca alta (Chupaderos) es superior al agua que logra ingresar al suelo; lo contrario ocurre en los meses con promedio positivo en el cambio del AAS, en donde la recarga de agua es superior que las salidas del AAS.

El cambio en el AAS en la cuenca Pte Carretera tiene un promedio de -10,6 mm/mes en el trimestre EFM y -11,5 mm/mes en el trimestre JAS. El caso contrario ocurre en los trimestres AMJ y OND en donde la cuenca tiene un cambio en el AAS promedio de 7,4 mm/mes y 14,8 mm/mes, respectivamente.

Figura 17 Variabilidad mensual y ciclo anual del cambio en el AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 1 Cauca, Bretana La, Chupaderos y Pte Carretera. (A) variabilidad mensual interanual, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del cambio en el AAS, (D) correlación entre el AAS y la precipitación.



En la Figura 18 se muestran los gráficos con la variabilidad mensual interanual e intranual del cambio en el AAS, así como la relación de rezago entre el cambio en el AAS y la precipitación mensual para las cuencas Área 4 Cauca, Quitasueño, Sinifaná y Campamento.

En la cuenca Área 4 Cauca el cambio en el AAS varía entre -15,8 mm/mes y 8,5 mm/mes siguiendo el patrón de variabilidad de la precipitación mensual con un rezago aproximado de 10 días. Debido a la respuesta rápida del AAS frente a la lluvia, durante el trimestre DEF el volumen de agua en el suelo se agota por la descarga de flujo sobre el río Cauca, en contraste con el bajo ingreso de agua al suelo. En los trimestres AMJ y SON el ingreso de agua en el suelo es superior a las salidas, viéndose reflejado en el promedio positivo del cambio en el AAS de ambos trimestres.

En la cuenca Quitasueño el cambio en el AAS tiene un promedio de -17,8 mm/mes durante el trimestre EFM y de -10,4 mm/mes entre los meses de agosto y septiembre. En los meses de mayo y junio la cuenca tiene un cambio promedio en el AAS de 13,6 mm/mes y durante el trimestre OND un promedio de 16,9 mm/mes. En los meses con promedio negativo del cambio en el AAS la cuenca aporta flujo al río Arma y en los periodos con promedio positivo incrementa el volumen de agua en el suelo.

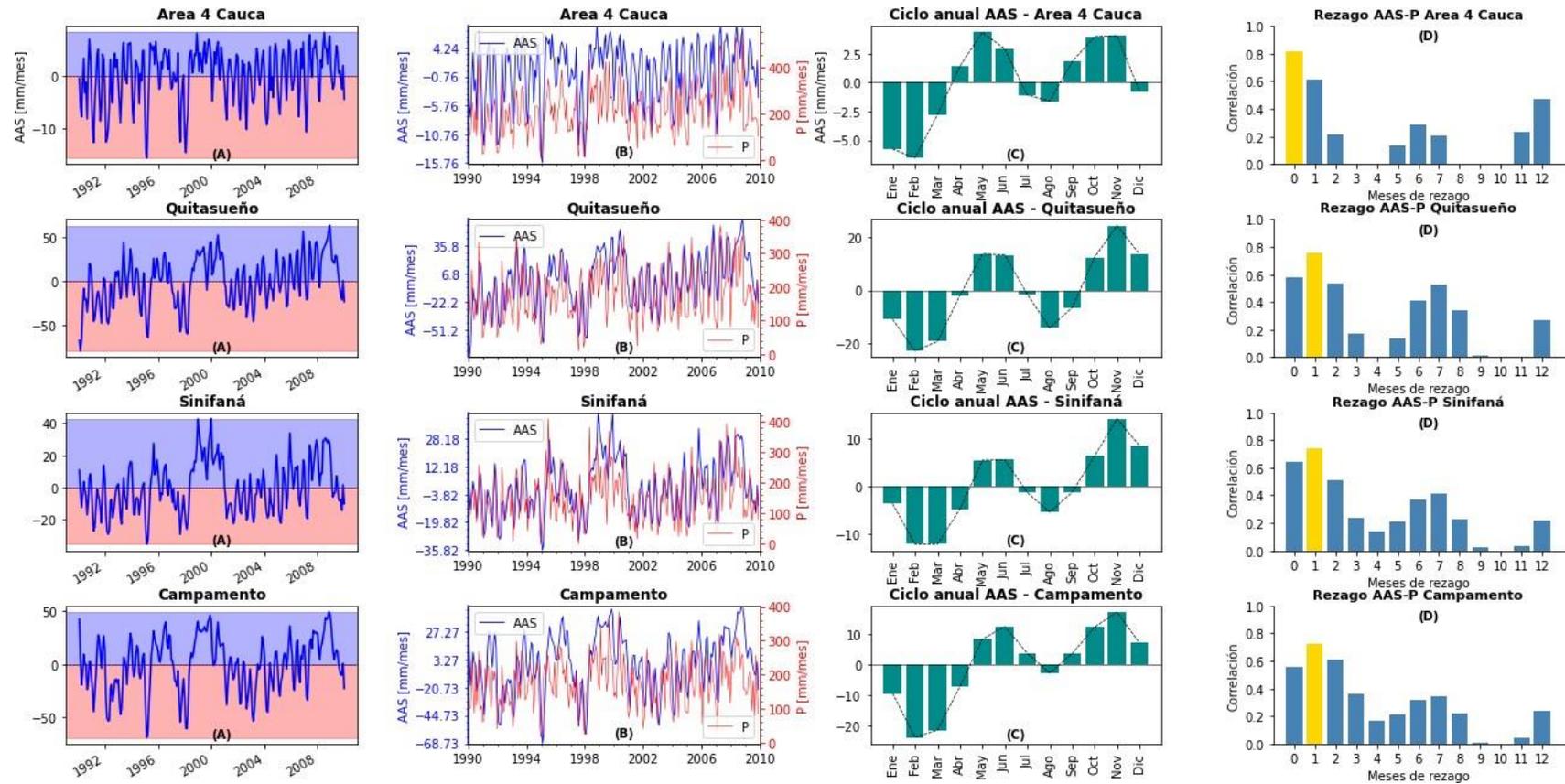
La respuesta promedio del AAS luego de la lluvia es de un mes, lo que explica que siendo MAM un trimestre húmedo en la cuenca Quitasueño, la recarga del AAS solo ocurre hasta el mes de abril y los efectos dicha recarga continúen hasta junio que es un mes seco. En el caso de las lluvias que ocurren entre septiembre y noviembre los efectos sobre el AAS se notan a partir del mes de octubre y se extienden hasta diciembre.

En la cuenca Sinifaná los meses con menor AAS son febrero y marzo con un cambio promedio de -12,1 mm/mes, este promedio se debe al hecho de que las lluvias que ocurren entre los meses diciembre y febrero no compensan mediante recarga el aporte de flujo desde el suelo a la quebrada Sinifaná. El caso contrario ocurre en el trimestre OND en donde el cambio promedio en el AAS es de 9,7 mm/mes, promedio asociado a las lluvias del trimestre húmedo SON.

En la cuenca Campamento el cambio en el AAS tiene un periodo de valores negativos y dos periodos de valores positivos. Entre enero y abril la cuenca tiene un promedio de -15,5 mm/mes, en el trimestre MJJ un promedio de 8,2 mm/mes y en el trimestre SON un almacenamiento promedio de 11,1 mm/mes.

Durante el trimestre EFM la cuenca Campamento el caudal de estiaje del río San Juan depende de la descarga del AAS, siendo el mes de febrero el de mayor agotamiento del AAS. Lo contrario ocurre en los meses de junio y noviembre en donde las lluvias de los meses de abril, mayo, septiembre y octubre permiten que los niveles de agua en el suelo se recuperen y ganen exceso de agua como reserva para los periodos de estiaje.

Figura 18 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 4 Cauca, Quitasueño, Sinifaná y Campamento. (A) variabilidad mensual del AAS, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del AAS, (D) nivel de correlación entre el AAS y la precipitación.



4.2.2 Variabilidad temporal del cambio en el AAS en la subzona 2

La Figura 19 presenta los gráficos con la variabilidad mensual interanual y ciclo anual del cambio en el AAS para las cuencas Área 4 Cauca, Área 5 Cauca, Cangrejo El y VECE, las cuales fueron seleccionadas para describir el comportamiento del cambio en el AAS en la subzona 2.

En la subzona 2 la variabilidad intranual o ciclo anual del cambio en el AAS muestra un periodo de cambios con promedio negativo, un periodo de cambios con promedio positivo y un periodo intermedio o de transición. El periodo en el que predominan cambios negativos en el AAS ocurre entre los meses de enero y mayo, y se da principalmente en las cuencas cercanas a las latitudes 6°N y 7°N (ver Figura 16B y gráficos C de la Figura 19).

En la subzona 2 el periodo con promedio positivo en el cambio del AAS corresponde al trimestre OND para todas las cuencas. Por su parte, el periodo de transición varía entre dos y cuatro meses según la posición latitudinal de la cuenca y puede extenderse entre los meses de junio y septiembre.

Entre los meses de junio y septiembre la magnitud del cambio en el AAS varía entre el 10% y 50% de las magnitudes del trimestre OND. Sin embargo, es importante mencionar que este periodo de transición no es tan evidente en la cuenca Área 5 Cauca, debido a que dicha cuenca también se ve influenciada por la variabilidad bimodal de la lluvia en la subzona 1. La región sur de la cuenca Área 5 Cauca representa en términos geográficos la transición entre las subzonas 1 y 2.

En el caso particular de la subzona 2, el periodo de transición es mayor que en el resto del área de estudio y su ocurrencia está asociada a bimestres o trimestres secos que preceden con uno o dos meses de rezago los cambios en el AAS. En cuencas como Área 6 Cauca y Cangrejo que tienen dos meses de rezago, el cambio promedio en el AAS durante la transición es alrededor del 10% de los valores del trimestre OND, mientras que en las cuencas con rezago de un mes el cambio promedio en el AAS es cercano al 50% de las magnitudes del bimestre octubre y noviembre.

En la cuenca Área 5 Cauca el cambio en el AAS tiene un promedio de -8,3 mm/mes en el trimestre EFM asociado a la poca lluvia del trimestre DEF. En los meses de mayo y junio se presenta el primer periodo promedio positivo en el cambio del AAS debido al ingreso de agua en el suelo en los meses abril y mayo.

El ciclo anual del cambio en el AAS en la cuenca Área 6 Cauca muestra valores negativos entre enero y abril, indicando que en dichos meses se genera el mayor aporte de agua desde el suelo hacia el río Cauca y que no se compensan dichos aportes. Durante el trimestre OND (especialmente en noviembre) el AAS es recargado y se recuperan los niveles de agua durante el periodo de transición.

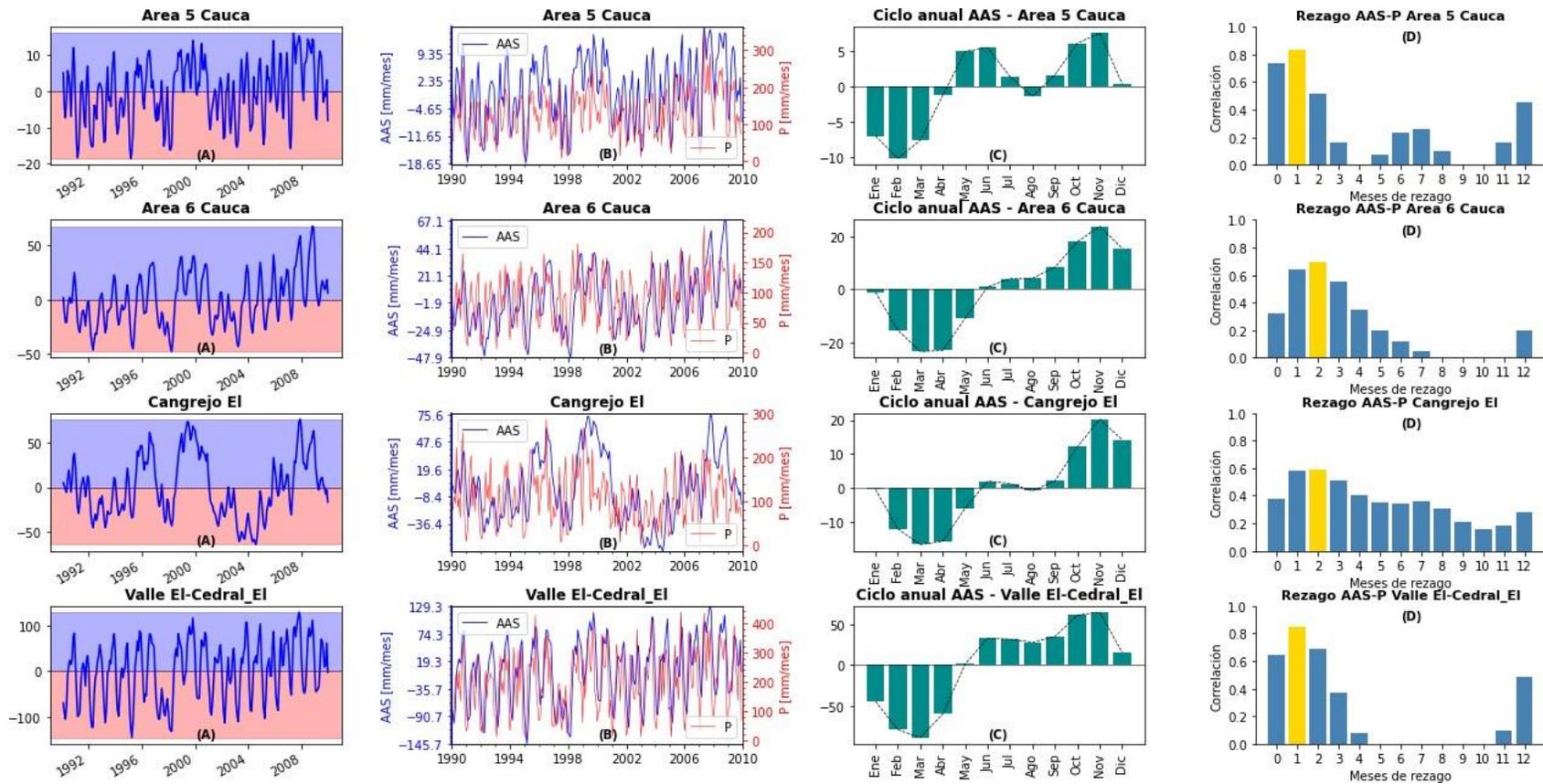
En la cuenca Cangrejo el trimestre FMA tiene un promedio de -14,9 mm/mes en los cambios del AAS, mientras que el trimestre OND tiene un promedio de 15,5 mm/mes. Entre los meses de junio y septiembre el AAS no sufre cambios significativos en comparación con los meses restantes (promedios de 1,09 mm/mes), por lo que el trimestre JJA puede considerarse como transición.

En la cuenca VECE el cambio en el AAS tiene un promedio de -68,3 mm/mes en los primeros cuatros meses del año y un promedio de 42,7 mm/mes entre junio y noviembre. En el mes de mayo el cambio promedio en el AAS se aproxima a 0 mm/mes representando el comienzo del periodo de recuperación del AAS luego de la temporada seca. El caso contrario ocurre durante el mes de diciembre, el volumen de agua almacenado en el suelo decrece debido a que los aportes de agua desde el suelo al río San Andrés son mayores que los aportes de la lluvia al suelo.

Nótese el cambio en el patrón de variabilidad del AAS entre las cuencas Área 5 Cauca y las cuencas restantes de la subzona 2. Se pasa de una variabilidad con dos periodos de promedio positivo y uno negativo en el cambio del AAS, a una variabilidad anual en la que se marca un periodo con cambios negativo y un periodo con promedio positivos.

La subzona 2 representa el área de transición espacial entre las subregiones del Cauca Medio y Bajo Cauca. Como se explicó en el numeral 3.1, la precipitación en la zona de estudio incrementa de sur a norte y cambia de patrón bimodal en el sur a un patrón unimodal en la región del Bajo Cauca. Lo anterior y el rezago de uno a dos meses entre la precipitación y los cambios en el AAS explican la transición en la subzona 2.

Figura 19 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Cangrejo El y VECE (Valle El – Cedral El). (A) variabilidad mensual del AAS, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del AAS, (D) nivel de correlación entre el AAS y la precipitación.



4.2.3 Variabilidad temporal del cambio en el AAS en la subzona 3

La Figura 20 presenta los gráficos con la variabilidad mensual interanual y ciclo anual del cambio en el AAS para las cuencas Área 7 Cauca, Área 8 Cauca, Área 9 Cauca y Las Camelias Aut. Estas cuencas se encuentran ubicadas en la subregión del Bajo Cauca y sumadas a la cuenca Palmira Hda cubren el 100% de la subzona 3 (Figura 16C).

El ciclo anual del cambio en el AAS para esta subzona muestra un periodo con promedio negativo y un periodo con promedio positivo (gráficos C). El periodo con promedio negativo es el comprendido entre los meses de enero y mayo, en dichos meses se genera el mayor aporte de flujo base desde el AAS a los ríos Tarazá, Man y Cauca, siendo marzo el mes de mayor aporte de flujo.

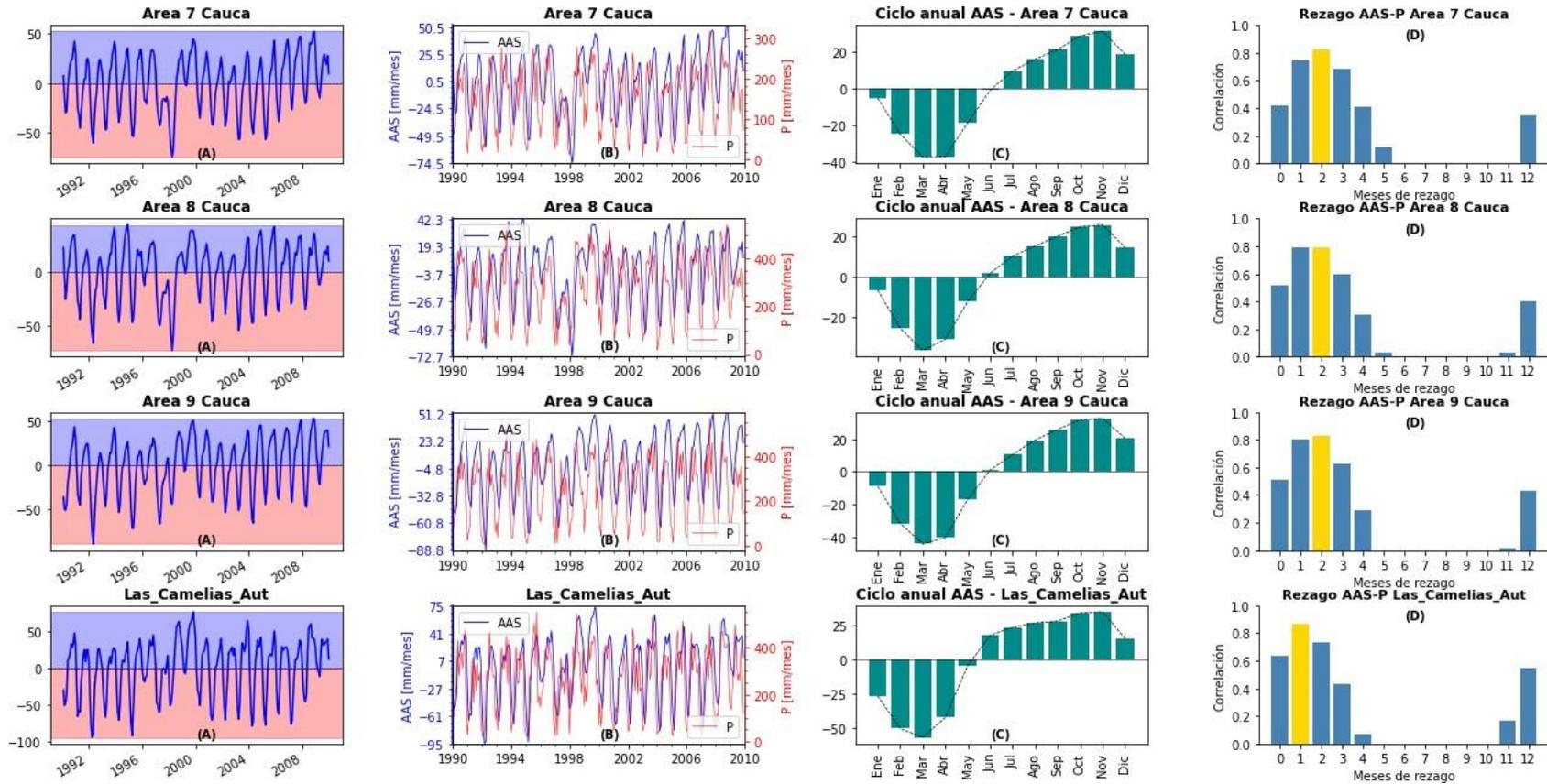
Por su parte, el periodo de con promedio positivo del cambio en el AAS se extiende desde el mes de julio hasta diciembre, permitiendo la recuperación del AAS. La recuperación de los volúmenes de agua en el AAS se da en forma rezagada con un promedio de dos meses respecto a las lluvias que ocurren entre los meses abril y octubre, tal como se muestra en los gráficos D de la Figura 20.

En los gráficos A y B de la Figura 20 se presenta la variabilidad mensual del cambio en el AAS en las cuencas características de la subzona 3. En la cuenca Área 7 Cauca el cambio en el AAS varía entre -74,5 mm/mes y 52,2 mm/mes, con un promedio de -26,4 mm/mes entre enero y abril y un promedio de 21,2 mm/mes entre julio y noviembre.

En el caso de la cuenca Área 8 Cauca, el cambio en el AAS varía entre -72,7 mm/mes y 43,2 mm/mes. Del ciclo anual se logró establecer que en los primeros cuatro meses del año se da la descarga del AAS con un cambio promedio de -24,7 mm/mes, y entre julio y noviembre, la recuperación del AAS con un cambio promedio de 19,1 mm/mes.

En la cuenca Área 9 Cauca el cambio en el AAS varía entre -88,7 mm/mes y 52,7 mm/mes, con promedio de -31,3 mm/mes entre enero y abril y promedio de 24,1 mm/mes entre julio y noviembre. En la cuenca Las Camelias Aut el cambio en el AAS varía entre -94,9 mm/mes y 76,3 mm/mes, con un promedio de -44,3 mm/mes en la temporada seca y un promedio de 29,7 mm/mes en la temporada húmeda.

Figura 20 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 7 Cauca, Área 8 Cauca, Área 9 Cauca y Las Camelias Aut. (A) variabilidad mensual del AAS, (B) comparación de la variabilidad del AAS y la precipitación mensual, (C) ciclo anual del AAS, (D) nivel de correlación entre el AAS y la precipitación.



4.2.4 Elementos adicionales sobre la variabilidad temporal del cambio en el AAS en las subzonas 1, 2 y 3

El rezago entre la lluvia y el cambio en el AAS representa el tiempo que le toma al agua viajar desde la superficie del suelo hasta los almacenamientos subsuperficial y subterráneo. Durante el recorrido ocurren procesos como la retención de agua en superficie por las coberturas terrestre, infiltración e ingreso de agua en la zona vadosa, escorrentía superficial y la recarga en la zona saturada.

En la subregión del Cauca Medio se desarrollan laderas con relieve montañoso y escarpado, en ambientes geológicos de rocas ígneas y metamórficas que conforman a escala regional basamentos Acuífugas (IDEAM, 2010). En las cuencas enmarcadas dentro de la subregión del Cauca Medio prima la escorrentía superficial y subsuperficial en las laderas, de allí que la respuesta del AAS ante las variaciones de la precipitación tenga un tiempo de rezago que varía entre una semana y un mes.

En la subregión del Bajo Cauca las condiciones geológicas y de pendiente son diferentes al Cauca Medio. En el Bajo Cauca se encuentran rocas ígneas y metamórficas cubiertas de manera discordante por sedimentos que alcanzan espesores de hasta 1.500 m (IDEAM, 2010). Estos sedimentos forman acuíferos libres y semiconfinados cuya recarga proviene principalmente la precipitación. En el sistema acuífero de la región del Bajo Cauca el flujo base mantiene el caudal de los ríos Man y Tarazá y Cauca durante periodos de estiaje.

Los resultados encontrados en esta investigación representan un importante esfuerzo por describir de manera detallada la variabilidad intranual e interanual del cambio en el AAS en cuencas colombianas. Estos resultados están en la misma vía de estudios realizados en escala espacial mayor; muestra de ello son las conclusiones del estudio de Güntner et al., (2007), quienes determinaron que en el trópico Suramericano la variabilidad estacional del cambio en el AAS es controlada por el ciclo anual de la precipitación. Así mismo, Guarín Giraldo & Poveda, (2013) determinaron que el ciclo anual de EWT de GRACE y la humedad responden al ciclo anual de la precipitación con rezago entre uno y dos meses.

A una conclusión similar llegaron Humphrey et al., (2016) luego de examinar las principales características de la variabilidad temporal de GRACE, encontrando entre otras cosas, que en las regiones tropicales y ecuatoriales el ciclo estacional de la precipitación generalmente precede al cambio en el AAS con un rezago temporal de uno a dos meses.

La correlación entre el cambio en el AAS y la precipitación mensual en las cuencas de la zona de estudio de esta tesis confirman el comportamiento identificado en los estudio anteriores. Para la cuenca del río Cauca en las subregiones del Cauca Medio y el Bajo Cauca, la variabilidad estacional del cambio en el AAS puede ser explicada en gran medida por los patrones de variabilidad de la precipitación mensual, y la respuesta al estímulo de la precipitación ocurre con un rezago de entre 10 días y 90 días, en donde la mayor frecuencia de rezago se encuentra entre los 30 y 60 días.

Nótese el cambio en el patrón de variabilidad del cambio en el AAS entre las cuencas Área 5 Cauca y las cuencas restantes de la zona 2, se pasa de un ciclo anual con dos periodos de promedio positivo y uno negativo, a un ciclo anual con un periodo de promedio negativo y un periodo con promedio positivos. La subzona 2 representa el área de transición en la variabilidad temporal del cambio en el AAS entre las subregiones Cauca Medio y Bajo Cauca.

4.3 Variabilidad interanual y ciclo anual del cambio en el AAS y su relación con el ENSO en la zona de estudio

En esta sección del documento se describe la variabilidad mensual del cambio AAS en toda la zona de estudio (escala regional). La serie de tiempo de cambios en el AAS para toda la zona de estudio es el resultado de agregar la variabilidad del AAS de las 32 cuencas.

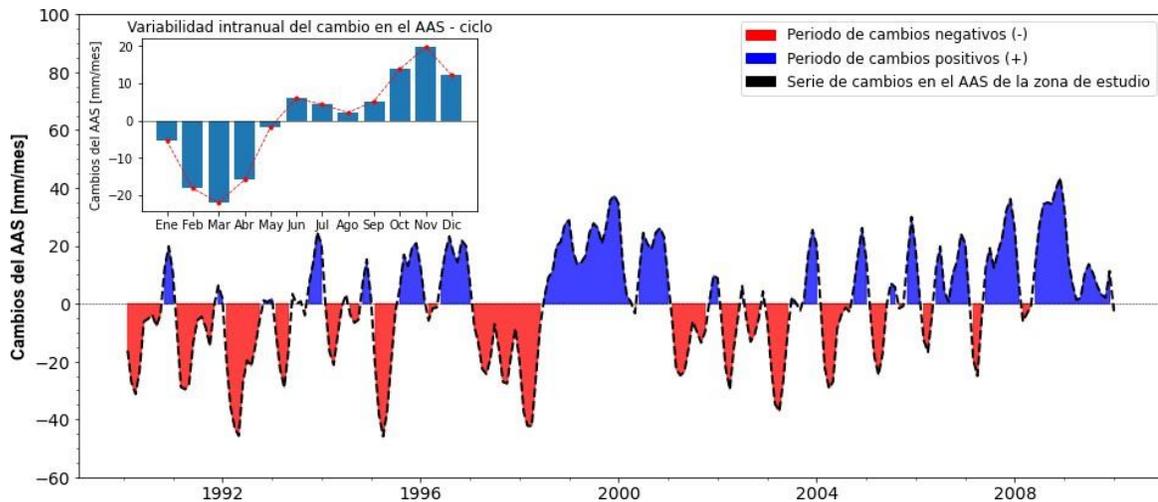
La Figura 21 presenta la variabilidad mensual interanual del cambio en el AAS de la zona de estudio, para el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2009. La figura también muestra el ciclo anual con la variabilidad intranual del cambio en el AAS para dicho periodo. A nivel de toda la zona de estudio el cambio en el AAS varía entre -45,9 mm/mes y 43,4 mm/mes y su variabilidad depende de la precipitación en las subzonas. Mediante la prueba de Mann Kendall considerando un nivel de significancia de 0,05 se determinó que el cambio en el AAS tiene una tendencia creciente para el periodo de análisis.

En la escala regional la variabilidad intranual del cambio en el AAS tiene el siguiente comportamiento (ciclo anual en la Figura 21): entre los meses de enero y abril los cambios en el AAS tienen un promedio negativo, siendo el trimestre FMA el de valores más bajos (-18,7 mm/mes). Entre los meses de mayo y septiembre el cambio promedio en el AAS es de 3,1 mm/mes, valor cercano a cero en comparación con el nivel más bajo (marzo) y más alto (noviembre). Por su parte, en el trimestre OND el cambio promedio en el AAS es de 15,3 mm/mes, reflejando una recuperación del volumen de agua en el suelo respecto a los primeros meses del año.

A nivel regional, entre los meses de enero y abril prima el aporte de agua desde el suelo a las corrientes, mientras que entre septiembre y diciembre ocurre la recuperación del AAS. La variabilidad intranual de la escala regional es diferente a la variabilidad intranual de las cuencas de la subzona 1, donde el cambio en el AAS tiene dos periodos con promedio positivo y dos periodos con promedio negativo.

El cambio en la variabilidad intranual al pasar de la escala de cuenca a la escala regional, obedece principalmente a la agregación espacial, en la escala regional se enmascara parte de la variabilidad que solo es visible en las cuencas. También es importante resaltar la similitud entre la variabilidad intranual regional y la variabilidad intranual observada en la subzona 3. Esta similitud se asocia a la presencia de grandes almacenamientos de agua en el suelo en la subzona 3 respecto a la subzona 1, generando una influencia mayor de la subzona 3 sobre la variabilidad regional que la influencia de la subzona 1.

Figura 21 Variabilidad mensual interanual e intranual del cambio en el AAS para la zona de estudio. Identificación de periodos con promedio positivo y negativo en el cambio del AAS.



La Figura 22 presenta la comparación entre la variabilidad mensual interanual del cambio en el AAS y la variabilidad mensual del índice MEI. Esto para efectos de identificar la relación entre los periodos con promedio positivo y negativo del cambio en el AAS y las fases del ENSO. En términos generales, la variabilidad mensual interanual conserva el patrón del ciclo anual, sin embargo, en algunos años el cambio en el AAS tiene un promedio mensual y anual considerablemente mayor o inferior a los del ciclo anual.

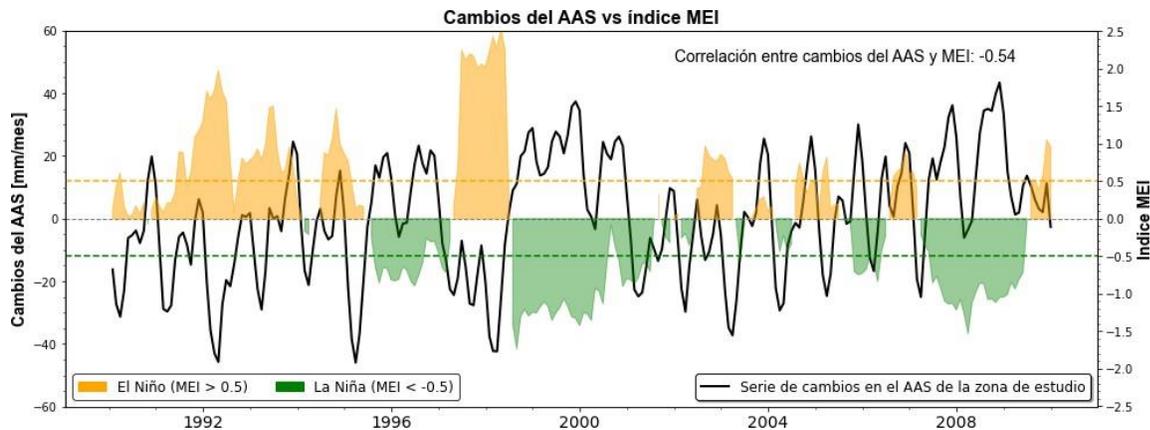
De acuerdo con de Linage et al., (2013), en la escala interanual la variabilidad del cambio en el AAS en la parte norte de Suramérica está influenciada principalmente por el ENSO, por lo que la notable reducción o incremento en el promedio anual del cambio en el AAS en la zona de estudio se asocia a las fases cálida y húmeda del ENSO. En la Figura 22 se observa la ocurrencia de al menos dos periodos de El Niño y La Niña. A continuación, se describen los periodos con mayor impacto del ENSO sobre los cambios en el AAS de la zona de estudio.

Entre comienzos del año 1997 y mediados de 1998 la zona de estudio tuvo promedio negativo en los cambios del AAS, promedio asociado a El Niño ocurrido entre abril de 1997 y mayo de 1998. La reducción del promedio mensual y anual de la precipitación en las cuencas, generó la reducción de los volúmenes de agua en el suelo debido a que no se compensaron los aportes de agua desde el suelo hacia las corrientes, con el ingreso de agua por efectos de la lluvia.

Durante el año 1997 todos los meses presentaron cambios negativos en el AAS. En el trimestre FMA el cambio promedio en el AAS fue de -20 mm/mes, entre mayo y agosto (periodo de recuperación a nivel regional con un promedio de 3,1 mm/mes) el cambio promedio en el AAS fue de -17,4 mm/mes. El efecto más fuerte de El Niño sobre los cambios en el AAS de la zona de estudio en el año 1997 ocurrió durante el trimestre OND, al pasar de un promedio multianual de 15,3 mm/mes a un promedio de -15,4 mm/mes.

La Figura 22 también muestra los efectos de La Niña sobre el cambio en el AAS. Entre enero de 1999 y el primer trimestre del año 2000 la magnitud del cambio en el AAS fue positiva, comportamiento que difiere principalmente para los primeros cuatro meses del año, donde en términos promedio los cambios en el AAS tienen magnitudes negativas. Se asocia el incremento en las magnitudes del cambio en el AAS a La Niña ocurrida entre julio de 1999 y febrero del 2000. Entre marzo de 2007 y noviembre de 2008 también se aprecian los efectos de La Niña ocurrida entre julio de 2007 y febrero de 2008 sobre los cambios en el AAS. Durante los periodos de La Niña el incremento en la magnitud del cambio en el AAS varía entre un 105% y 110%.

Figura 22 Determinación de periodos con cambios sobre los promedios mensuales del AAS por efectos de El Niño y La Niña e identificación de periodos de recarga y descarga del AAS.

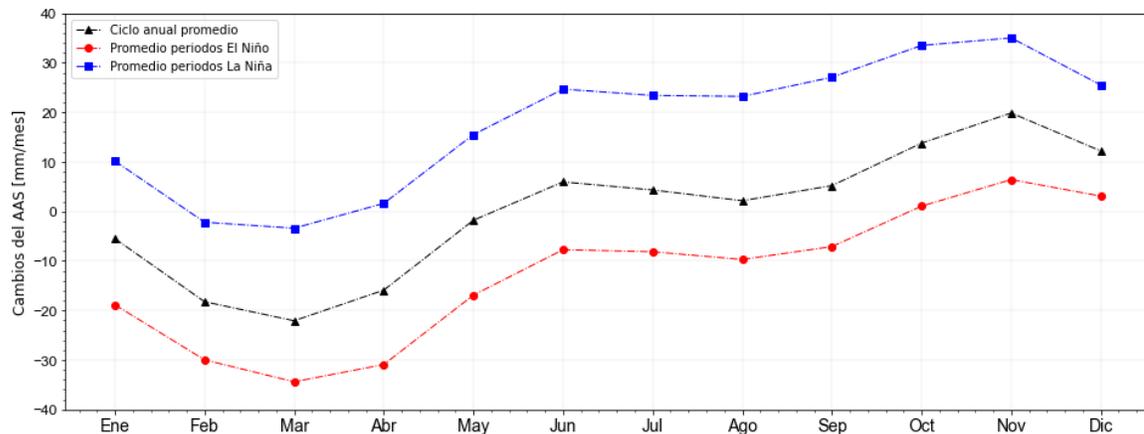


Para continuar explorando los efectos del ENSO sobre el cambio en el AAS de la zona de estudio se construyó el gráfico de la Figura 23. El gráfico contiene tres curvas que muestran el comportamiento de los promedios mensuales del cambio en el AAS para tres condiciones climáticas, condición promedio (negra), La Niña (azul) y El Niño (roja).

En la Figura 23 se observa que en condiciones promedio el ciclo anual del AAS varía entre -22,1 mm/mes y 19,9 mm/mes teniendo valores negativos de almacenamiento durante los primeros cuatro meses del año y valores positivos entre junio y diciembre.

Durante La Niña de los años 1999 y 2007 se presentaron lluvias en periodos tradicionalmente secos manteniendo humedad en el suelo y una recarga permanente de los almacenamientos subsuperficial y subterráneo. En términos multianual el trimestre FMA tiene un promedio de -18,7 mm/mes, pero durante el año 1999 el cambio promedio en el AAS fue de 14,8 mm/mes. Entre los meses de mayo y agosto el cambio en el AAS pasó de un promedio multianual de 3,1 mm/mes a 24,8 mm/mes, y en el trimestre OND tuvo un incremento superior al 100% respecto al promedio multianual al pasar de 15,3 mm/mes a 35,8 mm/mes.

Figura 23 Variabilidad mensual intranual del cambio en el AAS de la zona de estudio para las fases cálida y húmeda del ENSO y la condición promedio. La selección de los periodos con las diferentes fases del ENSO se realizó empleando el índice MEI y la clasificación de El Niño en Colombia con base en las anomalías de la temperatura superficial en el océano pacífico tropical central, región Niño 3 (IDEAM, 2014).



En el año 2008 el cambio en el AAS también mostró un incremento considerable respecto a los promedios multianuales. En el trimestre FMA el cambio en el AAS tuvo un valor medio de -3,4 mm/mes, promedio cinco veces mayor al multianual (-18,7 mm/mes) para el mismo periodo. Entre los meses de mayo y agosto el cambio promedio en el AAS fue de 27,7 mm/mes, valor nueve veces mayor al promedio multianual (3,1 mm/mes) para el mismo periodo. Finalmente, durante el trimestre OND el cambio promedio en el AAS fue de 39,1 mm/mes, representando un incremento del 250% respecto al promedio multianual del trimestre.

Durante El Niño el promedio anual del cambio en el AAS experimenta una reducción considerable. En condiciones promedio entre los meses de enero y abril el cambio en el AAS registra un valor medio de -15,4 mm/mes mientras que para los mismos meses durante El Niño decrece hasta los -28,5 mm/mes. Durante el trimestre OND se presentan los niveles más altos del AAS; en condiciones promedio en este trimestre el cambio en el AAS alcanza un valor de 15,3 mm/mes, mientras que en periodos El Niño el cambio en el AAS experimenta una reducción del 75% registrando un valor medio de 3,52 mm/mes.

Los efectos del ENSO sobre la climatología colombiana se reflejan en mayor medida en el incremento o reducción del ingreso de humedad hacia las cuencas según la fase del ENSO (Carvajal et al., 2016; Germán Poveda, 2004). El Niño impacta la variabilidad del cambio en el AAS reduciendo el promedio anual y exacerbando las magnitudes negativas de los promedios mensuales. Lo contrario ocurre durante La Niña, el incremento en el acumulado mensual de la lluvia exagera los promedios mensuales positivos del cambio en el AAS reflejando un incremento significativo en el promedio anual.

4.4 Comparación entre el cambio en el AAS del MHA y el EWT de GRACE

En esta sección del documento se presenta una comparación entre las series de cambios en el AAS calculadas con el MHA y las series de EWT de la misión satelital GRACE. La comparación se realiza con el objetivo de determinar si las observaciones de GRACE reflejan la variabilidad del cambio en el AAS en la zona de estudio. Se parte de la premisa de que el MHA representa la dinámica hidrológica de la zona de estudio, ya que la variabilidad del cambio en el AAS de los MHA se acopla de manera correcta a la reproducción de los caudales medios y de recesión de las cuencas que conforman la zona de estudio.

Esta comparación y los resultados restante de esta investigación toman mayor importancia si se considera el hecho de que las observaciones de EWT tienen los mayores errores en la zona ecuatorial debido a la convergencia de las trayectorias de los satélites hacia los polos, lo que se traduce en una mayor densidad de observación en los polos, y menor frecuencia de medición en el trópico (Llubes et al., 2007). Lo anterior se suma al hecho de que en cuencas con área inferior a 60.000 km² resultados como los de GRACE pierden precisión (Bolaños et al., 2022).

La comparación es realizada en la escala de pixel de GRACE y en la escala regional de la zona de estudio. El periodo para el cual se realiza la descripción del EWT es el comprendido entre los meses de abril del año 2002 y diciembre de 2009. El inicio del periodo corresponde a la fecha de inicio de las observaciones por parte de la misión satelital y la fecha final corresponde al corte del periodo de análisis de la presente investigación.

Vale la pena mencionar y dejar claro que, en esta sección del documento cada vez que se use la sigla AAS se hace alusión al cambio en el almacenamiento de agua en el suelo calculado con el MHA, y cuando se presente la sigla EWT se hace referencia al equivalente del cambio en el almacenamiento de agua en el suelo observado por GRACE.

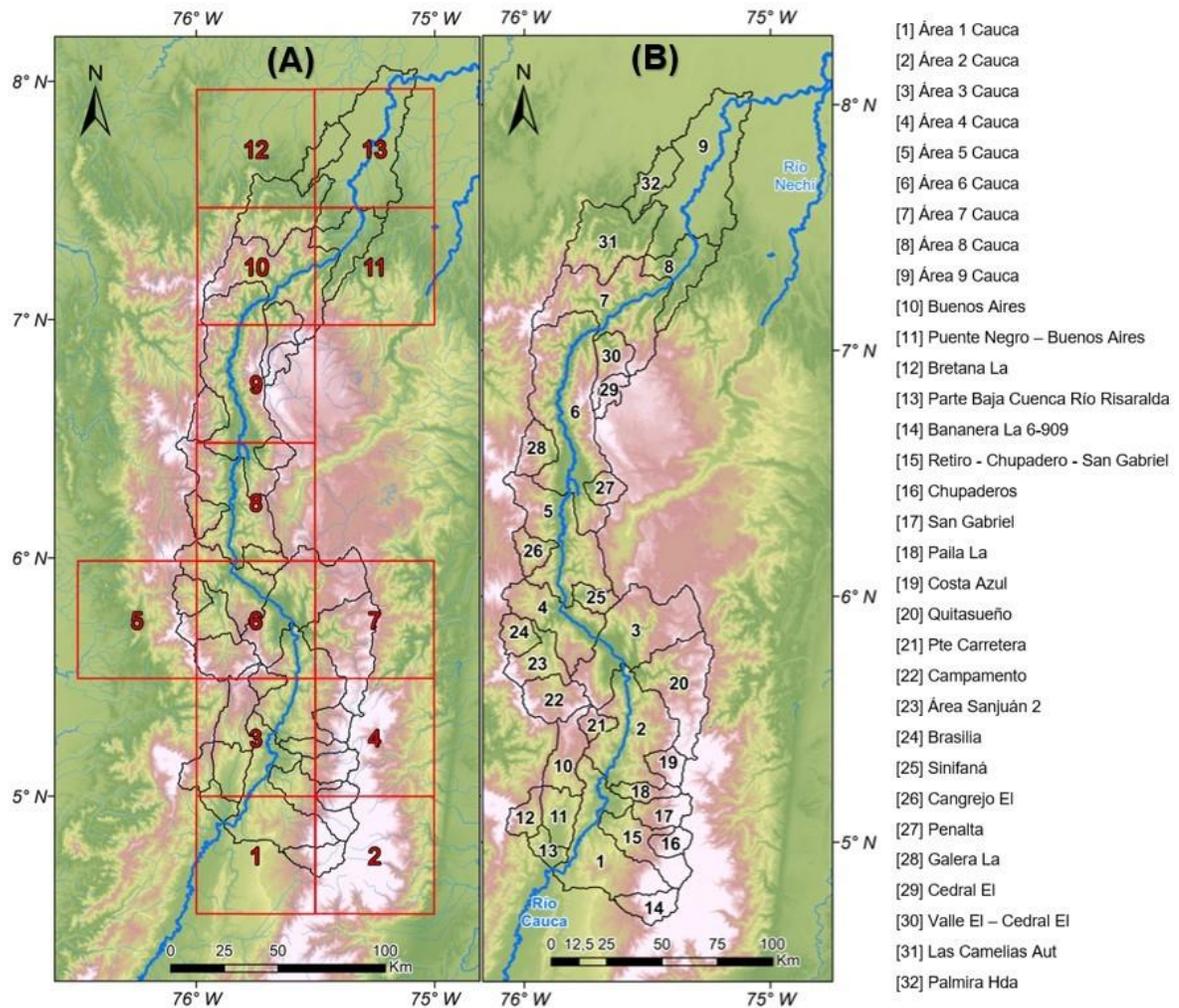
4.4.1 Cálculo de series de AAS para cada pixel

Para la construcción de la serie de AAS en cada pixel se realiza la agregación del AAS calculado con el MHA en cada una de las cuencas que se encuentran al interior del pixel. Durante el cálculo del AAS en el pixel solo se considera el aporte de cada cuenca proporcional al área que cubre en el pixel.

En la Figura 24 se muestran dos mapas y el listado de las cuencas que conforman la zona de estudio. En la figura el mapa A presenta la ubicación de 13 pixeles empleados para cubrir la extensión de la zona de estudio, así como la porción de cada una de las cuencas que queda enmarcada al interior de los pixeles. Los pixeles fueron enumerados en orden crecientes en sentido sur-norte.

El mapa B presenta las cuencas de la zona de estudio con una numeración y es complementado con el listado de nombres de las cuencas, listado que permite asociar para cada cuenca el nombre en función de la numeración. El uso conjunto de los mapas permite identificar las cuencas que conforman cada pixel.

Figura 24 Pixeles de la misión satelital GRACE con influencia sobre la zona de estudio. (A): pixeles empleados en la comparación de EWT y AAS. (B): cuencas de la zona de estudio.



En la Tabla 6 se presenta el listado de las cuencas que son geográficamente interceptadas por los pixeles de GRACE y el porcentaje de área que ocupan dichas cuencas dentro del pixel que las intercepta (%Ocupación del pixel).

Tabla 6 Resumen de las cuencas y el porcentaje que ocupan dentro de cada uno de los pixeles empleados para la comparación del AAS del MHA y el EWT de GRACE.

Pixel	% Ocupación del pixel	Cuencas interceptadas por el pixel
Pixel 1	40	Área 1 Cauca, PBCR, RCSG, Bananera La
Pixel 2	20	Bananera La, Área 1 Cauca, Chupaderos, RCSG

Pixel	% Ocupación del pixel	Cuencas interceptadas por el pixel
Pixel 3	90	Área 1 Cauca, Área 2 Cauca, Chupaderos, RCSG, Paila La, Costa Azul, San Gabriel, Pte Carretera, Buenos Aires, Bretana La, PBCR, PNBA
Pixel 4	30	Área 2 Cauca, Costa Azul, RCSG, Chupaderos, San Gabriel, Paila La, Quitasueño
Pixel 5	10	Área 4 Cauca, Brasilia, Campamento, Área Sanjuán 2
Pixel 6	99	Campamento, Brasilia, Área Sanjuán 2, Área 3 Cauca, Área 4 Cauca, Área 2 Cauca, Sinifaná, Pte Carretera, Buenos Aires, Quitasueño
Pixel 7	44	Área 2 Cauca, Área 3 Cauca, Quitasueño
Pixel 8	70	Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Cangrejo El, Sinifaná, Penalta
Pixel 9	70	Área 6 Cauca, Galera La, Penalta, Cedral El, VECE
Pixel 10	80	Área 6 Cauca, Área 7 Cauca, VECE, Las Camelias Aut
Pixel 11	33	Área 7 Cauca, Área 8 Cauca, Área 9 Cauca, Las Camelias Aut
Pixel 12	15	Las Camelias Aut, Área 9 Cauca, Palmira Hda
Pixel 13	62	Las Camelias Aut, Área 9 Cauca, Palmira Hda

4.4.2 Comparación entre AAS y EWT para cada pixel

Para evaluar el rendimiento de GRACE en la reproducción de la variabilidad temporal del AAS, se realiza la comparación gráfica y numérica entre la magnitud del AAS y EWT, se analiza la variabilidad intranual, la correlación entre las series y la tendencia en el tiempo. La tendencia fue determinada aplicando la prueba de Mann Kendall a las series considerando un nivel de significancia de 0,05.

Las figuras 25 y 26 presentan la variabilidad del AAS y el EWT en cada uno de los pixeles. En las figuras el gráfico (A) contiene la variabilidad del AAS y el EWT en mm/mes para el periodo de análisis. En el gráfico se demarcan dos zonas, la zona azul indica los periodos con AAS y EWT positivo mientras que la zona roja indica periodos con valores negativos. El gráfico también presenta el cálculo de métricas como el MAE, RMSE y el NRMSE. El gráfico A permite analizar la diferencia entre la magnitud del almacenamiento de agua en el suelo expresado por las series.

El gráfico B presenta las series de AAS y EWT estandarizadas con el fin de equiparar la amplitud en la variabilidad de cada serie, y con ello, corroborar y comparar la estacionalidad y determinar desfases temporales. El gráfico de las series estandarizadas es acompañado por un subgráfico de dispersión con la correlación entre las series de AAS y EWT; a lo anterior se suma el cálculo del desfase temporal entre las series y el coeficiente de correlación lineal tanto para las series rezagadas como entre las series sin evaluar rezago temporal. Vale la pena mencionar que el desfase temporal que se presenta en el gráfico corresponde al rezago (tiempo en meses) para el cual se obtuvo la mayor correlación.

La Figura 25 presenta la variabilidad del AAS y el EWT de los pixeles 1 a 8. En el pixel 1 el AAS varía entre -43,6 mm/mes y 53,1 mm/mes mientras que el EWT varía entre -31,7 mm/mes y 15,8 mm/mes. Ambas series muestran una tendencia creciente en el tiempo dentro del periodo de comparación, sin embargo, en términos de magnitud las series presentan un error absoluto medio de 17,29 mm/mes (gráfico A). En el gráfico de dispersión que acompaña las series estandarizadas (grafico B) es posible apreciar una

correlación aceptable (0,73), correlación que se debe a la similitud en la estacionalidad y la tendencia de las series sin la presencia de desfase en el tiempo.

Aun cuando las series muestran una buena correlación, en el gráfico también se evidencia una dispersión en la nube de puntos, lo anterior asociado a la discrepancia entre las magnitudes de GRACE y AAS. En términos de dispersión la serie de EWT muestra un RMSE de 20,23 mm/mes correspondiente a una desviación promedio del 20,91% respecto a la serie de AAS.

En el pixel 2 el AAS varía entre -29,3 mm/mes y 31,5 mm/mes mientras que el EWT varía entre -42,5 mm/mes y 28,2 mm/mes, mostrando ambas series un desfase temporal de 6 meses entre sí. El gráfico A para el pixel 2 permiten determinar que ambas series conservan el mismo orden de magnitud, por lo que en términos de magnitud GRACE reproduce la variabilidad del almacenamiento. Sin embargo, del grafico B es posible apreciar que la variación en el tiempo en términos de estacionalidad no se ajusta a los resultados de AAS de las cuencas que se encuentran al interior del pixel. Muestra de ello es la dispersión de la nube de puntos en el gráfico de las series estandarizadas. La diferencia promedio en la magnitud de las series es de 13,45 mm/mes, y la series de EWT tiene una desviación promedio del 25,67% respecto al AAS, siendo esta desviación explicada por el desfase temporal entre las series.

En el pixel 3 el AAS varía entre -63,4 mm/mes y 74,3 mm/mes mientras que el EWT varía entre -74,7 mm/mes y 37,2 mm/mes, ambas series sin desfase temporal entre sí. Ambas series muestran una tendencia creciente en el periodo de comparación, sin embargo, en términos de magnitud las series presentan un error absoluto medio de 25,61 mm/mes. En el gráfico de dispersión del gráfico B se muestra una nube de puntos con una correlación aceptable (0,79), nivel de correlación explicado mayormente por la similitud en la estacionalidad y tendencia de las series, sumado al hecho de que las series no presentan desfase en el tiempo.

Sin embargo, también se evidencia una dispersión en la nube de puntos, lo anterior asociado a la discrepancia entre los valores de almacenamiento de las series con un RMSE de 31,39 mm/mes correspondiente a una desviación promedio del 22,79%.

En el gráfico A del pixel 4 se puede apreciar que las series tienen un rango de variabilidad semejante y en ambos casos se aprecia una tendencia creciente. En este pixel el AAS varía entre -65,4 mm/mes y 72,4 mm/mes, mientras que el EWT varía entre -79,3 mm/mes y 52,6 mm/mes. Aunque las series muestran una amplitud similar, en el gráfico B se puede observar un rezago de 6 meses de la serie de EWT respecto al AAS, este rezago explica la dispersión de la nube de puntos en la gráfica de series estandarizadas.

La discrepancia entre ambas series debido al desfase temporal se ve reflejado en la diferencia promedio de 25,29 mm/mes entre la magnitud de las series, con una dispersión promedio de 15,62 mm/mes y una desviación del 21,69% EWT respecto al AAS de.

En el pixel 5 la magnitud del AAS es de 3 a 5 veces inferior a los valores de EWT, el AAS varía entre -1,2 mm/mes y 0,8 mm/mes mientras que el EWT varía entre -8,9 mm/mes y 4,5 mm/mes. La notable discrepancia en la magnitud de las series se refleja en la alta desviación (NRMSE de 180%) del EWT respecto al AAS, y un error medio absoluto cercano a la amplitud máxima de la serie de AAS.

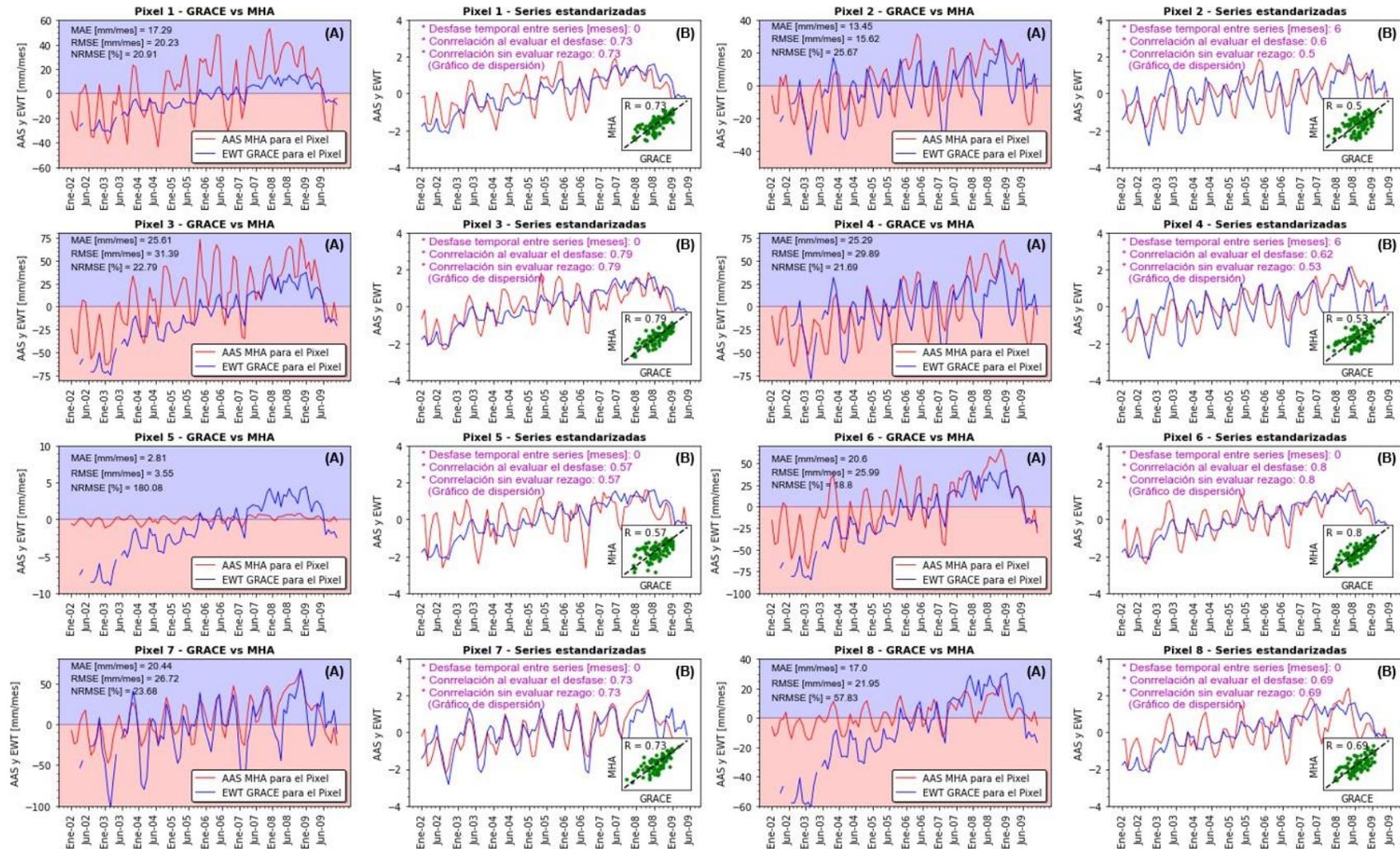
Del gráfico B se aprecia que las series tienen una tendencia creciente en el periodo de análisis. La diferencia en la magnitud de las series se asocia a la poca cobertura en el pixel por parte de las cuencas de la zona de estudio, solo el 10% del área del Pixel 5 es cubierta por las cuencas, por lo que es probable que dicha cobertura sea insuficiente para realizar la comparación entre el AAS y el EWT.

Se suma a lo anterior que el 90% del pixel se encuentra sobre el flanco occidental de la cordillera occidental, por lo que las observaciones de GRACE reflejan el comportamiento del AAS en cuencas ubicadas en la región pacífica, región con un comportamiento climático marcadamente diferente al de la zona de estudio.

Para el pixel 6 las series de AAS y EWT muestran una tendencia creciente con una correlación de 0,8 y poca dispersión. Lo anterior se debe a la similitud en la magnitud de las variables y el patrón de variabilidad, sin embargo, las métricas como el MAE y el NRMSE muestran una diferencia media de 20,6 mm/mes y una desviación promedio de 18,8% del EWT respecto al AAS.

La desviación entre las series obedece mayormente a las diferencias en el periodo comprendido entre los meses abril de 2002 y diciembre de 2005. En este periodo la diferencia entre las series alcanza un valor residual máximo de 69 mm/mes, mientras que entre los meses de enero de 2006 y diciembre de 2009 la diferencia promedio entre las series es de 13,2 mm/mes.

Figura 25 Comparación entre el AAS calculado con MHA y series de EWT de GRACE en los pixeles 1 al 8. (A) variabilidad mensual del AAS y el EWT. (B) series de AAS y EWT estandarizadas para el análisis de estacionalidad y desfase temporal.



En el pixel 7 la serie de EWT reproduce la estacionalidad del AAS de las cuencas que cubre el pixel. En este pixel el AAS varía entre -47,6 mm/mes y 65,2 mm/mes mientras que el EWT varía entre -102,3 mm/mes y 67,8 mm/mes. Ambas series exhiben un patrón de variabilidad con dos picos y dos valles, una tendencia creciente en el periodo de análisis y un rezago de 0 meses.

A pesar de la aceptable correlación y el buen ajuste que muestra la nube de puntos a la recta unitaria en el gráfico B, la diferencia promedio entre las series es de 20,4 mm/mes y la desviación de la serie de EWT respecto a la serie AAS de 23,68% (grafico A). La diferencia entre las magnitudes de EWT y AAS en el Pixel 7 se deben mayormente a la amplitud que toma la serie de EWT hacia los valores negativos. En los periodos donde el AAS y el EWT tienen almacenamiento negativo la diferencia promedio entre las series es de 25,1 mm/mes, mientras que en los periodos con valores positivos la diferencia promedio entre las series es de 10 mm/mes.

En el pixel 8 el AAS varía entre -15,2 mm/mes y 22,7 mm/mes mientras que el EWT varía entre -60,9 mm/mes y 30,4 mm/mes. Las series tienen una tendencia creciente en el periodo de análisis y en términos de estacionalidad muestran de dos picos de recarga y dos valles de descarga.

Se puede considerar que las series tienen una correlación aceptable (0,69) que se debe a la no presencia de rezago temporal, la similitud en la estacionalidad y similitud en la tendencia del valor medio anual. La dispersión de la nube de puntos del gráfico B obedece a la diferencia en la magnitud del AAS y el EWT en el periodo comprendido entre los meses de abril de 2002 y diciembre de 2005. En este periodo el EWT tiene valores de almacenamiento negativos, mientras que el AAS varía entre positivo y negativo en función del acumulado mensual de la precipitación, alcanza la diferencia entre la magnitud de las series un valor residual máximo de 52,26 mm/mes para el mes de diciembre de 2002.

Entre abril de 2002 y diciembre de 2005 la diferencia media entre el AAS y el EWT es de 26,4 mm/mes, mientras que entre enero de 2006 y diciembre de 2009 la diferencia promedio es de 8,7 mm/mes.

La Figura 26 presenta la variabilidad del AAS y el EWT en los pixeles 9, 10, 11, 12 y 13. En el pixel 9 el AAS varía entre -125,3 mm/mes y 200,4 mm/mes mientras que el EWT varía entre -59,3 mm/mes y 29,5 mm/mes. En este pixel el EWT muestra una diferencia significativa en cuanto a la magnitud del AAS, el error medio absoluto entre las series es de 56,29 mm/mes, valor que representa el aproximadamente el 60% de la amplitud de la serie de EWT. En términos promedio la magnitud del AAS calculado con MHA en las cuencas interceptadas por el Pixel 9, es 3,5 veces mayor que las observaciones de GRACE.

En el pixel 10 AAS varía entre -96,7 mm/mes y 89,9 mm/mes y el EWT varía entre -67,4 mm/mes y 33,6 mm/mes, con error medio absoluto entre las series es de 44,18 mm/mes. Reflejo de la discrepancia en la magnitud de las series es la dispersión de la nube de puntos y baja correlación (0,39) que se muestra en el gráfico B.

Para cada uno de los años dentro del periodo de comparación la serie de AAS muestra ciclo bimodal. Por su parte, la serie de EWT muestra valores negativos durante periodo comprendido entre los meses de abril de 2002 y diciembre de 2005, por lo tanto, al momento de comparar las series en periodos en los que el AAS alcanza su máximo positivo y EWT refleja valores negativos, se presentan los residuales más altos, explicando así la dispersión del 26,92% y el RMSE de 50,24 mm/mes entre las series. A pesar de la pobre reproducción de la serie de AAS por parte de GRACE para las cuencas enmarcadas en el Pixel 10, la serie de EWT conserva la tendencia media anual.

En el pixel 11 la magnitud del AAS varía entre -9,8 mm/mes y 8,5 mm/mes mientras que el EWT varía entre -76,4 mm/mes y 50,6 mm/mes. En este pixel las observaciones de GRACE indican valores de almacenamiento de agua 2,5 veces mayor que el almacenamiento calculado con el MHA en las cuencas dentro del pixel. La notable discrepancia en la magnitud de las series se refleja en la alta desviación (NRMSE de 120,91%) del EWT respecto al AAS y un error medio absoluto de 17,18 mm/mes.

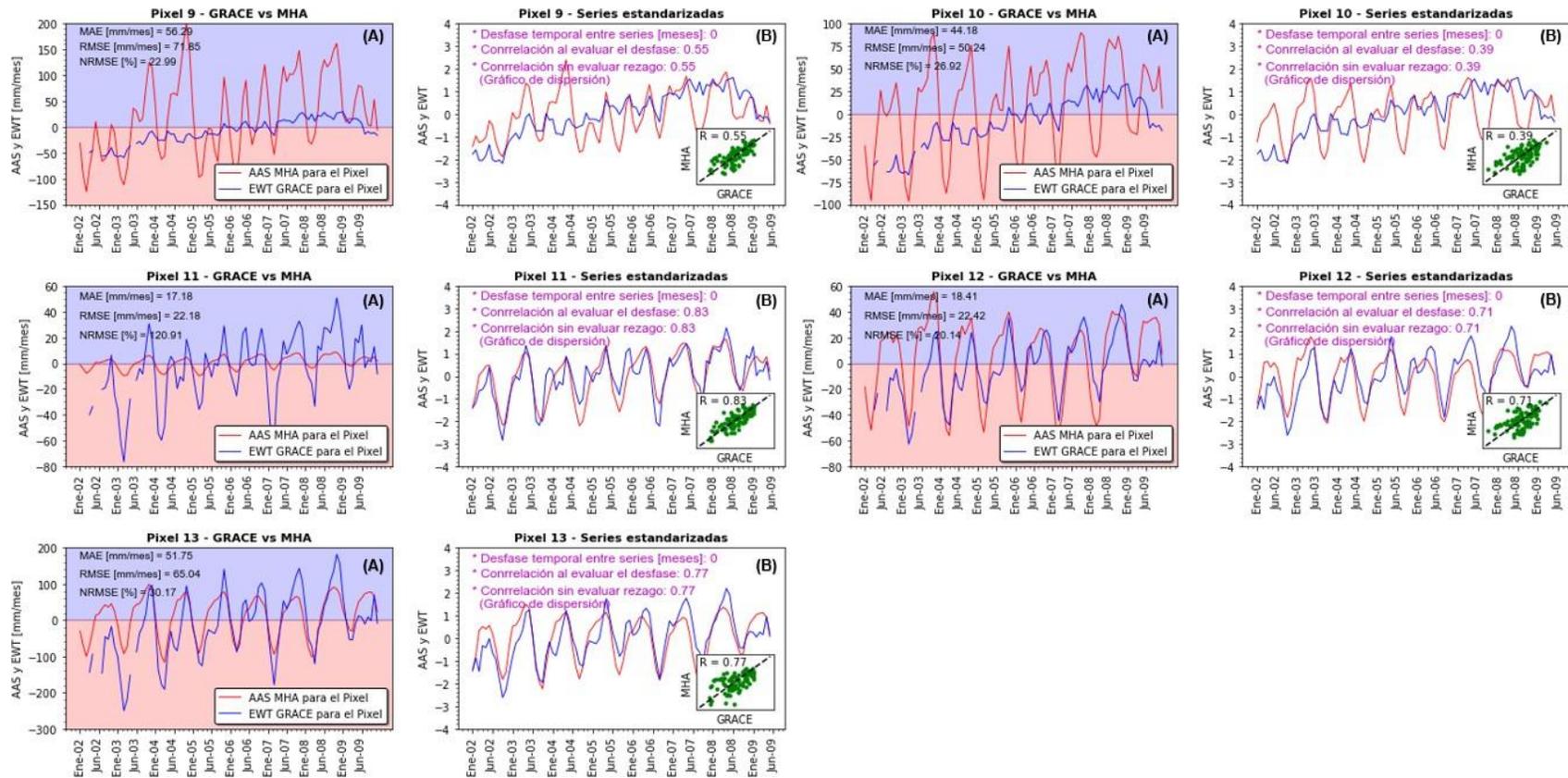
Contrario a la magnitud, la serie EWT muestra un ajuste aceptable en la reproducción del patrón de variabilidad de la serie de AAS, sumado al hecho de que ambas series presentan tendencia creciente en los valores medios anuales. El ajuste de la nube puntos respecto a la línea de pendiente unitaria en el gráfico B muestra una correlación aceptable (0,83). A pesar de la baja precisión en la reproducción de la magnitud, la buena correlación entre las series se debe la similitud en el patrón de variación de ambas series, la tendencia creciente y que las series no presentan rezago temporal entre sí.

En los pixeles 12 y 13 las observaciones de GRACE se ajustan en buena medida a la variabilidad del almacenamiento del AAS. En el caso del Pixel 12 el AAS varía entre -56,1 mm/mes y 55,1 mm/mes mientras que el EWT varía entre -62,6 mm/mes y 45,4 mm/mes. Las cuencas enmarcadas en los pixeles 12 y 13 se encuentran ubicadas en la subregión 3, lo que explica su comportamiento unimodal, comportamiento que se refleja en ambas series con una correlación de 0,71 en el Pixel 12 y 0,77 en el caso del Pixel 13. En ambos pixeles es posible apreciar que las series de AAS y EWT no tiene desfase temporal.

En el pixel 12 el error medio absoluto entre las series es de 18,41 mm/mes mientras que en el pixel 13 el error medio absoluto alcanza los 51,75 mm/mes. La diferencia significativa entre la magnitud (desviación promedio de 20,4%) obedece principalmente al registro por de niveles negativos por debajo de los calculados con los MHA en los años 2002 y 2004, así como la diferencia entre los almacenamientos positivos entre los años 2007 y 2009.

En el caso de las cuencas encerradas en el Pixel 12, tanto la series de EWT como el AAS indican que el promedio anual no muestra tendencia creciente ni decreciente; por el contrario, en el Pixel 13 se logró determinar que el promedio anual del almacenamiento incrementa año tras año en el periodo de análisis.

Figura 26 Comparación entre el AAS calculado con MHA y series de EWT de GRACE en los pixeles 9 al 13. (A) variabilidad mensual del AAS y el EWT. (B) series de AAS y EWT estandarizadas para el análisis de estacionalidad y desfase temporal.



4.4.3 Comparación entre AAS y EWT para toda la zona de estudio

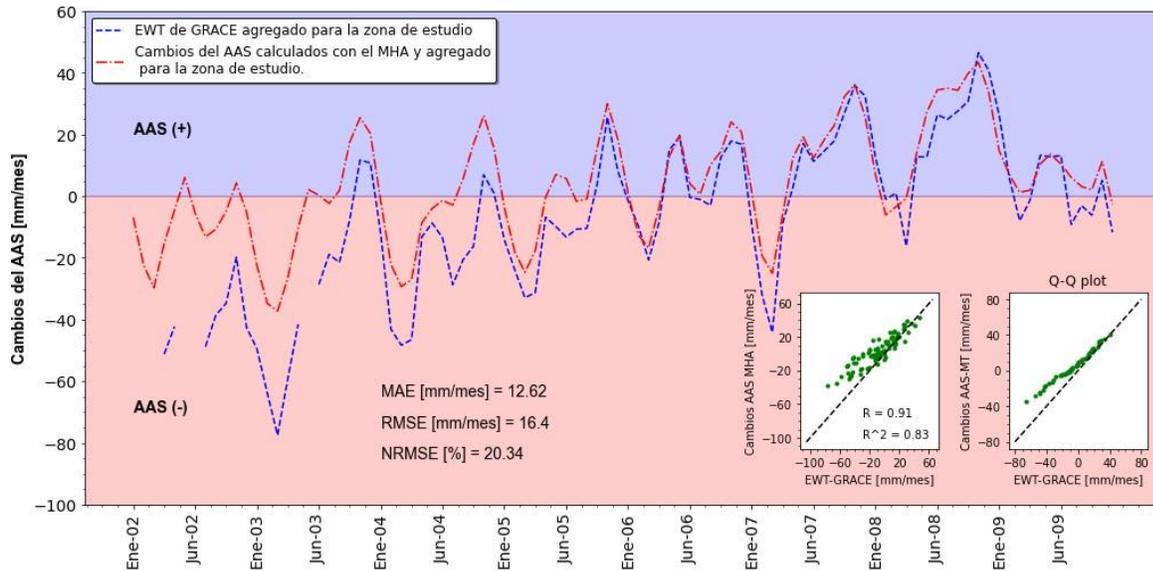
En esta sección se realiza la comparación entre la serie mensual de EWT obtenida de GRACE y la serie de AAS calculada con los MHA, teniendo como escala de referencia la extensión de la zona de estudio. La serie de tiempo de AAS para toda la zona de estudio es el resultado de agregar las series de almacenamiento de agua en el suelo de las 32 cuencas, mientras que la serie de EWT para toda la zona de estudio es el resultado de agregar las observaciones de GRACE de los 13 pixeles. La comparación es realizada para el periodo comprendido entre los meses de abril de 2002 y diciembre de 2009.

La Figura 27 presenta la variabilidad el almacenamiento del agua en el suelo representado tanto por la serie de AAS de los MHA (curva roja) como por la series de EWT de GRACE (curva azul). En la figura la franja azul representa valores negativos de almacenamiento mientras que la franja roja representa los valores positivos, la figura también presenta métricas como el MAE, RMSE y NRMSE calculadas para cuantificar la diferencia en la magnitud de las series. Los gráficos de dispersión y $Q - Q$ en la Figura 27 presentan la correlación y comparación entre las distribuciones de las series de AAS y EWT.

En la zona de estudio el AAS varía entre -37,2 mm/mes y 43,4 mm/mes, mientras que el EWT varía entre -77,5 mm/mes y 46,5 mm/mes. Las series muestran una estacionalidad bien definida que se compone por dos periodos picos y dos periodos valles en el almacenamiento de agua. Durante los periodos picos la zona de estudio experimenta una recuperación de los niveles del agua en el suelo debido a la recarga de agua que genera la precipitación, mientras que en los periodos en los que ocurren los valles la cuenca experimenta una reducción en los niveles de agua en el suelo debido a que los aportes de agua desde el suelo hacia las corrientes como flujo base son mayores que la recarga del almacenamiento.

Mediante el cálculo de los rezagos temporales se determinó que las series no tiene desfase en el tiempo, lo anterior debido a que muestran una frecuencia de variación similar. También se aplicó la prueba Mann Kendall considerando un nivel de significancia de 0,05 y se determinó que ambas series tienen tendencia creciente en el promedio anual de almacenamiento de agua en el suelo dentro del periodo de comparación.

En términos de magnitud las series tienen un error absoluto medio de 12,62 mm/mes con un RMSE de 16,4 mm/mes y una desviación del 20,34% de la serie de EWT respecto al AAS. Al igual que en la escala de pixel, a nivel de cuenca el EWT también muestra de manera permanente valores negativos de almacenamiento en el periodo comprendido entre abril de 2002 y diciembre de 2005, mientras que en el mismo periodo el AAS indica valores negativos y positivos del almacenamiento según el mes del año. En este periodo la diferencia promedio entre el AAS y el EWT es de 21,19 mm/mes.

Figura 27 Comparación entre el AAS del MHA y el EWT de GRACE para la zona de estudio.

Entre los meses de enero de 2006 y diciembre de 2009 las series de EWT muestran un mejor ajuste y reproducción del almacenamiento de agua en la zona de estudio, en este periodo la diferencia promedio en la magnitud de las series es de 6,06 mm/mes, siendo este valor tres veces menor que la diferencia que se presenta en los primeros cuatro años del periodo de comparación.

En el gráfico de dispersión que acompaña las series se muestra una nube de puntos con una buena correlación (0,91), correlación que se debe a la similitud en la estacionalidad y tendencia de las series, la no presencia de desfases en el tiempo y que la magnitud del almacenamiento es reproducida de manera aceptable, esto indicado por la baja dispersión en la nube puntos. El gráfico $Q - Q$ muestra que las mayores diferencias entre las series ocurren para los valores negativos de almacenamiento puesto que GRACE sobrestima el almacenamiento negativo con relación a los valores obtenidos con los MHA, esto ocurre mayormente en los primeros 4 años del periodo de comparación.

A pesar de las discrepancias entre los años 2002 y 2005, las series muestran un orden de magnitud similar y la reproducción del AAS por parte de GRACE mejora conforme se presentan valores positivos en la serie de EWT. A nivel de zona de estudio, tanto la diferencia promedio como la dispersión y desviación entre las series reducen aproximadamente entre un 30% y 46% respecto a las diferencias encontradas a escala de pixel. Todo lo anterior indica que se ha obtenido una mejora en la reproducción de la variabilidad mensual del almacenamiento del agua en el suelo en la zona de estudio por parte de GRACE, a escala de zona de estudio la variabilidad del EWT se ajusta mejor a la variabilidad del AAS que en la escala de pixel.

En la zona de estudio las cuencas tienen una extensión menor a los 2.500 km², tamaño 30 veces menor que umbral definido por Bolaños et al., (2022), este umbral se refiere al tamaño de cuenca a partir del cual los modelos que reproducen el almacenamiento total

de agua y las mediciones de GRACE tienen una marcada reducción en el rendimiento y representan pobremente la variabilidad mensual del AAS. Sin embargo, los resultados de la presente investigación también indican que el umbral en la escala o tamaño de cuenca en el que GRACE muestra un ajuste aceptable respecto a la variabilidad del almacenamiento del agua en el suelo es menor que los 60.000 km² definidos Bolaños et al., (2022), esto tomando en cuenta que GRACE reproduce de manera aceptable la variabilidad del almacenamiento del agua en el suelo agregado en toda la zona de estudio y esta última tiene un área de 20.593 km².

4.4.4 Resumen de los resultados de la comparación entre AAS y EWT a escala de pixel y regional

La comparación entre las series de AAS y EWT permite destacar algunos aspectos sobre la representación de la variabilidad del AAS en la zona de estudio por parte de GRACE. A escala de pixel y de cuencas (áreas menores a 2.500 km²) GRACE logra reproducir en buena medida la estacionalidad y la tendencia del promedio anual del cambio en el AAS. Sin embargo, el EWT muestra una desviación promedio del 26% respecto a la magnitud del cambio en el AAS. El resultado anterior confirma para la cuenca del río Cauca el problema de escala descrito por Bolaños et al., (2022), al analizar la representación del AAS mediante GRACE y modelos hidrológico hidrológicos globales en la cuenca del río Magdalena.

La desigualdad en la amplitud de las series AAS y EWT en los pixeles 1, 3, 9 y 10 indica que GRACE subestima la magnitud del cambio en el almacenamiento del agua en el suelo en algunos sectores de la zona de estudio, mientras que en los pixeles 7, 8 y 13 sobrestima dichos cambios, especialmente en los periodos de estiaje. Otro aspecto que denota la marcada diferencia en cuanto a la magnitud de las series de EWT y AAS es la diferencia dentro del periodo comprendido entre los meses de abril de 2002 y diciembre de 2005.

En los pixeles 1, 3, 6, 8, 9 y 10 los registros de GRACE muestran cambios negativos en el almacenamiento con tendencia creciente, indicando que durante dicho periodo el almacenamiento presentó niveles de agua inferiores al nivel neutro¹, sin embargo, a escala anual el balance entre la recarga y la salida de flujo base hacia las corrientes fue positivo permitiendo la recuperación gradual del almacenamiento. En el caso de la serie de cambios en el AAS, entre los meses de abril de 2002 y diciembre de 2005 muestra variaciones con periodos en los que el almacenamiento tiende agotarse y periodos en los que se recupera por encima del nivel neutro.

La adecuada reproducción de la estacionalidad del AAS por parte de GRACE obedece en mayor medida a la similitud en la frecuencia con la que varían las series de EWT y AAS en

¹ Nivel neutro se refiere a un nivel de referencia a partir del cual se define la ocurrencia de los cambios positivos y negativos en el almacenamiento de agua en el suelo.

las cuencas evaluadas dentro de la zona de estudio. Esto es, aproximadamente en el 92% del área de la zona de estudio las observaciones de GRACE siguen la estacionalidad intranual y la tendencia del promedio anual sin desfase temporal. Solo en los píxeles 2 y 4, que en conjunto interceptan el 8% de la zona de estudio, se presentó desfase temporal de 6 meses entre las series de EWT y AAS.

A partir del primer trimestre del año 2009 ambas series muestran una caída en la tendencia del promedio anual de almacenamiento de agua en el suelo en las cuencas ubicadas en las subzonas 1 y 2 y en el sector sur de la subzona 3, es decir, las cuencas encerradas en los píxeles 1 al 10. Por el contrario, para las cuencas interceptadas por los píxeles 11, 12 y 13 no se aprecia una tendencia clara para el mismo periodo, esto quizás indicando una transición en términos de tendencia en donde la región del Bajo Cauca muestra un rezago mayor en los cambios sobre el AAS. Estos resultados de cambio de tendencia en el AAS de la zona de estudio son consistentes con los resultados de Bolaños et al., (2022), quien determinó una tendencia negativa en el promedio anual del almacenamiento de agua en el suelo entre los años 2011 y 2018.

En la comparación entre las series de EWT y AAS resalta la ocurrencia de un desfase temporal de 6 meses en las series de los píxeles 2 y 4. El desfase se debe a que entre el 70% y 80% del área de los píxeles 2 y 4 se sitúa en la vertiente oriental de la cordillera central, vertiente contraria a la de la zona de estudio y en donde las condiciones hidroclimáticas que controlan el AAS tienen una variabilidad mensual desfasada o rezagada respecto a la de la zona de estudio. Las cuencas de la zona de estudio solo cubren en los píxeles 2 y 4 el 19% y 30% del área, respectivamente, siendo quizás esta cobertura insuficiente para explicar toda la variabilidad del registro de EWT en el píxel.

La apreciación clara y consistente de un patrón de variabilidad similar entre las series de AAS y EWT fue posible en los píxeles 11, 12 y 13 ubicados en la subzona 3. En este sector se presentaron las menores discrepancias tanto en magnitud como en rezago temporal, permitiendo considerar que en los sitios donde el AAS corresponde al agua alojada en acuíferos, las observaciones de GRACE son más realistas que las observaciones en zonas de ladera donde prima la escorrentía subsuperficial y se da un agotamiento rápido del AAS. Sin embargo, también es importante considerar el hecho de que la baja amplitud de las series de EWT respecto las de AAS en la mayoría de los píxeles de las subzonas 1 y 2 dificulta la identificación de picos y valles asociados a los periodos de recarga y descarga precedidos por el régimen de lluvia de las cuencas.

En las figuras 25 y 26 se observa una notable diferencia entre la magnitud del AAS y EWT en los píxeles 1 al 11, mientras que en los píxeles 12 y 13 la amplitud de la magnitud de las series es similar. En términos geográficos los píxeles 1 al 9 se encuentran entre las subzonas 1 y 2, los píxeles 10 y 11 interceptan latitudinalmente el norte de la subzona 2 y el sur de la subzona 3 y los píxeles 12 y 13 se encuentran enmarcados por completo en los acuíferos de la subzona 3 (ver Figura 24).

En las cuencas de las subzonas 1 y 2 dominan los flujos subsuperficiales que responden a la humedad de la zona no saturada, mientras que en la subzona 3 existen acuíferos con

mayor capacidad de almacenamiento y regulación de la descarga de agua desde el suelo a las corrientes.

GRACE permite detectar cambios en la gravedad por efecto de las variaciones a gran escala en el almacenamiento y transporte de agua en el suelo. GRACE ofrece una buena oportunidad de observar la dinámica del AAS en grandes cuencas de escala regional. En zonas acuíferas y de tamaño regional como lo es el caso de la subregión del Bajo Cauca, GRACE observa cambios en el almacenamiento subterráneo, observaciones que son semejantes al AAS reproducido por el MHA. Sin embargo, en las zonas de ladera con rocas de carácter Acuífugas y sin la presencia de acuíferos regionales, GRACE no captura el cambio rápido en la humedad de la zona no saturada, mientras que el MHA si logra determinar tal variabilidad.

La comparación entre las series también permitió identificar que entre abril de 2002 y diciembre de 2005 la diferencia entre el AAS y el EWT es más pronunciada que la diferencia entre enero de 2006 y diciembre de 2009. Tanto a nivel de pixeles como para toda la zona de estudio la tendencia creciente de la del EWT es más pronunciada que la del AAS. Esto ocurre porque la variabilidad del AAS calculada el MHA integra la dinámica de los almacenamientos subsuperficial y subterráneo, mientras que GRACE registra en mayor medida variaciones del almacenamiento subterráneo en sistemas acuíferos regionales donde la temporalidad de los flujos difiere de la variabilidad de los flujos subsuperficiales presentes en zonas de ladera.

Las series de AAS derivadas del MHA combinan la tendencia de los flujos subsuperficiales ligados a la humedad del suelo con la tendencia del flujo subterráneo, incluso si la participación de alguna de las componentes es baja en la cuenca. Lo anterior también explica la diferencia entre las magnitudes del AAS y el EWT.

4.5 Variabilidad espacial del cambio en el AAS: Resultados de BHCP

El objetivo de esta sección es describir la variabilidad espacial del cambio en el AAS para toda la zona de estudio empleando mapas construidos a partir de los resultados del BHCP. El BHCP fue realizado en cada una de las 32 cuencas a escala mensual para el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2009.

La variabilidad espacial del cambio en el AAS es presentada para la condición climática promedio o ciclo anual, condición El Niño y para La Niña. La Figura 28 presenta la variabilidad espacial del cambio en el AAS para la condición climática promedio, la Figura 29 presenta la variabilidad espacial durante los periodos de El Niño y la Figura 30 muestra la distribución espacial para los periodos de La Niña. En la paleta de colores los tonos rojos, naranjas, amarillos y verdes indican valores negativos de AAS, mientras que los tonos cian y azules hacen referencia a valores positivos. Por efectos de extensión, presentación y comprensión del documento en el Anexo A se muestran mapas con la variabilidad mensual todos los años entre 1990 y 2009.

Las cuencas donde el cambio en el AAS es positivo se debe a que en términos promedio, la precipitación recarga el AAS en cantidades mayores que los aportes de flujo desde el suelo a las corrientes. El caso contrario ocurre en las cuencas con cambios negativos en el AAS, donde la precipitación es insuficiente en algunos periodos.

En los mapas de las figuras 28, 29 y 30 es posible apreciar una marcada diferencia entre el cambio en el AAS de las cuencas localizadas en la región del Cauca Medio (subzonas 1 y 2) y las cuencas de la región del Bajo Cauca (subzona 3). Sin importar la condición climática evaluada, entre los meses de enero y mayo la región del Bajo Cauca muestra niveles más bajo en el AAS que la región del Cauca Medio. Esto ocurre por la temporada seca en la subzona 3 en los primeros cuatro meses del año, mientras que en las subzonas 1 y 2 se da la primera temporada de lluvias en el trimestre MAM o AMJ según la posición latitudinal de la cuenca.

El caso contrario ocurre entre los meses de junio y diciembre, durante este periodo ocurre la temporada húmeda en la subzona 3 permitiendo la recarga del AAS. En las subzonas 1 y 2 se genera recarga del AAS en los meses de octubre y noviembre, pero esta recarga es inferior a los niveles alcanzados en los acuíferos de la región del Bajo Cauca.

Las cuencas del Cauca Medio experimentan los cambios negativos más fuertes en el AAS en los meses de febrero, marzo, agosto y septiembre, mientras que los mayores cambios positivos ocurre en promedio en los meses de mayo, junio, octubre y noviembre (véase los ciclos anuales de AAS descritos en las secciones 4.2.1 y 4.2.2). En las cuencas del Bajo Cauca el mayor agotamiento del AAS se da en el trimestre FMA, y la mayor recarga en el trimestre SON. Esta variabilidad se conserva en las tres condiciones climáticas.

Figura 28 Variabilidad espacial del almacenamiento del agua en el suelo en condiciones climáticas promedio (ciclo anual).

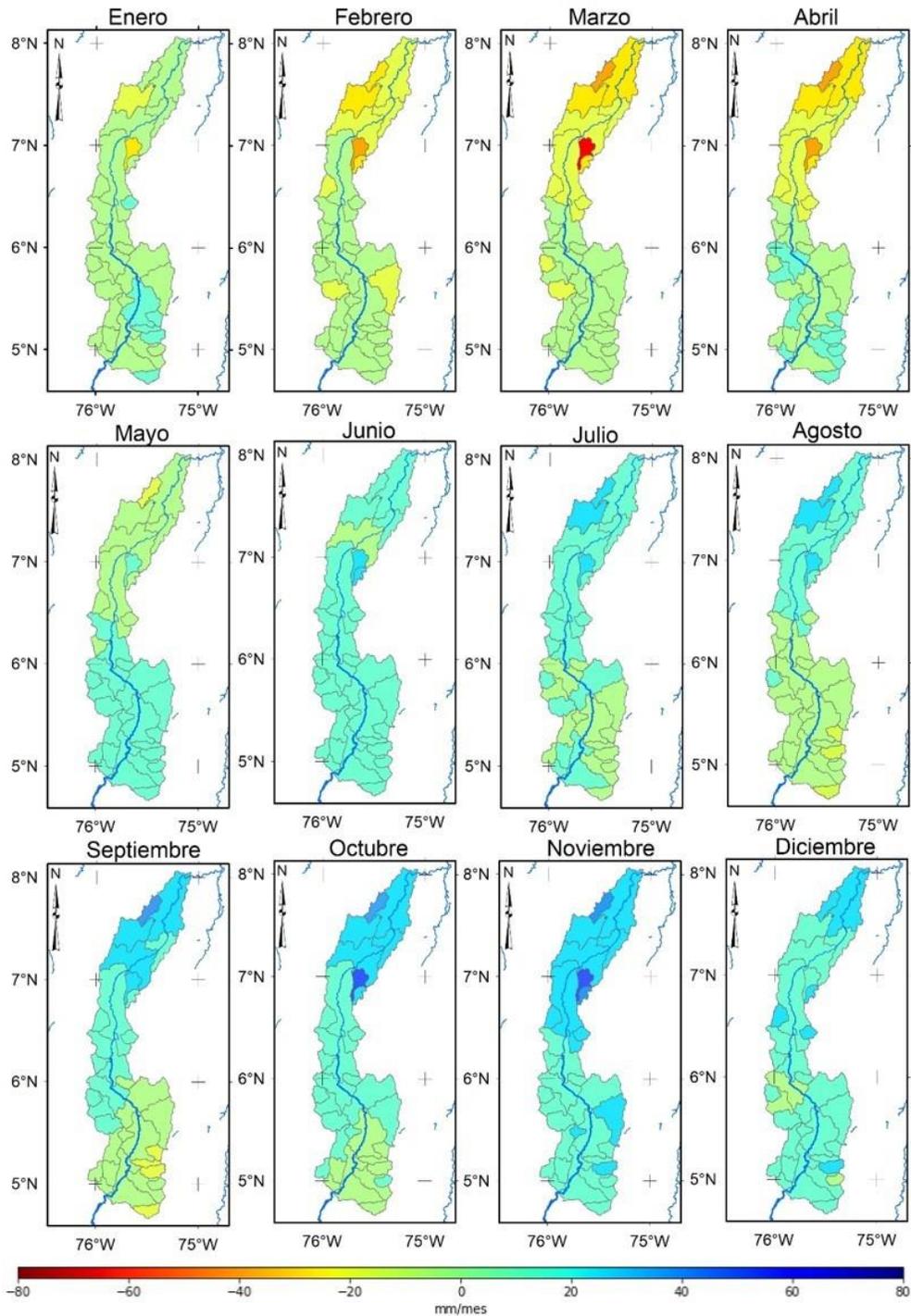


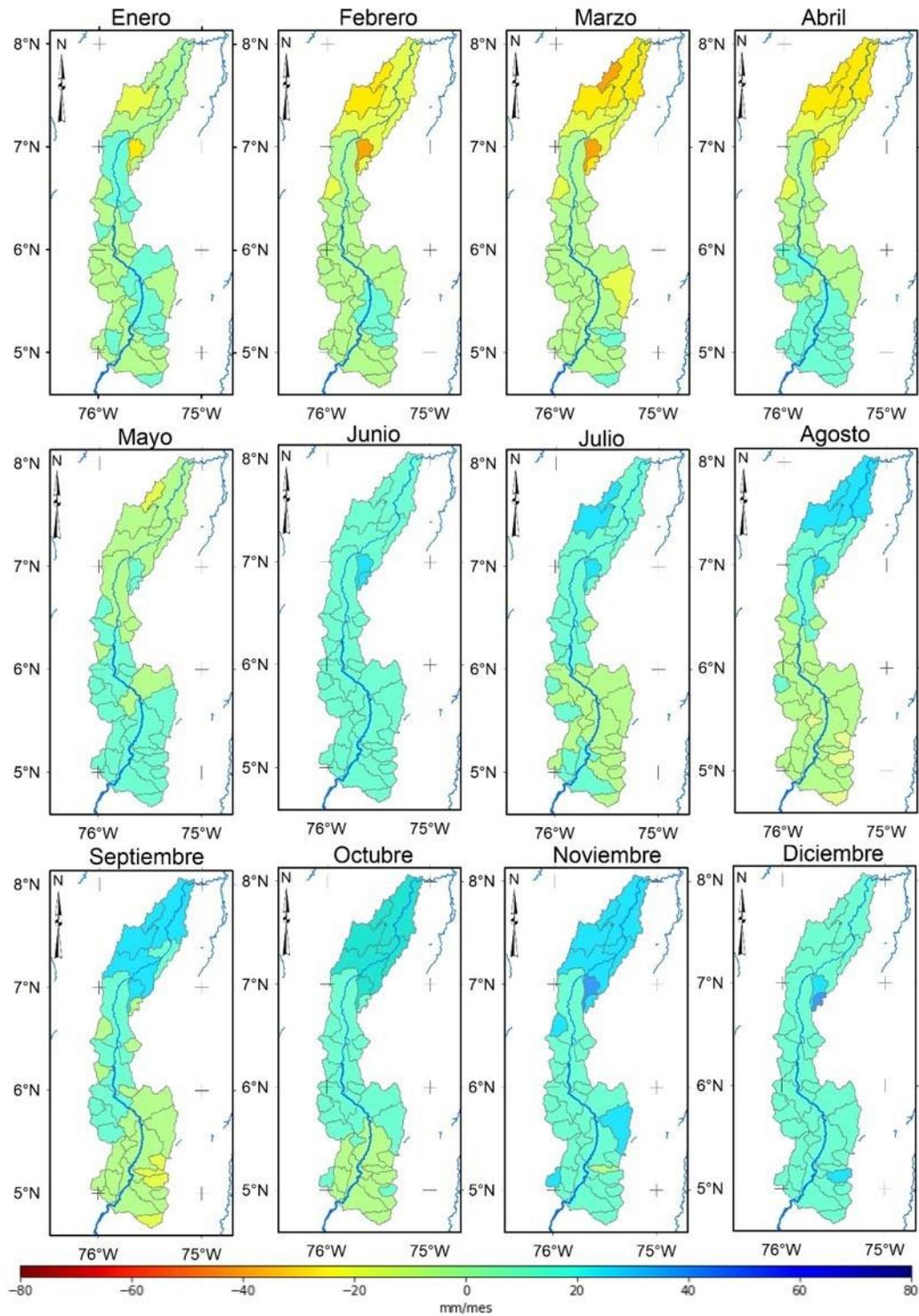
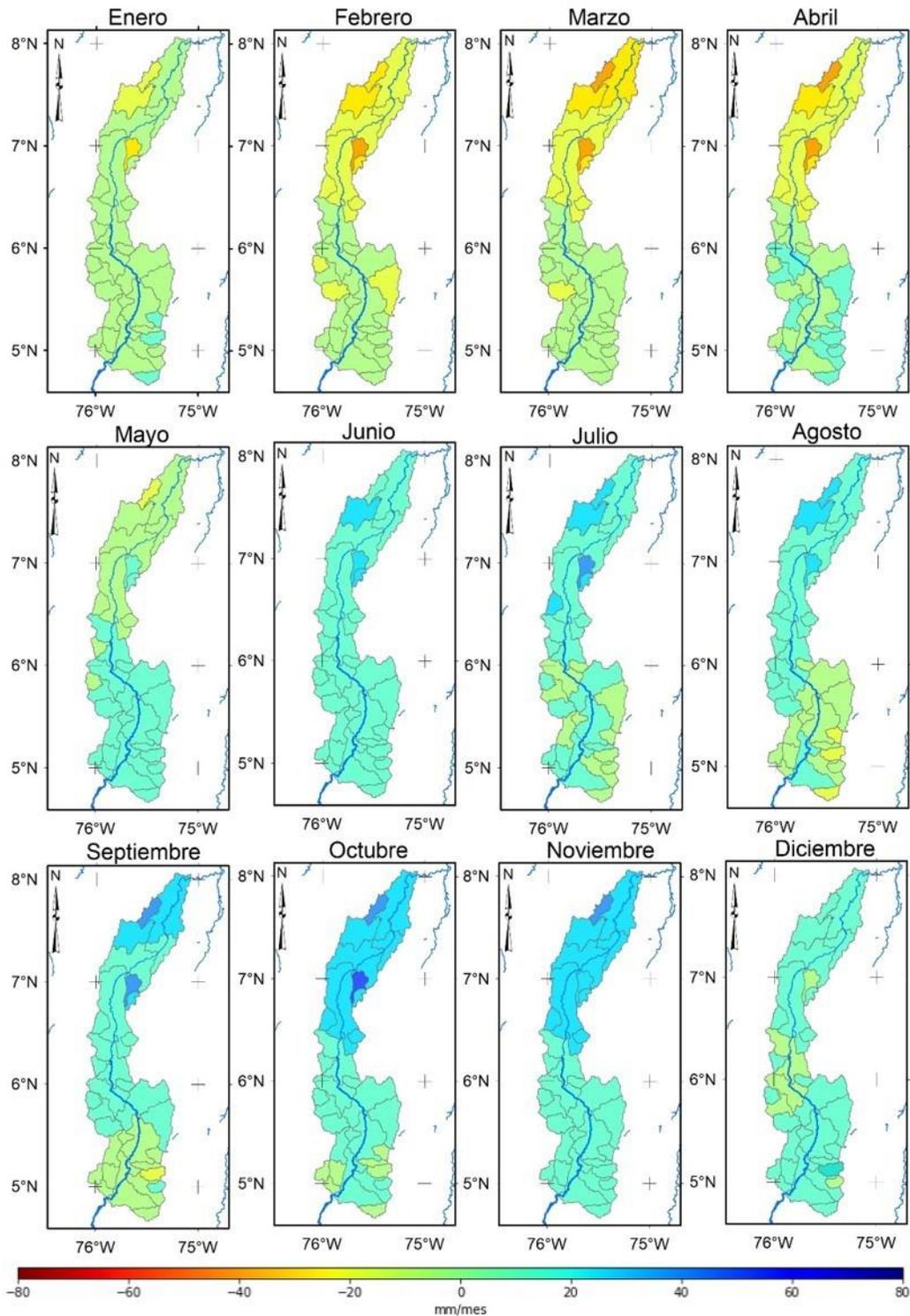
Figura 29 Variabilidad espacial del almacenamiento de agua en el suelo en condiciones El Niño.

Figura 30 Variabilidad espacial del almacenamiento del agua en el suelo en condiciones La Niña.

En términos espaciales también es posible apreciar una variabilidad bimodal del cambio en el AAS en las cuencas de la subregión 1 y parte de la subregión 2, así como un patrón unimodal en las cuencas de la subregión del Bajo Cauca.

La cuenca con mayor variabilidad en el AAS es VECE, al pasar de un promedio de -89 mm/mes en el mes de marzo a 65,4 mm/mes en septiembre. En contraste la cuenca con menor variabilidad en el AAS es Área 1 Cauca con un valor mínimo de -1,6 mm/mes en el mes de febrero y el máximo de 0,98 mm/mes en noviembre. Estas variaciones en el almacenamiento de agua en el suelo se ven reflejadas en el rol del AAS dentro de la hidrología de las cuencas.

Tal como se describe en la sección siguiente (Capítulo 5), en la cuenca Área 1 Cauca predomina la producción de escorrentía superficial directa y el retorno de agua hacia la atmósfera mediante la evaporación, por lo que el aporte de agua del AAS para mantener los caudales medios es poco significativo, limitando su aporte a menos del 50% de la de los caudales mínimos mensuales de la cuenca. El caso contrario ocurre en la cuenca VECE, en esta el AAS tiene un papel preponderante al garantizar la ocurrencia de los caudales mínimos mensuales aportando el 80% del flujo, y en el caso de los caudales medios aporta aproximadamente el 68%.

Si se compara la magnitud del cambio en el AAS en condiciones promedio respecto a las fases cálida y húmeda del ENSO, es posible apreciar que el impacto del ENSO sobre el AAS se ve reflejado en la reducción y el incremento de los promedios mensual y anual de AAS para algunos sectores de la zona de estudio. En términos espaciales los cambios sobre el AAS son mayores en la región del Bajo Cauca, especialmente en el trimestre SON.

Al comparar los mapas de las condiciones climáticas promedio y El Niño es posible apreciar una reducción en la magnitud mensual del cambio en el AAS. Esta reducción tanto en periodos secos como en húmedos se ve reflejada directamente sobre la magnitud de los caudales mínimos y medios de las cuencas, especialmente de los caudales mínimos mensuales puesto que en la zona de estudio el AAS aporta en promedio el 82% del flujo (capítulo 5).

Al comparar los mapas de condición climática promedio y La Niña el escenario resultante es contrario al descrito para El Niño. Durante La Niña, cuencas como Pte Carretera, Chupaderos, Sinifaná, PNBA, RSCG, Penalta muestran una significativa recuperación o valores positivos del cambio en el AAS en meses como junio, julio y agosto que son tradicionalmente secos.

5. Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica de la zona de estudio

Al analizar el comportamiento hidrológico de las cuencas durante la implementación de los MHA y la realización de los BHCP, fue posible determinar que el cambio en el AAS, la precipitación y la evaporación se interrelacionan de manera positiva en la producción de escorrentía. Es decir, la variabilidad temporal del caudal de las corrientes superficiales puede ser considerada como la sumatoria de aportes de escorrentías desde diferentes almacenamientos.

Forma parte del objetivo de esta tesis determinar y entender el rol del cambio en el AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio, y, si bien en la descripción de las series de cambio en el AAS de las secciones 4.2 y 4.3 se hizo mención del aporte de agua desde el suelo hacia las corrientes superficiales, en esta parte del documento se cuantifica la relación entre el cambio en el AAS y el caudal de las corrientes.

En esta sección del documento se presenta la importancia del AAS en el comportamiento hidrológico de la zona de estudio. Esta importancia es descrita y determinada desde la producción de escorrentía subsuperficial, subterránea y posterior afloramiento del flujo en las corrientes, así como el porcentaje que representa dicho flujo tanto en la magnitud de los caudales mínimos mensuales como en la magnitud de los caudales medios, más aún en los periodos en los que la precipitación es nula o insuficiente para generar escorrentía directa.

Vale la pena mencionar que, los caudales mínimos mensuales (en adelante caudal mínimo mensual o caudal representativo del periodo recesión), es una serie de tiempo conformada al seleccionar para cada mes entre los años 1990 y 2009 el caudal mínimo registrado en las estaciones hidrológicas de las cuencas. También es importante mencionar que, para efectos de simplificar la presentación del documento en este capítulo cada vez que se use la sigla AAS se hace alusión al cambio en el almacenamiento de agua en el suelo calculado con el MHA.

Para explicar la participación del AAS en la variabilidad de los caudales y la relación del AAS con la precipitación, la evaporación y la escorrentía superficial se emplea el resumen de la Tabla 7. La tabla presenta para cada una de las cuencas de la zona de estudio campos con información sobre la relación del AAS con la precipitación, el caudal medio y

el caudal mínimo de cada mes. Cabe anotar que las relaciones presentadas en la tabla son calculadas a partir de los resultados de los BHCP y los MHA.

En la Tabla 7 el campo %E/P contiene el porcentaje de la precipitación mensual que se convierte en evaporación mensual, el campo %R/P representa el porcentaje de la precipitación mensual que se convierte en escorrentía promedio mensual, el campo %AAS/P indica el porcentaje que representa el AAS respecto a la magnitud de la precipitación mensual, es decir, la porción de agua proveniente de la lluvia que alcanza los almacenamientos subsuperficiales y subterráneo. El campo %fb/Q_{min} indica el porcentaje de flujo que aporta el AAS al caudal mínimo mensual. Por último, el campo %fb/Q_{med} indica la cantidad de agua que aporta el AAS al caudal medio mensual.

De acuerdo con la información de la tabla en las cuencas de la zona de estudio el porcentaje de la precipitación que se convierte en AAS varía entre el 0,5% y el 38,9% con un promedio del 13,4%. En cuanto a los caudales mínimos de cada mes, el AAS aporta entre el 44,5% y el 99,1% con un aporte promedio del 82%. En relación al caudal medio mensual, el AAS aporta entre el 11,5% y el 93,8% con un aporte promedio del 57,2%.

Tabla 7 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio. Porcentaje de la precipitación que se convierte en evaporación (%E/P), porcentaje de la precipitación que se convierte en escorrentía (%R/P), porcentaje de la precipitación que genera AAS (%AAS/P), porcentaje de caudal aportado desde el AAS al caudal mínimo de cada mes (%fb/Q_{min}) y porcentaje de caudal aportado desde el AAS al caudal medio mensual (fb/Q_{med}). Elaboración propia.

Cuencas	%E/P	%R/P	%AAS/P	%fb/Q _{min}	%fb/Q _{med}	Subzona
Área 1 Cauca	21,3	77,2	0,8	44,5	11,5	1
Área 2 Cauca	61,2	18,4	19,7	94,3	84,3	
Area 3 Cauca	54,4	31	13,6	87	64,9	
Area 4 Cauca	19,5	78,8	1,3	79,9	40,8	
Área Sanjuán 2	19,2	77,3	0,5	65,3	16,4	
BANANERA LA 6-909	32,4	51,3	13,2	80	52,2	
BRETANA LA	34,5	52,4	11,2	74,6	47,8	
Brasilía	47,6	37,7	12,7	82,6	55,7	
BUENOS AIRES	26,2	62,9	7,7	68,3	37,2	
Campamento	21,5	65,9	9,4	83,8	49,9	
Chupaderos	41	56,8	1,4	88,7	57,8	
Costa Azul	49,8	34,3	15,1	90,8	70,1	
Paila La	48	24	27,3	84,4	53,1	
Parte baja cuenca río Risaralda (PBCR)	33	54,2	11,3	67,5	36,6	
Pte Carretera	21,7	63,2	12,1	57,4	32,7	
Pte_negro_BuenosAires (PNBA)	51,2	36,6	9,2	93	47	
Quitասueño	41,8	44,6	10,6	77,7	54,3	
Retiro-Chupadero-San_Gabriel (RCSG)	56,5	33,1	7,4	97,4	74,1	
San Gabriel	30,5	46,6	19,8	92,9	73	
Sinifaná	49,8	39,9	7,3	80,2	51,2	
Área 5 Cauca	49,9	44,6	4	88,3	60,9	2
Area 6 Cauca	57,7	16,7	24,5	97,5	93,8	
Cangrejo El	55,4	14,5	29,3	85,9	70,2	
Cedral El	36,7	35,1	27,3	94,7	77,2	
Galera La	55	23,9	20,3	99,1	89,2	

Cuencas	%E/P	%R/P	%AAS/P	%fb/Q _{min}	%fb/Q _{med}	Subzona
Penalta	54,9	6,1	38,9	94,8	85,7	
Valle El-Cedral_El (VECE)	25,3	51	20,7	80,3	68,5	
Área 7 Cauca	47,1	37,6	14,5	89,6	76,2	3
Area 8 Cauca	33	58,1	6	73,4	49,3	
Area 9 Cauca	32,3	55,7	8,9	59,1	38,2	
Las_Camalias_Aut	21,4	66,8	8,8	86,6	56,7	
Palmira Hda	37,5	46,2	14,8	84,7	54,4	

Para describir la participación del AAS en la dinámica hidrológica de las cuencas de la zona de estudio, se parte de la base que una vez terminada la precipitación, los aportes de caudal hacia las corrientes mediante escorrentía superficial reducen y la magnitud del caudal empieza a depender de la escorrentía subsuperficial y el flujo base desde el almacenamiento subterráneo.

A continuación, mediante las figuras 31, 32, 33 y 34 se presentan gráficos con la proporción de las variable involucradas en el balance hídrico (gráfico A) y el gráfico con la comparación de caudales (gráfico B) para las cuencas representativas de las subzobas 1, 2 y 3 definidas en el numeral 4.2.

Vale la pena recordar que, solo se describe la participación del AAS en la dinámica hidrológica de las cuencas representativas de las subzonas, lo anterior por efectos de extensión y compresión del documento. Sin embargo, dado que tanto el AAS como la evaporación y la escorrentía dependen de la variabilidad de la precipitación de cada subzona, el comportamiento que se describe a continuación es análogo para todas las cuencas que componen cada subzona. Si el lector desea conocer la descripción del balance hídrico en cada una de las subcuencas puede consultar el Anexo E.

El gráfico (A) muestra la variabilidad mensual de la evaporación, la escorrentía superficial y el AAS en la escala mensual para dimensionar la proporción de estas tres últimas variables respecto a la precipitación; esto con el objetivo de analizar (en conjunto con la información de la Tabla 7) el papel de cada variable (especialmente del AAS) en la producción de caudal de las cuencas.

El gráfico (B) presenta de manera conjunta la variabilidad mensual del caudal mínimo mensual, el caudal medio y el flujo que sale desde el AAS. Este gráfico junto con la información de los campos %fb/Q_{min} y fb/Q_{med} de la Tabla 7 permiten describir la participación del AAS en los caudales de la cuenca.

5.1 Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica: cuencas de la subzona 1

La Figura 31 presenta los gráficos de balance (A) y caudales (B) para las cuencas Área 1 Cauca, Bretana La, Chupaderos y Pte Carretera. En la cuenca Área 1 Cauca el AAS representa en promedio el 0,8% de la precipitación, la evaporación representa el 21,3% y la escorrentía representa cerca del 77%. En esta cuenca predomina la escorrentía

superficial directa y el retorno de agua hacia la atmósfera mediante la evaporación. El aporte de flujo desde el AAS para mantener los caudales medios es bajo (11,5%), pero en el caso de la magnitud del caudal de recesión, el AAS aporta el 44,5%.

En la cuenca Bretana La el AAS representa 11,2% de la precipitación mensual, mientras que la evaporación y la escorrentía directa representan el 34,5% y el 52,4%, respectivamente. Cerca del 74,6% del caudal de recesión se debe al flujo aportado por el AAS, y en el caso del caudal medio mensual el AAS aporta aproximadamente el 47,8%.

El balance hidrológico en la cuenca Chupaderos indica que la mayor parte de la precipitación se convierte en escorrentía directa (56,8%), la cual mantiene en mayor medida el caudal medio mensual durante los periodos húmedos. La evaporación representa el 41% de la precipitación mensual y solo el 1,4% de la precipitación ingresa al suelo para generar cambios en el AAS. En esta cuenca el AAS tiene gran importancia dado aporta cerca del 88,7% del caudal mínimo mensual y el 57,8% de la magnitud del caudal medio mensual.

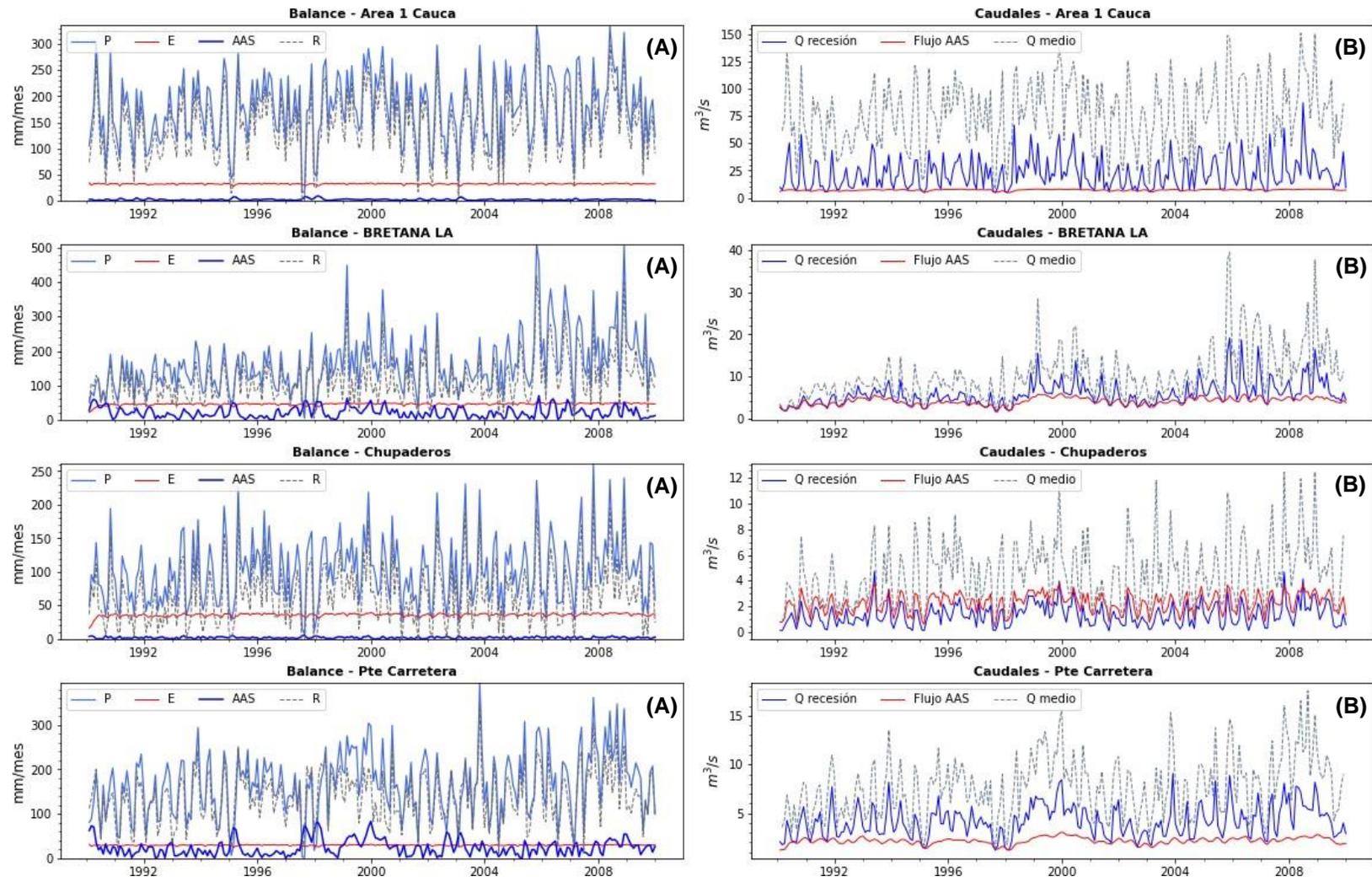
La cuenca Chupaderos es una de las más pequeñas de la zona de estudio (Tabla 1), tiene una de las precipitaciones más bajas (1.217,6 mm/año) y presenta un escurrimiento superficial rápido debido al relieve escarpado de la región. A pesar de que la mayor parte de la precipitación se convierte en escorrentía superficial, esta solo aporta en promedio el 42% de la magnitud del caudal medio mientras que el AAS regula el porcentaje restante. Parte de esta regulación es explicada por la presencia de humedales alto andinos en la parte alta de la cuenca (Álvarez-Villa et al., 2023).

Los humedales son ecosistemas y agentes ambientales que dentro de la dinámica hídrica de la cuenca del río Chinchiná cumplen funciones como la regulación hídrica, recarga, entre otros (Hernandez Henao, 2019).

En la cuenca Pte Carretera predomina la generación de escorrentía superficial y el aporte de esta última sobre la permanencia de los caudales medios del río Supía. Muestra de lo anterior es el hecho de que el 63,2% de la precipitación mensual se convierte en escorrentía directa. En esta cuenca el AAS representa el 12,1% de la precipitación mensual y la evaporación representa el 21,7%.

El AAS aporta en promedio el 57,4% del flujo del caudal mínimo mensual y cerca del 33% del caudal medio. El aporte de flujo desde el suelo hacia el canal del río Aurra es en terminos estacionales constante, sin embargo, el aporte se hace semejante a los caudales de recesión y medio mensual durante periodos secos prolongados, tal como se observa en el periodo comprendido entre el segundo semestre del año 1997 y el primer semestre del año 1998, periodo en el que ocurrió un evento El Niño y con ello una reducción cercana al 30% en la precipitación media anual de la cuenca.

Figura 31 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 1 (parte 1). (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.



La Figura 32 presenta los gráficos de balance (A) y caudales (B) para las cuencas Área 4 Cauca, Quitasueño, Sinifaná y Campamento. En la cuenca Área 4 Cauca el AAS representa el 1,3% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 19,5% y el 78,8% de la precipitación se convierte en escorrentía directa. En esta cuenca la importancia del AAS se ve reflejada sobre los caudales de recesión porque aporta aproximadamente 79,9% de la magnitud del caudal mínimo mensual.

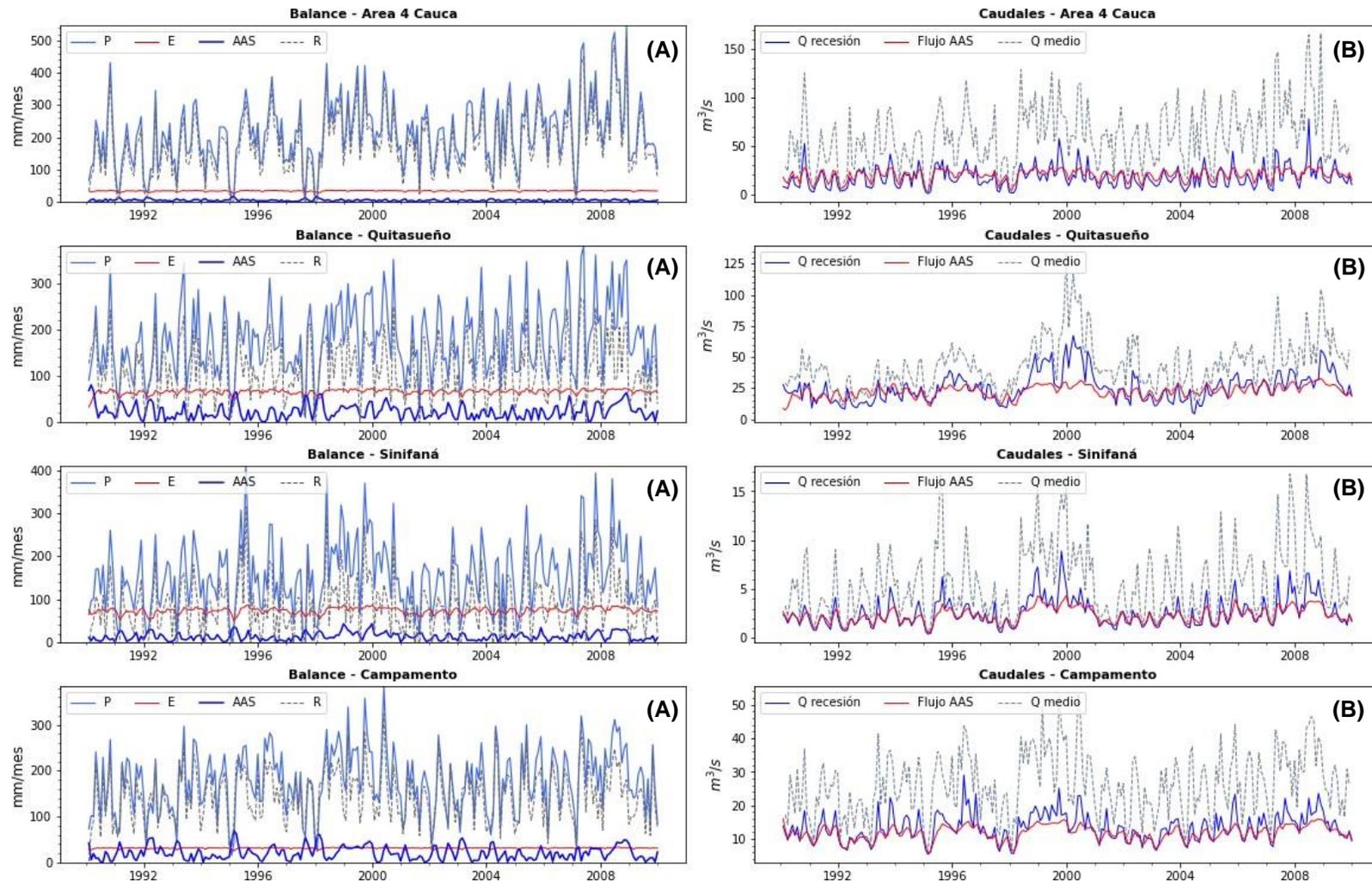
En cuanto a los caudales medios, el AAS aporta aproximadamente el 40,8%, sin embargo, este valor es representativo de los periodos secos porque en los periodos restantes el exceso de humedad se convierte de manera directa en escorrentía superficial generando un incremento sustancial del caudal medio.

En la cuenca Quitasueño aproximadamente el 10,6% de la precipitación mensual ingresa al suelo y genera cambios en el AAS, el 41,8% de la precipitación mensual se convierte en evaporación y el 44,6% de la precipitación genera escorrentía directa. El AAS en esta cuenca regula la variabilidad de los caudales mínimos mensuales aportando en promedio el 77,7% del flujo, y en el caso del caudal medio mensual el AAS aporta mediante cerca del 54,3%. En términos de variabilidad durante los periodos de estiaje los aportes de agua desde el AAS al río Arma pueden representar el 90% del caudal mientras que en periodos húmedos el 40%.

Esta variación porcentual no se debe a una reducción significativa de la disponibilidad del agua en el suelo respecto a las variables restantes sino al aporte de la escorrentía directa. Ejemplo de ello es que entre junio de 1997 y junio 1998 la precipitación media anual de la cuenca se redujo aproximadamente en un 30% y con ello la escorrentía superficial, en cuyo caso los caudales medio y mínimo mensual pasaron a depender del AAS. El caso contrario ocurrió entre los años 1999 y 2000 con la ocurrencia de La Niña, en este periodo la precipitación media anual tuvo un incremento del 25% generando incremento de caudales respecto a años anteriores, mientras se mantuvo el mismo nivel de aporte de flujo desde el AAS.

En la cuenca Sinifaná el 7,3% de la precipitación mensual recarga el AAS, mientras que la evaporación y la escorrentía directa representan el 49,8% y el 39,9% de la precipitación mensual, respectivamente. En esta cuenca la importancia del AAS se ve reflejada en el aporte de aproximadamente 80% de la magnitud del caudal mínimo mensual. El AAS aporta aproximadamente el 51,2% del caudal medio mensual, sin embargo, este valor es representativo de los periodos secos puesto que en los periodos restantes el exceso de humedad se convierte de manera directa en escorrentía superficial generando un incremento en el caudal medio mensual.

Figura 32 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 1 (Parte 2). (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.



5.2 Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica: cuencas de la subzona 2

La Figura 33 presenta los gráficos de balance (A) y caudales (B) para las cuencas Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Cangrejo El y VECE. En la cuenca Área 5 Cauca el AAS representa el 4% de la precipitación mensual mientras que la evaporación y la escorrentía representan el 49,9% y el 44,6% de la precipitación. En esta cuenca los caudales medios son controlados en mayor medida por la escorrentía directa y el aporte del AAS al caudal medio se ve reflejado en los periodos secos donde el caudal medio se asemeja al caudal mínimo mensual y estos reciben en promedio el 88,3% de la magnitud del flujo desde el AAS.

En la cuenca Área 6 Cauca el AAS representa el 24,5% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 54,7% y la escorrentía directa el 16,7%. Esta cuenca tiene una fuerte dependencia del AAS, ya que este aporta el 97,5% de la magnitud de los caudales mínimos mensuales, los cuales en periodos secos son semejantes al caudal medio que recibe cerca del 93,8% de flujo desde el AAS.

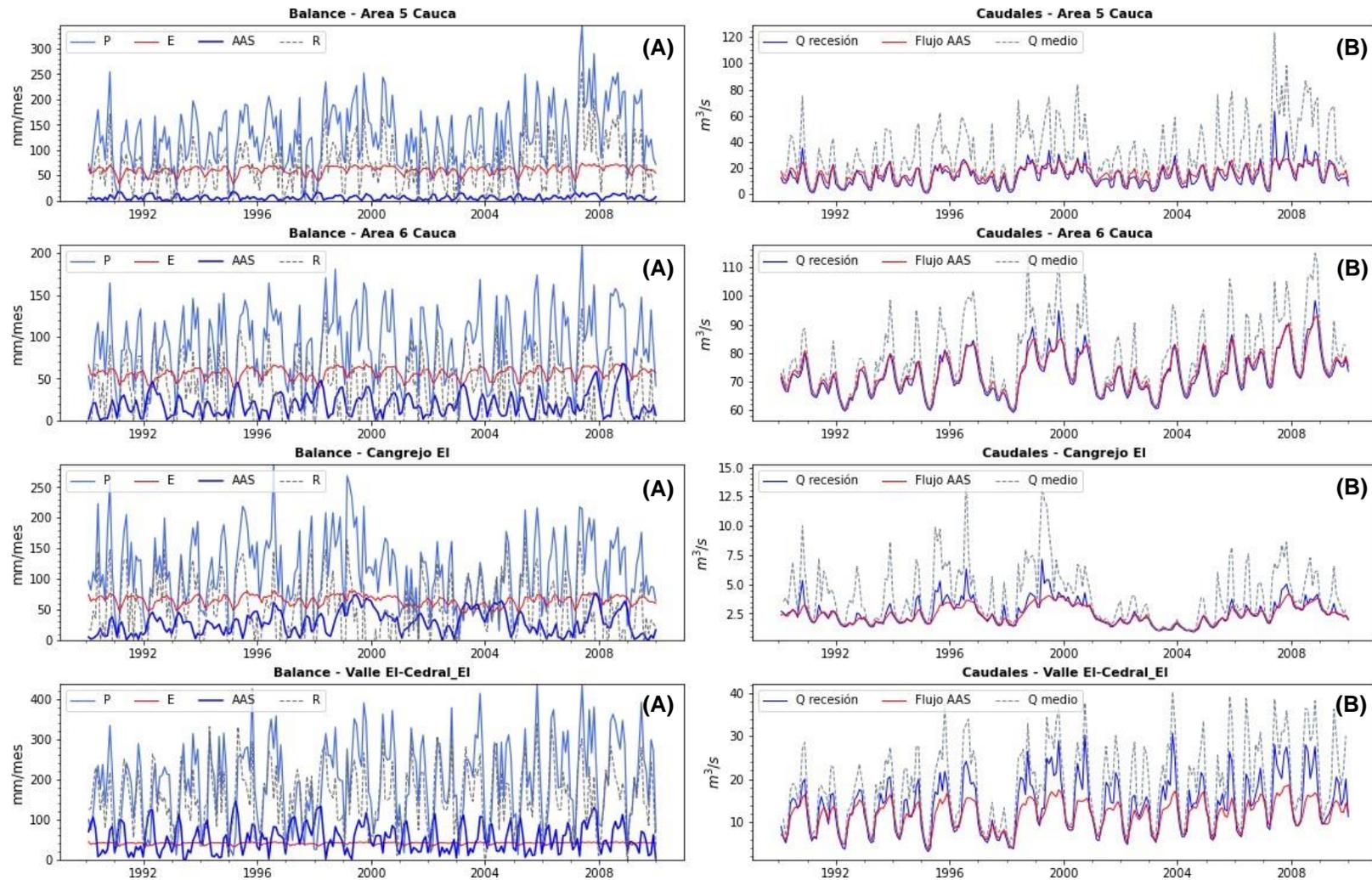
La poca producción de escorrentía directa se debe a que esta cuenca se ubica en el cañón del Cauca, uno de los sectores más secos de la zona de estudio con una precipitación media anual que varía entre 1.113 mm/año y 1.160 mm/año, haciendo que la escorrentía directa solo sea significativa y genere cambios significativos en los caudales medios mensuales con ocurren las precipitaciones más altas de los periodos húmedos.

En la cuenca Cangrejo el AAS representa el 29,3% de la precipitación mensual, la escorrentía representa el 14,5% y la mayor parte (55,4%) de la lluvia se evapora. En esta cuenca la precipitación media anual es de 1.321 mm/mes mientras que la evaporación anual es de 776 mm/mes lo que explica la baja producción de escorrentía directa. El aporta el 85,9% del caudal mínimo mensual y el 70,2% del caudal medio. El mayor impacto del AAS sobre los caudales medios se da durante los trimestres DEF y JJA cuando el flujo del AAS es semejante al caudal medio.

En la cuenca VECE (Valle El-Cedral_El) el AAS representa el 20,7% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 25,3% y la escorrentía el 51%. En esta cuenca predomina la escorrentía directa. Sin embargo, a paritr de la variabilidad de los caudales medios y mínimos mensuales que se muestra en el gráfico B para esta cuenca, se ha logrado determinar que el caudal mínimomensual representa el 74% del caudal medio. Esto tiene su explicación en el rápido escurriamiento que tiene la cuenca.

En la cuenca VECE el AAS aporta cerca del 80% del flujo que componen los caudales de recesión y el 68,5% del caudal medio mensual, jugando un papel preponderante en la permanencia de los caudales de la cuenca.

Figura 33 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 2. (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.



5.3 Participación del cambio en el AAS en la dinámica hidrológica: cuencas de la subzona 3

La Figura 34 presenta los gráficos de balance (A) y caudales (B) para las cuencas Área 7 Cauca, Área 8 Cauca, Área 9 Cauca y Las Camelias Aut. En la cuenca Área 7 Cauca el AAS representa el 14,5% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 47,1% y la escorrentía representa el 37,6%. Los caudales de recesión dependen del flujo aportado por el AAS (aproximadamente 89,6%), y en el caso del caudal medio mensual el aporte del AAS es del 76,2%. Sin embargo, puede considerarse que este aporte se ve reflejado mayormente durante los periodos de recesión y de estiaje, ya que en los periodos húmedos el río percibe un incremento en los caudales por la buena producción de escorrentía directa de la cuenca.

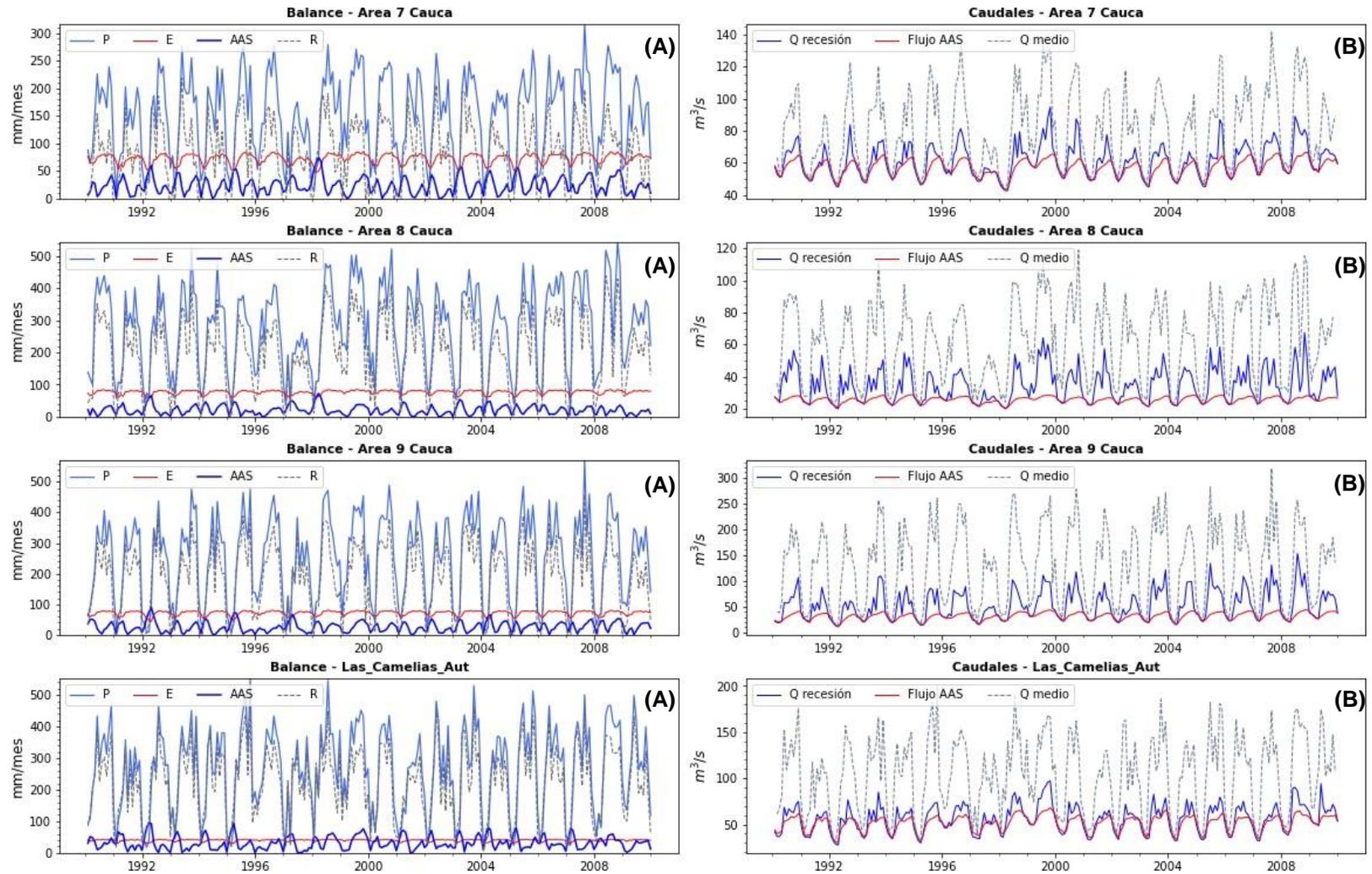
En la cuenca Área 8 Cauca el AAS representa el 8% de la precipitación mensual mientras que la escorrentía directa y la evaporación representan el 58,1% y el 33%, respectivamente. En esta cuenca el caudal medio depende mayormente de la escorrentía directa debido a la disponibilidad hídrica de la cuenca. El caudal medio recibe aportes cercanos al 49,3% de su magnitud desde el AAS mayormente durante los periodos de estiajes, mientras que los caudales mínimos mensuales reciben el 73,4%.

En la cuenca Área 9 Cauca el AAS es el 8,9% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 32,3% de la precipitación mensual y la escorrentía representa el 55,7%. Tal como se aprecia en los gráficos de caudales y en la magnitud de la escorrentía directa respecto al AAS, en esta cuenca el caudal medio depende en mayor medida de la escorrentía directa, el aporte del flujo base al caudal medio representa el 38,2% de la magnitud del caudal y se debe mayormente a periodos de recesión y estiaje.

En cuanto a los caudales mínimos mensuales de la cuenca Área 9 Cauca, el AAS aporta aproximadamente el 59,1% mediante flujo base. Sumado a la disponibilidad hídrica de la cuenca y la producción de escorrentía directa, la fuerte diferencia entre los caudales medios y mínimos respecto a la magnitud del flujo base se debe a la presencia de acuíferos que regulan la descarga de agua desde el suelo a las corrientes.

La participación del AAS en la dinámica hidrológica de la cuenca Las Camelias Aut se ve reflejada en los caudales de recesión del río Tarazá. Cerca del 86,6% de la magnitud del caudal mínimo mensual del río depende del flujo base del acuífero del Bajo Cauca. Este aporte se mantiene relativamente constante a lo largo del año, sin embargo, su efecto tiene mayor relevancia en los primeros cuatro meses del año cuando el flujo base proporciona el 56% del caudal medio del río.

Figura 34 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la subzona 3. (A) proporción entre la magnitud de la precipitación, la evaporación, escorrentía superficial y el AAS. (B) comparación entre la magnitud del flujo aportado por el AAS, el caudal de recesión y el caudal medio de la cuenca. Elaboración propia.



En las cuencas la humedad que mantiene el flujo de agua en los canales proviene de la escorrentía superficial directa, la escorrentía subsuperficial y la subterránea, una en mayor proporción que otra según las condiciones físicas y la disponibilidad hídrica de la cuenca. Lo anterior explica la heterogeneidad del AAS en la zona de estudio y su aporte en la producción de caudales de recesión y medio mensual.

De los gráficos de Caudales en las figuras 31, 32, 33 y 34 es posible determinar que en las cuencas donde la relación entre la precipitación y la escorrentía es alta (entre el 40% y el 70%), así como la relación entre la evaporación y la precipitación es alta (entre el 20% y el 55%) el aporte del flujo de AAS a los caudales medios es poco significativo. Este es el caso de las cuencas Área 1 Cauca y Área Sanjuan 2 en donde en promedio el AAS proporciona menos del 18% del caudal medio. En estas cuencas los caudales mínimos mensuales son muy bajos respecto al medio y el caudal medio se debe mayormente a la escorrentía directa por precipitación.

La importancia del AAS en la participación dentro de la dinámica hidrológica de las cuencas se ve reflejada en la regulación y permanencia de los caudales mínimo. En 29 de las 32 cuencas el AAS aporta en promedio el 85% de la magnitud del caudal de mínimo mensual de la corriente durante el periodo de recesión. El aporte mínimo de 65,3% se da en la cuenca Área Sanjuan 2 en el río San Juan y el aporte máximo del 99,1% en el caso de la cuenca Galera La del río Tonusco (Tabla 7).

En las cuencas de la subzona 3 el aporte de caudal desde el AAS hacia los ríos Tarazá, Man y Cauca durante los periodos de estiaje corresponde al flujo base del sistema acuífero del Bajo Cauca. De ahí que en esta zona se observe una marcada diferencia en la magnitud de los caudales medio y mínimo mensual respecto al flujo base. Por su parte, en las cuencas de las subzonas 1 y 2 predomina el aporte de flujos subsuperficiales y la escorrentía superficial, esto debido a las fuertes pendientes y la presencia de unidades hidrogeológicas de carácter no acuífero.

Vale la pena resaltar el caso de la cuenca Chupadero y la parte alta de la cuenca del río Chinchiná, en donde la presencia de humedales explica parte de la regulación hídrica en dicha cuenca a pesar de que se produce una escorrentía directa rápida debido a las fuertes pendientes.

Durante algunos periodos tanto el flujo base, como los caudales mínimo y medio mensual tienen magnitud similar. Esto ocurre de manera estacional en los periodos secos de al menos el 56% de las cuencas debido a los cambios en la disponibilidad hídrica de la cuenca mes a mes. Esto también ha sido evidenciado en la escala anual durante periodos de estiaje prolongados como el ocurrido entre el año 1997 y mediados del 1998 debido a la ocurrencia de El Niño y la reducción promedio de la precipitación media anual en al menos un 30% en las cuencas de la zona de estudio.

El comportamiento anterior es similar al descrito por Marengo, (2005) en la cuenca del río Amazonas, el cual encontró que en periodos de pocas lluvias y condiciones extremas, tal como las presentadas durante El Niño de 1983, la cuenca aportó humedad al sistema

hídrico, haciendo notar que en el costado sur de la cuenca los imbalances son mayores que en el sector norte. En el caso de la zona de estudio de esta investigación, las reducciones más grandes en el promedio mensual y anual del AAS por efectos de El Niño ocurren en la región del Bajo Cauca. Sin embargo, El Niño afecta la disponibilidad de caudales medios y mínimos en todas las cuencas de la zona de estudio.

El caso contrario ocurre durante la ocurrencia de La Niña, en estos periodos no es que se produzca una reducción significativa de agua desde el AAS a las corrientes, sino que incrementa la escorrentía superficial directa y con ello la magnitud de los caudales mínimos y el promedio, haciendo que la cantidad aportada por el suelo mediante flujo base sea proporcionalmente inferior a los aportes que se dan en periodos de estiaje.

6. Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

La metodología de simulación hidrológica presentada en esta tesis es efectiva para describir la variabilidad temporal y espacial del cambio en el almacenamiento del agua en el suelo de la zona de estudio. El esquema de modelación hidrológica a escala de cuencas pequeñas funciona bien porque reproduce los caudales medios y de recesión de las corrientes, reproduce las tendencias de variabilidad observadas por GRACE, reproduce la variabilidad intranual e interanual del cambio en el AAS y todo esto sujeto a la precipitación medida en las estaciones meteorológicas de las cuencas. Se resalta el hecho que los datos de GRACE no fueron empleados en la modelación hidrológica, y, aun así, la metodología reproduce aspectos de su variabilidad temporal.

En diferentes escalas de variabilidad temporal y espacial la metodología reproduce los patrones típicos, esto es, en la escala intranual reproduce los efectos de la ZCIT, en la escala interanual reproduce los efectos del ENSO, y en términos de la variabilidad espacial se nota la diferenciación de las zonas donde controlan almacenamientos pequeños de ladera y las zonas donde controlan grandes almacenamientos. A la fecha no se ha implementado un marco conceptual que conserve tantos aspectos de la escala temporal y espacial del cambio en el AAS.

Cuando se toma como volumen de control toda la zona de estudio se enmascaran procesos hidrológicos que se observan mejor cuando se desagrega en cuencas. La metodología presentada en esta tesis logra mostrar procesos que no se ven en los análisis regionales, y que son importante para la gestión del agua en las cuencas. Los resultados de esta tesis representan una descripción detallada de la variabilidad del cambio en el AAS en cuencas pequeñas, resultados que se encuentran en la misma vía y validan para la cuenca del río Cauca en la zona de estudio, los resultados de estudios de escala continental sobre los efectos del ENSO en la variabilidad intranual e interanual del cambio en el AAS.

Los resultados de esta investigación constituyen un aporte en el importante esfuerzo de entender el funcionamiento del AAS y su participación en la dinámica hídrica de la cuenca del río Cauca. Estos resultados se suman al esfuerzo de investigadores que intentan comprender la variabilidad del AAS en el territorio colombiano y con ello conformar el

estado del arte sobre el AAS y su importancia sobre los caudales de las corrientes superficiales.

La calibración del MHA y la validación de sus resultados en las cuencas de la zona de estudio, muestran que este modelo es una buena herramienta para la simulación y reproducción de series de caudales medios diarios, permitiendo además conocer el comportamiento del cambio en el almacenamiento del agua en el suelo, la escorrentía directa y la evaporación.

Las series diarias de precipitación ingresadas a los MHA son el resultado del uso conjunto de información de las estaciones del IDEAM y de la información espacialmente distribuida de CHIRPS, por lo que el buen rendimiento de los MHA en cuanto a la reproducción de la dinámica de los caudales medios diarios de las cuencas, permite considerar la información de CHIRPS como una herramienta de apoyo en la reconstrucción de las series de precipitación diaria en estaciones meteorológicas con problemas de intermitencia, e incluso, explorar el uso de CHIRPS en la simulación hidrológica en sitios sin información de lluvia.

En este trabajo se realizó la comparación entre las series de cambio en el AAS del MHA y las series de EWT de GRACE, considerando como series de referencia las resultantes del MHA, lo anterior sustentado en el hecho de que el cambio en el AAS simulado con los modelos MHA se acopla a la variabilidad hidrológica de la cuenca y reproduce la dinámica de los caudales observados de la cuenca. Con esto en mente, se logró determinar que, en la escala de pixel, GRACE tiene una reproducción pobre de la magnitud del almacenamiento del agua en el suelo de las cuencas interceptadas por los pixeles, sin embargo, GRACE logra reproducir en buena manera los patrones de variabilidad estacional y las tendencias de largo plazo.

En la escala regional se encontró que las observaciones de GRACE se ajustan mejor a los resultados del MHA. A nivel de zona de estudio tanto la diferencia promedio en la magnitud como la dispersión y desviación entre las series de cambio en el AAS y EWT, se reducen aproximadamente entre un 30% y 46% respecto a las diferencias encontradas a escala de pixel. Lo anterior muestra que GRACE tiene mejor rendimiento sobre escalas regionales.

Dos aspectos se resaltan de la comparación entre las series de EWT y AAS. El primero es que los resultados de la comparación tienen mayor confiabilidad cuando más del 40% del área del pixel intercepta las cuencas. El segundo es que, debido al tamaño del pixel, las series de EWT pueden enmascarar parte de la variabilidad del AAS en las cuencas, variabilidad que si logra ser reproducida por el MHA.

La zona de estudio tiene una extensión 20.593 km², tamaño 3 veces menor que umbral definido por Bolaños et al., (2022). Este umbral de área se refiere al tamaño de cuenca a partir del cual los modelos que reproducen el almacenamiento total de agua y las observaciones de GRACE tienen una marcada reducción en el rendimiento y representan pobremente la variabilidad mensual del cambio en el AAS. Sin embargo, los resultados de la presente investigación también indican que el umbral en la escala o tamaño de cuenca en que GRACE muestra un ajuste aceptable respecto a la variabilidad del cambio en el

AAS, es menor que los 60.000 km² definidos Bolaños et al., (2022). GRACE puede convertirse en una herramienta de apoyo en la mejora continua de los modelos hidrológicos ser un objetivo de calibración de los modelos en escalas regionales.

Los resultados de esta tesis representan una descripción detallada de la variabilidad del cambio en el AAS en cuencas pequeñas, y validan para la zona de estudio la variabilidad interanual del cambio en el AAS y su relación con el ENSO mencionada por Güntner et al., (2007). La tesis también valida los resultados de Humphrey et al., (2016) y de Linage et al., (2013) en cuanto a que la estacionalidad y la variabilidad intranual del cambio en el AAS en el trópico Suramericano es controlada por la precipitación mensual con rezagos entre 1 y 2 meses.

Las series mensuales de cambio en el AAS y el cálculo de los balances hídricos de corto plazo han permitido determinar que en la zona de estudio el almacenamiento de agua en el suelo tiene un comportamiento heterogéneo, tanto espacial como temporalmente. En las cuencas ubicadas en la subregión 1 (Cauca Medio) el AAS responde en menor tiempo (1 mes en promedio) al estímulo de la precipitación mensual que las cuencas ubicadas en la subregión 3 (Bajo Cauca) (2 meses en promedio).

Se logró determinar que en la subzona 1 y parte de la subzona 2 predomina la escorrentía subsuperficial, lo que explica el agotamiento más rápido del AAS en comparación con las cuencas del Bajo Cauca. Las cuencas de la subzona 3 tienen mayor AAS porque cuentan con acuíferos regionales que aportan flujo base en periodos de estiaje.

Los BHCP y el cálculo de flujo de AAS con los MHA ha permitido determinar que el AAS tiene un papel predominante en la dinámica hídrica de las cuencas de la zona de estudio. El aporte del AAS en la dinámica hidrológica de las cuencas se ve reflejada en la regulación y permanencia de los cuadales de recesión. En el 90% de las cuencas el AAS aporta en promedio el 85% de la magnitud del caudal mínimo mensual, con un aporte mínimo de 65,3% en el caso de la cuenca Área Sanjuan 2 en el río San Juan y un aporte máximo del 99,1% en el caso de la cuenca Galera La del río Tonusco.

Durante la revisión de las series mensuales de cambios en el AAS y EWT se logró determinar que, entre los años 2002 y 2008 el promedio anual del cambio en el AAS muestra una tendencia creciente, sin embargo, a mediados del año 2009 se aprecia el inicio de un cambio de tendencia. El periodo de análisis de esta investigación no permite concluir sobre la continuidad de la tendencia del cambio en el AAS luego del año 2009, sin embargo, una de las conclusiones del trabajo de Bolaños Chavarría et al., (2018) es que desde el año 2011 se presenta una tendencia negativa en el almacenamiento total de agua en el suelo en la cuenca del río Cauca, cuenca en la cual se encuentra inmersa la zona objeto de estudio en esta investigación. Lo anterior valida la capacidad del MHA para reproducir la tendencia de largo plazo del cambio en el AAS.

La medición de la hidrometeorología (estaciones de precipitación, evaporación y caudal) en Colombia es una labor compleja si se toma en consideración la variabilidad espaciotemporal del clima y la hidrología, la limitada cobertura espacial de la red de

estaciones, fallas en los equipos de medición y la imposibilidad de instrumentar todas las cuencas. Estos aspectos que limitan la medición de las variables meteorológicas e hidrológicas, permiten considerar los modelos como una alternativa para la reconstrucción de series de tiempo frente a la ausencia o inconsistencia de datos de estaciones.

Los problemas asociados a la recolección y aseguramiento de la calidad del registro de las estaciones hidrometeorológicas, hacen que sea necesario considerar que parte de los resultados están sujetos al error, error que se ve reflejado en inconsistencias como las detectadas en la estación de caudal Olaya ubicada sobre el río Cauca. El error en las mediciones puede repercutir en las estimaciones de los balances hídricos, tal como logró determinarlo Jaramillo, (2017) en la cuenca del río Amazonas.

A pesar de lo anterior, la coherencia en la participación de las variables del ciclo hidrológico en la dinámica hídrica de la cuenca, especialmente el rol del AAS calculado con los MHA en la permanencia de los caudales de las corrientes y la congruencia respecto a su variabilidad estacional y comportamiento frente forzadores de la climatología colombiana en diferentes escalas de tiempo, permite considerar que los posibles errores asociados a la información de las estaciones de precipitación y caudal no afectan considerablemente los resultados presentados en esta investigación.

Por último, consideramos que la única forma de avanzar y mejorar en la investigación de la hidrología del país, y con ello, crear conciencia alrededor del funcionamiento del AAS en las cuencas hidrográficas, es fortaleciendo la red de estaciones que permiten medir la precipitación, la evaporación y caudales de las cuencas. Este fortalecimiento debe ser integral y contemplar acciones orientadas a la instalación de mayor cantidad de estaciones en sitios donde no se cuenta con el monitoreo de las variables hidrometeorológicas, recuperar las estaciones inactivas en los casos que sea posible y fortalecer mediante capacitación el conocimiento técnico del personal encargado de la instalación, mantenimiento y aseguramiento de la calidad de los registros de las estaciones de la red de monitoreo.

6.2 Trabajos futuros

- Los resultados de esta investigación y los del trabajo de Bolaños et al., (2022) muestran que la escala espacial afecta la confiabilidad de los resultados de GRACE al momento de reproducir la variabilidad del cambio en el AAS. Se hace necesario el desarrollo de investigación sobre el AAS centrandó la atención en la escala temporal, es decir, evaluar el rendimiento de GRACE respecto a la reproducción de la variabilidad del AAS en escalas de tiempo inferior y superior a la mensual.
- Implementación de modelos hidrológicos para la zona restante de la cuenca del río Cauca y complementar los resultados de esta investigación. El análisis debe integrar los efectos de la extracción de agua desde los acuíferos y el cambio en las condiciones naturales del AAS debido a la presencia de reservorios de agua en superficie.
- Explorar la potencialidad de los productos de GRACE en la simulación hidrológica, esto desde la simulación hidrológica de caudales mínimos y medios en cuencas cuya escala espacial permita una buena reproducción del almacenamiento del agua en el suelo por parte de GRACE.
- Dadas las bondades del modelo hidrológico agregado para reproducir las condiciones hidrológicas de una cuenca en diferentes niveles de almacenamiento, se propone extender la modelación hidrológica a otras cuencas en donde la resolución espacial de GRACE dificulta determinar la variabilidad espaciotemporal del AAS. Al extender la implementación de los MHA a otras cuencas del territorio colombiano se podrá determinar la variabilidad del AAS y con ello robustecer el estado del arte sobre dicha variable en el país.
- Trabajos con información y escala adecuada que permitan determinar si la información de niveles piezométricos permite determinar de manera directa el comportamiento del AAS en una cuenca o requiere de procesamiento o manipulación para tal fin.

- Se hace necesario integrar al análisis de la variabilidad espaciotemporal del AAS las unidades geológicas y geomorfológicas que controlan tanto la residencia del agua en superficie, como el movimiento de la misma en los diferentes niveles del suelo.

- A. Anexo: Variabilidad espacial del AAS a escala mensual para todas las cuencas de la zona de estudio**

- B. Anexo: Variabilidad temporal del AAS a escala diaria agregado para la zona de estudio y en las cuencas**

- C. Anexo: Variabilidad del EWT y su relación con la precipitación mensual**

D. Anexo: Variabilidad temporal del AAS en las 32 cuencas de la zona de estudio

E. Anexo: Participación del AAS en la dinámica hidrológica de las cuencas de la zona estudio

Bibliografía

- Álvarez-Villa, Ó. D., Franco, D., Vergara, S., García, V., Cortés, M., Giraldo, J., Montoya, J., Gómez, J., Peña, N., & Rogeliz, C. (2023). Retornos de la inversión en la conservación de cuencas tropicales incluyendo la emisión de bonos de carbono. *Ingeniería Del Agua*, 27(2), 139-167. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.19198>
- Álvarez, O. D., Vélez, J. I., & Poveda, G. (2007). Incertidumbre asociada con el balance hídrico de largo plazo. *XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*, 16.
https://www.researchgate.net/publication/236954574_INCERTIDUMBRE_ASOCIADA_CON_LA_ESTIMACION_DEL_BALANCE_HIDRICO_DE_LARGO_PLAZO
- Alvarez Villa, O. D. (2007). *Cuantificación de la incertidumbre en la estimación de campos hidrológicos. Alicación al balance hídrico de largo plazo* [Universidad Nacional de Colombia].
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:UNIVERSIDAD+NAZIONAL+DE+COLOMBIA+SEDE+MEDELLIN#1>
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport* (Second). ELSEVIER.
- Bear, J., & Cheng, A. H.-D. (2010). Water balance and complete flow model. In *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport* (p. 815). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6682-5>
- Berg, A., & Sheffield, J. (2018). Soil moisture-evapotranspiration coupling in CMIP5 models: Relationship with simulated climate and projections. *Journal of Climate*, 31(12), 4865-4878. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0757.1>
- Bolaños Chavarría, S. (2020). *Dynamics of continental water storage in regions of hydrogeological interest in Colombia with implications for water security*. Universidad de Antioquia.
- Bolaños Chavarría, S., Betancur Vargas, T., & Villegas Salazar, J. F. (2018). Decrease in total water storage in the Magdalena River basin in recent years inferred from GRACE

- data. *EGU General Assembly, April*, 1-2.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18751.41126/1>
- Bolaños, S., Werner, M., Salazar, J. F., & Betancurt, T. (2022). Benchmarking global hydrological and land surface models against GRACE in a medium-sized tropical basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(16), 4323-4344.
<https://doi.org/10.5194/hess-26-4323-2022>
- Bonsor, H. C., Shamsudduha, M., Marchant, B. P., MacDonald, A. M., & Taylor, R. G. (2018). Seasonal and decadal groundwater changes in African sedimentary aquifers estimated using GRACE products and LSMs. *Remote Sensing*, 10(6), 1-20.
<https://doi.org/10.3390/rs10060904>
- Builes-Jaramillo, L. A. (2017). *Coupling between the Andes and the Amazon River Basin and their feedbacks with the Tropical North Atlantic and Tropical Pacific Ocean* [Universidad Nacional de Colombia]. <http://bdigital.unal.edu.co/58492/>
- Carmona, A. (2015). *Impacts of climate change and climate variability on the spatio-temporal hydrological dynamics of Amazonia* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511564499>
- Carvajal, Y., Enciso, A., & Sandoval, M. (2016). Hydrological analysis of historical floods in the upper valley of Cauca river. *Ingeniería y Competitividad*, 18(1), 46.
<https://doi.org/10.25100/iyc.v18i1.2176>
- Chaves, B., & Jaramillo, A. (1998). Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. In *Cenicafé* (Vol. 49, Issue 3, pp. 224-230). <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/860/1/arc49%283%29224-230.pdf>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (M. Suárez (ed.)). Mc Graw Hill.
- Cuartas, A., & Poveda, G. (2002). Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia según el reanálisis NCEP/NCAR. *Meteorología Colombiana*, 5, 49-57. <http://bdigital.unal.edu.co/4413/1/DD3528.pdf>
- de Linage, C., Kim, H., Famiglietti, J. S., & Yu, J. Y. (2013). Impact of Pacific and Atlantic sea surface temperatures on interannual and decadal variations of GRACE land water storage in tropical South America. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(19), 10,811-10,829. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50820>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring

- extremes. *Scientific Data*, 2, 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Guarín Giraldo, G. W., & Poveda, G. (2013). Variabilidad espacial y temporal del almacenamiento de agua en el suelo en Colombia. *Academia Colombiana de Ciencias*, 37(142), 89-113. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n142/v37n142a07.pdf>
- Güntner, A., Stuck, J., Werth, S., Döll, P., Verzano, K., & Merz, B. (2007). A global analysis of temporal and spatial variations in continental water storage. *Water Resources Research*, 43(5), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2006WR005247>
- Hernandez Henao, S. (2019). Percepción y conocimiento ambiental en humedales altoandinos de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná del departamento de Caldas: estudio de caso sector el ocho. In *Jurusan Teknik Kimia USU. UNIVERSIDAD DE MANIZALES*.
- Humphrey, V., Gudmundsson, L., & Seneviratne, S. I. (2016). Assessing global water storage variability from GRACE: trends, seasonal cycle, subseasonal anomalies and extremes. *Surveys in Geophysics*, 37(2), 357-395. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9367-1>
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://oab.ambientebogota.gov.co/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/11/Estudio_Nacional_de_Agua_IDEAM2010.pdf
- IDEAM. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. In *Bogotá, Colombia: IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Niño+-+La+Niña.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>
- INGETEC - INESCO. (1974). *Proyecto de regulacion del río Cauca* (p. 142).
- Jaramillo, M., Velez, J. I., & Velez, M. V. (2004). *Estimación de caudales mínimos usando un modelo distribuido de tanques* (p. 19).
- Jaramillo-Robledo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia* (p. 196). <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/859>
- Llubes, M., Lemoine, J. M., & Rémy, F. (2007). Antarctica seasonal mass variations

- detected by GRACE. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(1-2), 127-136.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.022>
- Long, D., Pan, Y., Zhou, J., Chen, Y., Hou, X., Hong, Y., Scanlon, B. R., & Longuevergne, L. (2017). Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models [Elsevier Inc.]. In *Remote Sensing of Environment* (Vol. 192, Issue February).
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.011>
- Marengo, J. A. (2005). Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon river basin water budget. *Climate Dynamics*, 24(1), 11-22. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0461-6>
- Men, B., Liu, H., Tian, W., Wu, Z., & Hui, J. (2019). The impact of reservoirs on runoff under climate change: A case of Nierji Reservoir in China. *Water (Switzerland)*, 11(5), 1-21.
<https://doi.org/10.3390/w11051005>
- Mogollón, L. A. G. (2017). *Dinámica espacio temporal del almacenamiento de agua en el suelo en el Norte de Suramérica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Montoya Hernandez, M. T. (1996). Efectos del proyecto Salvajina en el desarrollo socioeconómico del municipio de Suarez, Cauca. In *Corporación Universitaria Autónoma de Occidente - División de Ciencias Económicas*. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente.
- Nehls, T., & Wessolek, G. (2011). Urban soils, functions. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series: Vol. Part 4*. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1>
- Oki, T. (2011). Global hydrology. In *Treatise on Water Science* (p. 2102).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00025-7>
- Oki, Taikan, Musiake, K., Matsuyama, H., & Masuda, K. (1995). Global atmospheric water balance and runoff from large river basins. *Hydrological Processes*, 9(5-6), 655-678.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360090513>
- Pérez-Valbuena, G. J., Arrieta, A. M., & Contreras, J. G. (2015). Río Cauca: la geografía económica de su área de influencia. In *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 225* (p. 82).
<http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/3075>
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica En México*, XI(1), 21-37.
file:///E:/01_UNIVERSIDAD_NACIONAL/04_TESIS/Revision_Bibliografica/765-1130-

1-PB.pdf

- Poveda, Germán. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde La escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias*, XXVIII(107), 201-222.
- Poveda, German, & Mesa, O. J. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste (“del Chocó”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Academia Colombiana de Ciencias*, XXIII(89), 517-528. https://www.researchgate.net/publication/233857360_La_Corriente_de_Corro_Superficial_del_Oeste_del_CHOCO_y_otras_dos_corrientes_de_chorro_atmosfericas_sobre_Colombia_Climatologia_y_Variabilidad_durante_las_fases_del_ENSO
- Poveda, Germán, & Mesa, O. J. (1995). *El Niño, La Niña y la predicción de la hidrología colombiana* (pp. 105-128). <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=24285>
- Poveda, German, Mesa, O. J., Salazar, L. F., & Arias, P. A. (2005). The diurnal cycle of precipitation in tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 133, 228-240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>
- Ramirez Callejas, C., Santacruz, S., Bocanegra, R. A., & Sandoval, M. C. (2010). Incidencia del embalse de Salvajina sobre el régimen de caudales del río Cauca en su valle alto. In *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* (Issue 9, pp. 89-99). <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434011.pdf>
- Rasmusson, E. M. (1968). Atmospheric water vapor transport and the water balance of North America. II large-scale water balance investigations. *Monthly Weather Review*, 96(10), 720-734. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096<0720:AWVTAT>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0720:AWVTAT>2.0.CO;2)
- Ray K. Linsley, Max A. Kohler, J. L. H. P. (1977). Hidrología para ingenieros. In *McGraw-Hill* (Issue 2). <https://doi.org/10.1001/jama.1938.02790300058032>
- Ridolfi, L., D’Odorico, P., Porporato, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2003). Stochastic soil moisture dynamics along a hillslope. *Journal of Hydrology*, 272(1-4), 264-275. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00270-6)
- Rodell, M., & Famiglietti, J. S. (2001). An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*, 37(5), 1327-1339.

<https://doi.org/10.1029/2000WR900306>

- Rodell, Matthew, Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J. S., Nigro, J., & Wilson, C. R. (2006). Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 15(1), 159-166. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0103-7>
- Rueda, Ó., & Poveda, G. (2006). Variabilidad espacial y temporal del Chorro del Chocó y su efecto en la hidroclimatología de la región del Pacífico colombiano. *Meteorología Colombiana N°10*, 501, 132-145.
- Santanello, J. A., Dirmeyer, P. A., Ferguson, C. R., Findell, K. L., Tawfik, A. B., Berg, A., Ek, M., Gentine, P., Guillod, B. P., Van Heerwaarden, C., Roundy, J., & Wulfmeyer, V. (2018). Land-atmosphere interactions the LoCo perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(6), 1253-1272. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0001.1>
- Santiago do Vale, V., Schiavini, I., Monteiro Araújo, G., Gusson, A. E., de Faria Lopes, S., de Oliveira, A. P., do Prado-Júnior, J. A., de Silvério Arantes, C., & Dias-Neto, O. C. (2013). Fast changes in seasonal forest communities due to soil moisture increase after damming. *Revista de Biología Tropical*, 61(4).
- Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Jones, D., Longuevergne, L., Owor, M., & Tindimugaya, C. (2017). Recent changes in terrestrial water storage in the Upper Nile Basin: An evaluation of commonly used gridded GRACE products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4533-4549. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4533-2017>
- Singhal, B. ., & Gupta, R. . (2010). *Applied hydrogeology of fractured rock* (Second Edi). Springer Science. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>
- Sun, A. Y., Scanlon, B. R., AghaKouchak, A., & Zhang, Z. (2017). Using GRACE satellite gravimetry for assessing large-scale hydrologic extremes. *Remote Sensing*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/rs9121287>
- Sun, L., Jaramillo, F., Cai, Y., Zhou, Y., Shi, S., Zhao, Y., Wang, W., Yi, Y., Yang, W., Yang, Z., Tan, Q., & Gunnarson, B. (2021). Exploring the influence of reservoir impoundment on surrounding tree growth. *Advances in Water Resources*, 153(March), 103946. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103946>
- Teegavarapu, R. S. V., & Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312(1-4), 191-206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>

- Tourian, M. J., Reager, J. T., & Sneeuw, N. (2018). The total drainable water storage of the Amazon river basin: A first estimate using GRACE. *Water Resources Research*, 54(5), 3290-3312. <https://doi.org/10.1029/2017WR021674>
- Urrea, V. (2017). *Variabilidad espacial y temporal del ciclo anual de lluvia en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Velásquez, N., Vélez, J. I., Álvarez-Villa, O. D., & Salamanca, S. P. (2023). Comprehensive analysis of hydrological processes in a programmable environment: the watershed modeling framework. *Hydrology*, 10(76), 20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology10040076>
- Velez, J. I. (2013). Estrategia de simulación hidrológica distribuida: integración conceptual de hidrología, hidráulica y geomorfología. *Revista Academica Colombiana de Ciencias*, 37(144), 419-435.
- Velez, J. I., Restrepo-Tamayo, C., & Correa, P. L. (2010). Aplicaciones de un modelo hidrológico agregado en Colombia. *XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010*, 13.
- Vélez Upegui, J. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Vicente-Serrano, S. M., El Kenawy, A., Dominguez-Castro, F., Peña-Gallardo, M., Nieto, R., Gimeno, L., Drumond, A., Azorin-Molina, C., & Tomas-Burguera, M. (2018). Recent changes of relative humidity: Regional connections with land and ocean processes. *Earth System Dynamics*, 9(2), 915-937. <https://doi.org/10.5194/esd-9-915-2018>
- Wang, H. F., & Anderson, M. P. (1982). *Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods* (Vol. 66, Issues 1-4). Academic Press.
- Wei, J., Dong, N., Fersch, B., Arnault, J., Wagner, S., Laux, P., Zhang, Z., Yang, Q., Yang, C., Shang, S., Gao, L., Yu, Z., & Kunstmann, H. (2021). Role of reservoir regulation and groundwater feedback in a simulated ground-soil-vegetation continuum: A long-term regional scale analysis. *Hydrological Processes*, 35(8), 1-24. <https://doi.org/10.1002/hyp.14341>
- Zeng, N. (1999). Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D8), 9097-9106. <https://doi.org/10.1029/1998JD200088>
- Zuluaga Arias, M., & Poveda, G. (2004). Diagnóstico de sistemas convectivos de

mesoescala sobre Colombia y el océano Pacífico Oriental durante 1998-2002. In *Avances en Recursos Hidraulicos* (Issue 11, pp. 145-160). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9276>