

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS



**“ESTIMACIÓN DE ESCORRENTÍA MEDIA ANUAL EN LA
CUENCA ANDINA AMAZÓNICA, INCORPORANDO TIPOS DE
VEGETACIÓN EN MODELO BUDYKO”**

Presentada por:

ANGEL EDUARDO LUNA ROMERO

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS

Lima - Perú

2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS

**“ESTIMACIÓN DE ESCORRENTÍA MEDIA ANUAL EN LA CUENCA
ANDINA AMAZÓNICA, INCORPORANDO TIPOS DE VEGETACIÓN EN
MODELO BUDYKO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ANGEL EDUARDO LUNA ROMERO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Néstor Montalvo Archiñigo

PRESIDENTE

Dr. Waldo Sven Lavado Casimiro

PATROCINADOR

Dr. Jhan Carlo Espinoza Villar

MIEMBRO

Dr. Eduardo Abraham Chavarri Velarde

MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis hijas, Camila Yelena y Sofía Lisbeth, por ser la fuente de inspiración y motivación con sus tiernos rostros llenos de inocencia y sus dulces sonrisas.

A mi esposa, Flor Yelena, por el apoyo incondicional en mis estudios y sus palabras de aliento en los momentos difíciles, por cuidar el tesoro más preciado, nuestras hijas.

A mis padres, Jaime e Inés, por estar siempre pendiente de mi a la distancia, por su apoyo incondicional y desinteresado, y de forma especial a mi querida madre por velar y cuidar de Camila y Sofía.

A mis hermanos, Marlyn, Alex y Zayda, por creer en mi capacidad y perseverancia para poder culminar mi tesis, también de forma especial a mis sobrinos, Israel y Jorge, por ser parte importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a la Universidad Nacional Agraria La Molina y su Escuela de Posgrado como institución, y de una manera especial a los docentes del programa de Maestría de Recursos Hídricos por sus aportes en mi formación académica.

Debo agradecer de manera especial y sincera al Dr. Waldo Lavado por aceptar en ser mi patrocinador para realizar esta tesis. Por su apoyo y confianza en mi trabajo y capacidad para poder desarrollar mi tema de investigación.

También debo agradecer a mi amigo Xu Han, por su tiempo, apoyo y dedicación en el desarrollo de mi tesis.

ÍNDICE GENERAL

	Pag
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 La Cobertura vegetal y el ciclo hidrológico en la cuenca andino-amazónica	1
1.2 Objetivos.....	4
II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes.....	5
2.2 El ciclo Hidrológico.....	6
2.3 Balance Hídrico	7
2.3.1 Precipitación	7
2.3.2 Evapotranspiración	9
2.3.3 Escorrentía.....	9
2.4 La cobertura vegetal y su influencia en el balance hídrico.....	10
2.5 Modelos de precipitación-escorrentía.....	12
2.5.1 Modelo Budyko	12
2.5.2 Modelo Fu.....	15
2.5.3 Modelo GR1A	15
III. METODOLOGÍA	16
3.1 Localización.....	16
3.1.1 Características generales de la zona.	16
3.1.2 Ubicación.....	16
3.2. Materiales y equipos	17
3.3 Procedimientos.	20
3.3.1 Revisión bibliográfica.....	20
3.3.2 Obtención de la información	20
3.3.3 Análisis exploratorio de datos	22
3.3.4 Transformación de caudal a escorrentía	23
3.3.5 Tratamiento espacial de la información.....	23
3.3.6 Análisis de la información de precipitación y evapotranspiración.....	23
3.3.7 Cálculo de la escorrentía media anual	23
3.3.8 Pruebas de bondad de ajuste	24
IV. RESULTADOS.....	26

4.1. Caracterización de la zona de estudio y de las estaciones utilizadas.....	26
4.2 Análisis exploratorio de datos	28
4.3. Transformación de caudal a escorrentía	28
4.4. Tratamiento espacial de la información.....	30
4.5. Análisis de la información de precipitación y evapotranspiración.....	36
4.6. Cálculo de la escorrentía media anual	39
4.6.1. Modelo Budyko	39
4.6.2. Modelo Fu 1-parámetro	41
4.6.3. Modelo GR1A	45
4.6.4. Modelo Fu 2-parámetros	47
4.5.5. Elaboración de la curva de Budyko	54
4.5.6. Elaboración de la curva de Fu 1-parámetro.....	57
4.5.7. Elaboración de la curva de Fu 2-parámetro.....	60
4.5.8. Distribución espacial de la escorrentía media anual.....	64
V. CONCLUSIONES	66
VI. PERSPECTIVAS	70
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	80

ÍNDICE DE CUADROS

	Pag
Cuadro 1. Características de las estaciones hidrométricas en la Cuenca Andino Amazónica: nombre, código, río, ubicación geográfica, área y serie temporal.....	18
Cuadro 2. Características de las estaciones pluviométricas: nombre, código, ubicación geográfica y cuenca.....	19
Cuadro 3. Área de cada cuenca, porcentaje de las coberturas en el área de estudio, área para las coberturas BQ y NBQ.....	35
Cuadro 4. Parámetro α del modelo Fu 1-p, valores de Nash, coeficiente de correlación (r) coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para las estaciones de la cuenca andino-amazónica.....	44
Cuadro 5. Parámetro X del modelo GR1A, valores de Nash, coeficiente de correlación (r) coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para las estaciones de la cuenca andino-amazónica.....	47
Cuadro 6. Parámetro α para las coberturas bosque (BQ) y no bosque (NBQ) del modelo Fu 2-parámetros, valores de Nash, coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para cuatro estaciones de la cuenca andino-amazónica.....	51
Cuadro 7. Área de cada cuenca, porcentaje de las coberturas en el área de estudio, escorrentía media anual estimada para la cobertura de bosque (BQ), no bosque (NBQ) y el total simulado del modelo Fu 2-parámetros.....	53
Cuadro 8. Escorrentía media anual simulada con Budyko y QMA observada para cuatro estaciones de la CAA, índice de aridez (IA), coeficiente de escorrentía (CQ) para cada cuenca (GL) y las coberturas de BQ y NBQ.	57
Cuadro 9. Escorrentía media anual simulada con Fu 1-p con $\alpha=1.31$ y QMA observada para cuatro estaciones de la CAA, índice de aridez (IA), coeficiente de escorrentía (CQ) para cada cuenca (GL) y las coberturas de BQ y NBQ.	59
Cuadro 10. Área de cada cuenca, porcentaje de las coberturas en el área de estudio, Escorrentía media anual estimada para la cobertura de bosque (BQ), no bosque (NBQ) y el total simulado del modelo Fu 2-parámetros, con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.9$	61
Cuadro 11. Precipitación media anual (PMA), escorrentía media anual (QMA), índice de aridez (IA), coeficiente de escorrentía (CQ), en CAA para las coberturas de BQ y NBQ para el modelo Fu 2-p, con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$	64

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global anual en unidades relativas a un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre.	6
Figura 2. Efectos climáticos de la deforestación sobre el balance hídrico.	11
Figura 3. Diagrama de la curva de Budyko (C) y los segmentos A y B son sus asíntotas. En el eje de las abscisas el índice de aridez (EpP), en el eje de las ordenadas el índice de evaporación (EP).	13
Figura 4. Diagrama de la curva de Budyko, línea discontinua color azul. En el eje de las abscisas el índice de aridez (ETPP), en el eje de las ordenadas el coeficiente de escurrimiento (QP). Línea vertical discontinua separa separa la región húmeda y la región árida, línea sólida color negro es límite del coeficiente de escurrimiento (QMA = PMA).	14
Figura 5. Ubicación de la zona de estudio, A) Modelo de elevación digital (DEM), límite de las cuencas seleccionadas, estaciones hidrométricas (triángulos rojos), estaciones pluviométricas (puntos color negro), los principales ríos son mencionados y la región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color blanco. B) Ubicación de la zona de estudio en Sudamérica y límite de la cuenca amazónica (línea roja) C) Ubicación de la zona de estudio en el territorio de Perú y Ecuador.	17
Figura 6. Esquema del proceso de construcción del producto CHIRPS	21
Figura 7. Régimen de precipitaciones en la cuenca andino-amazónica, para las seis cuencas delimitadas por las estaciones de descarga. La región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color negro.	26
Figura 8. Régimen de caudales de las seis estaciones de descarga en la cuenca andino-amazónica.	27
Figura 9. Gráfico de cajas para detección de valores atípicos en las seis estaciones de descarga.....	28
Figura 10. Información observada en las seis estaciones de descarga de la cuenca andina amazónica. A. Caudal promedio anual, en el eje de las ordenadas las unidades están expresadas en m ³ /s; B. Escorrentía promedio anual esta expresada en mm/año.....	29
Figura 11. Precipitación anual (mm/año) del producto CHIRPS, para las seis cuencas de la zona de estudio de la cuenca andino amazónica.	30
Figura 12. Distribución espacial de la precipitación media anual del producto CHIRPS (0.05° x 0.05°). A. CHA (2000-2010); B. BOR (1992-2010); C. SRG (2000-2010); D. PUC (2000-2010); E. REQ (1999-2010); F. TAM (1985-2010).....	31
Figura 13. Evapotranspiración potencial (ETP) de la cuenca andina-amazónica obtenida	

de la Unidad de Investigación del Clima (CRU). A. Resolución espacial de 0.5° x 0.5° de ETP. B. Resolución espacial de ETP transformada a 0.05° x 0.05°.....	32
Figura 14. Evapotranspiración potencial anual promedio (mm/año) obtenida de la Unidad de Investigación del Clima (CRU, 0.5° x 0.5°), para las seis cuencas de la CAA.....	32
Figura 15. Distribución espacial de la evapotranspiración potencial media anual del CRU (0.05° x 0.05°). A. CHA (2000-2010); B. BOR (1992-2010); C. SRG (2000-2010); D. PUC (2000-2010); E. REQ (1999-2010); F. TAM (1985-2010).....	33
Figura 16. Cobertura vegetal obtenida del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con resolución espacial de ~1 x 1 km. Línea de color rojo delimita la zona de estudio.....	34
Figura 17. Reclasificación de la cobertura vegetal obtenida por la USGS. A. Coberturas reclasificadas en bosques (BQ), no bosques (NBQ) y cuerpos de agua, resolución espacial de ~1 x 1 km. B. Reclasificación homogenizada a 0.05° x 0.05°, la región andina sobre los 500 msnm está delimitada por la línea de color gris.	35
Figura 18. Precipitación media anual (1985 – 2010) de las estaciones pluviométricas en las cuencas de CHA (13) y REQ (35), la región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color negro.....	36
Figura 19. Correlación de Pearson al nivel de confianza del 95% entre la estación pluviométrica y la grilla más cercana del producto CHIRPS a escala anual para el periodo 1985 – 2010. La región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color negro.	37
Figura 20. Resultados de prueba Bias (%) de la precipitación estimada del producto CHIRPS comparado con la precipitación in situ de las estaciones pluviométricas a escala anuan para el periodo 1985 – 2010.....	38
Figura 21. Escorrentía anual simulada con modelo Budyko (en eje y) frente escorrentía anual observada (eje x). A. BOR (1992-2010); B. CHA (2000-2012), C.SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).	40
Figura 22. Comparación de la escorrentía anual simulada con modelo Budyko, sin . factor de ajuste (línea punteada), escorrentía anual ajustada con parámetro $x = 1.338$ (línea color gris) y la escorrentía anual observada (línea sólida con asteriscos). A. BOR (1992-2010); B. CHA (2000-2012), C.SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).	41
Figura 23. Escorrentía media anual simulada con modelo Budyko frente escorrentía media anual observada, los triángulos representan la escorrentía media anual y los puntos la escorrentía anual.....	42
Figura 24. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada con el modelo Budyko. A. BOR (1992-2010); B. SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).....	42

Figura 25. Comparación de la escorrentía anual simulada con modelo Fu 1-p (línea punteada) y la escorrentía anual observada (línea sólida con asteriscos) para las seis estaciones de descarga de la cuenca andino-amazónica.	43
Figura 26. Escorrentía media anual simulada con modelo Fu 1-p frente escorrentía media anual observada (mm), los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual de las seis estaciones de descarga de la cuenca andino-amazónica.	45
Figura 27. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada con el modelo Fu 1-parámetro. A. BOR (1992-2010); B. SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).....	46
Figura 28. Escorrentía media anual simulada en modelo GR1A frente escorrentía media anual observada, los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual.	47
Figura 29. Escorrentía media anual simulada en modelo GR1A frente escorrentía media anual observada, con $X=0.31$ en las estaciones de SRG, PUC y TAM, los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual.	48
Figura 30. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada con el modelo GR1A. A. BOR (1992-2010); B. SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).....	49
Figura 31. Comparación de la escorrentía anual simulada (línea punteada) con Fu 2-p y la escorrentía anual observada (línea sólida con asteriscos), la línea en color verde representa la escorrentía anual para la cobertura bosque (BQ) y la línea en color amarillo representa la escorrentía anual para la cobertura no bosque (NBQ), para cuatro estaciones de descarga de la cuenca andino-amazónica.	50
Figura 32. Escorrentía media anual simulada en modelo Fu 2-p frente escorrentía media anual observada, los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual.	51
Figura 33. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada con el modelo Fu 2-p. A. SRG (2000-2010); B. TAM (1985-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010).....	52
Figura 34. Distribución espacial de la QMA en la cobertura de bosque (QB). A. SRG (2000-2010); B. TAM (1985-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010).....	53
Figura 35. Distribución espacial de la QMA en la cobertura de no bosque (QNB). A. SRG (2000-2010); B. TAM (1985-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010).....	54
Figura 36. CQ frente IA, para el modelo Budyko. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ. La línea color lila es la curva de Budyko, línea color negro es límite $CQ = 1.0$ y la línea discontinua separa la región húmeda y la región árida.	56
Figura 37. CQ frente IA, para el modelo Budyko en la CAA. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos	

	representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ. La línea color negro es la curva de Budyko y la línea discontinua separa la región húmeda y la región árida.....	56
Figura 38.	CQ frente IA, para el modelo Fu 1-p en la CAA de acuerdo a los resultados del Cuadro 3. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ. La línea color negro es límite CQ = 1.0 y la línea discontinua separa la región húmeda y la región seca.....	58
Figura 39.	CQ frente IA, para el modelo Fu 1-p en la CAA. Las líneas de color sólido representan la curva del modelo Fu de acuerdo al parámetro α de cada cuenca establecido en Cuadro 4.....	58
Figura 40.	Escorrentía media anual simulada en modelo Fu 1-p frente escorrentía media anual observada, con $\alpha=1.31$ en las estaciones de SRG, PUC, REQ y TAM, los triángulos representan la escorrentía media anual y los puntos la escorrentía anual.....	59
Figura 41.	CQ frente IA, para el modelo Fu 1-p en la CAA con $\alpha = 1.31$. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de BQ. La línea color negro representa la curva de Fu 1-p.....	60
Figura 42.	Escorrentía media anual simulada en modelo Fu 2-p frente escorrentía media anual observada, con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, en las estaciones de SRG, PUC, REQ y TAM, los triángulos representan la escorrentía media anual y los puntos la escorrentía anual.....	61
Figura 43.	CQ frente IA, para el modelo Fu 2-p en la CAA con $\alpha_{BQ}= 4.30$ y $\alpha_{NBQ}= 25.90$. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ.	62
Figura 44.	Coficiente de escorrentía de boque (CQBQ) frente el índice de aridez (IABQ), para el modelo Fu 2-p en la CAA. Los triángulos representan el promedio, asteriscos los valores anuales. La línea color negro representa la curva de Fu 2-p para BQ.	63
Figura 45.	Coficiente de escorrentía de no boque (CQNBQ) frente el índice de aridez (IANBQ), para el modelo Fu 2-p en la CAA. Los triángulos representan el promedio anual, cruces los valores anuales. La línea color negro representa la curva de Fu 2-p para NBQ.	63
Figura 46.	Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada en la CAA para periodo 1985-2010. A. Budyko; B. Fu 1-p ($\alpha = 1.31$); C. Fu 2-p ($\alpha_{BQ} = 4.30$; $\alpha_{NBQ} = 25.9$).	64

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Información de caudales obtenidos del observatorio ORE – HYBAM (Hidrogeodinámica de la Cuenca Amazónica).....	80
ANEXO 2. Escorrentía anual (mm/año) transformada a partir de los caudales observados	81
ANEXO 3. Precipitación anual promedio obtenida del producto CHIRPS (0.05° x 0.05°), para la cuenca andina amazónica.	82
ANEXO 4. Evapotranspiración potencial anual promedio obtenida de la Unidad de Investigación del Clima (CRU, 0.5° x 0.5°), para la cuenca andina amazónica.	83
ANEXO 5. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Budyko, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS con el parámetro X (1.338) agregado en la ecuación (2).....	84
ANEXO 6. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 1-parámetro, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α de cada cuenca.....	85
ANEXO 7. Resultados de la escorrentía anual con el modelo GR1A, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro X de cada cuenca.	86
ANEXO 8. Comparación de la escorrentía anual simulada (línea punteada) con modelo GR1A y la escorrentía anual observada (línea solida con asteriscos) para cinco estaciones de descarga de la cuenca andino amazónica.....	87
ANEXO 9. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 2-p, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α_{BQ} y α_{NBQ} de cada cuenca.	88
ANEXO 10. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 2-p en la zona de BQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α_{BQ} y α_{NBQ} de cada cuenca.....	89
ANEXO 11. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 2-p en la zona de NBQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α_{BQ} y α_{NBQ} de cada cuenca.....	90
ANEXO 12. Resultados del índice de aridez (ETP/P), estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para las cuencas de la zona de estudio.	91
ANEXO 13. Resultados del índice de aridez (ETP/P), estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.....	92
ANEXO 14. Resultados del índice de aridez (ETP/P), estimado a través de la	

información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.....	93
ANEXO 15. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Budyko, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.....	94
ANEXO 16. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Budyko, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.	95
ANEXO 17. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Budyko, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para las cuencas de la zona de estudio.....	96
ANEXO 18. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Budyko, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.....	97
ANEXO 19. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Budyko, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.	98
ANEXO 20. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-parámetro de acuerdo al Cuadro 2, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para las cuencas de la zona de estudio.....	99
ANEXO 21. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-parámetro de acuerdo al Cuadro 2, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.	100
ANEXO 22. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-parámetro de acuerdo al Cuadro 2, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.	101
ANEXO 23. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 1-p, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha = 1.31$	102
ANEXO 24. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-p con $\alpha = 1.31$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para cuatro cuencas de la zona de estudio.	103
ANEXO 25. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-p con $\alpha = 1.31$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.	104

ANEXO 26. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-p con $\alpha = 1.31$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.	105
ANEXO 27. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 2-p, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$	106
ANEXO 28. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 2-p para la cobertura de BQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$	107
ANEXO 29. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 2-p para la cobertura de NBQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$	108
ANEXO 30. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 2-p con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para cuatro cuencas de la zona de estudio.....	109
ANEXO 31. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 2-p con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.....	110
ANEXO 32. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 2-p con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.	111

ESTIMACIÓN DE ESCORRENTÍA MEDIA ANUAL EN LA CUENCA ANDINA AMAZÓNICA, INCORPORANDO TIPOS DE VEGETACIÓN EN MODELO BUDYKO

RESUMEN

En la presente investigación se estimó la escorrentía media anual en la cuenca andina amazónica (CAA) hasta la estación Tamshiyacu, a través de ~24 000 celdas de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, utilizando los modelos de Budyko y Fu (1-p y 2-p), incorporando la cobertura vegetal de bosque (BQ) y no bosque (NBQ), además del modelo GR1A. Utilizando como información de entrada los datos de precipitación del producto CHIRPS (Grupo de Riesgo del Clima Precipitación Infrarroja con Datos de Estación), evapotranspiración potencial del CRU (Unidad de Investigación del Clima) y la cobertura vegetal de la USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos). Para la calibración de los modelos empleados, se utilizó los caudales observados de seis cuencas ($> 60\,000\text{ km}^2$) delimitadas por las estaciones de Borja (BOR), Chazuta (CHA), San Regis (SRG), Pucallpa (PUC), Requena (REQ) y Tamshiyacu (TAM), información proporcionada por el observatorio ORE-HYBAM. En la estimación de la escorrentía media anual se obtuvo mejores resultados en la cuenca del río Marañón (SRG), la cuenca del río Ucayali (PUC y REQ) y la CAA (TAM). El modelo Budyko a pesar de ser no paramétrico presentó buenos resultados, demostrando ser un modelo robusto, aunque el modelo Fu 1-p llegó a tener la mayor eficiencia en la prueba de bondad de ajuste, el valor del parámetro α , representa las características climáticas y físicas de la cuenca, alcanzo un valor de 1.31 y representa la parte climática de la CAA, indicando que el balance hídrico está influenciado por las variables climáticas en cuencas de esta dimensión. Por otro lado, la eficiencia del modelo Fu 2-p, que registro un $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, es menor con relación a los otros modelos. Sin embargo, proporciona una aproximación de la escorrentía que se produce en las coberturas vegetales, generándose en la cobertura de BQ entre el ~70% y ~82% de escorrentía de la CAA.

Palabras claves: cuenca andina amazónica, balance hídrico, Budyko, cobertura vegetal, escorrentía.

ESTIMATION OF MEAN ANNUAL RUNOFF IN AN ANUAL ACROSS AMAZON-ANDES BASIN, BY INCORPORATING VEGETATION TYPES INTO BUDYKO FRAMEWORK

ABSTRACT

In this research the mean annual runoff is estimated across Amazon Andean basin (CAA) to Tamshiyacu station, through ~ 24 000 cells of $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, using models Budyko and Fu (1-p and 2-p), incorporating forest vegetation cover (BQ) and non-forest (CNBQ), furthermore GR1A model. Taken as input data product precipitation CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), potential evapotranspiration of CRU (Climatic Research Unit) and vegetation cover of the USGS (United States Geological Survey Geological). For calibration of the models employed, the observed flow rates six basins ($> 60\,000\text{ km}^2$) bounded by the stations Borja (BOR), Chazuta (CHA), San Regis (SRG), Pucallpa (PUC), Requena (REQ) and Tamshiyacu (TAM), information provided by the observatory ORE-HYBAM. In the estimation of the mean annual runoff better results in the Marañon river basin (SRG), the Ucayali river basin (PUC and REQ) and CAA (TAM) was obtained. The Budyko model despite being nonparametric presented good results, proving to be a robust model, although the model Fu 1-p came to have greater efficiency in testing goodness of fit, the value of α parameter that represents the climatic characteristics and physical characteristics of the basin, reached a value of 1.31 and represents the climate of the CAA, indicating that the water balance is influenced by climatic variables in this dimension basins. On the other hand, the efficiency of Fu 2-p model, which registered $\alpha_{BQ} = 4.30$ and $\alpha_{NBQ} = 25.90$, is lower compared to the other models. However, it provides an approximation of runoff that is produced in land cover, thus generating coverage BQ between ~ 70% and ~ 82% of runoff from the CAA.

Keywords: Andean Amazon basin, water balance, Budyko, vegetation cover, runoff.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 La Cobertura vegetal y el ciclo hidrológico en la cuenca andino-amazónica

La estimación fiable de la disponibilidad de agua es importante para la captación, planificación y gestión regional del agua (Zhang & Chiew, 2012). Dentro de una cuenca hidrográfica se estima la disponibilidad de agua a través del balance hídrico, el concepto del balance hídrico proporciona un marco de estudio, y es útil para evaluar como los cambios en las condiciones de una cuenca pueden perturbar el particionamiento de la precipitación en sus componentes (evapotranspiración, escurrimiento, recarga de acuíferos y almacenamiento de agua en suelo) (Zhang et al., 2001). La precipitación es el término de entrada de la ecuación del balance hídrico, el mismo que varía tanto en tiempo y espacio. Para la mayoría de aplicaciones hidrológicas es apropiado asumir que la precipitación es independiente del tipo de vegetación (Calder, 1998). Sin embargo, la aplicación de modelos de circulación global (MCG) indica que los tipos de vegetación tendrán un impacto regional sobre el clima (Kremer et al., 1996).

La cuenca del Amazonas (CA) es la mayor cuenca hidrográfica del mundo, se extiende desde los Andes orientales hasta el Océano Atlántico (5° N y 20° S), abarca aproximadamente 6 000 000 km², aporta con el 15% de agua dulce que se vierte al océano y su caudal medio se estima en 209 000 m³/s (Marengo, 2005). La CA se divide en tres unidades morfológicas: el 44% de su superficie le pertenece a los escudos geológicos Guyanés y Brasileiro, el 45% en la llanura amazónica, y el 11% en los Andes (Espinoza et al., 2009).

El balance hídrico se ve afectado por la precipitación debido a su variabilidad espacio-temporal, en la cuenca CA se han realizado estudios acerca de la variabilidad de las lluvias (Liebmann & Marengo, 2001; Marengo, 2004; Espinoza et al., 2009). En la cuenca andino amazónica (CAA) el estudio realizado por Espinoza et al. (2009) indica el impacto de la cordillera de los Andes sobre las lluvias y sus regímenes son más diversificados en las

regiones andinas que en el llano amazónico. La topografía de los Andes bloquea los vientos húmedos del este y tiene una influencia directa sobre el transporte de humedad forzando la precipitación orográfica a lo largo del flanco oriental de los Andes (Insel et al., 2010).

Sobre una base anual, la esorrentía superficial guarda una buena correlación con la precipitación. Por lo tanto, para mejorar la estimación de esorrentía en la CA se han realizado diversos estudios utilizando información de sensoramiento remoto y aplicando diferentes modelos hidrológicos en distintas escalas (Coe et al., 2002; Collischonn et al., 2008). Lavado et al. (2009) en la CAA utilizó el modelo mensual de balance hídrico GR2M, desarrollado por CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia), que estima la esorrentía a partir de la precipitación y evapotranspiración, obteniendo resultados satisfactorios con información del TRMM 3B43 en las cuencas de Urubamba y Tambo.

La cuenca del Amazonas es reconocida por su gran biodiversidad, tanto acuática y terrestre. Cuantificar y estimar el número exacto de especies es todavía complicado, pero relacionado a la cobertura vegetal se estima alrededor de 11 200 especies de árboles (Hoorn et al., 2010). La vegetación y el ciclo hidrológico están estrechamente ligados (Gerten et al., 2004). La distribución, densidad y los tipos de vegetación influyen en los componentes del balance hídrico debido a la intercepción de la lluvia y la transpiración (Zhang et al., 1999; Berry et al., 2006), la evapotranspiración es una pérdida de aproximadamente del 60 por ciento de agua dentro del ciclo hidrológico, la misma que se ve regulada por el tipo de vegetación (Cheng et al., 2011). La abundante y diversa vegetación de la CA libera una gran cantidad de vapor de agua, parte de la precipitación de la región es sostenida localmente por la evapotranspiración, inducida por una precipitación reciclada de aproximadamente 25-30 por ciento (Eltahir & Brass, 1994; Malhi et al., 2002; De Almeida et al., 2007).

La reducción de la cobertura vegetal resulta en disminuciones del rendimiento del agua en una cuenca (Bosch & Hewlett, 1982), aunque los procesos por los cuales la vegetación afecta la respuesta hidrológica de una cuenca han sido bien documentada, ha sido difícil desarrollar modelos que puedan ser utilizados para predicciones de esorrentía (Zhang et al., 2004). La curva de Budyko durante mucho tiempo ha sido considerada para estimar la esorrentía media anual (Q) o la evapotranspiración real (E) debida a su simplicidad y

sensata hipótesis física que la disponibilidad de agua (precipitación anual, P) y energía (evapotranspiración potencial, ETP) son los principales factores que gobiernan la escorrentía media anual y evaporación (Zhang & Chiew, 2012).

A partir de la curva de Budyko se han desarrollado varios estudios para analizar los efectos del clima y las características físicas de una cuenca (por ejemplo la cobertura vegetal) sobre la evapotranspiración y escorrentía (Zhang et al., 2001; 2004; 2012; Roderick & Farquhar, 2011). Además, ha sido utilizada para analizar la variabilidad espacio-temporal del balance hídrico y su simetría en ambas escalas (Yang et al., 2008; Sivapalan et al., 2011), entre otras aplicaciones. Chen et al. (2013) menciona que Fu (1981) ajustó la curva de Budyko en una función racional de un parámetro adimensional (α) que representa las características físicas y el clima local de una cuenca. Zhang et al. (2001) desarrolló una función similar de un parámetro utilizado para estimar la evaporación media anual, la misma que utilizó en dos estudios con el mismo objetivo. El primero con 250 cuencas (Zhang et al., 2001) y el segundo con 470 cuencas (Zhang et al., 2004), ambos estudios utilizando cuencas alrededor del mundo; presentando resultados razonables y argumentando que las cuencas no boscosas (praderas, pastizales) tienen valores altos del parámetro α y por lo tanto mayor evaporación que las cuencas boscosas.

En investigaciones se han utilizado modelos basados en procesos físicos y muy pocos modelos hidrológicos a nivel de cuenca incorporan la vegetación, y cuando lo hacen es de forma general o en términos abstractos que se dificultan de medir a través del espacio y tiempo (Donohue et al., 2007). Esto ha comenzado a cambiar con el reconocimiento de la comunidad hidrológica que la vegetación juega un papel importante en el balance hídrico, cambios en la densidad de la vegetación influyen en la distribución de la energía solar entrante (radiación) y el flujo del calor latente, además puede resultar en cambios a largo plazo del clima tanto local y global (Montaldo et al., 2005; Marengo, 2006; De Almeida et al., 2007).

Sivapalan et al. (2011) menciona que Budyko (1958, 1974) desarrolló un modelo que es muy utilizado y de su ecuación se han derivado muchos trabajos, describe y vincula que el balance hídrico está gobernado por el clima y las características físicas de la cuenca. Donahue et al. (2007) utilizó la curva de Budyko para integrar las principales características

de la vegetación y observar como su dinámica temporal tiene una influencia en el balance hídrico, encontrando buenos resultados en cuencas con una superficie mayor a los 10 000 km².

El carácter húmedo del clima amazónico es resultado de su propio ciclo hidrológico (Hoorn et al., 2010). Las diferencias en la dinámica de la humedad del suelo es una de las principales razones para que existan diferentes tipos de vegetación (pastizales, bosques, arbustos, etc.) (Rodríguez-Iturbe et al., 2001), por lo tanto, la intercepción de la lluvia y la transpiración será diferente con cada tipo de vegetación; el cambio o variabilidad de la escorrentía anual está relacionado con el cambio de la cobertura vegetal debido al cambio del uso de la tierra como la deforestación y reforestación (Zhang et al., 1999; Marengo, 2006; De Almeida et al., 2007). Con modelos climáticos se ha evaluado la influencia de la vegetación en la CA, acerca de los efectos de la deforestación sobre el cambio del clima regional y el ciclo hidrológico, escenarios de una drástica deforestación podrían alterar y reestructurar la dinámica de la interacción suelo-atmósfera (Nobre et al., 1991, Marengo, 2006; De Almeida et al., 2007).

1.2 Objetivos

Modelizar la escorrentía media anual de la cuenca andina amazónica incorporando los tipos de vegetación en el modelo de Budyko, utilizando información de satélite tanto para precipitación (CHIRPS), evapotranspiración (CRU) y cobertura vegetal (USGS), es el principal objetivo de éste estudio, desarrollando los siguientes objetivos específicos:

- Estimar la escorrentía de la cuenca andina amazónica aplicando el modelo no paramétrico Budyko, el paramétrico Fu y el conceptual GR1A.
- Aplicar el modelo de dos parámetros de Fu al área de estudio, distinguiendo entre cubierta vegetal de bosques y no bosques, con un valor de α representando todo el grillado de bosques y otro valor de α para el grillado de no bosques.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Para éste estudio, se tuvieron en cuenta dos enfoques de estudios realizados anteriormente para la estimación de la escorrentía. El primero, investigaciones desarrolladas tanto en la cuenca del Amazonas (CA) y cuenca Andina Amazónica (CAA), en este primer punto se resaltan los trabajos realizados utilizando la lluvia estimada por teledetección como variable de entrada en los diferentes modelos de precipitación-escorrentía (Coe et al., 2002; Collischonn et al., 2008; Lavado et al., 2009). El segundo, investigaciones realizadas en cuencas de diferentes partes del mundo, pero considerando la vegetación y su influencia en los componentes de la ecuación del balance hídrico (Zhang et al., 2001; 2012; Arora, 2002; Montaldo et al., 2005; Donohue et al., 2007; Oudin et al., 2008).

La estimación de la escorrentía varía en primer lugar por la precipitación, en la CAA los regímenes de lluvias son más diversos debido a la cordillera de los Andes. Espinoza et al. (2009) ha estudiado la variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la CAA teniendo como data los registros de 756 estaciones meteorológicas. Vale señalar que no existe una extensa red pluviométrica que represente la variabilidad de la precipitación a plenitud, la alternativa a este problema es el uso de lluvia estimada por sensoramiento remoto, como se mencionó en el párrafo anterior ya se han realizados trabajos con esta metodología.

Una serie de estudios se han realizado entorno al modelo de Budyko, los principales para estimar la evapotranspiración y su variabilidad (Zhang et al., 2004; Sivapalan et al., 2011; Cheng et al., 2011; Chen et al., 2013), en lo posterior se incluyó la vegetación para evaluar la respuesta de la evapotranspiración de acuerdo al tipo y cambio de la cubierta vegetal dentro de las cuencas hidrográficas (Zhang et al., 2001; 2012).

Oudin et al. (2008) incorpora la vegetación en cinco fórmulas de igual características a la de Budyko incluso unas derivadas de ella, para evaluar qué tipo de vegetación influye

en el balance hídrico. Donuhue et al. (2007) examinan la literatura relacionada al modelo de Budyko enfocándose sobre como la vegetación puede afectar el balance hídrico y argumentan que es necesario incluir la dinámica de la vegetación en el modelo de Budyko antes de ser aplicada en pequeñas cuencas hidrográficas.

2.2 El ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico puede ser considerado como un producto integrado del clima y de los atributos biogeofísicos de la superficie (Figura 1), ejerce una influencia sobre el clima, que va más allá de la interacción entre la humedad atmosférica, precipitación y escorrentía. Una mejor comprensión de los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca y su variabilidad dependerá del conocimiento de los mecanismos físicos relacionados a gran escala y escala regional de los forzantes atmosférico-oceánico-biosférico, que al final modulan la variabilidad temporal y espacial de la hidrometeorología de una cuenca (Marengo, 2006).

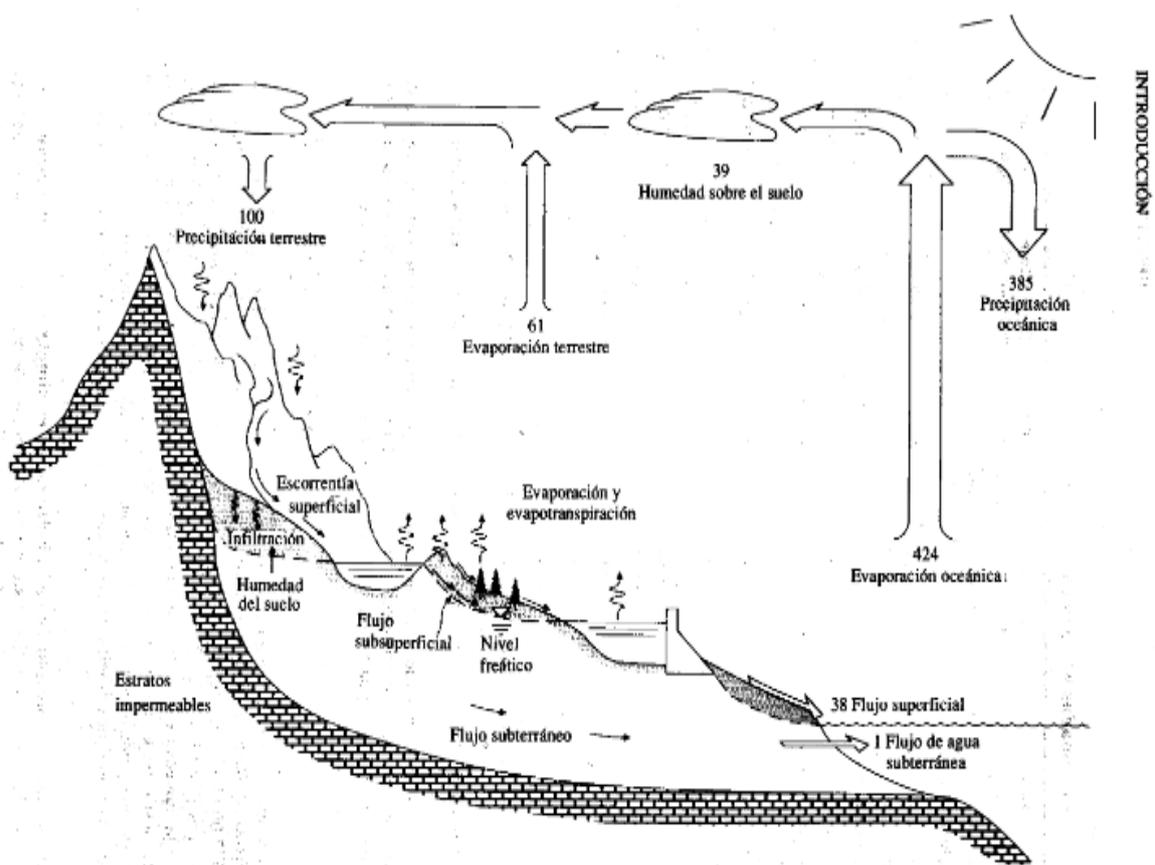


Figura 1. El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global anual en unidades relativas a un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre.

Fuente: Chow et al. (1994)

El ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua de los océanos, constituye el 90 % de la humedad atmosférica, y de la superficie terrestre para incorporarse a la atmósfera en forma de vapor de agua, que es transportado por la circulación atmosférica y recorre grandes distancias por el movimiento de las masas de aire. El vapor de agua se enfría y condensa formando las nubes, si las condiciones son favorables puede transformarse en precipitación. Dentro del ciclo hidrológico se destacan cuatro fases básicas de interés para distintos estudios: precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial y agua subterránea (Linsley et al., 1977; Chow et al., 1994).

2.3 Balance Hídrico

El balance hídrico relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico, se utiliza cuando se realiza una distribución de los recursos hídricos (Fattorelli & Fernández, 2011). Además, es útil para estudiar el comportamiento hidrológico de una cuenca y evaluar los cambios de las variables que componen el balance hídrico. La cuenca hidrográfica considerada como un volumen de control para el ciclo hidrológico, considerándose como un sistema donde se examinan las entradas y salidas (Chow et al., 1994).

La ecuación del balance hídrico se basa en los principios de la ecuación de continuidad, según Zhang et al. (2004) la ecuación del balance hídrico se puede escribir de la siguiente manera:

$$P = E + Q + \Delta S \quad (1)$$

Donde P es la precipitación, E es la evapotranspiración, Q es la escorrentía total (escorrentía superficial, agua subterránea y flujo base), y ΔS es la variación de almacenamiento del agua en el suelo. Sobre un largo periodo de tiempo, la variación de almacenamiento del agua (ΔS) puede ser despreciable (cero). La evaluación de la ecuación del balance hídrico necesita información acerca de las características físicas de la cuenca, variables climáticas, y otras relaciones (Zhang et al., 2004).

2.3.1 Precipitación

La principal fuente de humedad para que se genere la precipitación es la evaporación proveniente de la superficie de los océanos, el vapor de agua se incorpora a la atmósfera y es arrastrado por los vientos hacia los continentes, una parte permanece sobre los océanos.

Dentro del sistema general de circulación, la humedad atmosférica puede enfriarse (proceso de saturación), y cambiar el estado del vapor de agua a líquido (Linsley et al., 1977).

La precipitación es el término más grande en la ecuación de balance hídrico, la incertidumbre en la determinación de la distribución espacial y temporal constituye un obstáculo importante para la comprensión del comportamiento hidrológico a nivel de cuenca (Zhang et al., 2001; Milly & Dunne, 2002).

En la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en la CA se resalta el impacto de la cordillera de los Andes sobre las lluvias (Espinoza et al., 2009), los Andes tiene un efecto de barrera en el flujo de humedad proveniente desde el océano Atlántico y la región central del Amazonas (Espinoza et al., 2015), afectando el patrón de los vientos y la precipitación a nivel regional (Insel et al., 2009), en el flanco este de los Andes expuesto a barlovento se registran fuertes precipitaciones, siendo el resultado de las interacciones complejas entre la atmósfera y la orografía (Bookhagen & Strecker, 2008; Insel et al., 2009, Espinoza et al., 2015).

En la CAA hasta la estación Tamshiyacu las regiones particularmente lluviosas (3000 mm/año a más) se encuentra al norte de la amazonia ecuatoriana, y, noreste y sureste de la amazonia peruana, las lluvias disminuyen hacia los trópicos, menos de 1500 mm/año en el llano peruano. Espinoza et al. (2009) en su estudio de la variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la CA para el periodo 1964-2003, recalca la disminución de las lluvias en las regiones altas de los Andes, principalmente en el centro y sur. Las precipitaciones tienden a disminuir con la altitud, pero la exposición a barlovento o sotavento de las estaciones al viento húmedo dominante hace que sea difícil encontrar una relación sencilla entre precipitación y la altitud, existiendo registros de lluvias superiores a los 1500 mm/año a una altitud mayor de los 2000 msnm, menos de 1000 mm/año se observa a más de 3000 msnm (Laraque et al., 2007; Espinoza et al., 2009). Las precipitaciones superiores a 3000 mm/año se registran a menos de 1500 msnm, que se relacionan con el bloqueo que ejerce los Andes sobre los vientos alisios de bajo nivel (cálido-húmedo) que transportan humedad desde el océano Atlántico ecuatorial y la cuenca del Amazonas hacia el flanco este de los Andes, liberando gran cantidad de vapor de agua sobre las primeras laderas orientales de la cordillera (Espinoza et al., 2009; 2015).

2.3.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración, representa la pérdida de aproximadamente el 60% del agua precipitada, es un componente crítico de la ecuación del balance hídrico, que resulta de la compleja relación entre clima-suelo-vegetación (Cheng et al., 2011). La Evapotranspiración es un proceso con extraordinaria heterogeneidad en espacio y tiempo e intrínsecamente, bastante compleja para ser medida o precisamente pronosticada (Brutsaert & Stricker, 1979).

Ecuaciones empíricas relacionan la evapotranspiración con la precipitación, que han sido desarrolladas para calcular el balance hídrico global (Choudhury, 1999). En la ecuación del balance hídrico se representa la evapotranspiración real (E), mediante la ecuación de balance de energía, se representa a la evapotranspiración potencial (ETP) como el suministro de energía (Cheng et al., 2011).

El término de ETP fue presentado por Thornthwaite (1948), aunque fue desarrollado en un principio como un índice para la clasificación del clima, se ha utilizado más ampliamente por el sector agrícola, interesados en el uso eficiente del agua en los cultivos, y por los hidrólogos como un índice más predecible a partir del cual la evapotranspiración real (E) podría ser estimada. La ETP se ha convertido en un ingrediente estándar en el desarrollo de un nuevo esquema para estimar la Evapotranspiración real (E) (Granger, 1989).

En la literatura se encuentran disponibles diferentes fórmulas para calcular la ETP (Zhang et al., 1999). Según Oudin et al. (2005) y Kay & Davies (2008), la complejidad de estas fórmulas varían en gran medida, desde aquellas que necesitan una sola variable atmosférica, como la temperatura (por ejemplo: Thornthwaite, 1948; Blaney-Criddle, 1950; Jensen & Haise, 1963; Hargreaves & Samani, 1982), hasta aquellas fórmulas que requieren más variables, tales como humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar neta (por ejemplo: Penman, 1948; Priestley & Taylor, 1972; Thom & Oliver, 1977).

2.3.3 Escorrentía

La escorrentía es un componente importante del balance hídrico y se genera cuando el suelo se encuentra saturado o cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración (Zhang et al., 1999). La precipitación efectiva es una fracción de la precipitación total y es la que contribuye directamente a la escorrentía superficial, en tanto

la proporción restante del total de precipitación se pierde por evapotranspiración, infiltración y es interceptada por la vegetación. La escorrentía superficial está formada en un primer momento por el flujo en forma de lámina, por efecto de la gravedad y la pendiente de la cuenca hidrográfica este flujo fluye hacia los canales de drenaje natural hasta formar el caudal total que se dirige hacia la salida de la cuenca (Fattorelli & Fernández, 2011).

2. 4 La cobertura vegetal y su influencia en el balance hídrico

El papel de influencia e impacto de la cobertura vegetal dentro del ciclo hidrológico tiene una historia que se remonta al menos al siglo I DC con la observación de Plinio Segundo (Pliny the Elder) (Adreassian, 2004). La circulación continúa del agua en el suelo-vegetación-atmósfera es un proceso importante y es fundamental para los balances de energía, carbono y soluto del sistema (Zhang et al., 1999). El agua que precipita y alimenta el sistema puede derivar por diferentes caminos, puede ser interceptada por la vegetación y evaporada directamente a la atmósfera, puede infiltrar en el suelo y luego ser evaporada desde la superficie del suelo o ser transpirada por la vegetación, puede convertirse en escorrentía superficial y por último puede percolar a través del suelo para recargar las aguas subterráneas.

La intercepción de la precipitación por la vegetación es un importante proceso hidrológico. El agua interceptada puede ser retenida sobre las hojas, fluir hacia abajo de las plantas para convertirse en escurrimiento por el tronco, o dejar las hojas para convertirse parte del escurrimiento, o ser evaporada desde la superficie del follaje húmedo durante el periodo de la tormenta. El proceso de intercepción es un complejo proceso y es afectado por varios factores tales como las características del follaje (área foliar del follaje, configuración de la hoja) y régimen de precipitación (intensidad), puede afectar la distribución de la lluvia en el sistema y existe una gran variación en la pérdida por intercepción entre diferentes tipos de vegetación (Zhang et al., 1999). Previos estudios sugieren que la intercepción por el follaje de la vegetación se encontró valores significativos, desde aproximadamente 10 por ciento (Lloyd et al., 1988) hasta 22 por ciento (Franken & Leopoldo, 1984). Este es un tema importante debido al potencial impacto ambiental del exceso de agua que llega al suelo, y la consiguiente erosión cuando se elimina la cobertura vegetal (Marengo, 2006).

La cuenca del Amazonas cuenta con una abundante vegetación que libera gran cantidad de vapor de agua por transpiración, que junto a la evaporación, igualan el 50 – 60

por ciento del total de la precipitación de la región. Parte de ésta precipitación es mantenida localmente por la evapotranspiración, inducida por un reciclaje de las precipitaciones de alrededor de 25 a 35 por ciento (Eltahir & Brass, 1994). El cambio de la superficie de la tierra a través de la deforestación dentro de la cuenca del Amazonas se ha convertido en una actividad intensiva desde mediados y finales de 1970 (Marengo, 2006; De Almeida et al., 2007), para inicios de 1990 más del 10 por ciento de la cuenca boscosa se ha había convertido en pastizales o cultivos (Fearnside, 1993).

Los cambios de uso del suelo debido a una deforestación a gran escala (a través de modelos de clima global) pueden producir un impacto sobre la circulación de la atmósfera tropical (por ejemplo la célula de Hadley) y consta de dos componentes: la respuesta de la circulación tropical a la variación negativa en la precipitación (calor latente), y la respuesta de la misma circulación hacia el cambio positivo en la temperatura superficial (Marengo, 2006).

Bajo un escenario hipotético de deforestación de la cuenca del Amazonas (Figura 2), casi todos los modelos presentan una disminución en la esorrentía, precipitación, evapotranspiración y un aumento en la temperatura del aire. La dependencia de las predicciones de esorrentía en las magnitudes relativas de los cambios previstos en la precipitación y la temperatura de la superficie implica que las predicciones sobre la esorrentía son muy sensibles, lo que explica, al menos en parte, el desacuerdo entre los diferentes modelos de relación con el signo del cambio previsto en la esorrentía amazónica (Marengo, 2006).

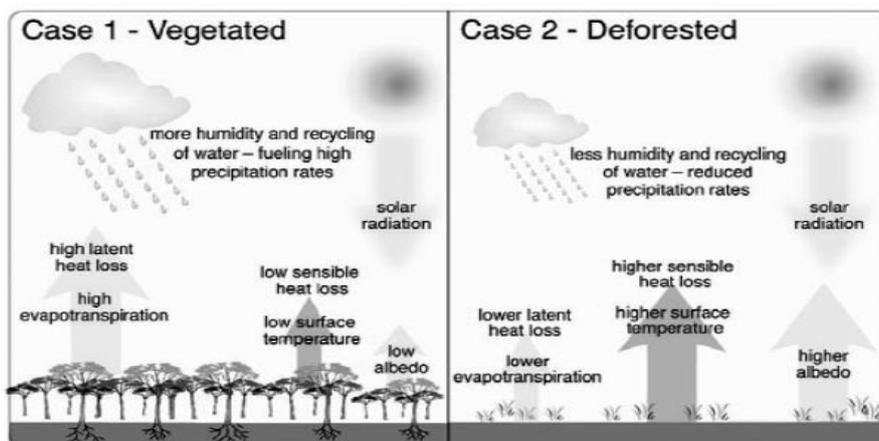


Figura 2. Efectos climáticos de la deforestación sobre el balance hídrico.

Fuente: Foley et al. (2003)

2.5 Modelos de precipitación-escorrentía

Desde inicios de 1960, muchos hidrólogos han concentrados sus esfuerzos en diseñar modelos de precipitación-escorrentía, en los últimos 30 años se han desarrollado modelos que proporcionen una información distribuida de las características de la cuenca (modelos más complejos con mayor número de parámetros) (Perrin et al., 2001). Cuando se considera un paso de tiempo tan grande como un año, los modelos de precipitación-escorrentía por lo general son llamados modelos de balance hídrico, y pueden ser útiles para la gestión de los recursos hídricos (Mouelhi et al., 2006).

El contar con modelos más complejos podría ser útil en términos de conocimiento de los procesos, tiene limitaciones cuando se aplica en un contexto operacional. Por el contrario, los modelos simples construidos conceptual o empíricamente concentran las heterogeneidades de la cuenca y representan la transformación de la precipitación en escorrentía, son generalmente herramientas fáciles de usar, con bajos requerimientos de datos (Perrin et al., 2001).

Los modelos conceptuales de precipitación-escorrentía generalmente representan la cantidad de humedad del suelo del ciclo hidrológico como varios subsistemas interconectados, cada uno representando un cierto componente en el proceso de un evento hidrológico. Empíricamente o heurísticamente determinada, pero funciones físicamente realistas se utilizan para describir el funcionamiento interno de estos procesos. Los tipos de funciones y la cantidad de detalle utilizado para representar un sistema determinan el grado de realismo y sofisticación de un modelo de precipitación-escorrentía. Para cualquier modelo conceptual de precipitación-escorrentía para tener una utilidad práctica, es importante ser capaz de identificar valores adecuados para los parámetros que rigen estas funciones; el procedimiento para hacer esto se llama calibración del modelo (Duan et al., 1992).

2.5.1 Modelo Budyko

Donohue et al. (2007) y Chen et al. (2013) mencionan que a mediados del siglo pasado Budyko (1958, 1974), publicó un modelo que describe la partición de la precipitación promedio en la evapotranspiración promedio (E) y la escorrentía promedio (Q) basado en relaciones físicas simples, conocida en la actualidad como la “curva de Budyko”.

El balance hídrico anual puede ser modelado utilizando el método de Budyko, la curva de Budyko tiene un enfoque integral que asume el equilibrio del balance hídrico es controlado por la disponibilidad de agua (P) y la disponibilidad de energía (E_p) para la evaporación (Donohue et al., 2007; Gerrits et al., 2009). Budyko observó que en algunas regiones, bajo condiciones muy secas, la evapotranspiración anual se aproxima a la precipitación anual ($E/P \rightarrow 1$), donde la energía (radiación neta R_n) anual entrante a la superficie (medida por la E_p) excede en gran medida la cantidad necesaria para vaporizar la precipitación anual ($E_p/P \rightarrow \infty$, segmento A en Figura 3). En cambio, bajo condiciones muy húmedas, cuando la entrada de energía es una pequeña fracción de la cantidad necesaria, la evapotranspiración anual se aproxima a la evapotranspiración potencial anual ($E \rightarrow E_p$, donde $E_p/P \rightarrow 0$, segmento B en Figura 3). Estas relaciones asintóticas bajo condiciones áridas y húmedas son entendidas como situaciones limitadas por el suministro anual de agua y energía, respectivamente (Milly, 1994; Zhang et al., 1999; 2001). La evapotranspiración de la mayoría de áreas de tierra es menor que los límites tanto de agua y energía, como se indica en la Figura 3 por la curva C (Milly, 1994).

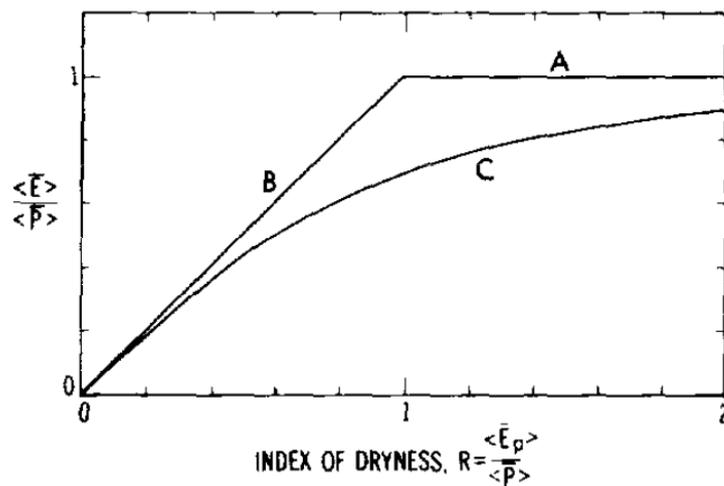


Figura 3. Diagrama de la curva de Budyko (C) y los segmentos A y B son sus asíntotas. En el eje de las abscisas el índice de aridez (E_p/P), en el eje de las ordenadas el índice de evaporación (E/P).

Fuente: Milly (1994).

La ecuación semi-empírica propuesta por Budyko es un modelo no paramétrico para el balance hídrico (Chen et al., 2013), considerada una herramienta útil para evaluar el impacto del clima y el cambio de las características de la cuenca sobre la escorrentía anual

(Donuhue et al., 2011; Roderick & Farquhar, 2011), la ecuación de Budyko (1974) asume que se puede estimar el índice de evaporación (E/P) o el coeficiente de escorrentía (Q/P o $1 - E/P$) en función del índice de aridez ($IA = E_p/P$), donde P es la precipitación media anual y E_p es la evapotranspiración media anual; la escorrentía media anual se puede estimar con la siguiente ecuación (2) (Zhang et al., 2012)

$$Q = P - \{P[1 + \exp(-IA)E_p \tanh(IA)]\}^{0.5} \quad (2)$$

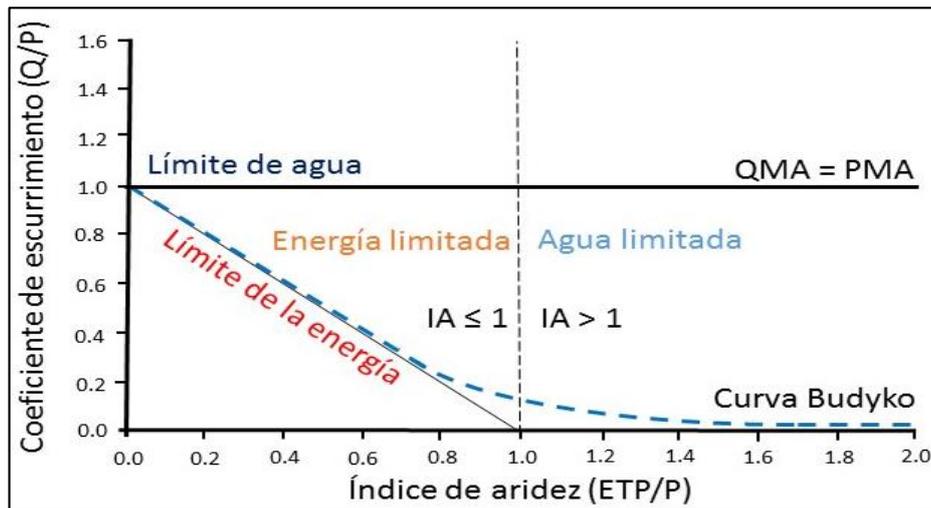


Figura 4. Diagrama de la curva de Budyko, línea discontinua color azul. En el eje de las abscisas el índice de aridez (ETP/P), en el eje de las ordenadas el coeficiente de escurrimiento (Q/P). Línea vertical discontinua separa la región húmeda y la región árida, línea sólida color negro es límite del coeficiente de escurrimiento ($QMA = PMA$).

Fuente: Propia

El coeficiente de escorrentía (CQ) se puede estimar en función del IA (Figura 4); donde el límite del CQ es igual a uno, la escorrentía media anual (QMA) es igual a la precipitación media anual (PMA), es decir un valor no puede estar por encima de este límite a menos que exista una entrada adicional de agua más allá que la precipitación. Valores en la región árida ($IA > 1$) presentan un bajo CQ, donde la energía de entrada (ETP) excede la cantidad necesaria para vaporizar la P ($ETP/P \rightarrow \infty$), es decir la escorrentía es mínimo o prácticamente nulo y la evapotranspiración se aproxima a la P ($E = P$). Por otro lado, los valores en la región húmeda ($IA \leq 1$) muestran un alto CQ, donde la energía de entrada es una pequeña fracción de la cantidad necesaria ($ETP/P \rightarrow 0$), es decir el escurrimiento alcanza su nivel máximo ($CQ = 1$) y el escurrimiento se aproxima a la P ($Q = P$).

2.5.2 Modelo Fu

Zhang et al. (2004) mencionan que B. P. Fu, en 1981, publicó un artículo científico sobre las relaciones entre la evapotranspiración y la precipitación a largo plazo, donde combinó análisis dimensional con razonamiento matemático y desarrolla soluciones analíticas para la evapotranspiración media anual. El método de Fu (1981) es similar a la conocida curva de Budyko, asumiendo que el equilibrio del balance hídrico es controlado por la disponibilidad de agua y energía (Zhang et al., 2008).

Bajo el contexto de Fu (1981), la esorrentía media anual se puede estimar con la siguiente ecuación (3) (Zhang et al., 2012)

$$Q = P[1 + (AI)^\alpha]^{1/\alpha} - E_p \quad (3)$$

Donde Q es la esorrentía media anual, P la precipitación media anual, AI es el índice de aridez, E_p es la evapotranspiración potencial y α es el parámetro que representa las características físicas y el clima regional de una cuenca.

2.5.3 Modelo GR1A

El GR1A es un modelo lluvia-esorrentía global de un solo parámetro. Su desarrollo se inició en CEMAGREF (Instituto Francés de Investigación para la Ingeniería Agrícola y Ambiental) a finales de 1990 con el objetivo de desarrollar un modelo de simulación de lluvia-esorrentía robusto y fiable para usos de la evaluación de la gestión de los recursos hídricos. La estructura del modelo es muy simple, ya que se reduce a una simple ecuación, el flujo Q_k de año k es proporcional a la lluvia P_k ese año, con un coeficiente de caudal en función P_k , P_{k-1} de la lluvia del año k-1 y la evapotranspiración potencial media anual E, siendo X el único parámetro del modelo (Perrin et al., 2007). La siguiente ecuación (4) según Perrin et al. (2010) es la propuesta por Mouelhi (2003) y Mouelhi et al. (2006a):

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{XE} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad (4)$$

III. METODOLOGÍA

3.1 Localización

3.1.1 Características generales de la zona.

La cuenca andino amazónica hasta la estación de Tamshiyacu, al igual que toda la cuenca del Amazonas se caracteriza por la variabilidad de las lluvias que es el resultado de muchas interacciones complejas (Marengo, 2004). La presencia de la cordillera de los Andes tiene un impacto en las lluvias, marcando regímenes más diversificados de la precipitación (Espinoza et al., 2009; 2015). Los Andes tienen una influencia en la climatología forzando a los vientos húmedos del este a generar la precipitación orográfica a lo largo de la zona oriental de la cordillera (Insel et al., 2009). La parte sur de la cuenca andina amazónica muestra un claro régimen tropical con una larga estación seca de mayo a septiembre. En la cuenca alta de los ríos Huallaga y Ucayali presentan un régimen tropical húmedo, con un periodo lluvioso de diciembre a mayo. En la parte alta del río Marañón se observa un régimen intermedio entre tropical sur y ecuatorial. En las estaciones más cerca de la línea ecuatorial, se presentan periodos de lluvias más prolongados (Espinoza et al., 2009).

La CA se caracteriza por la variedad de paisajes como la zona boscosa al pie de los Andes y la extensa selva tropical en la parte central de la cuenca, además de su biodiversidad de especies (Hoorn et al., 2010). La cordillera de los Andes tiene su efecto sobre el clima regional y el gran aporte de sedimentos en la cuenca, teniendo un papel crucial para la evolución de paisajes y el ecosistema (Hoorn et al., 2010). Nobre et al. (1991) señalan que los bosques de la Amazonia reciclan eficientemente la precipitación hacia la atmósfera, el cambio de cubierta vegetal de pastos por el bosque podría variar la tasa de evapotranspiración.

3.1.2 Ubicación

La cuenca andina amazónica hasta la estación Tamshiyacu (4.00°S y 73.16° W) que comprende territorio de Perú y Ecuador, cubre una superficie de 726 400 km², con un 53%

sobre los 500 msnm (Espinoza et al., 2009). La zona de estudio se encuentra comprendida por cinco subcuencas (Figura 5), y sus límites establecidos tomando como base las estaciones de descarga (Cuadro 1).

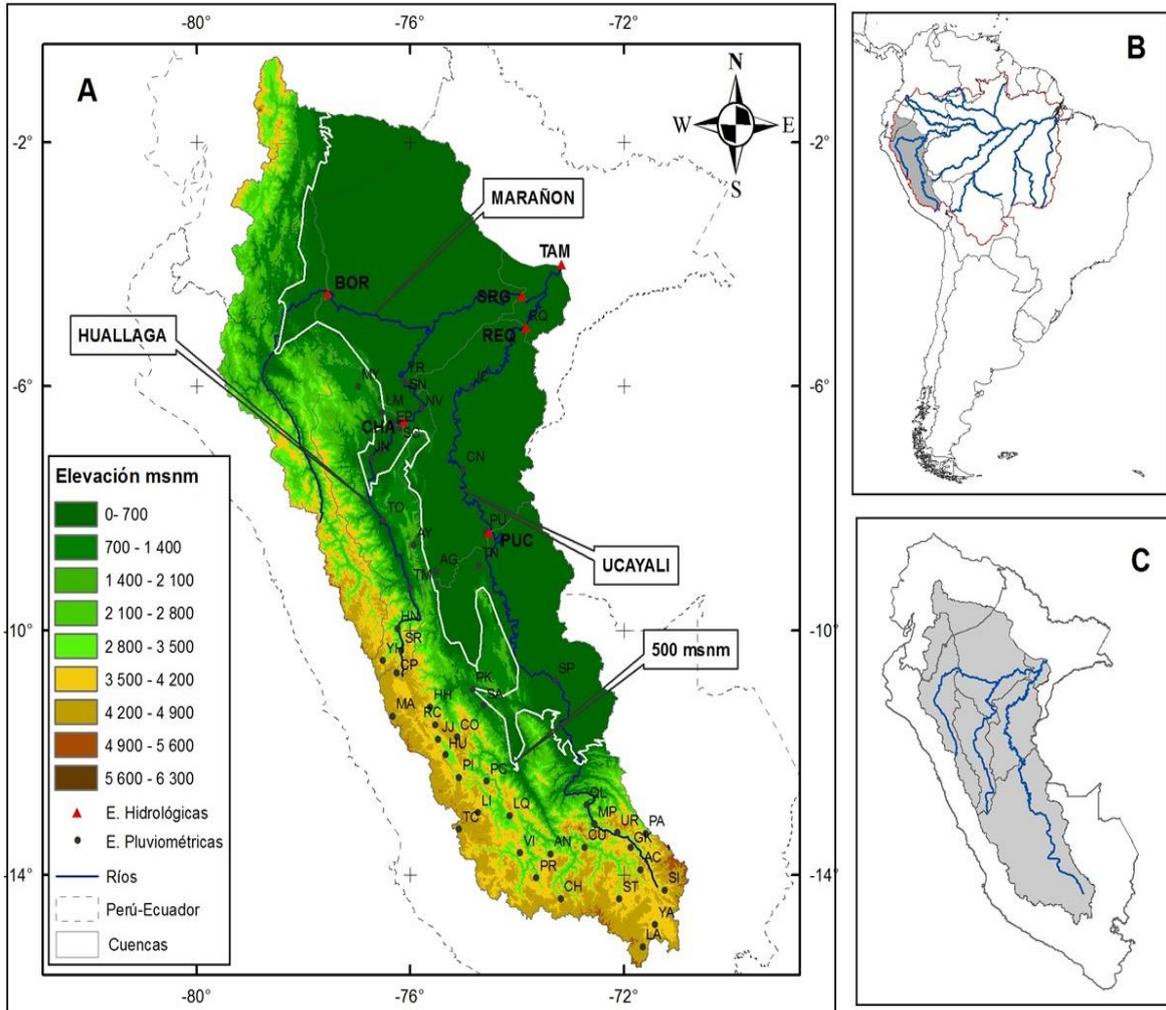


Figura 5. Ubicación de la zona de estudio, A) Modelo de elevación digital (DEM), límite de las cuencas seleccionadas, estaciones hidrométricas (triángulos rojos), estaciones pluviométricas (puntos color negro), los principales ríos son mencionados y la región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color blanco. B) Ubicación de la zona de estudio en Sudamérica y límite de la cuenca amazónica (línea roja) C) Ubicación de la zona de estudio en el territorio de Perú y Ecuador.

3.2. Materiales y equipos

Para la estimación de la escorrentía media anual de la cuenca andina amazónica, incorporando los tipos de vegetación en el modelo de Budyko, se utilizó lo siguiente:

- Datos estimados de precipitación con sensoramiento remoto CHIRPS (Grupo de Riesgo del Clima Precipitación Infrarroja con Datos de Estación) en una resolución de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (~5.5 x 5.5 km).
- Imagen de cobertura vegetal del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) (~1 x 1 km).
- Datos de evapotranspiración potencial CRU (Unidad de investigación del clima) grillados a una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (~55 x 55 km).
- Series de datos mensuales desde enero de 1985 hasta diciembre de 2010 en ríos pertenecientes a la CAA (Cuadro 1).
- Precipitación in situ a escala anual de 1985 – 2010 pertenecientes a la cuenca del río Huallaga y río Ucayali, 48 estaciones pluviométricas (Cuadro 2).
- Libros y revistas científicas.
- Mapas pertenecientes a la Cuenca del Amazonas.
- Útiles de escritorio.
- Ordenador de escritorio.
- Impresora multifuncional, tinta de color y negra.
- Software: Microsoft Office, HYDRACCES, ArcGIS 10.0, ENVI 4.7.

Cuadro 1. Características de las estaciones hidrométricas en la Cuenca Andino Amazónica: nombre, código, río, ubicación geográfica, área y serie temporal.

Estación	Código	Río	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Área (km ²)	Serie Temporal
Tamshiyacu	TAM	Amazonas	-4.00	-73.16	726 400	1985-2010
Requena	REQ	Ucayali	-5.04	-73.84	315 544	1999-2010
Pucallpa	PUC	Ucayali	-8.39	-74.53	260 541	2000-2010
Chazuta	CHA	Huallaga	-6.57	-76.12	68 625	2000-2010
Borja	BOR	Marañón	-4.47	-77.55	114 983	1992-2010
San Regis	SRG	Marañón	-4.51	-73.91	356 198	2000-2010

Fuente: Observatorio ORE-HYBAM (2014)

Cuadro 2. Características de las estaciones pluviométricas: nombre, código, ubicación geográfica y cuenca.

Estación Pluviométrica	Código	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)	Cuenca
Huanuco	HN	-9.966	-76.237	1947	Huallaga
Aucayacu	AY	-8.600	-75.934	600	Huallaga
Bellavista	BL	-7.051	-76.559	247	Huallaga
Juanjui	JN	-7.175	-76.734	280	Huallaga
Cerro de Pasco	CP	-10.694	-76.254	4260	Huallaga
Yanahuanca	YH	-10.491	-76.508	3170	Huallaga
Tocache	TO	-8.184	-76.500	508	Huallaga
Sauce	SC	-6.694	-76.203	620	Huallaga
El Porvenir	EP	-6.593	-76.322	230	Huallaga
Lamas	LM	-6.424	-76.525	920	Huallaga
Moyobamba	MY	-6.000	-76.967	860	Huallaga
Tingo María	TM	-9.288	-76.000	686	Huallaga
San Rafael	SR	-10.322	-76.169	2600	Huallaga
Santo Tomas	ST	-14.399	-72.089	3253	Ucayali
Sicuani	SI	-14.254	-71.237	3574	Ucayali
Curahuasi	CU	-13.553	-72.735	2763	Ucayali
Urubamba	UR	-13.311	-72.124	2863	Ucayali
Paucartambo	PA	-13.324	-71.591	3042	Ucayali
Vilcashuaman	VI	-13.644	-73.949	3590	Ucayali
Andahuaylas	AN	-13.657	-73.371	2866	Ucayali
Huayao	HU	-12.034	-75.339	3308	Ucayali
Pilchaca	PI	-12.406	-75.085	3570	Ucayali
Comas	CO	-11.745	-75.118	3300	Ucayali
Jauja	JJ	-11.779	-75.474	3322	Ucayali
Huasahuasi	HH	-11.254	-75.627	2737	Ucayali
Pichanaky	PK	-10.966	-74.830	547	Ucayali
Tournavista	TN	-8.932	-74.711	185	Ucayali
Sepa	SP	-10.817	-73.284	307	Ucayali
Acomayo	AC	-13.917	-71.684	3160	Ucayali
Granja Kcayra	GK	-13.557	-71.875	2360	Ucayali
Yauri	YA	-14.817	-71.417	3927	Ucayali
Machu Picchu	MP	-13.167	-72.546	2563	Ucayali
Quillabamba	QL	-12.856	-72.692	990	Ucayali
La Angostura	LA	-15.180	-71.649	4150	Ucayali

Estación Pluviométrica	Código	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)	Cuenca
La Quinua	LQ	-13.034	-74.135	3232	Ucayali
Paucarbamba	PC	-12.467	-74.567	3000	Ucayali
Lircay	LI	-12.983	-74.729	3150	Ucayali
Marcapomacocha	MA	-11.405	-76.325	4479	Ucayali
Chalhuanca	CH	-14.393	-73.179	3358	Ucayali
Ricran	RC	-11.542	-75.525	3500	Ucayali
Paucaray	PR	-14.051	-73.644	3250	Ucayali
Tunel Cero	TC	-13.254	-75.085	4700	Ucayali
Juancito	JC	-6.034	-74.867	150	Ucayali
Aguaytia	AG	-9.034	-75.508	338	Ucayali
Satipo	SA	-11.220	-74.627	607	Ucayali
Requena	RQ	-5.043	-73.836	128	Ucayali
Contamana	CN	-7.353	-75.006	185	Ucayali
Pucallpa	PU	-8.384	-74.576	160	Ucayali

Fuente: Lavado et al. (2011)

3.3 Procedimientos.

3.3.1 Revisión bibliográfica.

La bibliografía como fuente primaria utilizada para el desarrollo de la investigación es el desarrollado por Zhang & Chiew (2012), denominada “*Estimation of mean annual runoff across southeast Australia by incorporating vegetation types into Budyko framework*”.

3.3.2 Obtención de la información

La información de la precipitación del producto CHIRPS, se descargó del portal web de CHG (Climate Hazards Group, <http://chg.geog.ucsb.edu>), serie de tiempo anual del periodo 1985-2010. El CHIRPS es una estimación de la precipitación mundial comenzando en 1981 hasta la actualidad (50°N – 50°S), incorpora imágenes satelitales a una resolución de 0.05° con datos de estación in situ (Figura 6) para crear series temporales de lluvia grillada para análisis de tendencias y monitoreo de sequías.

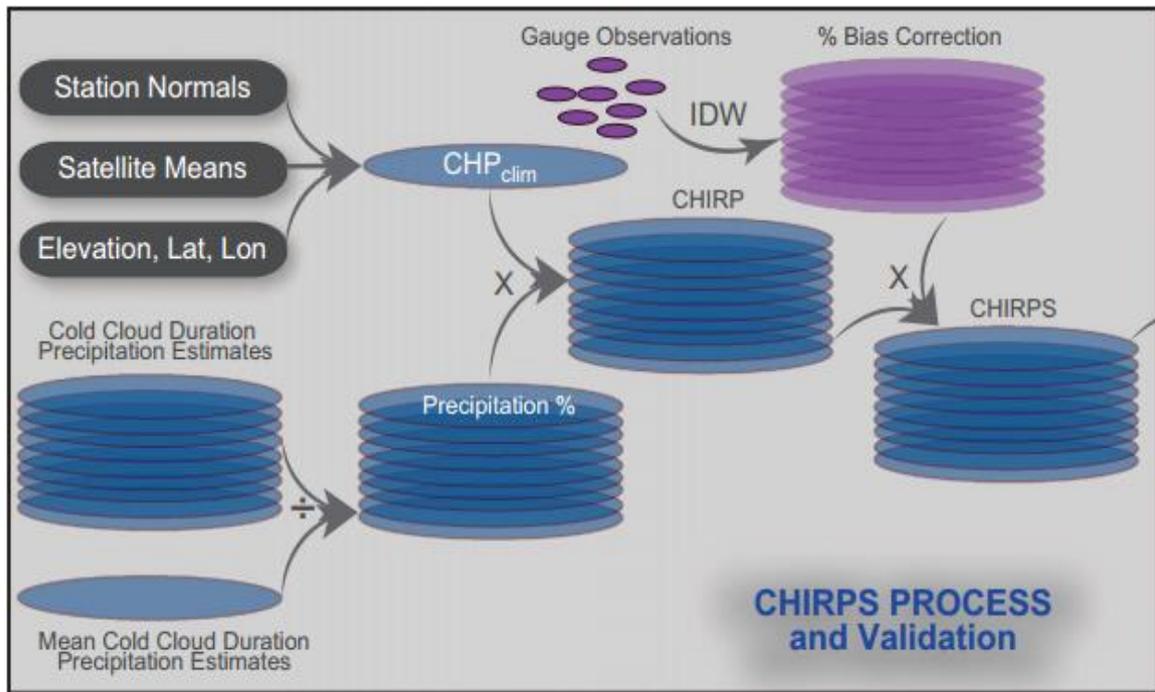


Figura 6. Esquema del proceso de construcción del producto CHIRPS

Fuente: Funk et al. (2015).

Las principales fuentes de datos utilizados en la creación del CHIRPS son: (1) la climatología de precipitación mensual, CHP_{clim} (Climatología de Precipitación del Riesgo Climático); (2) observación cuasi-global de satélites geoestacionarios del infrarrojo térmico (IR) desde dos fuentes del NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), el Centro de Predicción del Clima (CPC) IR (resolución temporal de 0.5 h, espacial de 4 km, desde 2 000-actualidad) y el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC) B1 IR (resolución temporal de 3 h, espacial de 8 km, desde 1981-2008); (3) la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) 3B42 producto de la NASA (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio); (4) modelo atmosférico de precipitación a partir del Sistema de Pronóstico del Clima del NOAA, versión 2 (CFSv2); y (5) precipitación observada in situ obtenida desde una variedad de fuentes incluyendo servicios meteorológicos regional y nacional. Todas las fuentes de datos son compilado como precipitación acumulada de 5 días (Funk et al., 2014).

Los datos de la evapotranspiración potencial se descargaron de portal de la Unidad de Investigación del Clima (CRU, por sus siglas en inglés, <http://www.cru.uea.ac.uk>). El CRU se estableció en la Facultad de Ciencias del Medio Ambiente (ENV) en la universidad

East Anglia (UEA) en Norwich (Inglaterra) en 1972; su trabajo, monitoreo de la temperatura global, comenzó a tener mayor impacto internacional a partir de 1978. Además, el CRU ha elaborado una amplia base de datos observados con alta resolución espacial ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) a escala mensual de datos como: temperatura máxima y mínima, precipitación, presión de vapor, nubosidad, velocidad del viento.

La información de cobertura vegetal se adquirió de la biblioteca virtual de datos climáticos del IRI (Instituto de Investigación Internacional, <http://iridl.ldeo.columbia.edu>), la última actualización de la información del portal fue 16 de febrero de 2015. El centro de Observación de la Tierra Recursos y Ciencia (EROS) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con la necesidad de mejorar los datos globales de cobertura vegetal, desarrolló el programa Caracterización Mundial de la Cubierto Terrestre (GLCC), consistiendo en una base de datos globales que se basan principalmente en la clasificación no supervisada de ~ 1 km del AVHRR (Radiómetro Avanzado de muy alta Resolución) y un compuesto de 10 días del NDVI (Índice de Vegetación Normalizado). Las fechas de las imágenes AVHRR fuente a partir de abril de 1992 y marzo de 1993 (Loveland et al., 2000).

Los caudales mensuales se obtuvieron del observatorio ORE – HYBAM (Hidrogeodinámica de la Cuenca Amazónica), la estación de mayor registro de caudales dentro de la cuenca andina amazónica es Tamshiyacu con 26 años (1985-2010). El Observatorio de Investigación del Medio Ambiente se encarga de monitorear la hidrología, geodinámica y biogeoquímica de la erosión/alteración y de las transferencias de la materia en las cuencas del Amazonas, Orinoco y Congo, iniciando operaciones en 2003. Su objetivo es brindar apoyo y proporcionar a la comunidad de investigación con los datos científicos de alta calidad necesarios para entender y modelar el comportamiento de los sistemas y su dinámica a largo plazo.

3.3.3 Análisis exploratorio de datos

Se realizó un análisis general de los datos de caudales mensuales obtenidos del observatorio ORE – HYBAM, mediante gráfico de cajas al 95% de confianza. Este gráfico suministró información sobre mínimos y máximos para cada estación de descarga, los cuartiles 1 y 3, la mediana y la simetría de la distribución.

3.3.4 Transformación de caudal a escorrentía

De la información mensual de caudales se estimó el promedio anual de cada estación de descarga, para calibrar y evaluar los modelos de Budyko, Fu y el GR1A. Se convirtió los caudales (m^3/s) a láminas de escorrentía (mm), por medio de una transformación de unidades y tomando en cuenta el área (km^2) de cada cuenca.

3.3.5 Tratamiento espacial de la información

La información tanto de evapotranspiración potencial y cobertura vegetal, fue llevada a una misma escala espacial ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) a través de interpolación, con el método del vecino más cercano.

La cobertura vegetal se reclasificó en dos categorías, la primera en bosques (BQ) y la segunda como no bosques (BNQ).

3.3.6 Análisis de la información de precipitación y evapotranspiración

La precipitación estimada del producto CHIRPS fue analizada con la precipitación in situ de 48 estaciones pluviométricas (Cuadro 2), específicamente en las cuencas del río Huallaga (CHA) y el río Ucayali (REQ). Se realizó la correlación (Pearson) entre la información observada de la estación y la información de la grilla del CHIRPS correspondiente a la estación para la serie temporal 1985 – 2010. Además, se realizó la prueba Bias (%) para conocer la subestimación o sobrestimación del producto CHIRPS. En relación a la evapotranspiración potencial se realizó un análisis inferencial de la información del CRU revisando los valores promedios de ETP en trabajos de artículos científicos.

3.3.7 Cálculo de la escorrentía media anual

Los modelos de Budyko, Fu y el GR1A fueron aplicados para estimar la escorrentía media anual en cada celda de la información grillada, tanto de precipitación y evapotranspiración potencial. La escorrentía media anual para cada cuenca se calculó como el promedio de la escorrentía de las celdas. Cuatro tipos de modelos se llevaron a cabo:

- Modelo Budyko, se aplicó la ecuación de Budyko (2) en la zona de estudio.
- Modelo Fu 1-parámetro, la ecuación de Fu (3) se empleó en la zona de estudio, se consideró el valor del parámetro α como uno solo para cada cuenca.

- Modelo Fu 2-parámetros, se utilizó la misma ecuación de Fu, distinguiéndose la cobertura vegetal entre bosque y no bosque, con un valor de α que representó las grillas de bosques y otro valor de α para todas las grillas de la clase no bosques.
- Modelo GR1A, se empleó la ecuación de éste modelo (4) en toda la zona de estudio.

3.3.8 Pruebas de bondad de ajuste

La sobrestimación o subestimación del producto CHIRPS con relación a las estaciones in situ se calculó utilizando la prueba Bias (%):

$$Bias (\%) = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (P_{est,j} - P_{obs,j})}{\sum_{j=1}^n P_{obs,j}} \right] \times 100 \quad (5)$$

Donde $P_{est,j}$ es la precipitación estimada del producto en un tiempo j ; $P_{obs,j}$ es la precipitación observada en un tiempo j . Valores positivos de Bias (%) significa sobrestimación y valores negativos indican subestimación del producto.

Los valores del parámetro α del modelo Fu tanto para uno y dos parámetros, fueron optimizados para poder reproducir la escorrentía media anual lo más cercano posible a los valores observados. Para la calibración del parámetro α se utilizó la prueba de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$Nash = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - Q_{s,j})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - \overline{Q_o})^2} \right] \times 100 \quad (6)$$

Donde $Q_{o,j}$ es la escorrentía observada en un tiempo j ; $\overline{Q_o}$ es la escorrentía promedio de los valores observados; $Q_{s,j}$ es la escorrentía simulada en un tiempo j y n es el número de datos disponibles. El valor de Nash mide el acuerdo entre los valores modelados y observados, con un valor Nash de 1.0 indica el perfecto acuerdo entre la escorrentía media anual modelada y observada en todas las cuencas (Zhang et al., 2012).

Los resultados fueron evaluados usando el criterio de la raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Q_{s,j} - Q_{o,j})^2}{n-1}} \quad (7)$$

El RMSE mide el acuerdo entre las escorrentías medias anuales estimadas y observadas, con un valor cercano a cero indica un mejor rendimiento del modelo (Zhang et al., 2012).

IV. RESULTADOS

4.1. Caracterización de la zona de estudio y de las estaciones utilizadas

La zona de estudio experimenta una alta variabilidad espacial de la precipitación, la Figura 7G presenta la precipitación promedio anual determinada con el producto CHIRPS para el periodo 1985-2010, la parte norte de la cuenca muestra mayor precipitación y de forma constante, así lo demuestra el régimen de precipitación anual de la Figura 7E para la cuenca delimitada hasta la estación SRG evidenciando una débil estacionalidad, mientras hacia la parte sur, para la cuenca delimitada hasta la estación de descarga PUC se muestra un claro régimen tropical con una fuerte estacionalidad (Figura 7C).

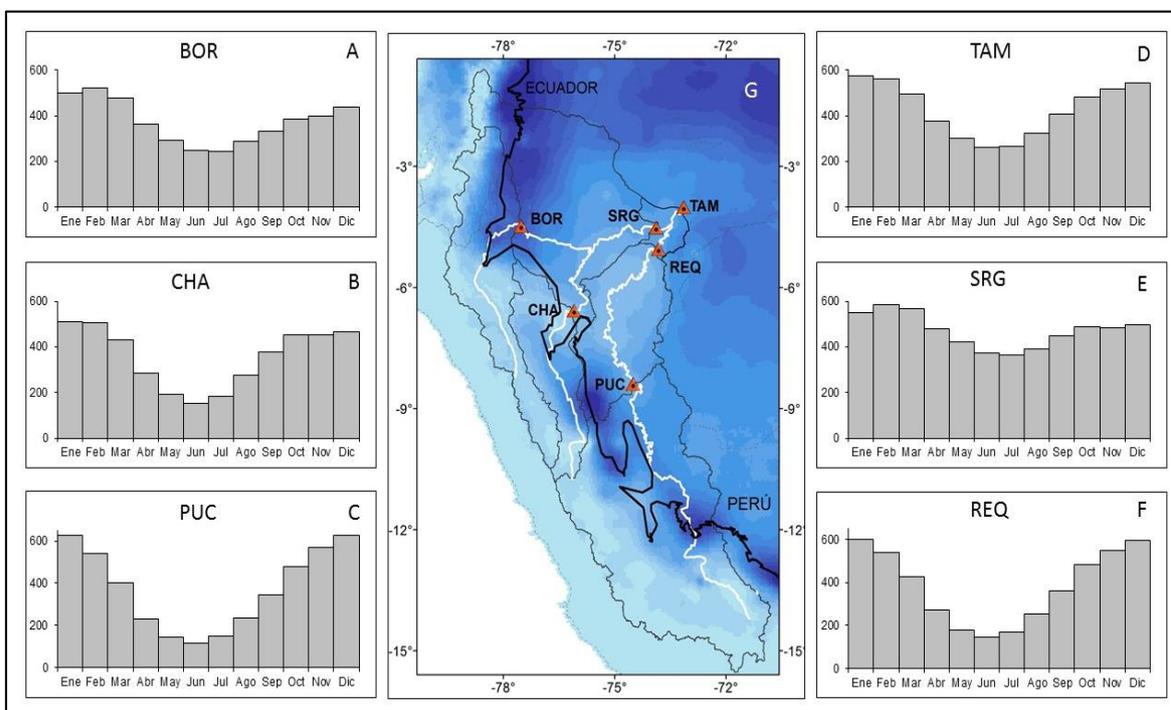


Figura 7. Régimen de precipitaciones en la cuenca andino-amazónica, para las seis cuencas delimitadas por las estaciones de descarga. La región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color negro.

En la cuenca del río Ucayali en donde se encuentran ubicadas las estaciones de descarga PUC y REQ sus regímenes de precipitación (Figura 7A y 7F) presenta un periodo

lluvioso entre los meses de noviembre a marzo (pico máximo de precipitación), la fuerte estacionalidad de ésta cuenca está asociada con la migración estacional de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), así lo manifiesta Espinoza et al. (2009) en su estudio de la variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica. Los regímenes de precipitación anual presentados en la Figura 5A-F fueron calculados con la precipitación mensual del producto CHIRPS ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) para el periodo 1985-2010.

La información obtenida del Observatorio HYBAM, se analizó a partir de datos mensuales de caudales con diferentes periodos de tiempo, detallado en el Cuadro 1. En la Figura 7A, se observa que todas las estaciones de descarga se encuentran en el Amazonas peruano, la estación TAM donde convergen los ríos Ucayali, Marañón y drenan las regiones andinas y tropicales ecuatorianas. Las estaciones TAM, SRG, REQ y BOR presentan un máximo de caudal en los meses de marzo a mayo y un mínimo de julio a octubre (Figura 7A y 7D-F). La estación PUC presenta un máximo en los meses de enero a marzo (Figura 8C), producido por los meses de máxima precipitación (noviembre a enero) existiendo un desfase de dos meses entre lluvias y caudales, debido al tiempo de concentración en la cuenca.

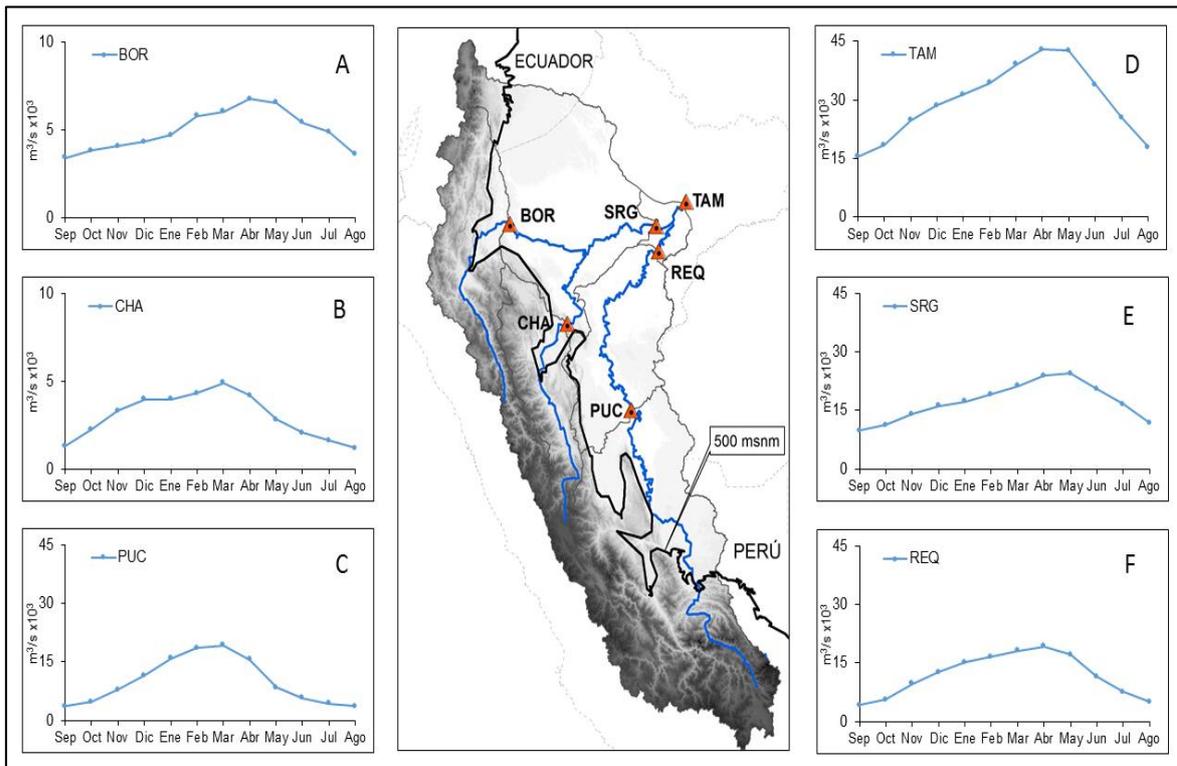


Figura 8. Régimen de caudales de las seis estaciones de descarga en la cuenca andino-amazónica.

4.2 Análisis exploratorio de datos

Se realizó un gráfico de cajas, para detectar los datos atípicos (outliers) de manera cualitativa. En la Figura 9, se muestra la distribución de los datos para cada estación, donde la mayoría de los datos analizados están dentro del intervalo de confianza del 95%. Las estaciones BOR y CHA presentan caudales menores a los 10 000 m³/s, que se encuentran en la parte oeste de la cuenca que recogen las aguas de los ríos Marañón y Huallaga, respectivamente.

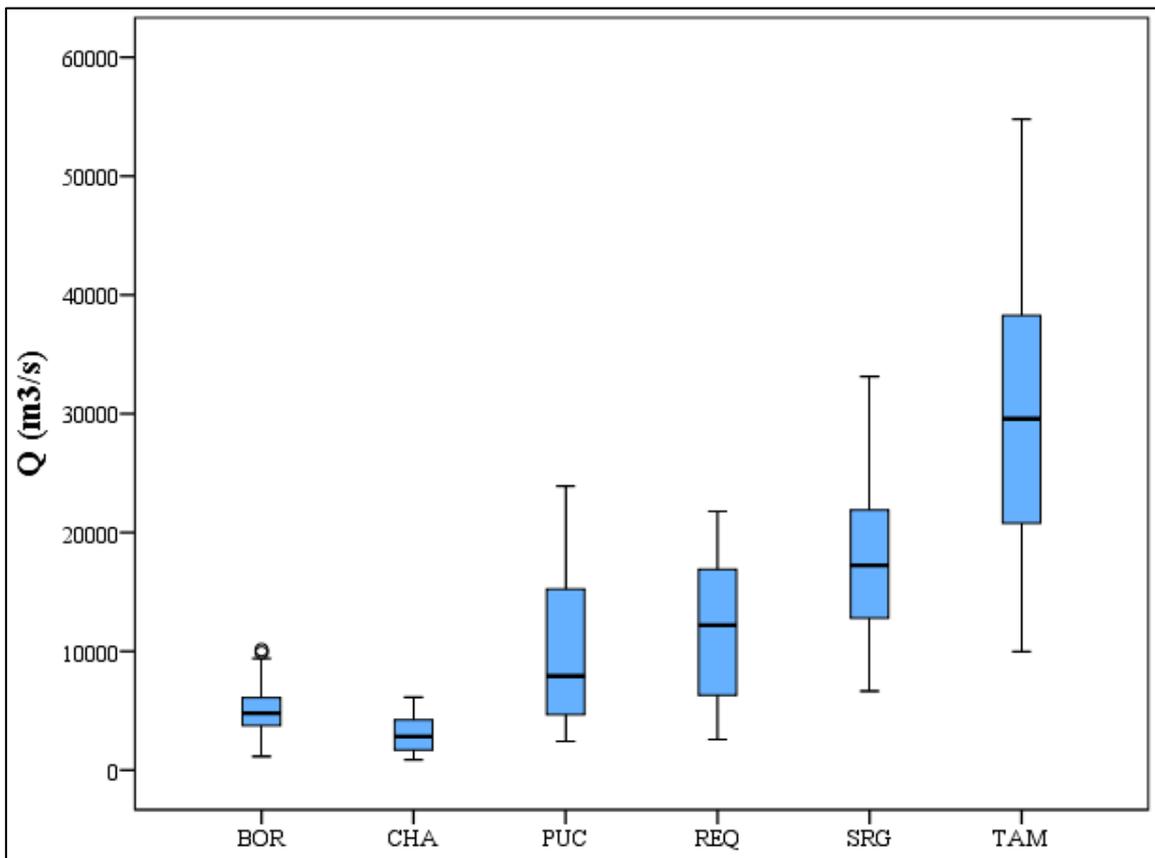


Figura 9. Gráfico de cajas para detección de valores atípicos en las seis estaciones de descarga

4.3. Transformación de caudal a escorrentía

A partir de la información obtenida del Observatorio HYBAM, se estimó el caudal promedio anual (Anexo 1) y posteriormente se transformó a escorrentía (Anexo 2), por medio de una transformación de unidades y tomando en cuenta el área de cada cuenca detallada en el Cuadro 1, pasando la información inicial de m³/s (Figura 10A) a mm/año (Figura 10B), unidades necesarias para la calibración de los modelos.

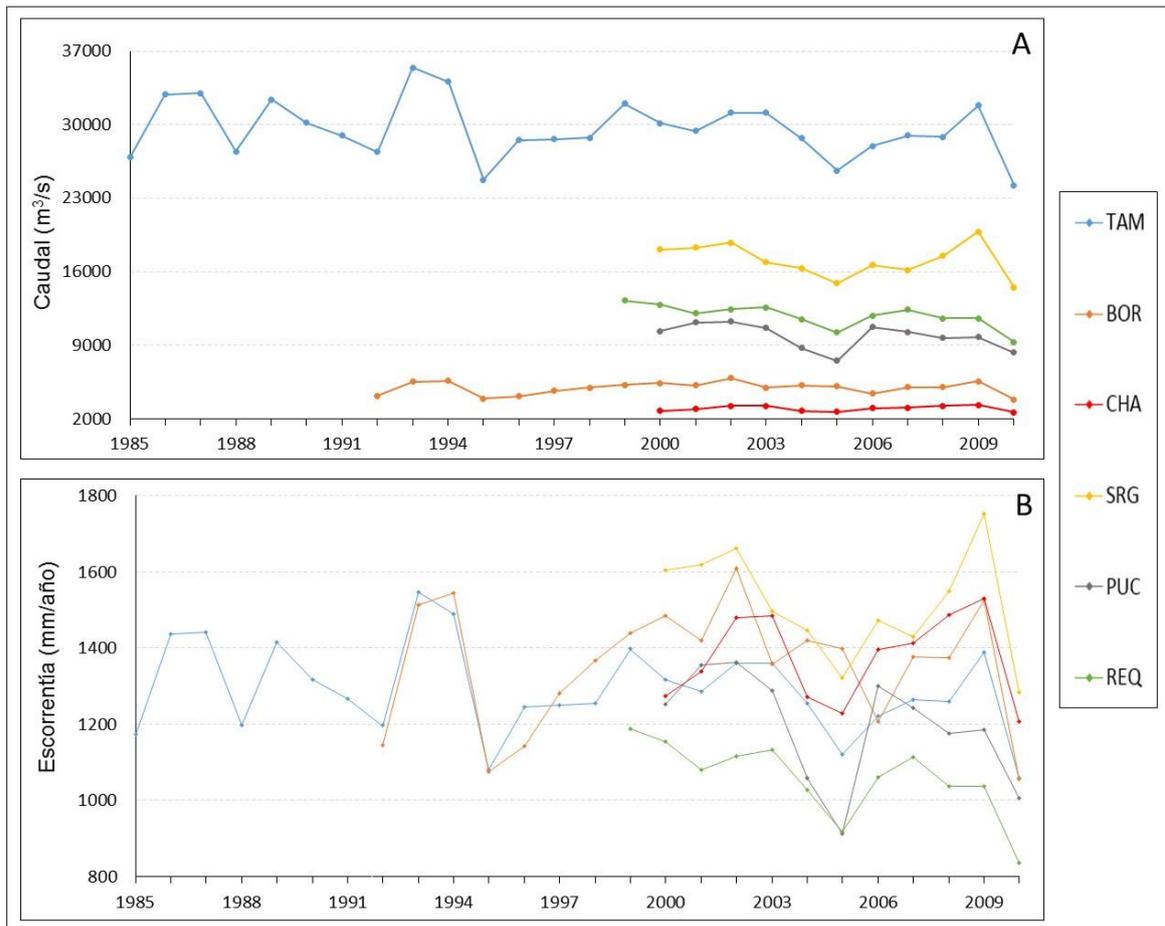


Figura 10. Información observada en las seis estaciones de descarga de la cuenca andina amazónica. A. Caudal promedio anual, en el eje de las ordenadas las unidades están expresadas en m³/s; B. Escurrentía promedio anual esta expresada en mm/año.

La Figura 10A muestra los caudales promedios anuales donde se resalta la diferencia entre los registros de cada estación, TAM (1985-2010) registra su caudal más alto en 1993 (35 483.8 m³/s) y sus tres años más secos en 2010 (24 209.1 m³/s), 1995 (24 736 m³/s) y 2005 (25 634. 2 m³/s); los máximos caudales se registran para SRG en 2009 (19 793.6 m³/s), REQ en 1999 (13 249.9 m³/s), PUC en 2002 (11 248.6 m³/s), BOR en 2002 (5 871.7 m³/s) y CHA en 2009 (3 329.3 m³/s). Todas las estaciones registran su caudal más bajo en 2010 a excepción de PUC en 2005 (7 541.3 m³/s), los valores anuales de caudales se detallan en Anexo 1.

La Figura 10B muestran como la diferencia entre cuencas se ha reducido, SRG presenta el escurrimiento medio anual (QMA) de ~1512 mm siendo el más alto de las seis cuencas, CHA y BOR con un área de 68 625 km² y 114 983 km², respectivamente;

y caudales promedios anuales $< 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$, muestran un QMA alto en relación al área de escurrimiento, $\sim 1354\text{ mm}$ y $\sim 1373\text{ mm}$, respectivamente; REQ y PUC (región sur de CAA) registran el QMA más bajo, $\sim 1065\text{ mm}$ y $\sim 1194\text{ mm}$, respectivamente. Todas las estaciones experimentan la sequía del 2005 a excepción de BOR que la presenta en 2006 (1 207.9 mm). Después de la sequía del 2005 TAM, SRG, CHA y BOR (2006) prácticamente los valores de escurrimiento asciende llegando su pico máximo en el 2009 y luego vuelven a descender hasta alcanzar su punto más crítico del 2010. La cuencas de la región sur también presenta la sequía del 2005 pero sus valores de escurrimiento ascienden a su flujo máximo en 2006 para PUC y 2007 en REQ y después descienden hasta la sequía de 2010, los valores anuales de escurrimiento se detallan en Anexo 2.

4.4. Tratamiento espacial de la información

Los datos estimados de precipitación del producto CHIRPS de resolución espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ no necesitaron un resamplio espacial. La Figura 11 muestra la variación anual en la zona de estudio. La máxima P anual se registra para TAM en 1999 (2 208.07 mm), SRG en 2008 (2 017.92 mm), REQ en 1999 (1 952.79 mm), BOR en 1999 (1 738.52 mm), PUC en 2006 (1 645.65 mm) y CHA en 2008 (1 404.64 mm). Por otro lado, la mínima P anual se registra para BOR en 2004 (959.36 mm), CHA en 2005 (1 067.27 mm), PUC en 2005 (1 276.37 mm), REQ en 2005 (1 428.84 mm), TAM en 1992 (1 542.57 mm) y SRG en 2001 (1 720.28 mm), los valores anuales de P se detallan en Anexo 3.

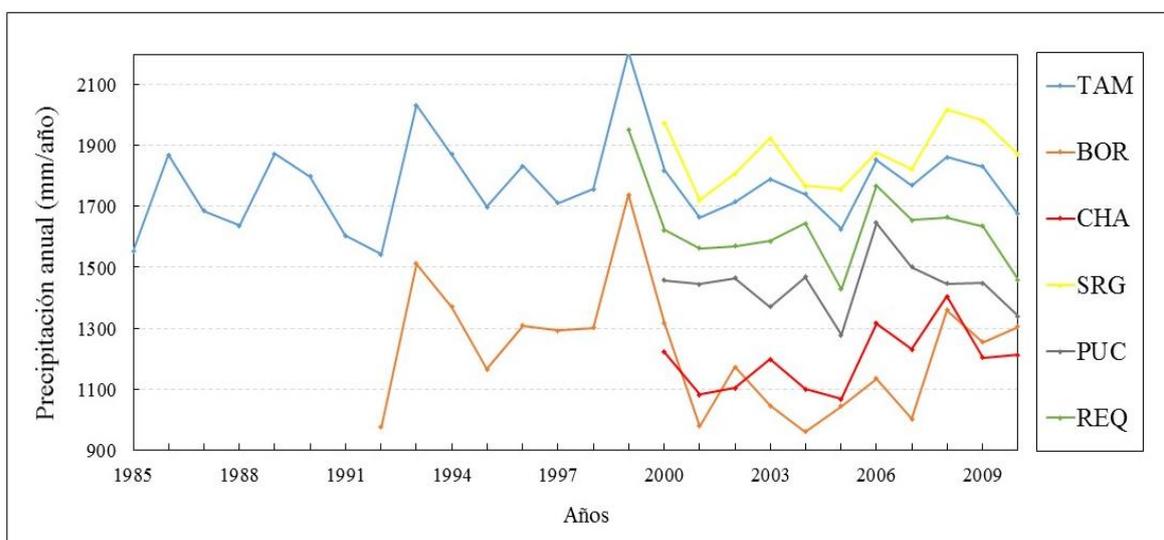


Figura 11. Precipitación anual (mm/año) del producto CHIRPS, para las seis cuencas de la zona de estudio de la cuenca andino amazónica.

La Figura 12 muestra la distribución espacial de la precipitación media anual (PMA), SRG con $\sim 1\ 886$ mm presenta el valor más alto de PMA, de forma descendente de PMA se registra para TAM $\sim 1\ 770$ mm, REQ $\sim 1\ 629$ mm, PUC $\sim 1\ 442$ mm, BOR $\sim 1\ 222$ mm y CHA $\sim 1\ 194$ mm.

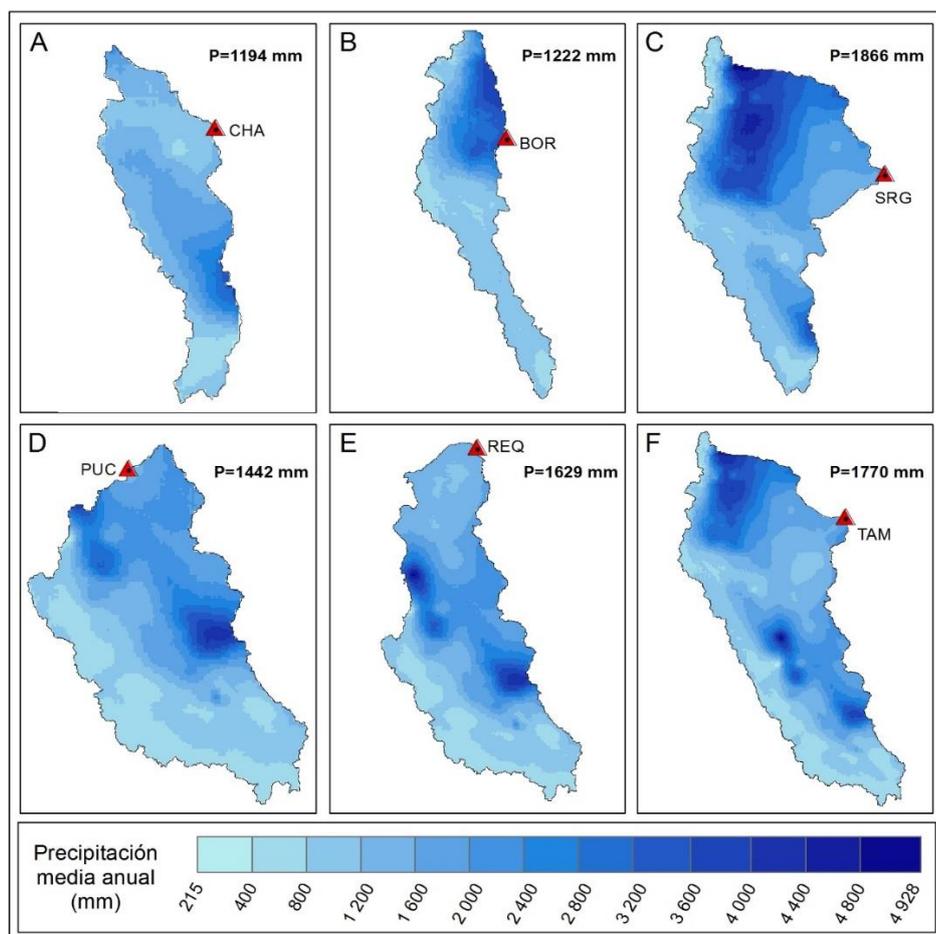


Figura 12. Distribución espacial de la precipitación media anual del producto CHIRPS ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$). A. CHA (2000-2010); B. BOR (1992-2010); C. SRG (2000-2010); D. PUC (2000-2010); E. REQ (1999-2010); F. TAM (1985-2010).

La información de la evapotranspiración potencial obtenida de la Unidad de Investigación del Clima (CRU), que al descargarla su resolución espacial era de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Figura 17A), se transformó con el método de interpolación del vecino más cercano su resolución a $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (Figura 17B).

Específicamente los valores más altos de ETP se presentan en BOR y CHA (Figura 13). La Figura 14 muestra la máxima ETP anual se registra para BOR en 1997 (1 749.58 mm), CHA en 2008 (1 578 mm), SRG en 2009 (1 558.21 mm), PUC en 2001 (1 167.09 mm),

REQ en 1999 (1 224.11 mm) y TAM en 1987 (1 398.94 mm). Por otro lado, la mínima ETP anual se registra para BOR en 2005 (1 605.4 mm), CHA en 2010 (1 486.84 mm), SRG en 2005 (1 476.84 mm), PUC en 2004 (1 111.81 mm), REQ en 2004 (1 151.07 mm) y TAM en 2005 (1 320.32 mm), los valores anuales de ETP se detallan en Anexo 4.

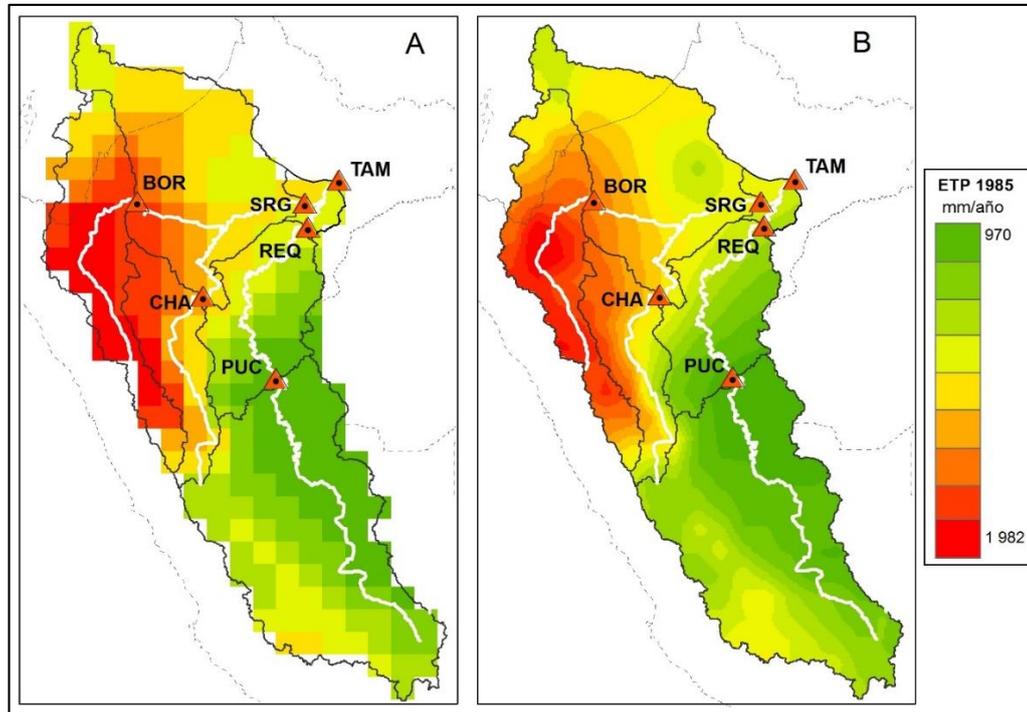


Figura 13. Evapotranspiración potencial (mm) de la cuenca andina-amazónica obtenida de la Unidad de Investigación del Clima (CRU). A. Resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de ETP. B. Resolución espacial de ETP transformada a $0.05^\circ \times 0.05^\circ$.

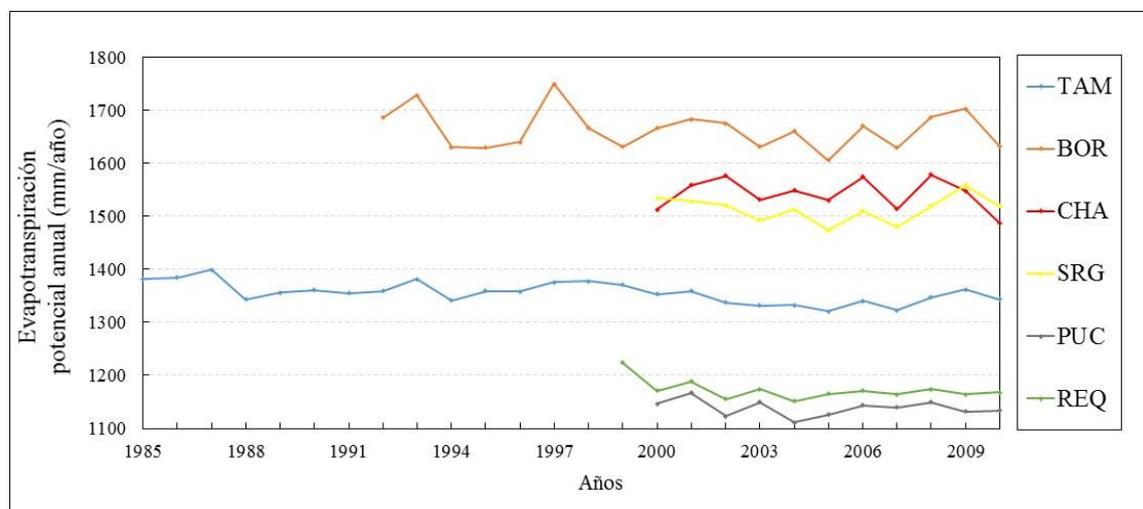


Figura 14. Evapotranspiración potencial anual promedio (mm/año) obtenida de la Unidad de Investigación del Clima (CRU, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$), para las seis cuencas de la CAA.

La mayor evapotranspiración potencial media anual (ETPMA) se concentra en BOR, CHA y SRG, 1 663.02 mm, 1 541.6 mm y 1 513.32 mm, respectivamente; la menor ETMA se registra en PUC (1 138.53 mm) y REQ (1 172.62 mm) y TAM que engloba las cuencas en estudio y presenta la mayor serie temporal (1985-2010) registra una ETPMA de 1 355.74 mm (Figura 15).

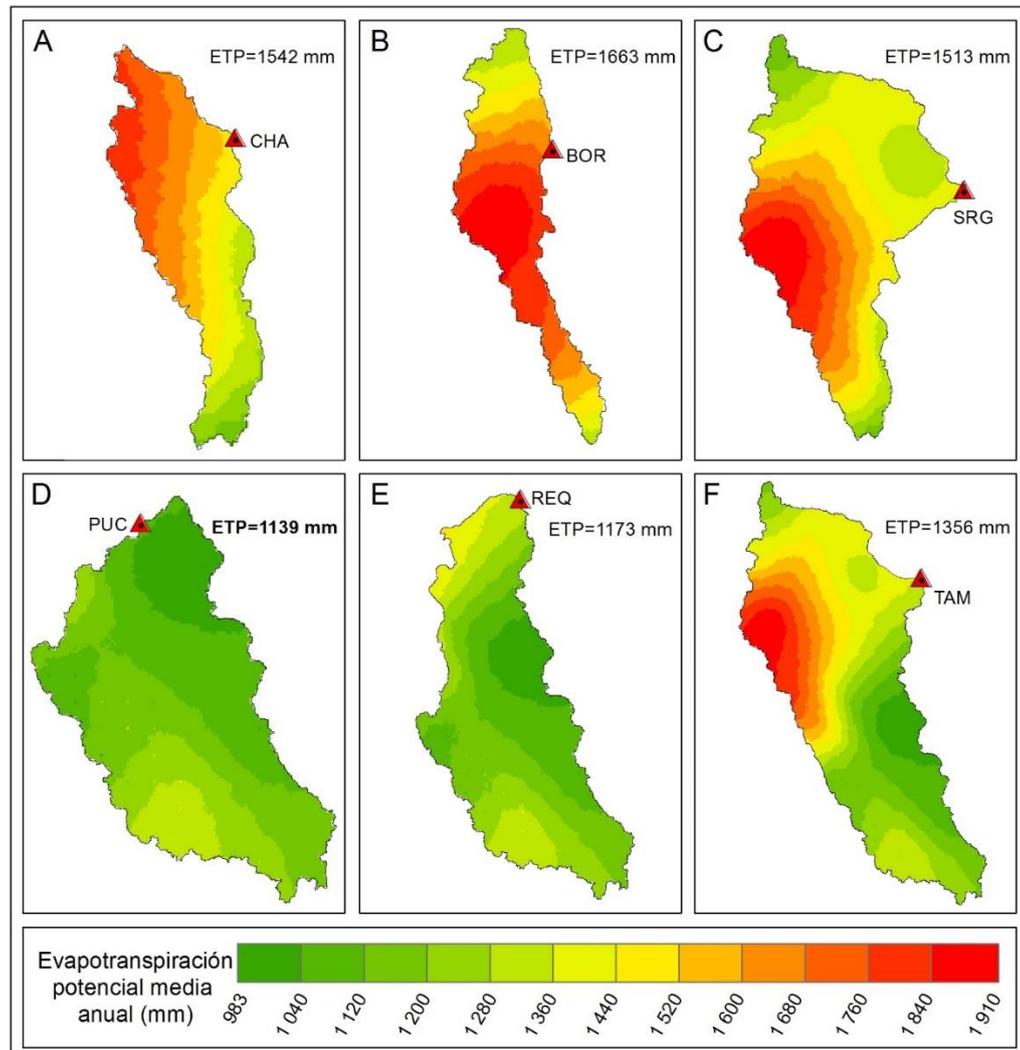


Figura 15. Distribución espacial de la evapotranspiración potencial media anual del CRU ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$). A. CHA (2000-2010); B. BOR (1992-2010); C. SRG (2000-2010); D. PUC (2000-2010); E. REQ (1999-2010); F. TAM (1985-2010).

La información de la cobertura vegetal obtenida de la biblioteca virtual IRI con una resolución espacial de $\sim 1 \times 1 \text{ km}$ ($0.0083^\circ \times 0.0083^\circ$), se le realizó dos procesos de tratamiento antes de ser utilizada en el modelo de FU de 2 parámetros (Fu 2-p). Primero, se reclasificó la información original (Figura 16) en dos categorías: bosques y no bosques

(Figura 17A). Segundo, con el método de interpolación del vecino más cercano se homogenizó la resolución espacial de la data reclasificada a $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (Figura 17B).

La cobertura vegetal de bosques (BQ) de la CAA, representa el $\sim 57\%$ del total de la superficie, del global de BQ el $\sim 79\%$ se encuentra por debajo de los 500 msnm. Por otro lado, la cobertura vegetal de no bosques (NBQ) representa el $\sim 77\%$ de la superficie región andina, en la llanura amazónica de la cuenca se distribuye el $\sim 6\%$ del global NBQ, correspondiendo específicamente a la cobertura de sabana; según la información de USGS.

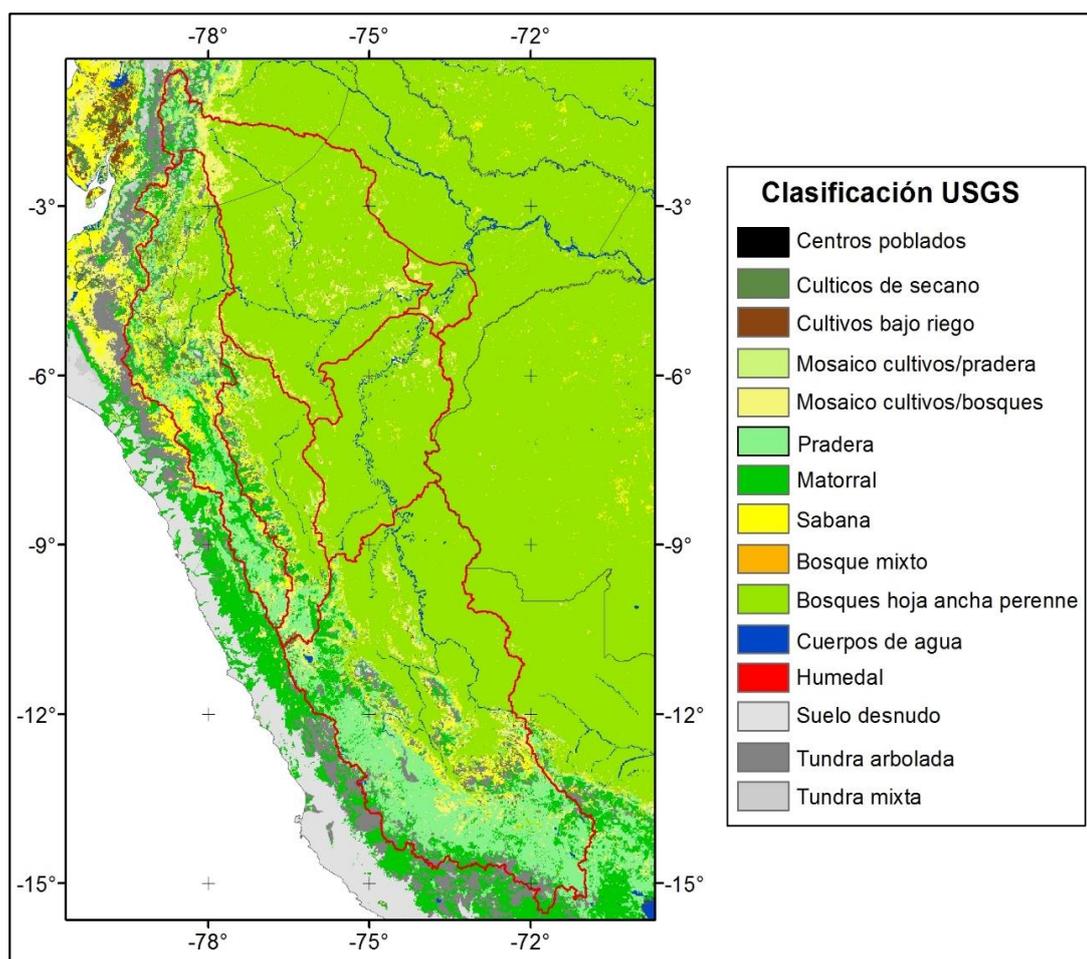


Figura 16. Cobertura vegetal obtenida del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con resolución espacial de $\sim 1 \times 1$ km. Línea de color rojo delimita la zona de estudio.

La cobertura de BQ predomina en las cuencas de CHA (53.44%), SRG (57.58), REQ (54.58%) y TAM (56.63%), mientras la cobertura NBQ es superior en PUC (57.31%) y en BOR es tres veces superior (77.36%) a BQ (21.76%), los cuerpos de agua (CA) ocupan entre un $\sim 0.6\%$ y $\sim 1.7\%$ en la superficie la CAA (Cuadro 2 y Figura 17B)

Cuadro 3. Área de cada cuenca, porcentaje de las coberturas en el área de estudio, área para las coberturas BQ y NBQ.

Estación	Área (km ²)	Coberturas (%)			Área (km ²)	
		BQ	NBQ	CA	BQ	NBQ
BOR	114 983	21.76	77.36	0.88	25 019.02	88 959.34
CHA	68 625	53.44	45.93	0.63	36 675.89	31 515.18
SRG	356 198	57.58	41.28	1.14	205 098.81	147 038.53
PUC	260 541	41.26	57.31	1.43	107 499.22	149 316.05
REQ	315 544	54.58	43.72	1.70	172 223.92	137 955.84
TAM	726 400	56.63	41.89	1.48	411 360.32	304 288.96

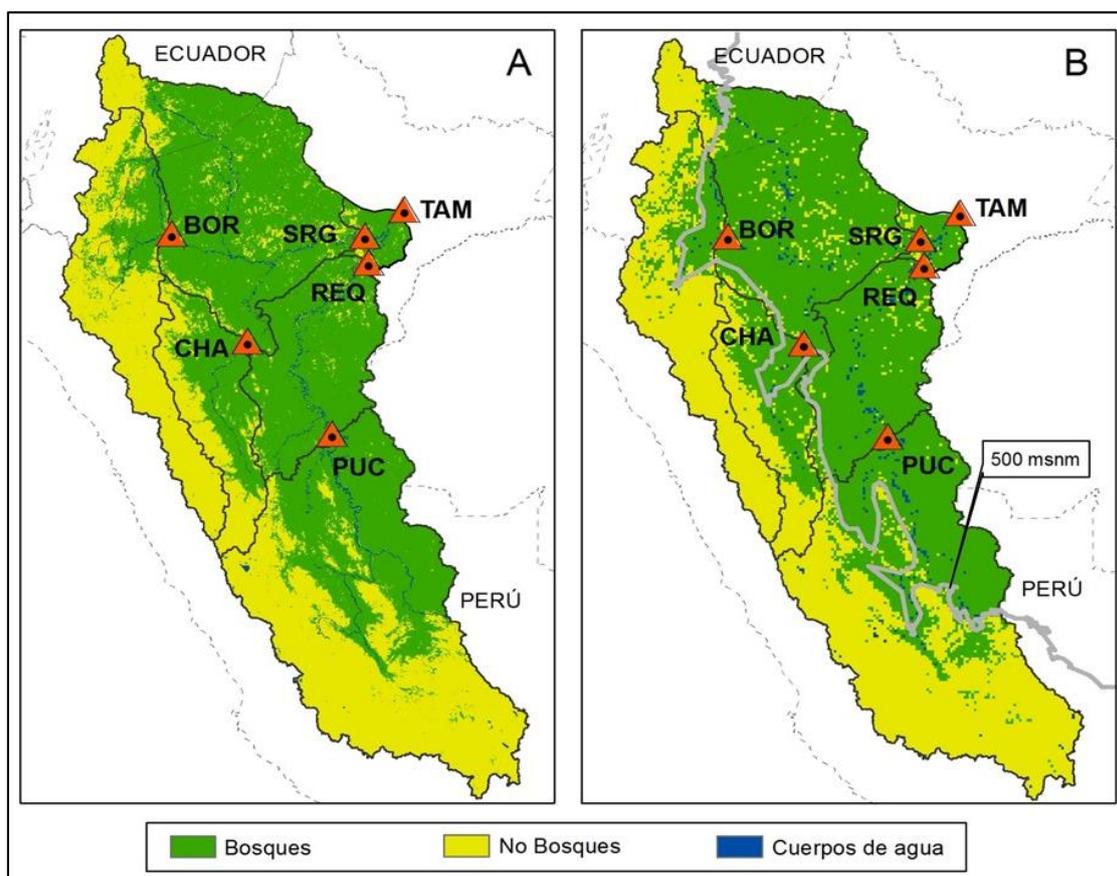


Figura 17. Reclasificación de la cobertura vegetal obtenida por la USGS. A. Coberturas reclasificadas en bosques (BQ), no bosques (NBQ) y cuerpos de agua, resolución espacial de ~1 x 1 km. B. Reclasificación homogenizada a 0.05° x 0.05°, la región andina sobre los 500 msnm está delimitada por la línea de color gris.

4.5. Análisis de la información de precipitación y evapotranspiración

La Figura 18 muestra la precipitación media anual (PMA) de las 48 estaciones pluviométricas (Cuadro 2) para el periodo 1985 - 2010, específicamente 13 estaciones en CHA y 35 en REQ. En la región andina de REQ las estaciones registran una precipitación menor de 1000 mm/año a más de 2600 msnm, las precipitaciones superiores a los 1600 mm/año se registran a menos de 600 msnm y en AG ubicada a una altitud de 338 msnm se registra el valor más alto de lluvia (~4236 mm/año). En CHA se registra precipitación menor de 1000 mm/año a más de 1900 msnm (YH, SR, HN, CP), por debajo de esta altitud se registra lluvias superiores a los 1000 mm/año (9 estaciones) y la máxima precipitación se registra en TM (686 msnm) con ~3311 mm/año.

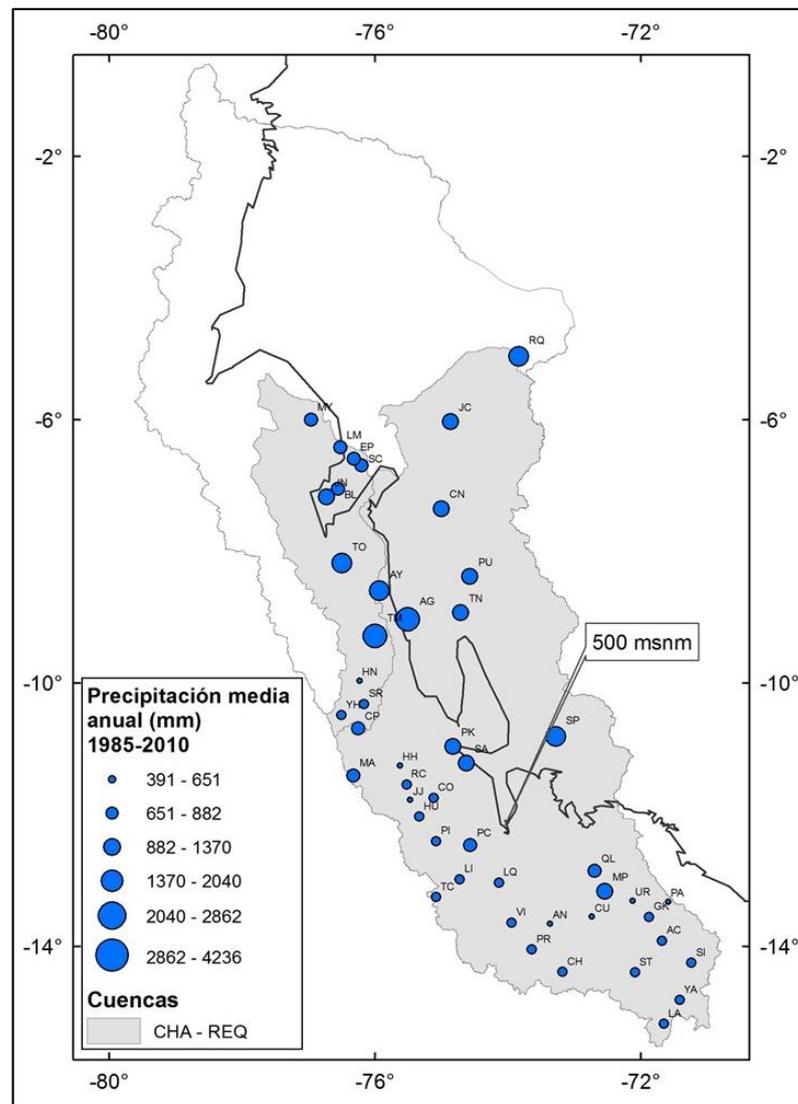


Figura 18. Precipitación media anual (1985 – 2010) de las estaciones pluviométricas en las cuencas de CHA (13) y REQ (35), la región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color negro.

Con la precipitación in situ a escala anual y la información del producto CHIRPS de la grilla más cercana a cada estación, se estimó el coeficiente de correlación de Pearson al nivel de confianza del 95% (Figura 19). En CHA siete estaciones presentaron un coeficiente de correlación (r) de entre 0.39 (LM) y 0.64 (BL), mientras seis estaciones mostraron una correlación no significativa. REQ en la región andina presenta 26 estaciones con un r de entre 0.43 (AC) y 0.89 (LI) y dos estaciones mostraron un r no significativo, mientras en la región selva tres estaciones de las siete presentaron un r de entre 0.40 (RQ) y 0.77 (AG, CN).

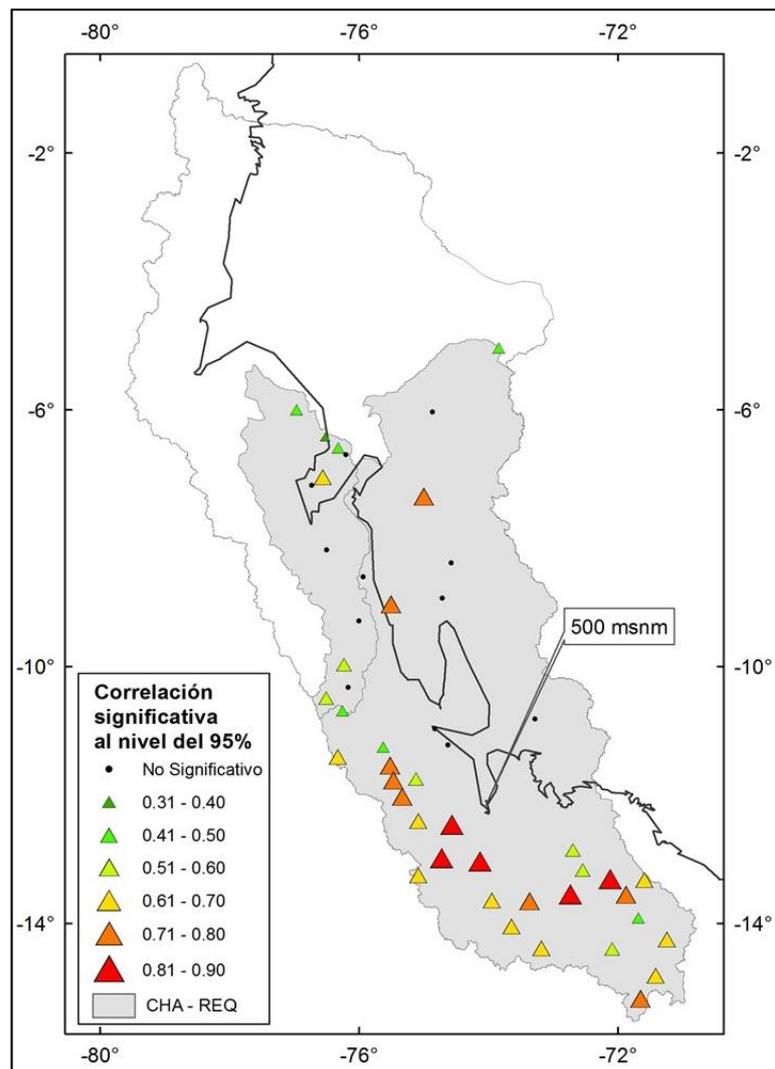


Figura 19. Correlación de Pearson al nivel de confianza del 95% entre la estación pluviométrica y la grilla más cercana del producto CHIRPS a escala anual para el periodo 1985 – 2010. La región andina sobre los 500 msnm está delimitada por línea en color negro.

La Figura 20 representa los resultados de la prueba del Bias en porcentaje de la precipitación del producto CHIRPS comparado con la precipitación in situ de las estaciones

pluviométricas, que van desde -92.33% a 43.75% para el periodo 1985 – 2010. La subestimación de la precipitación con valores menores a \sim -8.1% se registra tanto en la región andina (17 estaciones) como en la selva (4 estaciones) de las cuencas CHA y REQ y la sobrestimación con valores mayores a \sim 8.1% se presentan en la región andina en 8 estaciones (una en región selva).

En CHA ocho estaciones subestiman la precipitación con valores menores que van desde -8.7% (YH) a -31.02% (LM), mientras en dos estaciones se sobrestima con valores de 12.36% (AY) y 43.75%. En la región andina de REQ se subestima la precipitación en 11 estaciones que van desde -10.5% (GK) a -92.33% (MP), mientras en la región selva por debajo de los 500 msnm se subestima en cuatro estaciones que van desde -15.24% (PU) a -83.04% (JC); la precipitación se subestimó en seis estaciones en la región andina que van desde 16.44% (VI) a 30.20% (PA) y una estación en la región selva (TN).

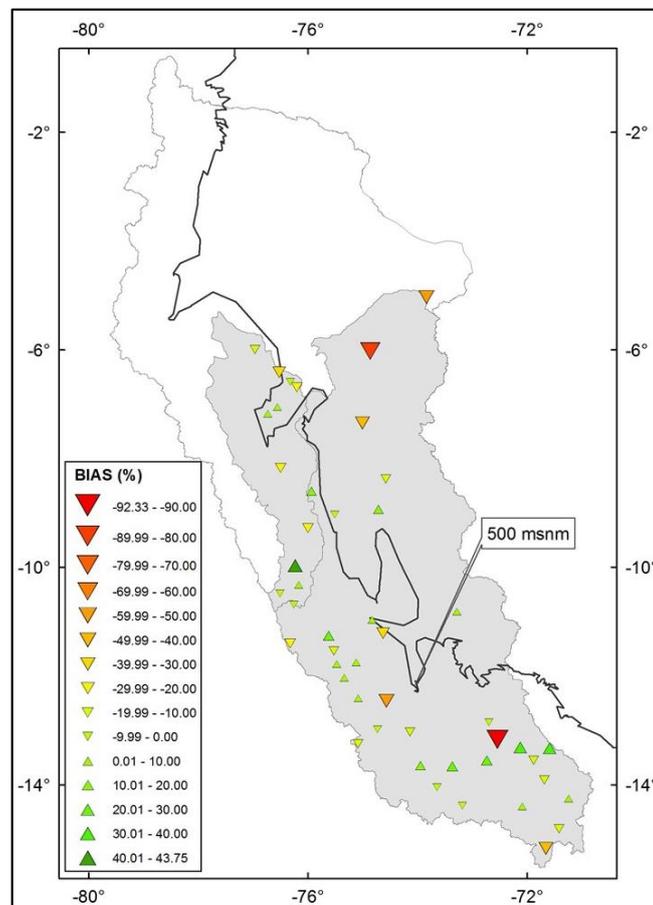


Figura 20. Resultados de prueba Bias (%) de la precipitación estimada del producto CHIRPS comparado con la precipitación in situ de las estaciones pluviométricas a escala anual para el periodo 1985 – 2010

En CHA aproximadamente el 61% de la precipitación del producto CHIRPS es subestimada frente la precipitación in situ y además tienen un bajo coeficiente de correlación (<0.52) y en algunos casos sin significancia estadística, mientras un ~15% sobrestima la precipitación y un ~24% presenta valores aceptables (-8% a 8%). En REQ aproximadamente el 43% de precipitación del producto CHIRPS se subestima frente la precipitación registrada en las estaciones pluviométricas y su coeficiente de correlación está entre 0.40 a 0.88, mientras un ~20% sobrestima la precipitación y un ~37% presenta valores aceptables.

Lavado et al. (2011) encontró que la ETP media en la cuenca del río Ucayali (REQ) es de 3.38 mm/día, este valor fue calculado utilizando la ecuación de Penman-Monteith, mientras la ETP media estimada del CRU para ésta cuenca es de ~3.21 mm/día. Marengo (2006) en su revisión histórica y estado del arte actual del ciclo hidrológico de la cuenca del Amazonas, menciona que la ETP de la CA es de 4.6 mm/día obtenido por Zeng (1999) derivado de datos de reanálisis (NASA/DAO), ETP de 3.1 mm/día se derivó utilizando modelos climáticos (Molion, 1975), 4.3 mm/día derivado desde reanálisis NCEP (Marengo, 2005). Por otro lado, en la CAA la ETP estimada a partir del CRU es aproximadamente 3.7 mm/día (TAM), los valores más altos de ETP se registran en la zona norte del área de estudio CHA (4.2 mm/día), BOR (4.6 mm/día) y SRG (4.1 mm/día), estos valores son cercanos a los presentados en la literatura pero muy altos en relación al área que se registran ($<730\ 000\ \text{km}^2$), perteneciendo los valores de la revisión bibliográfica a la CA (~6 000 000 km^2).

4.6. Cálculo de la escorrentía media anual

4.6.1. Modelo Budyko

La escorrentía media anual de la CAA se estimó con el modelo Budyko aplicando la ecuación (2) a través de ~24 000 grillas de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Siendo la ecuación semi-empírica de Budyko un modelo no paramétrico se determinó la escorrentía en tres procesos. El primero, fue calcular la escorrentía anual para toda la CAA para el periodo 1985-2010. El segundo, fue extraer la información resultante (formato ráster) del primer proceso con el área de las subcuencas, tomando en consideración las series de tiempo del Cuadro 1. En el último proceso se determinó la QMA como el promedio de la escorrentía anual de todas las grillas de cada cuenca.

La escorrentía anual obtenida a través del modelado de lluvia-escorrentía, empleando como datos de entrada la precipitación del producto CHIRPS y la ETP del CRU se obtuvo el coeficiente de determinación más alto ($R^2 = 0.69$) para las estaciones PUC y SRG , ve Figura 21C y 21D. Sin embargo, CHA presentó el coeficiente de determinación más bajo ($R^2 = 0.14$) de las seis estaciones en estudio de la CAA.

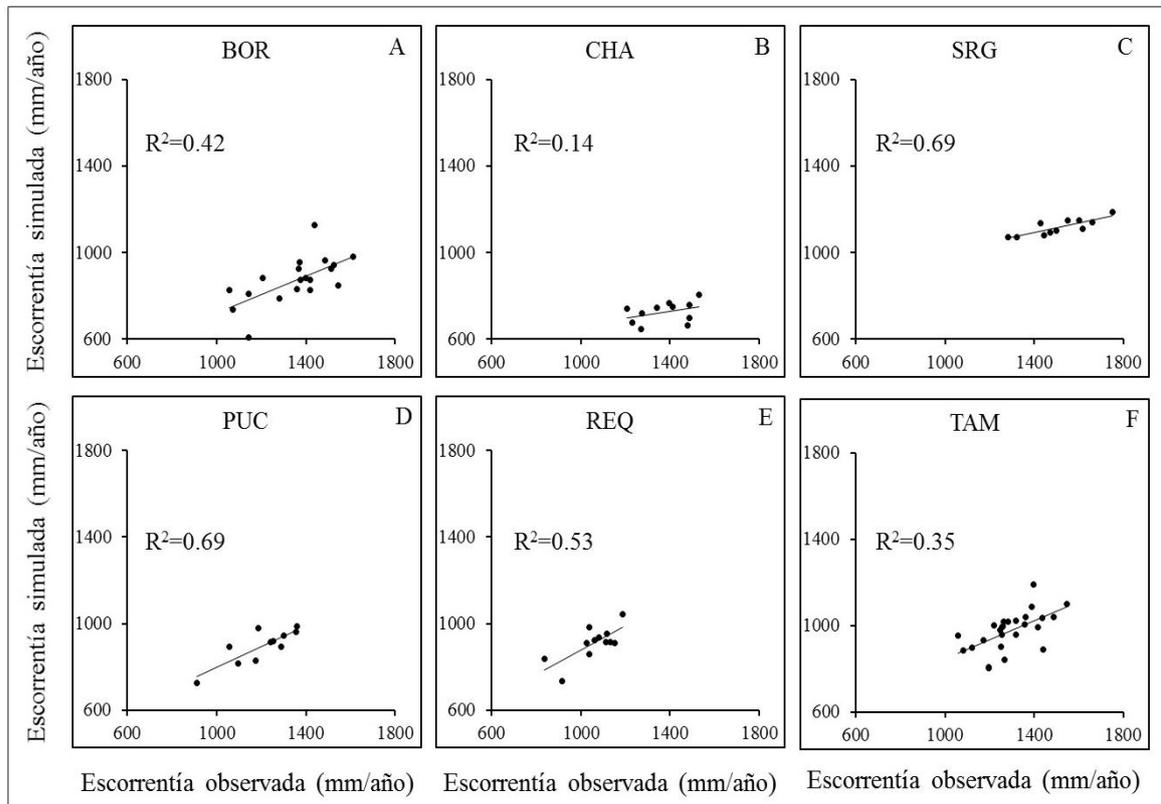


Figura 21. Escorrentía anual simulada con modelo Budyko (en eje y) frente escorrentía anual observada (eje x). A. BOR (1992-2010); B. CHA (2000-2012), C.SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).

Se debe resaltar que el modelo Budyko subestimó la escorrentía simulada con relación a los observados (Figura 22). Por lo tanto, con la finalidad de medir la eficiencia del modelo no paramétrico se le agregó a la ecuación (2) un coeficiente de ajuste (x). La estación CHA y BOR se las descartó para la estimación de la escorrentía media anual por presentar un R^2 muy bajo (Figura 21 A-B), quedando cuatro cuencas con un área $> 260\ 000\ \text{km}^2$.

Se realizó las pruebas de bondad de ajuste a la escorrentía media anual (Anexo 5) y se obtuvo un Nash del 76.23% y un error cuadrático medio (RMSE) de 92.75 mm (Figura

23), y a su vez de determinó en 1.338 el coeficiente de ajuste (x). La ventaja de trabajar el modelo con datos de entrada en formato ráster (grillas) es tener el resultado en el mismo formato, dando una idea de la distribución espacial de la QMA (Figura 24A-E)

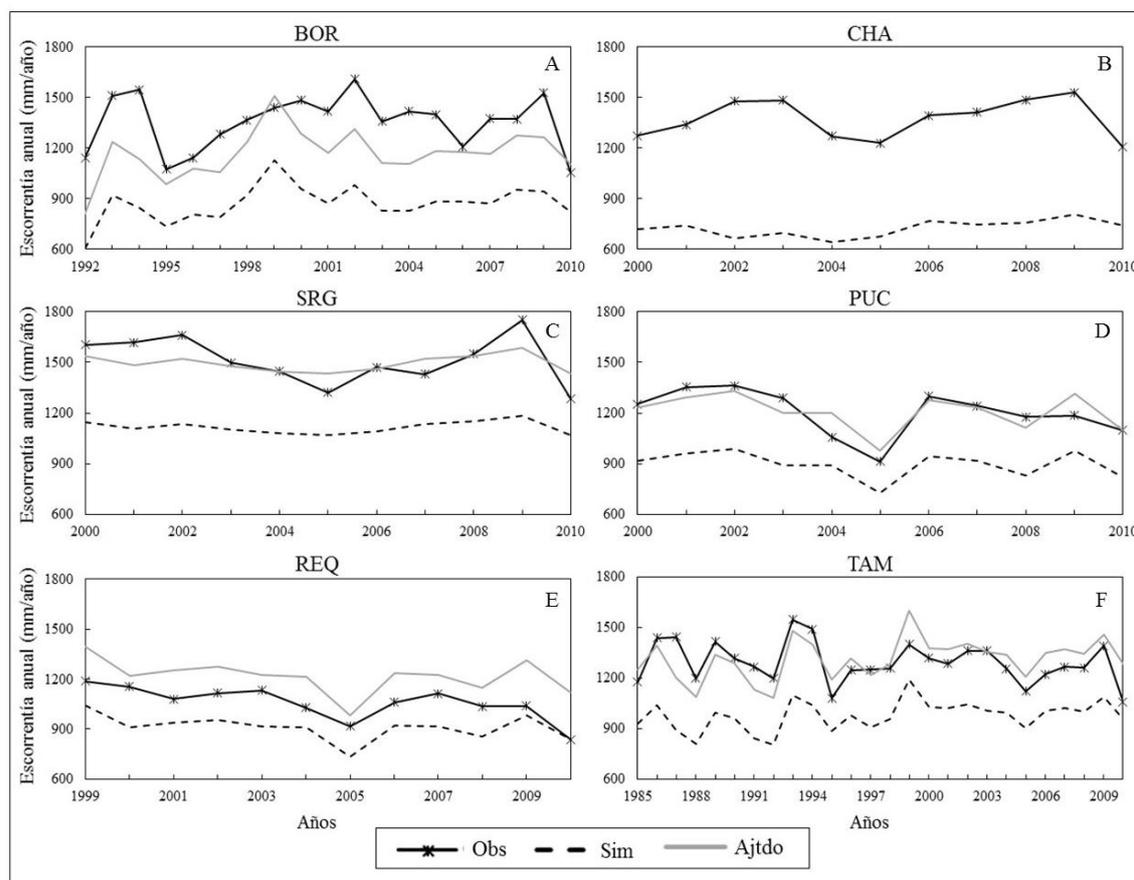


Figura 22. Comparación de la escorrentía anual simulada con modelo Budyko, sin factor de ajuste (línea punteada), escorrentía anual ajustada con parámetro $x = 1.338$ (línea color gris) y la escorrentía anual observada (línea sólida con asteriscos). A. BOR (1992-2010); B. CHA (2000-2012), C.SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).

4.6.2. Modelo Fu 1-parámetro

Se determinó la escorrentía media anual con el modelo Fu aplicando la ecuación (3) a cada celda (grilla de $0.05 \times 0.05^\circ$) para toda la zona de estudio de la CAA. En este modelo paramétrico se desarrolló dos pruebas de bondad de ajuste. La primera prueba (Nash, RMSE) se realizó para la estimación de la escorrentía anual y así determinar el valor del parámetro α de la ecuación de Fu (1981) de cada cuenca y la segunda prueba (RMSE) fue para ver la eficiencia del modelo en la estimación de la escorrentía media anual en la CAA.

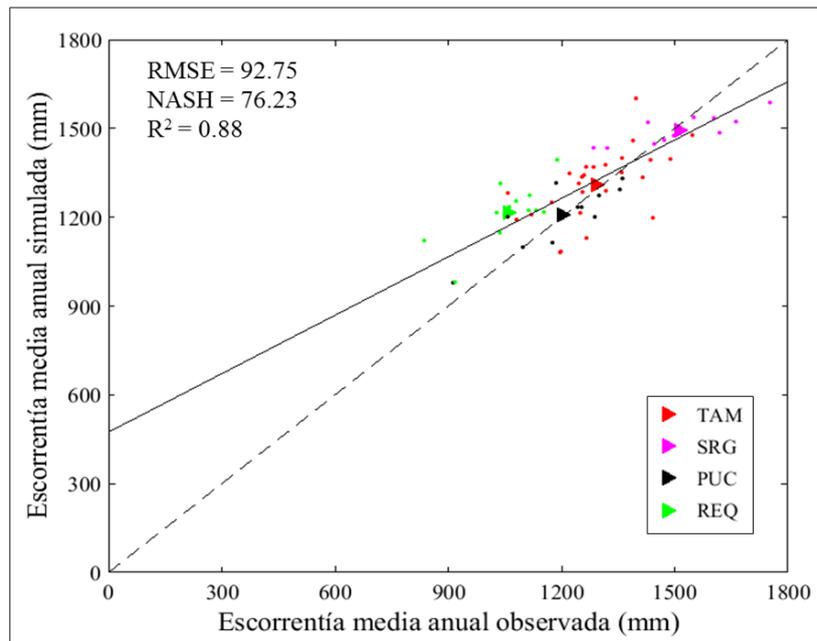


Figura 23. Escorrentía media anual simulada con modelo Budyko frente escorrentía media anual observada, los triángulos representan la escorrentía media anual y los puntos la escorrentía anual

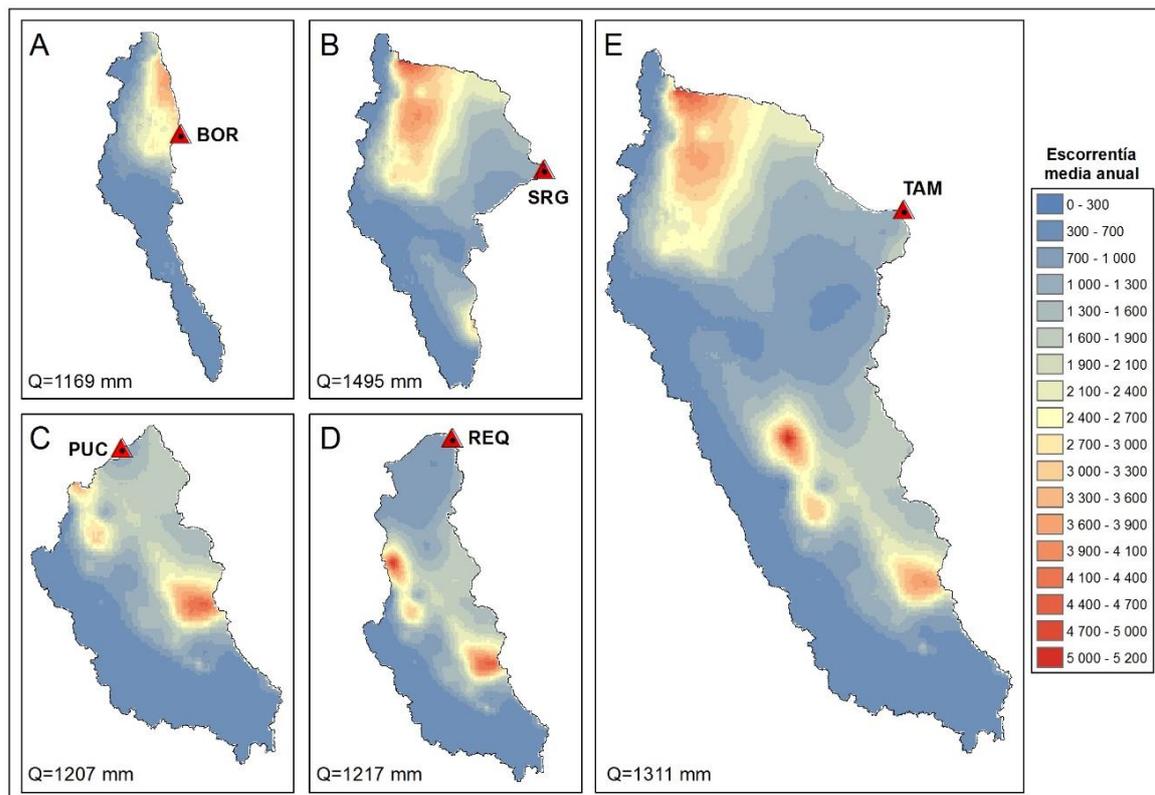


Figura 24. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada con el modelo Budyko. A. BOR (1992-2010); B. SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).

En la estimación de la escorrentía anual (Anexo 6) se obtuvo la mayor eficiencia del modelo Fu 1-p en PUC con un Nash de 68.74% y un RMSE de 76.32 mm y en la gráfica de la Figura 25D se puede observar la estrecha cercanía entre los valores simulados y los observados. El RMSE más bajo (70.38 mm) de las seis cuencas en estudio se presenta en REQ, sin embargo, el valor de Nash (50.06%) está ~19% por debajo de la PUC.

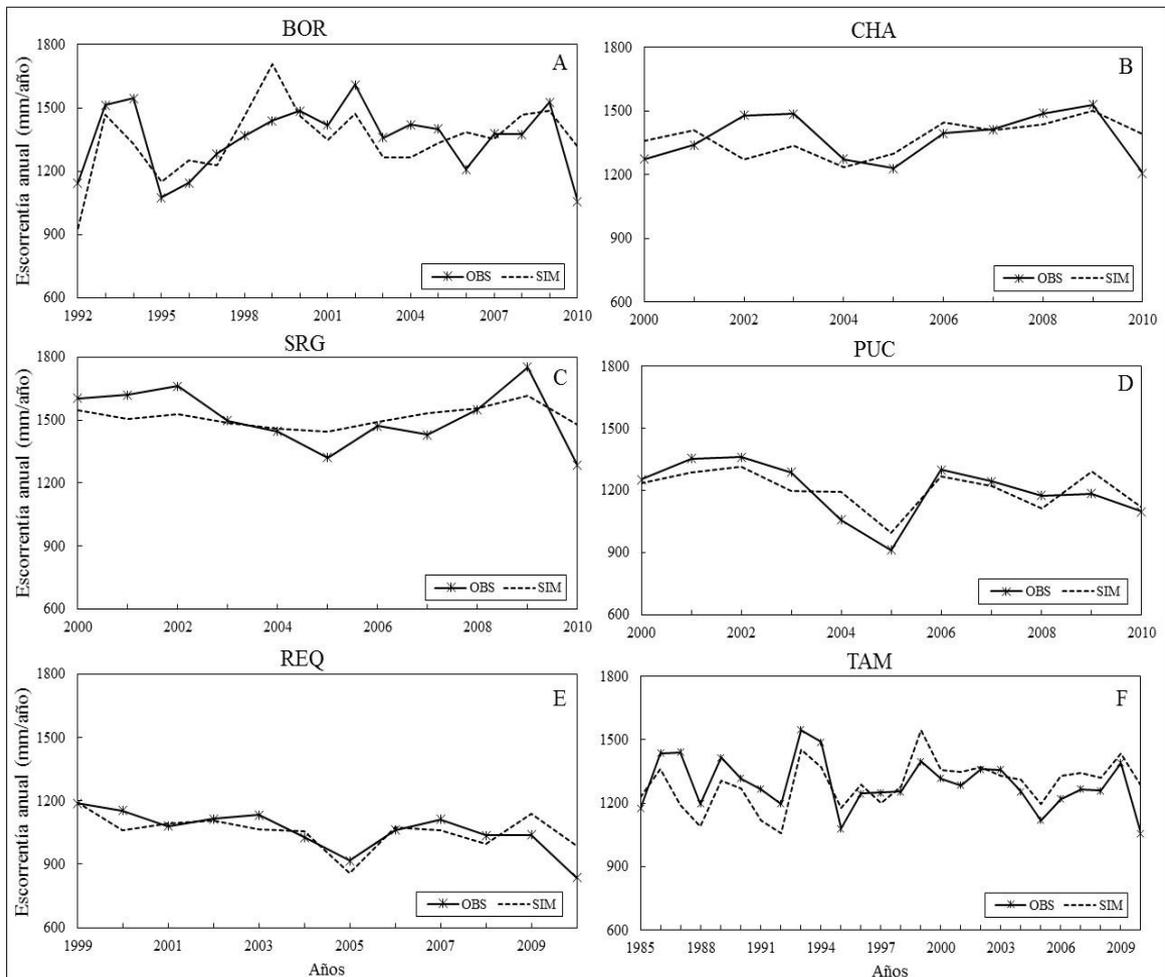


Figura 25. Comparación de la escorrentía anual simulada con modelo Fu 1-p (línea punteada) y la escorrentía anual observada (línea sólida con asteriscos) para las seis estaciones de descarga de la cuenca andino-amazónica.

En el análisis de sensibilidad se determinó los valores de α , parámetro que representa las características físicas y climáticas de cada cuenca, SRG con un Nash de 42.17% y un RMSE de 108.28 mm, se determinó un α de 1.26 valor similar para la región sur del río Ucayali (PUC), mientras las otras cuencas presentaron diferentes valores que se detallan en el Cuadro 4.

La cuenca BOR y CHA con un área < 115 000 km², ubicadas al oeste de la cuenca SRG, donde se concentra la mayor ETP de la CAA (Figura 13) y existe una mayor variabilidad estacional de la precipitación (Figura 7) con relación a SRG; presentan un valor de α 1.13 y 1.05, respectivamente. BOR a pesar de tener un valor de Nash superior (23.24%) a CHA (7.49%) su RMSE es de 142.31 mm (CHA, 110.98 mm), posiblemente debido a la variabilidad interanual de la escorrentía (Figura 25A). La cuenca TAM con el mayor registro de datos (1985-2010) presenta una subestimación en la escorrentía anual entre 1986 a 1994 y una sobrestimación para el resto de periodo (Figura 25F), presentando un RMSE de 107.06 mm.

Cuadro 4. Parámetro α del modelo Fu 1-p, valores de Nash, coeficiente de correlación (r) coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para las estaciones de la cuenca andino-amazónica.

Estación	α	r	R^2	RMSE (mm)	Nash (%)	QMA OBS (mm)	QMA SIM (mm)
BOR	1.13	0.62*	0.38	142.31	23.24	1354.75	1351.28
CHA	1.05	0.40	0.16	110.98	7.49	1373.82	1372.88
SRG	1.26	0.78*	0.61	108.28	42.17	1512.63	1513.53
PUC	1.26	0.84*	0.71	76.32	68.74	1202.69	1203.90
REQ	1.49	0.72*	0.52	70.38	50.06	1058.46	1057.86
TAM	1.30	0.58*	0.34	107.06	22.19	1292.29	1290.83

*significativo al 95%

La QMA con el método Fu 1-p en la CAA se obtienen valores muy cercanos a la escorrentía media anual observada (Cuadro 4), realizada la prueba de bondad de ajuste (RMSE) para la escorrentía media anual se obtuvo un valor de 1.83 mm. En la Figura 26 se observa como los valores obtenidos frente los observados se ajustan a la recta de una regresión ideal ($R^2 = 0.99$). La Figura 27 muestra el patrón espacial de la escorrentía media anual simulada en la CAA, en la parte norte de la cuenca (SRG, Figura 27B) se presentan los valores más altos, lo opuesto ocurre en la región sur en las cuencas REQ (Figura 27D), destacándose focos de mayor QMA en la zona centro de PUC (Figura 27C).

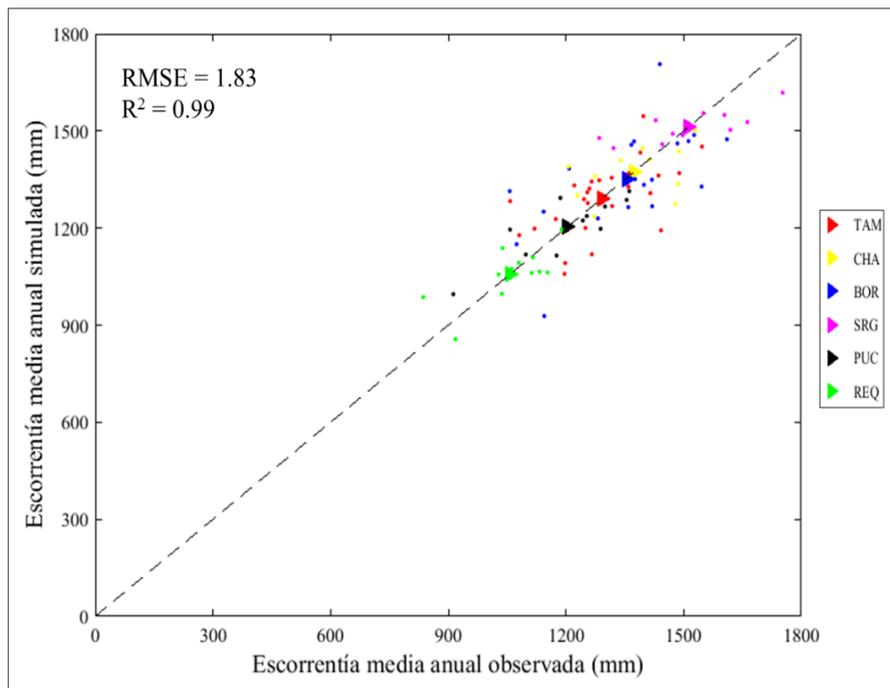


Figura 26. Escorrentía media anual simulada con modelo Fu 1-p frente escorrentía media anual observada (mm), los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual de las seis estaciones de descarga de la cuenca andino-amazónica.

De forma general en la CAA la menor escorrentía media anual se produce en la parte oeste, perteneciente a la región andina, por encima de los 5000 msnm y la zona centro aproximadamente entre los 5° y 8° S, hasta llegar a la estación de descarga TAM (Figura 27E).

4.6.3. Modelo GR1A

Para la estimación de la QMA con el modelo de precipitación-escorrentía GR1A de un solo parámetro (X), se utilizó la ecuación (4) a través de ~24 000 celdas (0.05° x 0.05°) de la CAA. Se desarrolló la misma metodología aplicada en el modelo Fu 1-p. En la primera etapa, se calculó la escorrentía anual (Anexo 7 y 8) estimando la mayor eficiencia en cada cuenca a través de prueba de bondad de ajuste de Nash. PUC presentó la mayor eficiencia con un valor de Nash de 69.10%; por otro lado, REQ muestra el menor RMSE de 69.65 mm, pero su valor de Nash (51.08%) es menor que PUC. La estación de descarga CHA en la cuenca del río Huallaga se descartó en este modelo por presentar valores negativos en la prueba de bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe (1970).

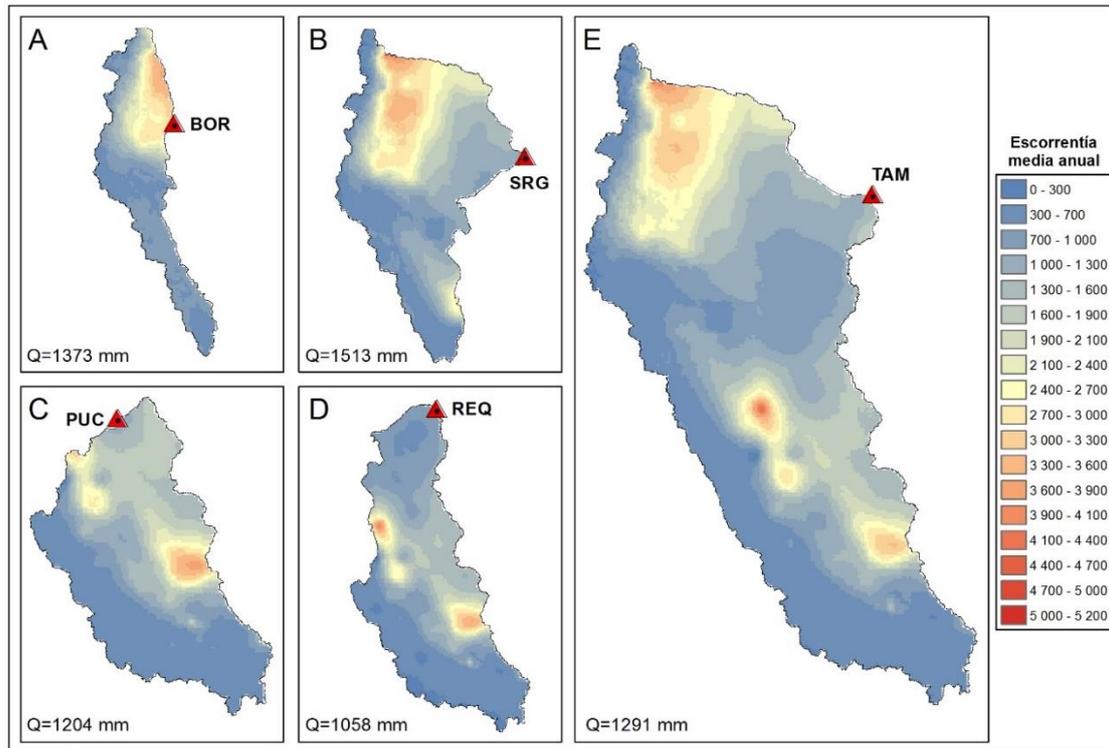


Figura 27. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada con el modelo Fu 1-parámetro. A. BOR (1992-2010); B. SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).

En la calibración del modelo se obtuvieron diferentes valores del parámetro X que se detallan en el Cuadro 5, BOR en este modelo coincide con el modelo Fu 1-p presentando el RMSE más alto (145.88 mm) de las cuencas simuladas. Se debe resaltar que las cuencas SRG (356 198 km²) ubicada al norte y PUC (260 541 km²) al sur de la CAA y TAM (726 400 km²) muestran valores del parámetro X muy similares: 0.30, 0.31 y 0.33. Los valores de la escorrentía media anual obtenidos de acuerdo a su mayor eficiencia (Nash) y con el valor del parámetro X , son muy cercanos a los datos observados.

En la segunda etapa del proceso se realizó la prueba de bondad de ajuste, la raíz del error cuadrático medio, a la escorrentía media anual y se obtuvo un valor de 3.58 mm. La Figura 28 muestra como los valores simulados de las cinco cuencas frente los datos observados se ajustan a la recta de una regresión lineal ideal. Considerando la similitud del parámetro X en las tres cuencas mencionadas en el párrafo anterior, se realizó una nueva simulación con el objetivo de homogenizar el parámetro del modelo para las cuencas en mención; llegándose a determinar el valor de $X = 0.31$, pero con RMSE de 11.07 mm

(Figura 29) superior a la primera simulación que consta de un X propio para cuenca. La Figura 30 representa la distribución espacial de la QMA para todas las cuencas (menos CHA) en la zona de estudio de acuerdo a la serie de tiempo del Cuadro 1, el comportamiento espacial es similar en el descrito por el modelo Fu 1-parámetro.

Cuadro 5. Parámetro X del modelo GR1A, valores de Nash, coeficiente de correlación (r) coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para las estaciones de la cuenca andino-amazónica.

Estación	X	r	R^2	RMSE (mm)	Nash (%)	QMA OBS (mm)	QMA SIM (mm)
BOR	0.14	0.61*	0.37	145.88	19.34	1354.75	1352.35
SRG	0.30	0.75*	0.56	109.83	40.51	1512.63	1514.54
PUC	0.31	0.84*	0.71	75.88	69.10	1202.69	1195.35
REQ	0.49	0.78*	0.52	69.65	51.08	1058.46	1057.94
TAM	0.33	0.56*	0.31	111.60	15.45	1292.29	1291.55

*significativo al 95%

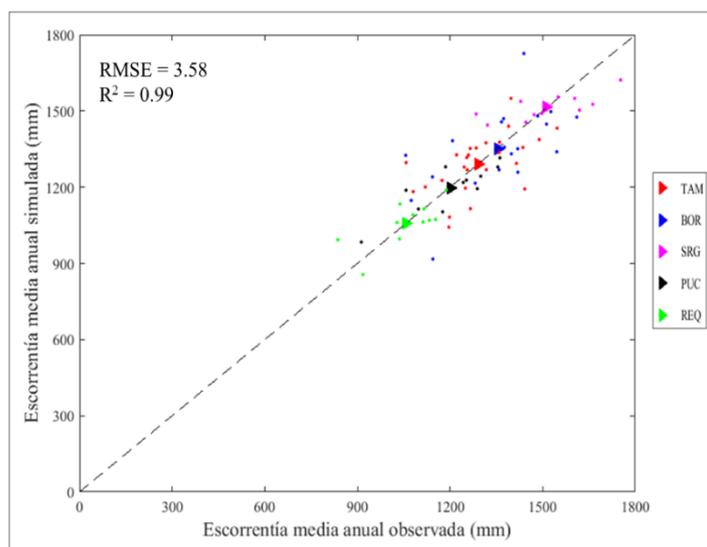


Figura 28. Escorrentía media anual simulada en modelo GR1A frente escorrentía media anual observada, los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual.

4.6.4. Modelo Fu 2-parámetros

En la estimación de la QMA con el modelo Fu 2-parámetros (Fu 2-p) se utilizó la misma ecuación (3) propuesta por Fu (1981), que puede convertirse en un modelo multi-

parámetros cuando se introducen diferentes valores de α utilizados para representar diferentes tipos de cobertura vegetal (bosque y no bosque) en este modelo se determinó la escorrentía media anual como la sumatoria de la escorrentía simulada con cada cobertura vegetal.

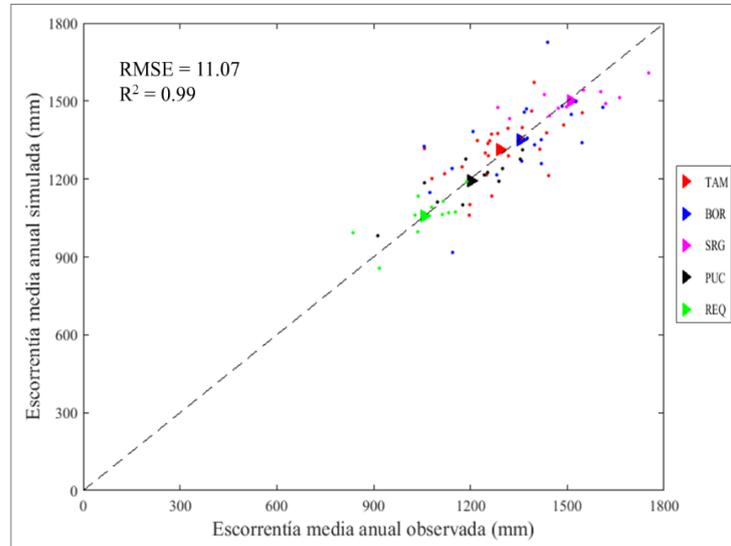


Figura 29. Escorrentía media anual simulada en modelo GR1A frente escorrentía media anual observada, con $X=0.31$ en las estaciones de SRG, PUC y TAM, los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual.

Utilizando la misma metodología establecida para los modelos anteriores, de aplicar la ecuación en cada una de las celdas de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, utilizando la misma información de entrada los datos de precipitación anual del producto CHIRPS y la evapotranspiración potencial anual del CRU, pero adicionando la cobertura vegetal reclasificada en bosque (BQ) y no bosque (NBQ) y resamplada a la misma resolución espacial (Figura 17B).

Primero se estimó la escorrentía anual (Anexo 9) en cada cuenca de acuerdo a la serie de tiempo disponible (Figura 31). Aplicándose la primera prueba de bondad de ajuste (Nash), y de acuerdo a la mayor eficiencia se determinó el valor del parámetro α para las coberturas de BQ y NBQ de cada cuenca (Cuadro 6). CHA y BOR, se descartaron por presentar valores negativos en la prueba de Nash-Sutcliffe (1970).

En la Figura 31B-D se muestra una diferencia muy marcada entre la escorrentía anual generada en las coberturas BQ y NBQ para las cuencas PUC, REQ y TAM, donde la

escorrentía de la cobertura NBQ se encuentra entre los 381 mm (1999) para la estación de TAM, y 131.7 mm (2005) para la estación PUC (Anexo 11). Por otro lado, en la SRG donde existe una precipitación casi uniforme durante el año (Figura 7E), la diferencia entre la escorrentía generada por las dos coberturas no es muy marcada (Figura 31A), donde la cobertura NBQ se encuentra entre los 522.19 mm (2004) y 647.02 mm (2009).

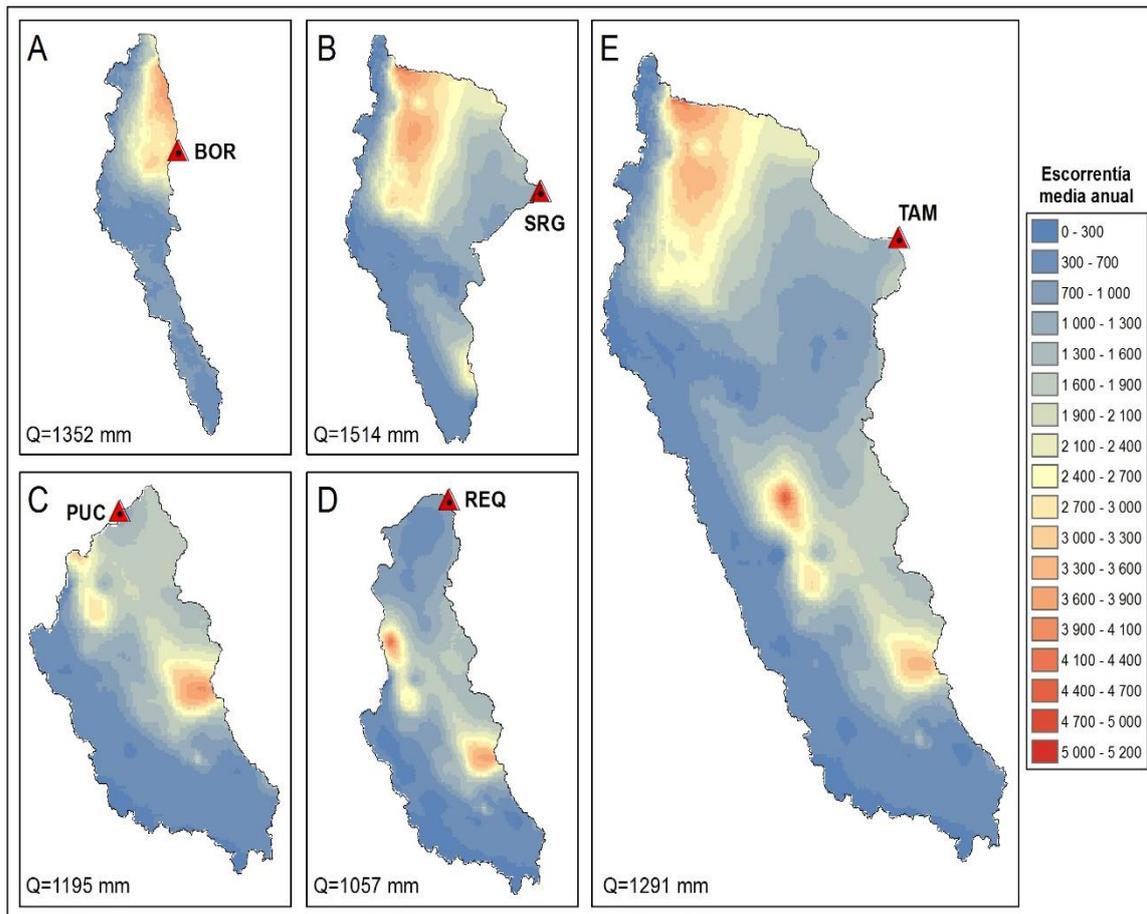


Figura 30. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada con el modelo GR1A. A. BOR (1992-2010); B. SRG (2000-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010); E. TAM (1985-2010).

La estación SRG presenta el valor de Nash más alto (57.69%) y su QMA simulada (1512.80 mm) es casi igual a la observada (1512.63 mm). La QMA simulada en la estación TAM tiene una diferencia sobrestimada de 1.35 mm con relación al dato observado, a pesar de tener un Nash = 6.19% y un RMSE = 117.55 mm. PUC y REQ, donde existe una fuerte estacionalidad en la precipitación (Figura 7C y 7F), sobrestiman la QMA, ~75 mm y ~9 mm, respectivamente.

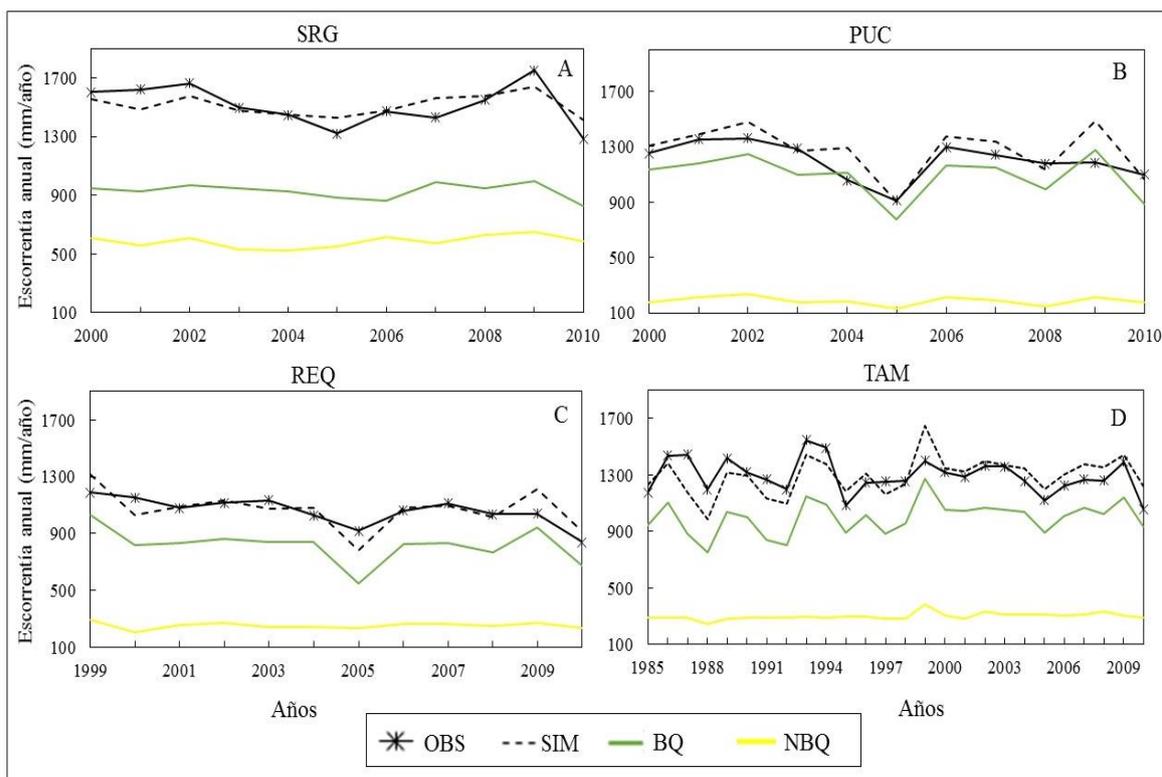


Figura 31. Comparación de la escorrentía anual simulada (línea punteada) con Fu 2-p y la escorrentía anual observada (línea sólida con asteriscos), la línea en color verde representa la escorrentía anual para la cobertura bosque (BQ) y la línea en color amarillo representa la escorrentía anual para la cobertura no bosque (NBQ), para cuatro estaciones de descarga de la cuenca andino-amazónica.

El parámetro α de NBQ en PUC, REQ y TAM es mayor en relación al presentado en SRG, entre mayor es el parámetro menor es la escorrentía generada en esa zona, siendo justamente en estas cuencas donde la QMA de NBQ está por debajo ~ 300 mm. En PUC y REQ el valor de α de BQ y NBQ son casi iguales (Cuadro 6). SRG y TAM presentan sus valores de α en las coberturas en sentido opuesto, es decir, el α_{BQ} de SRG es mayor (21.85) a TAM (2.92), mientras el α_{NBQ} de SRG es menor (2.08) a TAM (23.01).

En la evaluación de la QMA en la CAA, para las estaciones que presentaron un valor positivo de Nash (Cuadro 5), se realizó la segunda prueba de bondad de ajuste (RMSE) y se obtuvo un valor de 43.57 mm. La Figura 32 muestra como los valores simulados frente los valores observados se ajustan a la recta de una regresión lineal ideal, justamente se aprecia como la estación PUC (triángulo negro) está más alejada de la recta.

Cuadro 6. Parámetro α para las coberturas bosque (BQ) y no bosque (NBQ) del modelo Fu 2-parámetros, valores de Nash, coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para cuatro estaciones de la cuenca andino-amazónica

Estación	α BQ	α NBQ	R^2	RMSE (mm)	Nash (%)	QMA OBS (mm)	QMA SIM (mm)
SRG	21.85	2.08	0.67	92.62	57.69	1512.63	1512.80
PUC	15.95	15.95	0.62	135.34	1.71	1202.69	1277.58
REQ	25.49	25.80	0.73	92.04	14.58	1058.46	1067.63
TAM	2.92	23.01	0.33	117.55	6.19	1292.29	1293.64

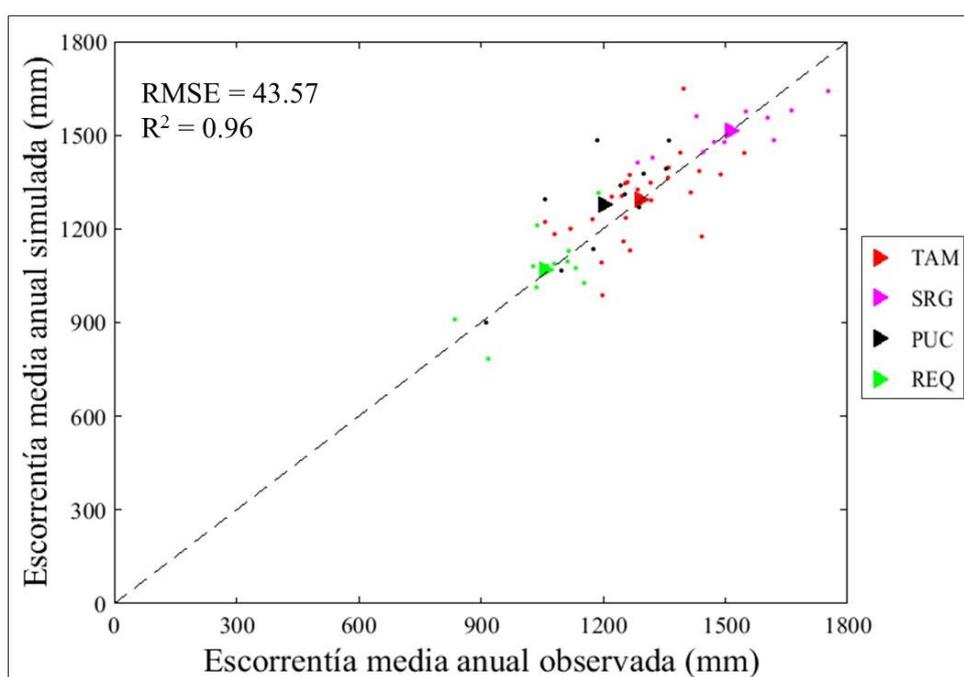


Figura 32. Escorrentía media anual simulada en modelo Fu 2-p frente escorrentía media anual observada, los triángulos representan la QMA y los puntos la escorrentía anual.

La Figura 33 presenta la distribución espacial de la escorrentía media anual de acuerdo a la serie de tiempo de cada cuenca, la distribución presentada por el modelo Fu 2-p, observándose en la parte alta de la cuenca del río Ucayali los valores más bajos de la escorrentía, correspondiendo a la zona de la cobertura NBQ. De acuerdo a los parámetros de las coberturas para cada cuenca, descritos en el Cuadro 6, se pudo determinar la cantidad de QMA que se genera tanto en la cobertura de BQ y NBQ. En el Cuadro 7 se detalla el

porcentaje de área de las dos coberturas con relación al área total de cada cuenca, la esorrentía media anual en cada cobertura y el porcentaje que representan del total de la esorrentía simulada. En REQ y TAM la esorrentía media anual de la cobertura BQ representa ~77% del total, en PUC (región sur de CAA) la esorrentía media anual de la cobertura NBQ registra el porcentaje más bajo (~15%) con relación a las demás cuencas que se ubican por encima del ~23%, siendo justamente la cuenca que contiene mayor porcentaje de NBQ (57.31%) de las cuatro cuencas simuladas, superando entre un ~13% y ~16%.

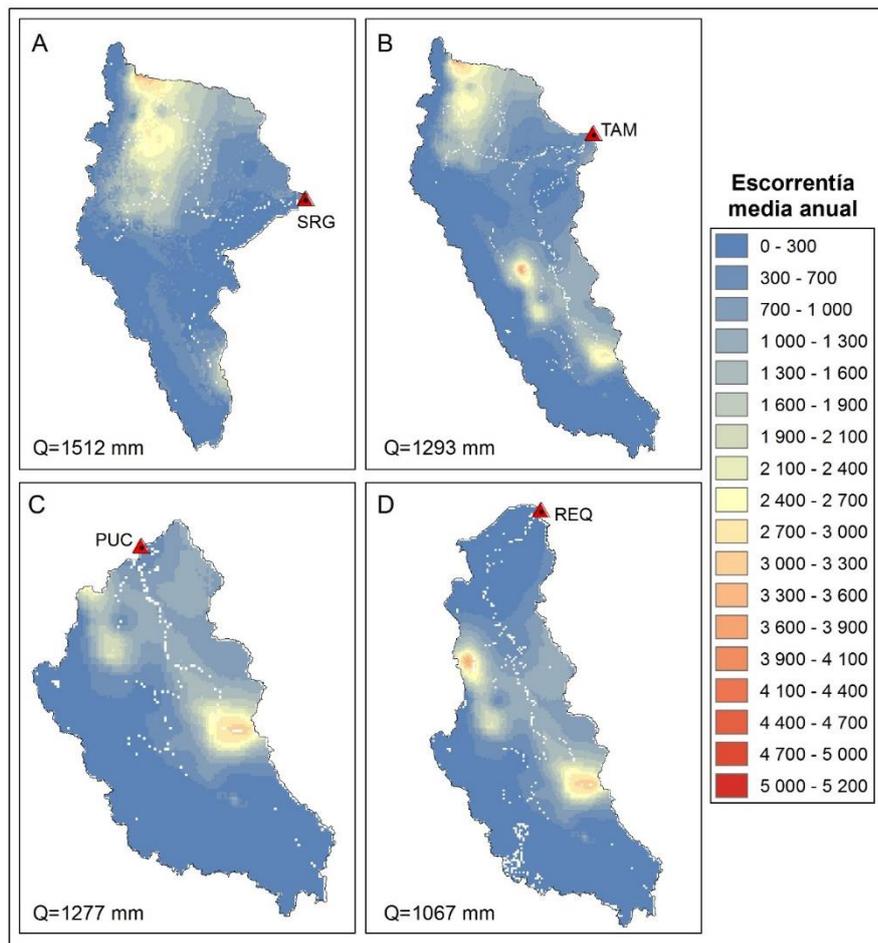


Figura 33. Distribución espacial de la esorrentía media anual simulada con el modelo Fu 2-p. A. SRG (2000-2010); B. TAM (1985-2010); C. PUC (2000-2010); D REQ (1999-2010).

La Figura 34 representa la distribución espacial de la QMA en la cobertura QB, considerando la similitud entre la esorrentía simulada y la observada en las cuencas SRG y TAM, se puede apreciar en SRG los valores más altos de esorrentía se concentran en la parte norte de la cuenca, siendo el sector donde se registra mayor precipitación (Figura 7G). En TAM se presenta una distribución similar a SRG, pero destacándose dos focos de mayor

escorrentía en la región sureste, mientras la menor escorrentía se produce en la región central de la cuenca.

Cuadro 7. Área de cada cuenca, porcentaje de las coberturas en el área de estudio, Escorrentía media anual estimada para la cobertura de bosque (BQ), no bosque (NBQ) y el total simulado del modelo Fu 2-parámetros.

Estación	Área (km ²)	Coberturas (%)		Q media anual (mm)			Escorrentía (%)	
		BQ	NBQ	BQ	NBQ	TOTAL	BQ	NBQ
SRG	356 198	57.58	41.28	928.59	584.21	1512.80	61.38	38.62
PUC	260 541	41.26	57.31	1093.52	186.42	1277.58	85.69	14.59
REQ	315 544	54.58	43.72	816.75	250.89	1067.63	76.50	23.50
TAM	726 400	56.63	41.89	996.44	297.19	1293.64	77.03	22.97

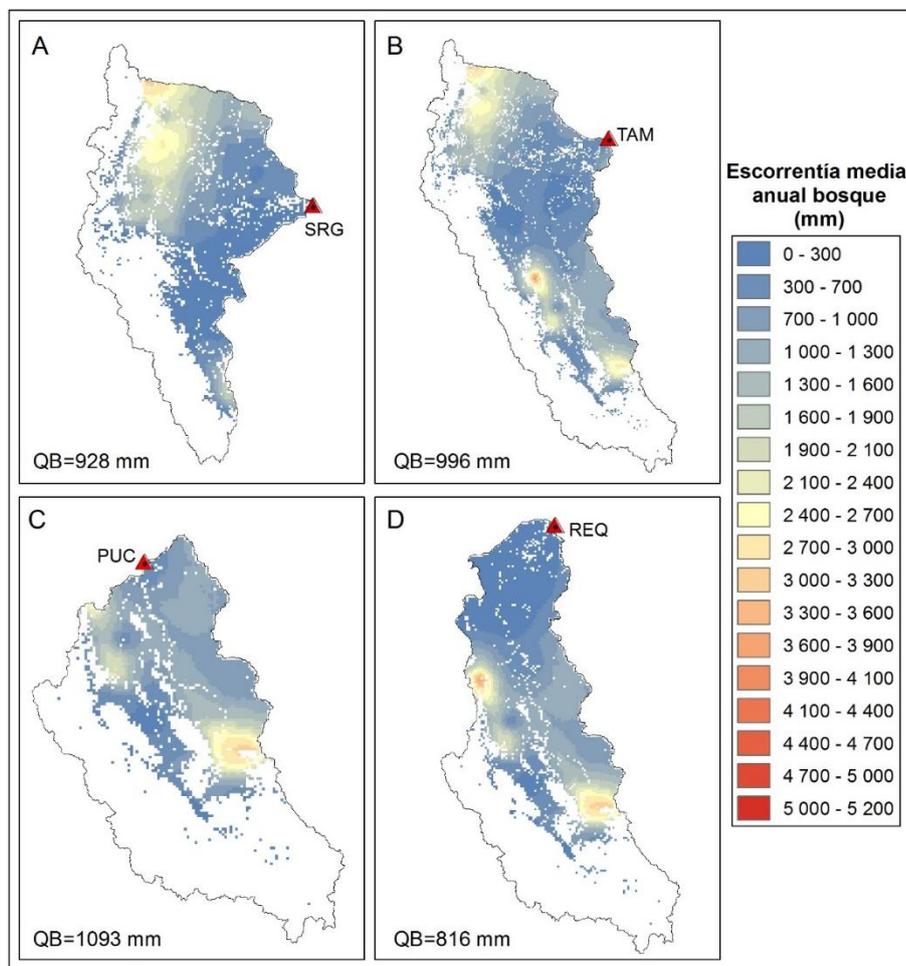


Figura 34. Distribución espacial de la QMA en la cobertura de bosque (QB). A. SRG (2000-2010); B. TAM (1985-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010).

La Figura 35 representa la distribución espacial de la QMA en la cobertura QNB en la CAA, se aprecia que la menor escorrentía se produce en la región andina, en la región norte se resalta una mayor escorrentía pero en menor proporción espacial. SRG con el $\alpha_{NBQ}= 2.08$ se tiene una escorrentía media anual de ~ 584 mm (Figura 35A), mientras en la PUC, REQ y TAM el valor de α_{NBQ} es 15.95, 25.80 y 23.01, respectivamente, la escorrentía media anual disminuye teniendo valores de ~ 186 mm en PUC, ~ 250 mm en REQ y ~ 297 mm en TAM (Figura 35B-D).

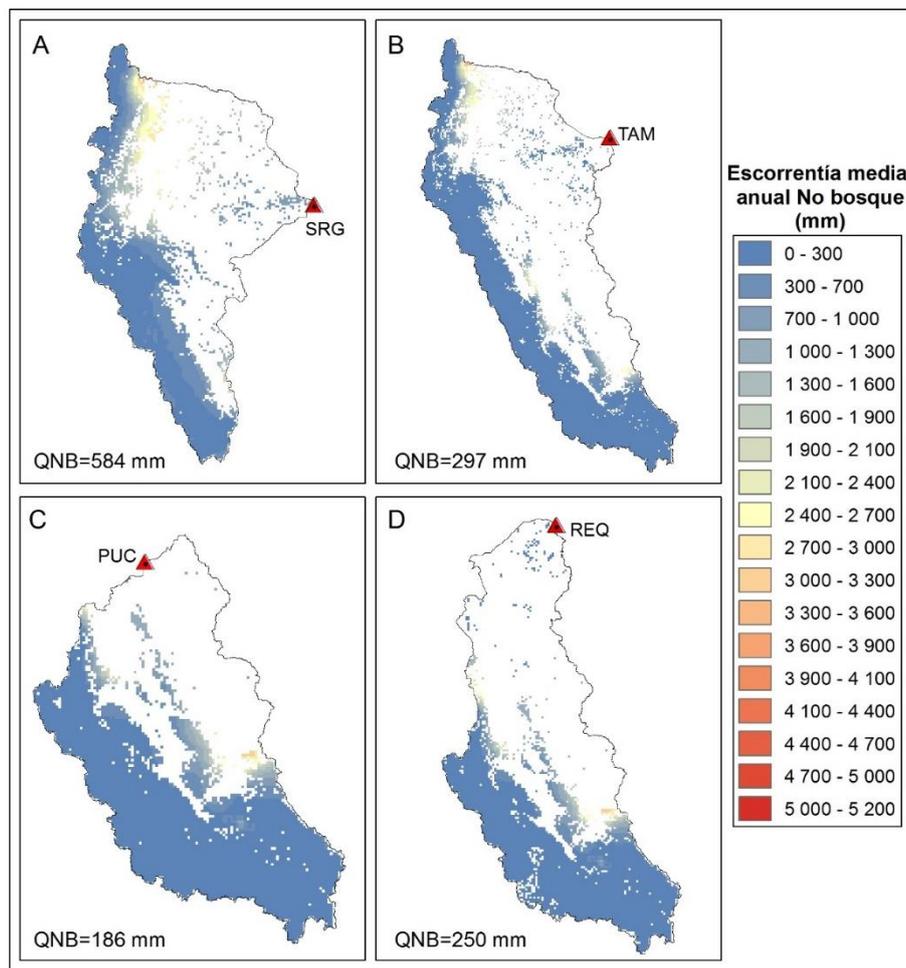


Figura 35. Distribución espacial de la QMA en la cobertura de no bosque (QNB). A. SRG (2000-2010); B. TAM (1985-2010); C. PUC (2000-2010); D. REQ (1999-2010).

4.5.5. Elaboración de la curva de Budyko

Con el objetivo de poder construir la curva del modelo de Budyko se procedió a calcular el índice de aridez (ETP/P) y el coeficiente de escorrentía (Q/P) para cada cuenca de la zona de estudio y además se estimó para las coberturas BQ y NBQ, en escala de tiempo anual y como promedio anual.

Las cuencas con índice de aridez ≤ 1.2 se consideran cuencas húmedas y cuencas áridas con un IA > 1.2 (Zhang & Chiew, 2012). La estimación del índice de aridez (IA), se realizó a través de las ~24 000 celdas ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) de la zona de estudio y se determinó como el promedio de todo el grillado de cada cuenca y el mismo procedimiento se utilizó para estimar el IA para las dos coberturas vegetales. En el Anexo 12 se detalla los valores del IA para cada cuenca en escala de tiempo anual y el promedio anual; en los Anexos 13 y 14, se encuentra los valores del IA para la cobertura de BQ y NBQ, respectivamente.

El coeficiente de escorrentía (CQ), se estimó entre la escorrentía promedio anual simulada y la precipitación promedio anual para cada cuenca (Anexo 17). Se utilizó la imagen de coberturas reclasificada (Figura 17B) para extraer la escorrentía simulada correspondiente al área de las coberturas de BQ y NBQ de cada cuenca (Anexo 15 y 16). En los Anexos 18 y 19 se detalla los valores del coeficiente de escorrentía para la cobertura de bosque (CQBQ) y del coeficiente de escorrentía correspondiente a la cobertura de no bosque (CQNBQ).

Cada cuenca de la zona de estudio se representa en un plano adimensional, el IA en el eje de las X frente al CQ en el eje de las Y (Figura 36), la curva del modelo Budyko (no paramétrico) obtenida del ajuste de los datos se proyecta de forma ascendente, superior al límite del $CQ = 1.0$; es decir, la escorrentía media anual (QMA) es igual a la precipitación media anual (PMA), este hecho acontece debido a los valores obtenidos BOR y CHA. Primero, presentan un IA > 1.2 (Anexo 12) estimado con los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS. En segundo lugar el CQ es ~ 1.0 ($CBOR = 0.97$) y a escala anual se presentan valores de $CQ > 1.0$ en algunos años (Anexo 17), indicando que la ETP está sobrestimada o que la P es subestimada para el sector donde se encuentran las dos cuencas mencionadas (noroeste de la CAA, Figura 4A).

Realizadas las correcciones de acuerdo a lo expuesto anteriormente (descartando BOR y CHA), en la Figura 37 se muestra la curva del modelo Budyko, observándose que los promedios anuales (triángulos) y los promedios anuales de BQ (asteriscos) se ubican en la región húmeda ($IA \leq 1.2$), característico de la CAA (Hoorn et al., 2010). Por otra parte, los promedios anuales de NBQ se encuentran en la región árida ($IA > 1.2$) y dos valores anuales 1991 (1.22) y 1992 (1.39) de TAM (Anexo 12); en la gráfica no se presentan los

valores anuales para las coberturas, pero en NBQ también se registran los valores más altos del IA para los años 1991 y 1992 (Anexo 14), cobertura que representa el ~77% de la región andina. Además, todos los valores tanto anuales como promedios anuales están por debajo $CQ = 1.0$.

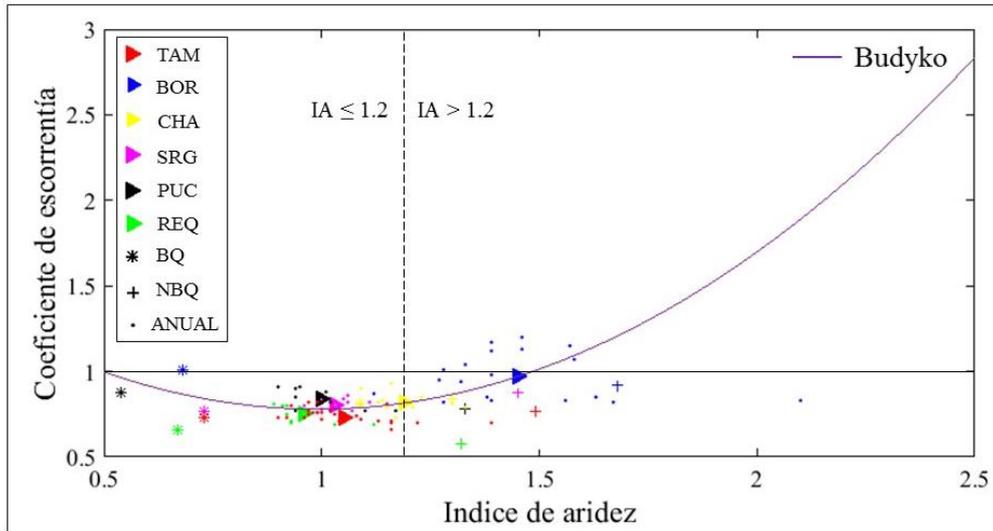


Figura 36. CQ frente IA, para el modelo Budyko. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ. La línea color lila es la curva de Budyko, línea color negro es límite $CQ = 1.0$ y la línea discontinua separa la región húmeda y la región árida.

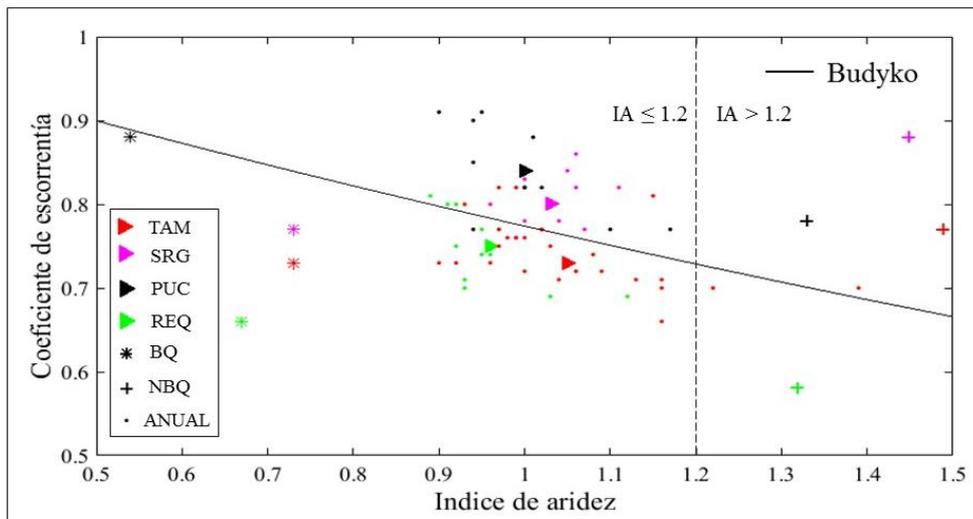


Figura 37. CQ frente IA, para el modelo Budyko en la CAA. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ. La línea color negro es la curva de Budyko y la línea discontinua separa la región húmeda y la región árida.

La QMA simulada con modelo Budyko (Nash = 76.23%; RMSE = 92.75 mm), sobrestima en las cuencas de PUC (~4 mm), REQ (~158 mm) y TAM (~19 mm), mientras en SRG que representa la parte norte de la CAA se subestima (~18 mm), en la cobertura de NBQ para las cuencas de SRG y TAM el índice de aridez es 1.45 y 1.49, respectivamente; zonas donde se el CQ debería ser menor, pero se presenta lo opuesto un CQ superior al registrado en la zona de BQ (Cuadro 8); ocurriendo el mismo efecto suscitado en BOR y CHA (subestimación de P). PUC y REQ guardan concordancia entre los CQ de las coberturas, generándose mayor escurrimiento en los BQ (Zhang & Chiew, 2012).

Cuadro 8. Escorrentía media anual simulada con Budyko y QMA observada para cuatro estaciones de la CAA, índice de aridez (IA), coeficiente de escorrentía (CQ) para cada cuenca (GL) y las coberturas de BQ y NBQ.

Estación	QMQ OBS (mm)	QMA SIM (mm)	IA			CQ		
			GL	BQ	NBQ	GL	BQ	NBQ
SRG	1512.63	1494.81	1.03	0.73	1.45	0.80	0.77	0.88
PUC	1202.69	1207.09	1.00	0.54	1.33	0.84	0.88	0.78
REQ	1058.46	1216.94	0.96	0.67	1.32	0.75	0.66	0.58
TAM	1292.29	1311.16	1.05	0.73	1.49	0.73	0.73	0.77

4.5.6. Elaboración de la curva de Fu 1-parámetro

Con la finalidad de obtener la curva del modelo Fu 1-p, primero se procedió a obtener el CQ entre la escorrentía simulada con éste modelo y la P del producto CHIRPS, determinado tanto para escala anual, promedio anual (Anexo 20) y para las coberturas vegetales (Anexo 21-22), de acuerdo a los resultados obtenidos en el Cuadro 4, donde la QMA estimada es muy cercana a los datos observados. La Figura 38 muestra las cuencas sobre un plano adimensional, observándose BOR y CHA estar por arriba de la línea QMA=PMA (CQ = 1.0), presentan las mismas características como en modelo Budyko ($IA > 1.2$).

Realizado el análisis de la información obtenida de la Figura 38, se descartó las cuencas BOR y CHA, por las mismas razones que en modelo Budyko. La Figura 39 muestra la curva del modelo de Fu 1-p para cada cuenca caracterizada por el parámetro α establecido en el Cuadro 3, la similitud entre las curvas de las cuencas PUC, REQ y SRG presentan una forma distinta a TAM, debido a la corta serie de tiempo (11 años).

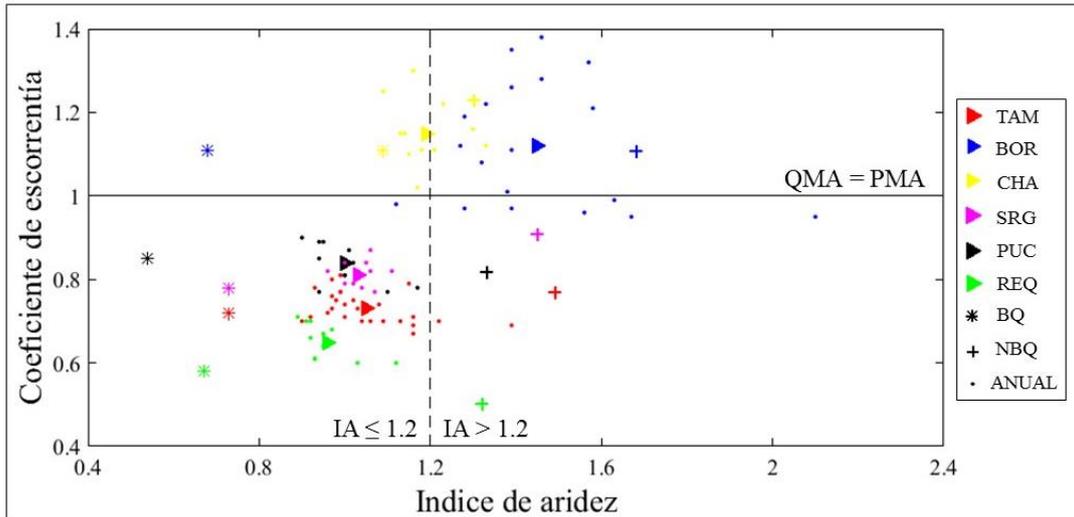


Figura 38. CQ frente IA, para el modelo Fu 1-p en la CAA de acuerdo a los resultados del Cuadro 3. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ. La línea color negro es límite CQ = 1.0 y la línea discontinua separa la región húmeda y la región seca.

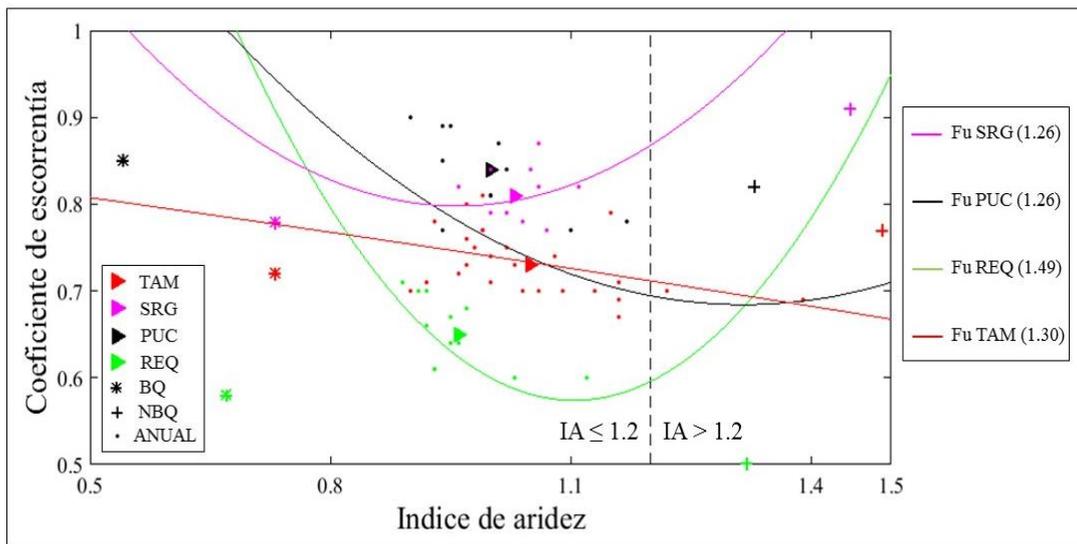


Figura 39. CQ frente IA, para el modelo Fu 1-p en la CAA. Las líneas de color sólido representan la curva del modelo Fu de acuerdo al parámetro α de cada cuenca establecido en Cuadro 3.

De acuerdo a la metodología establecida por Zhang & Chiew (2012) de caracterizar la curva del modelo para toda la zona de estudio, se realizó una nueva simulación dando como resultado un $\alpha = 1.31$, y los valores de la prueba de bondad de ajuste se obtuvo un

RMSE = 84.20 mm y un Nash = 80.42% (Figura 40). Con la nueva simulación se subestimó la QMA en tres cuencas y en REQ se sobrestimó con ~129 mm con relación al dato observado (Cuadro 9).

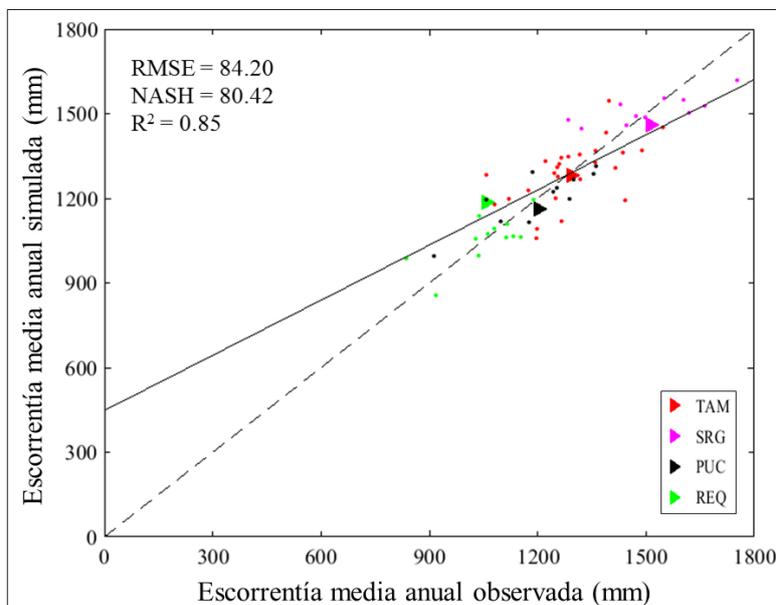


Figura 40. Escorrentía media anual simulada en modelo Fu 1-p frente escorrentía media anual observada, con $\alpha=1.31$ en las estaciones de SRG, PUC, REQ y TAM, los triángulos representan la escorrentía media anual y los puntos la escorrentía anual

Cuadro 9. Escorrentía media anual simulada con Fu 1-p con $\alpha=1.31$ y QMA observada para cuatro estaciones de la CAA, índice de aridez (IA), coeficiente de escorrentía (CQ) para cada cuenca (GL) y las coberturas de BQ y NBQ.

Estación	QMQ OBS (mm)	QMA SIM (mm)	IA			CQ		
			GL	BQ	NBQ	GL	BQ	NBQ
SRG	1512.63	1459.00	1.03	0.73	1.45	0.78	0.75	0.87
PUC	1202.69	1163.23	1.00	0.54	1.33	0.81	0.82	0.78
REQ	1058.46	1187.81	0.96	0.67	1.32	0.73	0.64	0.58
TAM	1292.29	1282.11	1.05	0.73	1.49	0.72	0.71	0.76

Con los nuevos resultados obtenidos se estimó el CQ tanto para escala anual y promedio anual (Anexo 24); con la imagen de coberturas reclasificada (Figura 17B) se pudo extraer la escorrentía simulada correspondiente al área de las coberturas de BQ y NBQ de cada cuenca. En los Anexos 25 y 26 se detalla los valores del coeficiente de escorrentía para

la cobertura de bosque (CQBQ) y del coeficiente de escorrentía correspondiente a la cobertura de no bosque (CQNBQ).

La Figura 41 muestra la curva del modelo Fu 1-p ($\alpha = 1.31$), presentando una dispersión de los datos similar a la curva de Budyko, pero se puede apreciar una ligera mejoría de ajuste de los CQ de los promedios anuales de cada cuenca hacia la curva. Se debe resaltar que los CQNBQ son superiores para SRG (0.87) y TAM (0.76) con relación a los CQBQ (0.75 y 0.71, respectivamente), indicando un mayor escurrimiento en la zona de NBQ, un efecto opuesto sucede con el CQ de la zona de BQ para PUC (0.82) y REQ (0.64), que es mayor al CQNBQ (0.78 y 0.58, respectivamente). Un comportamiento similar se presenta en la curva de Budyko.

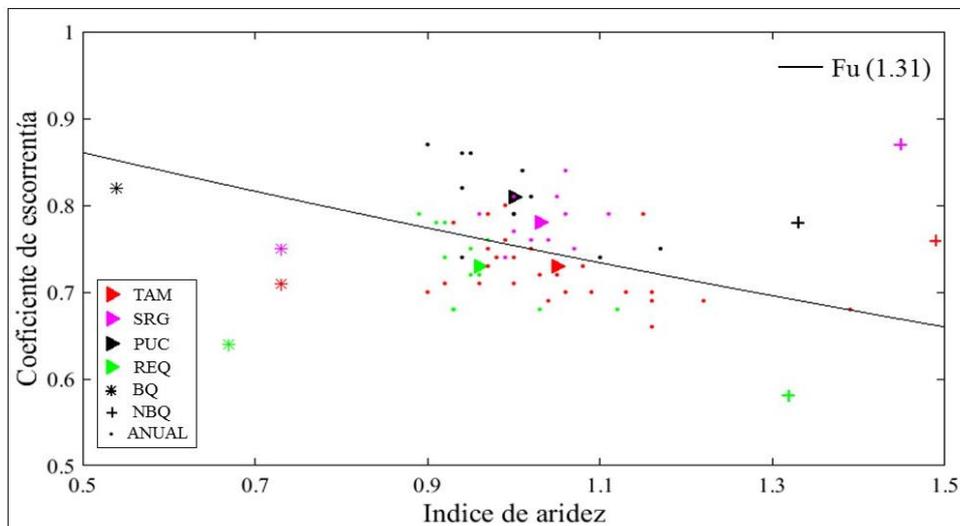


Figura 41. CQ frente IA, para el modelo Fu 1-p en la CAA con $\alpha = 1.31$. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ. La línea color negro representa la curva de Fu 1-p.

4.5.7. Elaboración de la curva de Fu 2-parámetro

Con el objetivo de construir la curva del modelo Fu 2-p (BQ y NBQ) y poder caracterizar la zona de estudio, se realizó una nueva simulación en la CAA dando como resultado un $\alpha = 4.30$ para BQ y $\alpha = 25.90$ para NBQ, y los valores de la prueba de bondad de ajuste se obtuvo un RMSE = 120.33 mm y un Nash = 60.00% (Figura 42). Con la nueva simulación se subestimo la escorrentía media anual en SRG (~71 mm) y TAM (~64mm),

mientras se sobrestimo en PUC (~165 mm) y REQ (~85 mm), ver Anexo 27. El Cuadro 10 cuantifica la escorrentía media anual para las dos coberturas, el porcentaje de escorrentía que aporta la cobertura de bosque esta entre ~70% (SRG) y ~82% (PUC) del total simulado, PUC presenta la menor escorrentía generada en NBQ (17.37%) y la mayor se presenta SRG (29.90%).

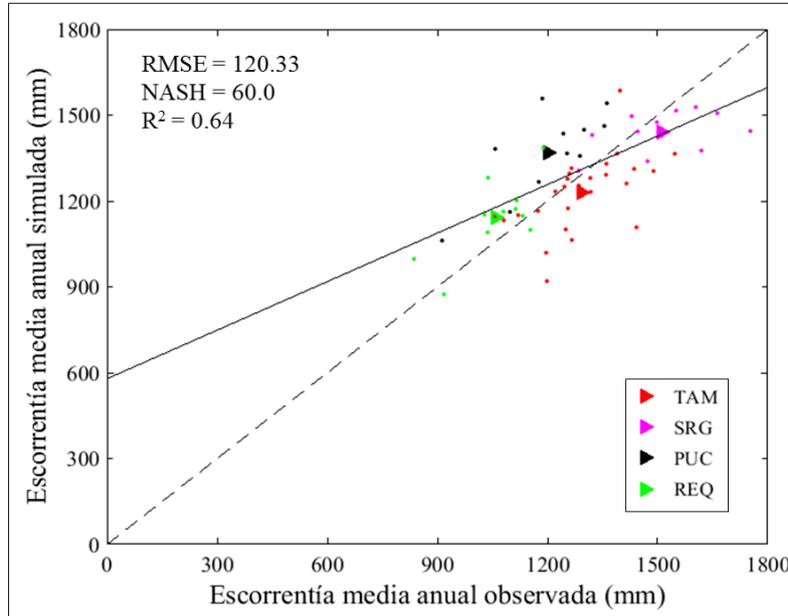


Figura 42. Escorrentía media anual simulada en modelo Fu 2-p frente escorrentía media anual observada, con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, en las estaciones de SRG, PUC, REQ y TAM, los triángulos representan la escorrentía media anual y los puntos la escorrentía anual

Cuadro 10. Área de cada cuenca, porcentaje de las coberturas en el área de estudio, Escorrentía media anual estimada para la cobertura de bosque (BQ), no bosque (NBQ) y el total simulado del modelo Fu 2-parámetros, con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.9$

Estación	Área (km ²)	Coberturas (%)		QMA (mm)			Escorrentía (%)	
		BQ	NBQ	BQ	NBQ	TOTAL	BQ	NBQ
SRG	356 198	57.58	41.28	1010.91	431.13	1442.04	70.10	29.90
PUC	260 541	41.26	57.31	1130.02	237.50	1367.52	82.63	17.37
REQ	315 544	54.58	43.72	890.14	253.11	1143.25	77.86	22.14
TAM	726 400	56.63	41.89	896.78	331.51	1228.29	73.01	26.99

Con la estimación de la escorrentía anual y promedio anual para las cuatro cuencas, se estimó el CQ para cada cuenca (Anexo 30), y de igual forma se determinó el CQBQ

(Anexo 31) y el CQNBQ (Anexo 32) tanto para escala anual y promedio anual. La información del IA estimado en un principio para graficar la curva de Budyko es utilizado en Fu 2-p. La Figura 43 muestra una reducción del CQ en los promedios anuales de las coberturas vegetales en comparación con los modelos Budyko y Fu 1-p (Cuadro 8 y 9). En los dos primeros modelos el CQNBQ de PUC y REQ es menor al CQBQ, mientras un efecto contrario se presentó en SRG y TAM, donde el CQNBQ es mayor al CQBQ. En el modelo Fu 2-p el CQBQ es mayor al CQNBQ en las cuatro cuencas.

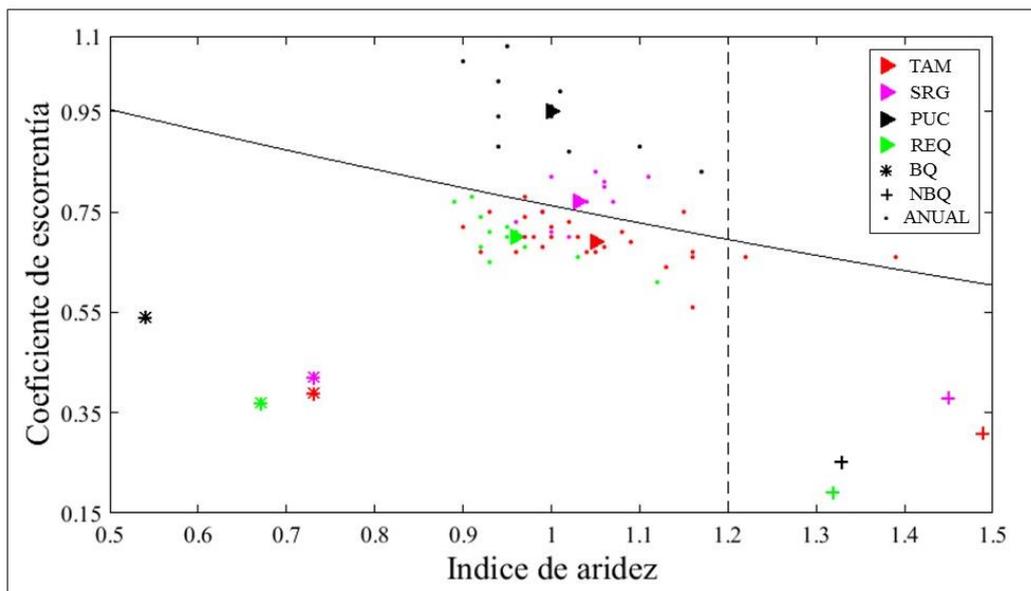


Figura 43. CQ frente IA, para el modelo Fu 2-p en la CAA con $\alpha_{BQ}= 4.30$ y $\alpha_{NBQ}= 25.90$. Los triángulos representan el promedio anual, los puntos son los valores anuales, los asteriscos representan el promedio anual de BQ y las cruces el promedio anual de NBQ.

La Figura 44 muestra la curva del modelo para la cobertura de bosques ($\alpha = 4.30$), la cual sigue una tendencia potencial a diferencia de la curva presentada en la Figura 43 que presenta una tendencia exponencial y además los valores anuales se ajustan bien a la curva. Por otro lado, la Figura 45 muestra la curva para la cobertura NBQ ($\alpha = 25.90$) la cual tiene una forma contraria a curva de la cobertura de BQ (no monotónica), siendo un resultado adverso a lo reportado por Zhang & Chiew (2012), en su trabajo de investigación, donde las curvas de las coberturas vegetales siguen una misma forma y tendencia.

La cobertura NBQ ocupa el ~77% de la región andina, siendo una zona compleja de estimar la precipitación a través de satélite, en especial al norte de la CAA (SRG) región

donde se registra mayor precipitación (Figura 12C), debido a la fuerte nubosidad presente en la zona, SRG (356 198 km²) representa aproximadamente el 49% de la superficie de TAM (726 400 km²), registra el CQNBQ más alto (0.38) y ejerce una influencia en TAM que también muestra un CQNBQ elevado (0.31), ver Cuadro 11. Asociando los resultados del IA (> 1.40) y el alto coeficiente de escorrentía de SRG y TAM se deduce una subestimación de precipitación en la zona norte andina.

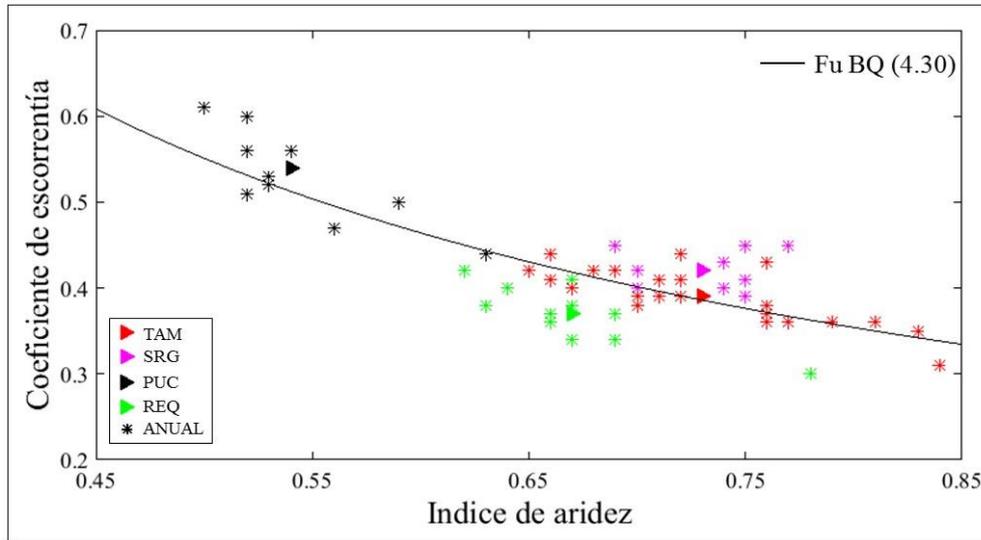


Figura 44. Coeficiente de escorrentía de boque (CQBQ) frente el índice de aridez (IABQ), para el modelo Fu 2-p en la CAA. Los triángulos representan el promedio, asteriscos los valores anuales. La línea color negro representa la curva de Fu 2-p para BQ.

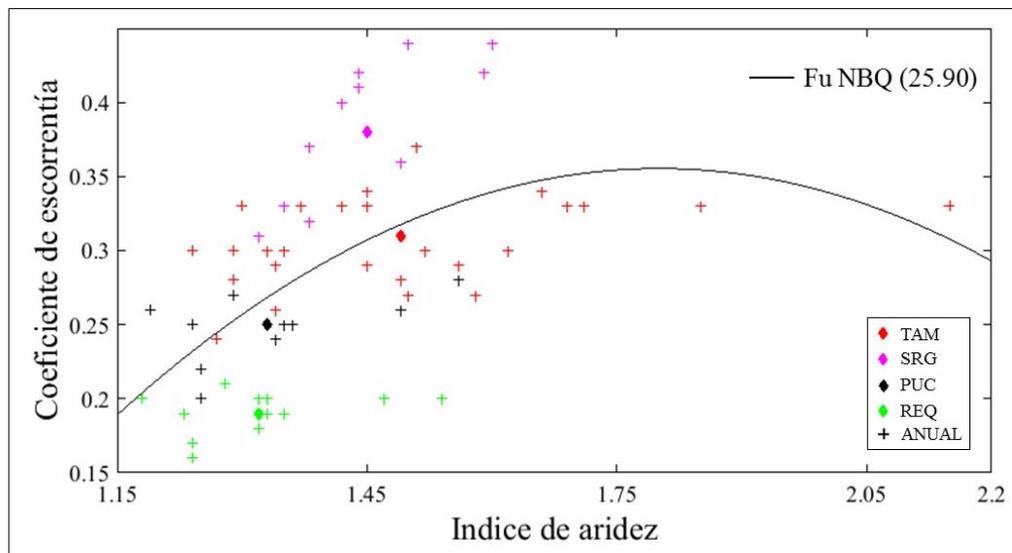


Figura 45. Coeficiente de escorrentía de no boque (CQNBQ) frente el índice de aridez (IANBQ), para el modelo Fu 2-p en la CAA. Los triángulos representan el promedio anual, cruces los valores anuales. La línea color negro representa la curva de Fu 2-p para NBQ.

Cuadro 11. Precipitación media anual (PMA), escorrentía media anual (QMA), índice de aridez (IA), coeficiente de escorrentía (CQ), en CAA para las coberturas de BQ y NBQ para el modelo Fu 2-p, con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$.

Estación	PMA (mm)		QMA SIM (mm)		IA		CQ	
	BQ	NBQ	BQ	NBQ	BQ	NBQ	BQ	NBQ
SRG	2406.3	1134.1	1010.9	431.1	0.73	1.41	0.42	0.38
PUC	2104.6	949.8	1130.0	237.5	0.54	1.33	0.54	0.25
REQ	2386.9	1324.5	890.1	253.1	0.67	1.32	0.37	0.19
TAM	2267.9	1092.1	896.8	331.5	0.73	1.49	0.39	0.31

4.5.8. Distribución espacial de la escorrentía media anual

La Figura 46 presenta la distribución espacial del escurrimiento anual estimado con el modelo Budyko y las dos versiones de Fu en la cuenca TAM para el periodo 1985-2010, los tres modelos se presentan un fuerte escurrimiento al norte (> 2500 mm) y dos focos de alto escurrimiento al sur (> 2700 mm).

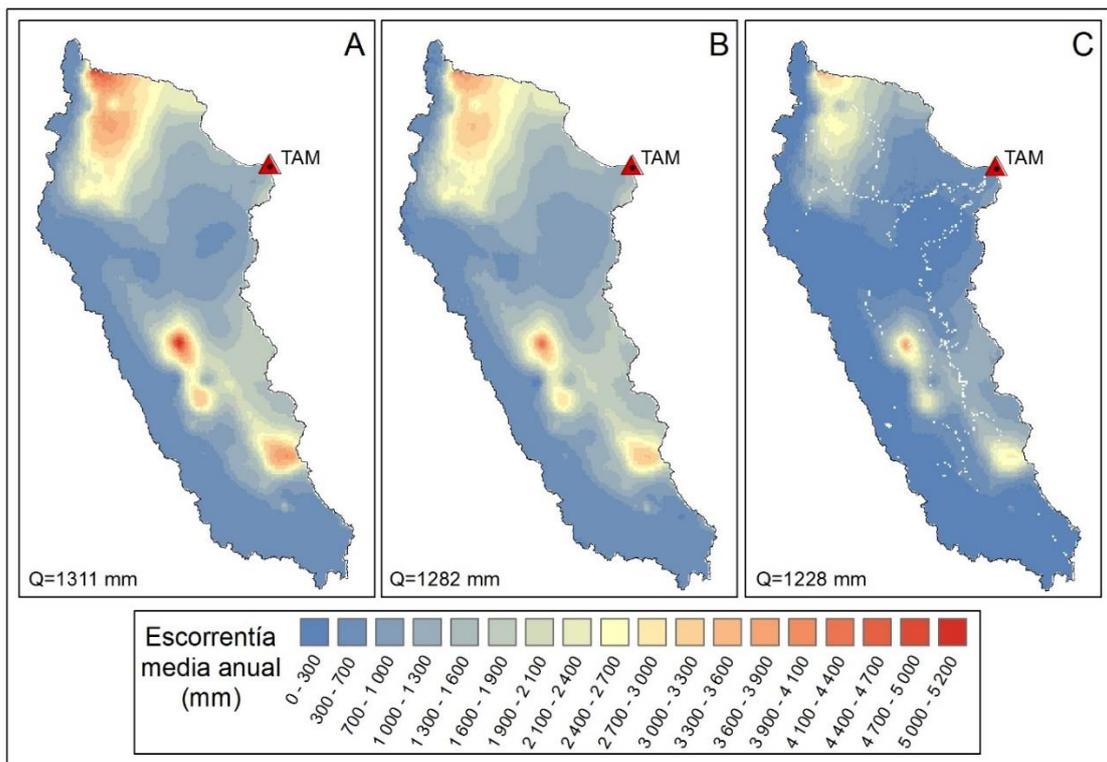


Figura 46. Distribución espacial de la escorrentía media anual simulada en la CAA para periodo 1985-2010. A. Budyko; B. Fu 1-p ($\alpha = 1.31$); C. Fu 2-p ($\alpha_{BQ} = 4.30$; $\alpha_{NBQ} = 25.9$).

Budyko (Figura 46A) y Fu 1-p (Figura 46B) presentan un patrón espacial muy similar, el menor escurrimiento se produce en el centro-sur de la parte alta de la cordillera de los andes (~250 mm y ~600 mm), pero con una sobrestimación en Budyko. El modelo Fu 2-p (Figura 46 C) presenta pixeles en blanco correspondiente a los cuerpos de agua (ríos y lagos), en su patrón espacial muestra una subestimación del QMA, la mayor subestimación se presenta en zona oeste de CAA aproximadamente por arriba de los 1 400 msnm (0 y ~200 mm), el QMA en la zona centro-este se encuentra entre ~60 mm y ~300 mm. Por debajo de los 500 msnm existe una distribución más heterogénea y un fuerte gradiente de escurrimiento tanto desde el norte y sur de la cuenca hacia la estación de descarga TAM.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones serán abordadas según los objetivos planteados:

Objetivo general: Modelizar la escorrentía media anual de la cuenca andina amazónica incorporando los tipos de vegetación en el modelo de Budyko, utilizando información de satélite tanto para precipitación (CHIRPS), evapotranspiración (CRU) y cobertura vegetal (USGS).

En la presente investigación se estimó la escorrentía media anual (QMA) de la CAA utilizando como datos de entrada la precipitación estimada del producto CHIRPS ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$), la evapotranspiración potencial del CRU ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$); la cobertura vegetal de la USGS ($\sim 1\text{km} \times 1\text{km}$), la información observada de caudales para calibrar los modelos se obtuvo del observatorio ORE-HYBAM, las estaciones de la zona de estudio fueron: TAM (1985-2010), BOR (1992-2010), CHA (2000-2010), SRG (2000-2010), PUC (2000-2010) y REQ (1999-2010).

Realizadas las pruebas de bondad de ajuste (Nash, RMSE) a la estimación de la QMA en la CAA utilizando el modelo Budyko y las dos versiones de Fu (1-p y 2-p) derivadas de la ecuación universal de Budyko, se concluye que existe una mayor eficiencia utilizando Fu 1-p, resaltándose que para la evaluación de los resultados se utilizó solamente SRG, PUC, REQ y TAM, cuencas con una superficie mayor a los $250\,000\text{km}^2$. La curva que se ajusta del coeficiente de escorrentía (CQ) frente el índice de aridez (IA) para Fu 1-p es similar al modelo Budyko, destacándose la notable robustez de la ecuación universal de Budyko (no paramétrica).

Fu 2-p que incluye la cobertura vegetal a través del parámetro α , presenta la menor eficiencia, pero mejora la estimación de la QMA en la zona de NBQ, esquematizando que el menor escurrimiento se genera en NBQ, incongruencia que se presentó en los dos modelos

anteriores. Se destaca la importancia de representar la información sobre el plano adimensional del CQ y el IA, permitiendo evaluar la consistencia de los resultados y la información de entrada.

Objetivo específico 1: Estimar la escorrentía de la cuenca andina amazónica aplicando el modelo no paramétrico Budyko, el paramétrico Fu y el conceptual GR1A.

En primera instancia se estimó la escorrentía en cada cuenca y a escala anual. El modelo Budyko presentó un bajo coeficiente de determinación ($R^2 < 0.42$) en BOR y CHA, con la información de entrada los resultados se subestimaron, considerando el R^2 se implementó un factor (x) de ajuste para evaluar la eficiencia del modelo, llegando alcanzar un Nash = 76.23% y RMSE = 92.75, teniendo mejores resultados en PUC, SRG y TAM donde sus valores con los observados varían entre ~4 mm y ~19 mm, mientras en REQ su diferencia es aproximadamente 158 mm.

Con el modelo Fu 1-p se obtuvo un valor del parámetro α característico para las seis cuencas, evaluado y optimizado a escala anual. La QMA obtenida como el promedio de los valores anuales simulados, se ajustan de forma óptima con los observados ($R^2 = 0.99$), teniendo una mayor eficiencia en SRG (42.71%), REQ (50.06%) y PUC (68.74%). Estimando el CQ y el IA se presentó sobre un plano adimensional, donde los resultados obtenidos en BOR y CHA se descartaron por presentar un $IA > 1.2$ (región semi-árida) y el $CQ > 1$, presentándose inconsistencia en el IA, siendo la característica de la CAA ser húmeda, deduciéndose que la región noroeste de la zona de estudio existe una subestimación de la precipitación estimada por el producto CHIRPS. Con la finalidad de caracterizar la curva del modelo se optimizó el α para las cuencas SRG, PUC, REQ y TAM, obteniéndose un Nash = 80.42% y un RMSE = 84.20 mm y se determinó un $\alpha = 1.31$, donde se sobrestima la QMA en REQ y las otras cuencas se subestima. Con el modelo Fu 1-p se concluye el parámetro α representa la parte climática que influye en el balance hídrico en cuencas superiores a los 69 000 km²

El modelo conceptual GR1A es a paso anual, se realizó la calibración y optimización del parámetro X, CHA se descartó por presentar valores negativos de Nash, presentó un

comportamiento similar a Fu 1-p simulado a paso anual, presentando una mejor eficiencia en SRG (40.51%), REQ (51.08%) y PUC (69.10%), la QMA calculada a partir de la escorrentía anual simulada se ajustan de manera eficiente ($R^2 = 0.99$) con la QMA observada, presentando un RMSE = 3.58 mm. Con valores similares de X en SRG, PUC y TAM (0.30, 0.31 y 0.33, respectivamente) se realizó una simulación para homogenizar el parámetro en las tres cuencas y se mantuvo el mismo coeficiente de determinación, pero el RMSE se incrementó (11.07 mm). Los resultados obtenidos con el GR1A son parecidos a Fu 1-p, pero se debe destacar que el modelo Fu 1-p, al igual que Budyko, estima la QMA directamente utilizando como data de entrada la precipitación media anual y la evapotranspiración media anual, mientras el GR1A primero estima a paso anual y posteriormente se calcula la QMA.

Objetivo específico 2: Aplicar el modelo de dos parámetros de Fu al área de estudio, distinguiendo entre cubierta vegetal de bosques y no bosques, con un valor de α representando todo el grillado de bosques y otro valor de α para el grillado de no bosques.

El modelo Fu se puede convertir en un modelo multi-parámetros, cuando se introducen diferentes valores de α para representar diferentes tipos de cobertura vegetal. En primera instancia se estimó la escorrentía en cada cuenca y a escala anual. BOR y CHA se descartaron por presentar valores negativos de Nash, la calibración del parámetro α tanto para BQ y NBQ se efectuó de manera simultánea, obteniéndose la escorrentía estimada en cada cobertura y la suma de las dos se evaluó con el dato observado a través del coeficiente de Nash. Cada cuenca se caracterizó por sus parámetros (α_{BQ} y α_{NBQ}), en PUC y REQ sus valores fueron muy similares, pero en SRG y TAM presentaron valores opuestos, α_{BQ} de SRG > TAM y α_{NBQ} en SRG < TAM. La mayor eficiencia se registró en SRG (57.69%).

Con la finalidad de caracterizar la curva del modelo se optimizó el α_{BQ} y α_{NBQ} para SRG, PUC, REQ y TAM, obteniéndose un Nash = 60% y un RMSE = 120.33 mm y se determinó un $\alpha_{BQ} = 4.3$ y $\alpha_{NBQ} = 25.9$, donde se sobrestima en PUC, REQ subestima en SRG, TAM. La curva para QMA se ajusta de forma similar a Budyko y Fu 1-p (ajusta de forma explicativa). La curva que se ajusta del coeficiente de escorrentía (CQ) frente el índice de aridez (IA) para la zona de BQ sigue la misma forma y tendencia que las curvas de los

modelos anteriores (ajustada para valores promedios anuales). Por otro lado, la curva ajustada para el CQ y el IA para la zona de NBQ presenta una forma distinta (no monotónica). Considerando el IA de SRG y TAM (1.41 y 1.49, respectivamente) que son mayores a los presentados en PUC y REQ (1.33 y 1.32, respectivamente) registran valores de CQ muy elevados, tomando en cuenta que a mayor IA menor CQ. Presentándose un caso similar al registrado por BOR y CHA pero a escala promedio anual. El mayor CQ se muestra en SRG, cuenca que ocupa ~49% de la superficie de TAM, influyendo en generar valores altos de CQ, llegándose a concluir que el región noroeste de la zona de estudio existe una subestimación de la precipitación estimada por el producto CHIRPS.

VI. PERSPECTIVAS

Se presentan a continuación algunas perspectivas para futuras investigaciones y desarrollo de estudios afines:

- Se considera necesario realizar la estimación de la escurrimiento media anual en cuencas de menor superficie, menores a 1 000 km² (Donohue et al.,2007), con los resultados obtenidos se puede considerar la cuenca del río Marañón (estación San Regis) como una zona de estudio representando el norte de la CAA. Por otro lado, la cuenca del río Ucayali (estación Pucallpa) como otra zona de estudio representando el sur de la CAA.
- En un próximo trabajo será mejor trabajar con información in situ, especialmente por la deficiente estimación de los productos de satélite en la región andina de la CAA, así, los resultados obtenidos se podrán discutir y concluir con mayor precisión.
- Cuando se realice futuros trabajos relacionados a la incorporación de la cobertura vegetal para la estimación de la escurrimiento media anual y se obtengan resultados aceptables, debe plantearse un análisis de sensibilidad, por ejemplo relacionado a un aumento o disminución de la precipitación. Con los parámetros estimados se podría plantear escenarios de que sucedería si se reduce la cobertura de bosque.
- Se puede implementar el modelo GR1A para la estimación de la escurrimiento media anual con incorporación de la cobertura vegetal, conociendo que el parámetro X se encuentra multiplicando la evapotranspiración potencial, bajo el concepto que la ETP está regulada por la vegetación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andréassian, V. 2004. Waters and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, Vol. 291, pp. 1-27.
- Arora, V. 2002. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Reviews of Geophysics* , Vol. 40, pp. 3-1-3-26.
- Berry, S. L., Farquhar, G. D., & Roderick, M. L. 2006. Co-evolution of Climate, Soil and Vegetation. En *Encyclopedia of Hydrological Science* (págs. pp. 1-16). New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Ltda.
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *Technical Paper no. 96, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC.*
- Bookhagen, B., & Strecker, M. R. 2008. Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, pp. 6403-6408.
- Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal Hydrology*, Vol. 55, pp. 3-23.
- Brutsaert, W., & Stricker, H. 1979. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resources Research*, Vol. 15, pp. 443-450.
- Budyko, M. I. 1958. The Heat Balance of the Earth's Surface. US Department of Commerce, Washington. pp. 259.

- Budyko, M. I. 1974. *Climate and life*. San Diego, California. pp. 508. Calder, I. R. 1998. Water-resource and land-use issues. *International Water Management Institute*, pp. 1-24.
- Chen, X., Alimohammadi, N., & Wang, D. 2013. Modeling interannual variability of seasonal evaporation and storage change based on the extended Budyko framework. *Water Resources Research*, Vol. 49, pp. 6067-6078.
- Cheng, L., Xu, Z., Wang, D., & Cai, X. 2011. Assessing interannual variability of evapotranspiration at the catchment scale using satellite-based evapotranspiration data sets. *Water Resource Research*, Vol. 47, pp. 1-11.
- Choudhury, B. J. 1999. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. *Journal of Hydrology*, Vol. 216, pp. 99-110.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. 1994. *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Coe, M. T., Costa, M. H., Botta, A., & Birkett, C. 2002. Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical research*, Vol. 107, 20: pp. 8044-8060.
- Collischonn, B., Collischonn, W., & Morelli, C. E. 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal Hydrology*, Vol. 360, pp. 207-216.
- De Almeida, C., Vörösmarty, C. J., Hurtt, G. C., Marengo, J. A., Dingman, S. L., & Keim, B. D. 2007. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology*, 27: pp 633-647.
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & Mcvicar, T. R. 2007. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 983-995.

- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. 1992. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 1015-1031.
- Eltahir, E. B., & Brass, R. L. 1994. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 120, pp. 861-880.
- Espinoza, J. C., Chavez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K., & Lavado, W. 2015. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resources Research*, Vol. 51, pp. 3459-3475.
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., . . . Pombosa, R. 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29: pp. 1574-1594.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. 2011. *Diseño Hidrológico* (2da ed.). Zaragoza: Edición digital, WASA-GN Water Assessment & Advisory Global Network. Obtenido de <http://www.ina.gov.ar/>
- Fearnside, P. M. 1993. Deforestation in Brazilian Amazonia: the effects of population and land tenure. *Journal Ambio* , Vol. 22, pp. 537-545.
- Foley, J., Costa, M., Deliere, C., & Ramankutty, N. 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol. 1, pp. 38-44.
- Franken, W., & Leopoldo, P. 1984. Hydrology of catchment areas in Central-Amazonian forest streams. En *The Amazon. Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. Berlin: Springer Science+Business Media B.V. Vol. 56, pp. 501-519
- Fu, B. P. 1981. On the calculation of the evaporation from land surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, Vol 5, pp. 23-31.

- Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsell, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., Romero, B. E., Husak, G. J., Michaelsen, J. C., & Verdin, A. P. 2014. A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *U. S. Geological Survey Data Series* 832, 4p.
- Funk, C., Peterson, P., Landsell, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shraddhanand, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. 2015. The climate hazard infrared precipitation with stations-a new environmental record monitoring extremes. *Climate Hazards Group*, 20p
- Gerrits, A. M., Savenije, H. H., Veling, E. J., & Pfister, L. 2009. Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model. *Water Resources Research*, Vol. 45, pp. 4403-4417.
- Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W., & Sitch, S. 2004. Terrestrial vegetation and water balance-hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal Hydrology*, Vol. 286, pp. 249-270.
- Granger, R. J. 1989. An examination of the concept of potential evaporation. *Journal of Hydrology*, Vol. 111, pp. 9-19.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 3, pp. 225-230.
- Hoorn, C., Wesselingh, F. P., Steege, H., Bermudez, M. A., Mora, A., Sevink, J., . . . Stadler, T. 2010. Amazonia through Time: Andean Uplift, Climate Change, Landscape Evolution, and Biodiversity. *Journal Science*, Vol. 330, No 6006, pp. 927-931.
- Insel, N., Poulsen, C. J., & Ehlers, T. A. 2010. Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation. *Climate Dynamics*, Vol. 35, pp. 1477-1492.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE*, LR (4), pp. 15-41.

- Kay, A. L., & Davies, H. N. 2008. Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts. *Journal of Hydrology*, Vol. 358, pp. 221-239.
- Kremer, R. G., Hunt, E. R., Running, S. W., & Coughlan, J. C. 1996. Simulating vegetational and hydrologic responses to natural climatic variation and GCM-predicted climate change in a semi-arid ecosystem in Washington, U.S.A. *Journal of Arid Environments*, 33: pp. 23-38.
- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., & Guyot, J. L. 2007. Hetrogeneous distribution of rainfall and discharge regimes in the ecuadorian Amazon basin. *Journal of hydrometeorology*, Vol. 8, pp. 1364-1381.
- Lavado, W., Labat, D., Guyot, J. L., Ronchail, J., & Ordoñez, J. J. 2009. Validación de lluvia utilizando TRMM en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico. *Revista Peruana Geo-Atmosférica*, pp. 11-29.
- Lavado, W., Labat, D., Guyot, J. L., & Ardoin-Bardin, S. 2011. Assement of climate change on the hydrology of the Peruvian Amazon-Andes basin. *Hydrology Process*, Vol. 25, pp. 3721-3734.
- Liebmann, B., & Marengo, J. A. 2001. Interannual Variability of the rainy Season and Rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *Journal Climate*, Vol. 14, pp. 4308-4318.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. 1977. *Hidrología para ingenieros*. México: McGraw-Hill.
- Lloyd, C. R., Gash, J. H., Shuttleworth, W. J., & Marques, A. O. 1988. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazon rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 43, pp. 277-294.
- Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, U., Yang, L., & Merchant, J. W. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP Discover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, pp. 1303-1330.

- Malhi, Y., Pegoraro, E., Nobre, A. D., Pereira, M. G., Grace, J., Culf, A. D., & Clement, R. 2002. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest . *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, pp. 8061-8078.
- Marengo, J. A. 2004. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin . *Theoretical and Applied Climatology*, 78: pp. 79-96.
- Marengo, J. A. 2005. The characteristics and variability of the atmospheric water balance in the Amazon basin: Spatial and temporal variability. *Climate Dynamics*, 24: pp. 11-22.
- Marengo, J. A. 2006. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol. 21, pp. 1-19.
- Milly, P. C. 1994. Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, Vol. 30, pp. 2143-2156.
- Milly, P. C., & Dunne, K. A. 2002. Macroscale water fluxes 1. Quantifying errors in the estimation of basin mean precipitation. *Water Resources Research*, Vol. 38, pp.1205-1218.
- Montaldo, N., Rondena , R., Albertson, J. D., & Mancini, M. 2005. Parsimonious modeling of vegetation dynamics for ecohydrologic studies of water-limited ecosystems. *Water Resources Research*, Vol. 41, pp. 10416-10431.
- Molion, L. C. B. 1975. A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazon basin with considerations of deforestation effects.Ph. D. thesis University of Wisconsin, Madison.
- Mouelhi, S. 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. *PhD Thesis*. ENGREF, Cemagref Antony.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. 2006a. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: The Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology*, Vol. 328, pp. 283-296.

- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Nobre, C. A., Sellers, P. J., & Shukla, J. 1991. Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *Journal of Climate*, Vol. 4, pp. 957-988.
- Observatorio ORE-HYBAM*. (20/03/2014). Obtenido de <http://www.ore-hybam.org/>
- Oudin, L., Andréassian, V., Lerat, J., & Michel, C. 2008. Has land cover a significant impact on mean annual streamflow? An international assessment using 1508 catchment. *Journal of Hydrology*, Vol. 357, pp. 303-316.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, Vol. 303, pp. 290-306.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 120-145.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, Vol. 242, pp. 275-301.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. 2007. *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*. Paris: Rapport de Cemagref UR Hydrosystèmes et Bioprocédés.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. 2010. A Set of Hydrological Models. En *Mathematical Models* (Vol. 2). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Priestley, C. H., & Taylor, R. J. 1972. On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.

- Roderick, M. L., & Farquhar, G. D. 2011. A simple framework for relating variations in climatic conditions and catchment properties. *Water Resources Research* , Vol. 47, pp. 1-11.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Laio, F., & Ridolfi, L. 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress I. Scope and general outline . *Advances in Water Resources*, Vol. 24, pp. 695-705.
- Sivapalan, M., Yaeger, M. A., Harman, C. J., Xu, X., & Troch, P. A. 2011. Functional model of water balance variability at the catchment scale: 1. Evidence of hydrologic similarity and space-time symmetry. *Water Resource Research*, Vol. 47, pp. 2522-2539.
- Thom, A. S., & Oliver, H. R. 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 103, pp. 345-357.
- Thornwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, Vol. 38, pp. 55-94.
- Vaze, J., Chiew, F. Z., Perraud, J.-M., Viney, N., Post, D., Teng, J., . . . Goswami, M. 2010. Rainfall-runoff modelling across southeast Australia: Datasets, models and results. *Australian Journal of Water Resources*, Vol. 14, pp. 101-116.
- Yang, H., Yang, D., Lei, Z., & Sun, F. 2008. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation. *Water Resource Research*, Vol. 44, pp. 34010-3418.
- Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. 1999. *Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance*. Australia: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.
- Zhang, L., Hickel, K., & Dawes, W. R. 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, Vol. 40, pp. 1-14.

- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y., & Shao, Q. 2008. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework-Model development and testing. *Journal of Hydrology*, Vol. 306, pp. 117-131.
- Zhang, L.; Dawes, W.R.; Walker, G.R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resource Research*, Vol. 37, No 3, pp. 701-708.
- Zhang, Y., & Chiew, F. 2012. Estimation of mean annual runoff across southeast Australia by incorporating vegetation types into Budyko framework. *Australian Journal of Water Resources*, Vol. 15, No 2, pp. 1-11.
- Zeng, N. 1999. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. *Journal Climate*, Vol. 104, pp. 9097-9106

ANEXOS

ANEXO 1. Información de caudales obtenidos del observatorio ORE – HYBAM (Hidrogeodinámica de la Cuenca Amazónica).

Años	Estaciones de descarga (m ³ /s)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	26872.50	-	-	-	-	-
1986	32867.50	-	-	-	-	-
1987	33010.00	-	-	-	-	-
1988	27423.33	-	-	-	-	-
1989	32390.00	-	-	-	-	-
1990	30160.83	-	-	-	-	-
1991	28977.50	-	-	-	-	-
1992	27380.00	4173.58	-	-	-	-
1993	35400.83	5514.58	-	-	-	-
1994	34073.33	5635.92	-	-	-	-
1995	24736.67	3916.58	-	-	-	-
1996	28517.50	4167.92	-	-	-	-
1997	28604.17	4672.83	-	-	-	-
1998	28739.17	4983.42	-	-	-	-
1999	31983.33	5247.75	-	-	-	13249.92
2000	30133.33	5411.42	2773.33	18114.17	10353.08	12857.50
2001	29410.00	5174.67	2915.08	18287.50	11191.75	12036.83
2002	31138.33	5871.67	3218.50	18776.17	11248.58	12436.42
2003	31110.00	4955.00	3232.50	16916.67	10642.75	12625.42
2004	28708.33	5176.75	2768.50	16329.17	8736.42	11461.92
2005	25634.17	5099.83	2675.43	14924.67	7541.33	10232.50
2006	27954.17	4404.42	3036.67	16629.75	10736.00	11836.33
2007	28960.00	5017.75	3073.17	16141.50	10269.25	12404.33
2008	28830.83	5008.08	3237.50	17510.83	9716.00	11554.00
2009	31804.17	5566.50	3329.33	19793.64	9795.67	11571.75
2010	24209.08	3852.58	2624.87	14511.83	9068.18	9321.83

ANEXO 2. Escorrentía anual (mm/año) transformada a partir de los caudales observados

Años	Escorrentía anual observada (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1174.08	-	-	-	-	-
1986	1436.01	-	-	-	-	-
1987	1442.23	-	-	-	-	-
1988	1198.15	-	-	-	-	-
1989	1415.14	-	-	-	-	-
1990	1317.75	-	-	-	-	-
1991	1266.05	-	-	-	-	-
1992	1196.25	1144.67	-	-	-	-
1993	1546.69	1512.46	-	-	-	-
1994	1488.69	1545.74	-	-	-	-
1995	1080.76	1074.19	-	-	-	-
1996	1245.95	1143.12	-	-	-	-
1997	1249.74	1281.60	-	-	-	-
1998	1255.64	1366.78	-	-	-	-
1999	1397.38	1439.28	-	-	-	1188.61
2000	1316.55	1484.17	1274.47	1603.74	1253.14	1153.41
2001	1284.95	1419.24	1339.60	1619.09	1354.65	1079.79
2002	1360.46	1610.40	1479.04	1662.35	1361.53	1115.64
2003	1359.22	1358.99	1485.47	1497.72	1288.20	1132.59
2004	1254.29	1419.81	1272.24	1445.71	1057.46	1028.22
2005	1119.98	1398.71	1229.47	1321.36	912.81	917.93
2006	1221.34	1207.98	1395.48	1472.32	1299.49	1061.80
2007	1265.29	1376.20	1412.25	1429.09	1242.99	1112.76
2008	1259.64	1373.55	1487.77	1550.32	1176.03	1036.48
2009	1389.55	1526.70	1529.97	1752.43	1185.67	1038.07
2010	1057.71	1056.63	1206.24	1284.81	1097.62	836.23
Q media anual (mm)	1292.29	1354.75	1373.82	1512.63	1202.69	1058.46

ANEXO 3. Precipitación anual promedio obtenida del producto CHIRPS (0.05° x 0.05°), para la cuenca andina amazónica.

Años	Precipitación anual promedio (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1552.90	-	-	-	-	-
1986	1868.82	-	-	-	-	-
1987	1685.96	-	-	-	-	-
1988	1636.73	-	-	-	-	-
1989	1873.74	-	-	-	-	-
1990	1798.39	-	-	-	-	-
1991	1604.12	-	-	-	-	-
1992	1542.57	973.31	-	-	-	-
1993	2032.77	1511.44	-	-	-	-
1994	1870.76	1370.28	-	-	-	-
1995	1699.39	1165.31	-	-	-	-
1996	1832.96	1308.96	-	-	-	-
1997	1712.01	1291.02	-	-	-	-
1998	1756.81	1301.10	-	-	-	-
1999	2208.07	1738.52	-	-	-	1952.79
2000	1818.00	1315.21	1220.84	1975.69	1457.09	1622.41
2001	1663.43	977.59	1081.20	1720.28	1443.65	1562.83
2002	1715.00	1171.66	1102.43	1808.38	1463.86	1570.03
2003	1789.18	1044.75	1197.99	1924.56	1369.98	1585.53
2004	1741.49	959.36	1099.56	1768.51	1467.94	1644.75
2005	1626.90	1043.28	1067.27	1757.16	1276.37	1428.84
2006	1852.73	1133.86	1315.42	1876.41	1645.65	1767.00
2007	1768.76	1001.38	1230.19	1822.92	1501.36	1655.85
2008	1862.04	1358.22	1404.64	2017.92	1445.92	1663.48
2009	1831.66	1254.20	1203.69	1981.52	1448.14	1634.81
2010	1676.06	1305.09	1211.52	1871.56	1338.37	1458.99
P promedio anual (mm)	1770.05	1222.34	1194.07	1865.90	1441.67	1628.94

ANEXO 4. Evapotranspiración potencial anual promedio obtenida de la Unidad de Investigación del Clima (CRU, 0.5° x 0.5°), para la cuenca andina amazónica.

Años	Evapotranspiración potencial anual promedio (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1381.79	-	-	-	-	-
1986	1384.40	-	-	-	-	-
1987	1398.94	-	-	-	-	-
1988	1342.87	-	-	-	-	-
1989	1356.39	-	-	-	-	-
1990	1361.01	-	-	-	-	-
1991	1354.66	-	-	-	-	-
1992	1359.30	1685.66	-	-	-	-
1993	1381.56	1727.57	-	-	-	-
1994	1341.59	1629.56	-	-	-	-
1995	1358.62	1628.46	-	-	-	-
1996	1357.71	1640.05	-	-	-	-
1997	1375.26	1749.58	-	-	-	-
1998	1377.35	1666.25	-	-	-	-
1999	1370.18	1630.47	-	-	-	1224.11
2000	1352.59	1665.71	1512.75	1533.65	1146.62	1171.56
2001	1358.47	1682.60	1558.00	1528.32	1167.09	1188.62
2002	1337.56	1675.09	1575.63	1520.28	1123.26	1155.39
2003	1331.95	1631.15	1531.57	1491.59	1149.93	1173.74
2004	1332.16	1660.39	1549.15	1512.88	1111.81	1151.07
2005	1320.32	1605.40	1530.32	1473.84	1126.25	1164.98
2006	1339.97	1670.24	1573.87	1509.65	1143.26	1170.74
2007	1322.27	1628.51	1513.45	1479.78	1139.61	1164.49
2008	1346.88	1686.23	1578.00	1519.42	1149.33	1174.48
2009	1361.82	1702.52	1548.01	1558.21	1132.23	1164.51
2010	1343.59	1631.89	1486.84	1518.86	1134.43	1167.73
ETP promedio anual (mm)	1355.74	1663.02	1541.60	1513.32	1138.53	1172.62

ANEXO 5. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Budyko, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS con el parámetro X (1.338) agregado en la ecuación (2).

Años	Escorrentía anual (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1250.40	-	-	-	-	-
1986	1393.78	-	-	-	-	-
1987	1198.27	-	-	-	-	-
1988	1084.64	-	-	-	-	-
1989	1334.65	-	-	-	-	-
1990	1289.25	-	-	-	-	-
1991	1129.79	-	-	-	-	-
1992	1081.51	811.215	-	-	-	-
1993	1477.47	1236.34	-	-	-	-
1994	1396.63	1134.74	-	-	-	-
1995	1192.07	985.072	-	-	-	-
1996	1314.60	1081.61	-	-	-	-
1997	1214.64	1056.93	-	-	-	-
1998	1285.23	1236.13	-	-	-	-
1999	1601.49	1509.32	-	-	-	1394.02
2000	1377.24	1287.83	971.44	1535.59	1234.12	1217.58
2001	1369.86	1171.33	1003.36	1485.63	1293.75	1254.89
2002	1400.20	1313.58	894.79	1522.94	1330.92	1274.40
2003	1351.38	1112.69	943.78	1475.68	1201.36	1223.20
2004	1336.52	1106.69	869.71	1447.80	1201.45	1215.55
2005	1208.94	1180.97	910.52	1433.90	978.81	980.85
2006	1348.35	1178.77	1034.54	1460.73	1273.78	1235.11
2007	1370.28	1167.34	1008.59	1520.72	1234.69	1223.57
2008	1342.16	1275.9	1022.63	1537.73	1114.33	1148.20
2009	1459.02	1262.68	1085.95	1587.50	1315.81	1314.47
2010	1281.78	1103.99	1001.24	1434.72	1099.02	1121.46
Q promedio anual (mm)	1311.16	1169.11	976.96	1494.81	1207.09	1216.94

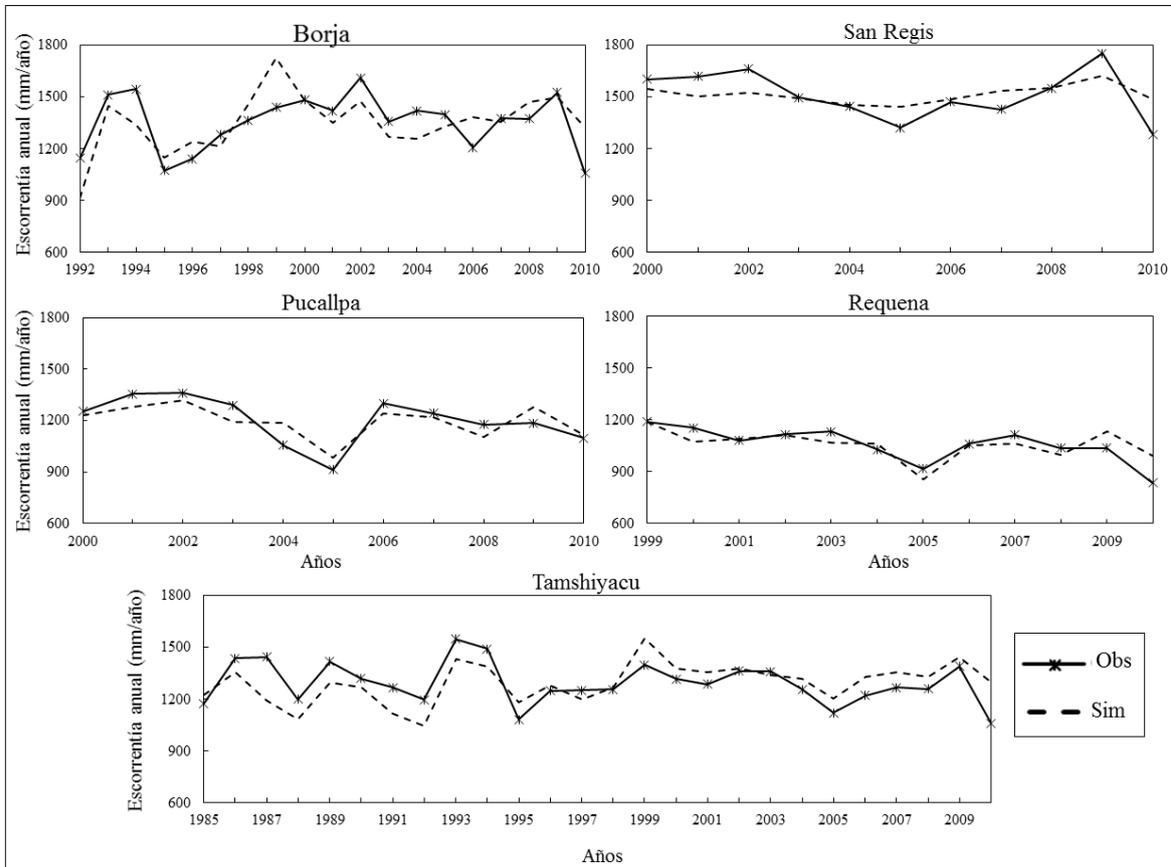
ANEXO 6. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 1-parámetro, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α de cada cuenca.

Años	Escorrentía anual (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1228.14	-	-	-	-	-
1986	1362.28	-	-	-	-	-
1987	1192.86	-	-	-	-	-
1988	1091.98	-	-	-	-	-
1989	1307.91	-	-	-	-	-
1990	1267.75	-	-	-	-	-
1991	1118.94	-	-	-	-	-
1992	1058.45	928.01	-	-	-	-
1993	1451.63	1468.72	-	-	-	-
1994	1369.84	1328.11	-	-	-	-
1995	1178.03	1149.99	-	-	-	-
1996	1289.13	1250.75	-	-	-	-
1997	1200.34	1229.74	-	-	-	-
1998	1277.09	1457.41	-	-	-	-
1999	1545.64	1706.48	-	-	-	1195.38
2000	1355.33	1461.55	1360.30	1549.15	1236.96	1062.72
2001	1347.60	1349.43	1409.42	1503.27	1286.88	1092.54
2002	1368.70	1474.10	1273.87	1527.32	1314.19	1108.87
2003	1327.43	1264.46	1335.61	1487.20	1197.78	1065.30
2004	1310.57	1267.18	1235.48	1458.81	1195.26	1056.66
2005	1198.19	1333.79	1301.21	1447.11	995.52	856.54
2006	1331.70	1384.13	1447.30	1491.48	1266.61	1073.78
2007	1343.75	1351.16	1410.62	1533.07	1223.26	1061.27
2008	1321.92	1467.71	1436.38	1554.76	1115.15	996.92
2009	1433.13	1487.62	1501.64	1618.50	1293.10	1137.78
2010	1283.13	1313.97	1389.90	1478.18	1118.24	986.55
Q promedio anual (mm)	1290.83	1351.28	1372.88	1513.53	1203.90	1057.86

ANEXO 7. Resultados de la escorrentía anual con el modelo GR1A, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro X de cada cuenca.

Años	Escorrentía anual (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1226.72	-	-	-	-	-
1986	1356.53	-	-	-	-	-
1987	1193.26	-	-	-	-	-
1988	1082.01	-	-	-	-	-
1989	1293.76	-	-	-	-	-
1990	1268.89	-	-	-	-	-
1991	1115.60	-	-	-	-	-
1992	1042.52	917.03	-	-	-	-
1993	1432.39	1448.51	-	-	-	-
1994	1387.74	1339.49	-	-	-	-
1995	1182.36	1147.93	-	-	-	-
1996	1279.40	1240.50	-	-	-	-
1997	1196.18	1215.92	-	-	-	-
1998	1268.51	1457.56	-	-	-	-
1999	1549.62	1726.60	-	-	-	1189.83
2000	1374.90	1480.42	1360.30	1549.49	1228.04	1072.94
2001	1354.32	1351.31	1409.42	1503.40	1279.60	1091.19
2002	1377.44	1476.16	1273.87	1526.25	1315.38	1114.45
2003	1337.23	1268.60	1335.61	1490.68	1194.23	1069.76
2004	1316.88	1259.24	1235.48	1456.08	1188.11	1060.94
2005	1200.78	1331.53	1301.21	1444.72	984.06	856.19
2006	1327.14	1382.96	1447.30	1485.50	1243.37	1053.47
2007	1352.60	1357.50	1410.62	1537.93	1218.81	1063.22
2008	1326.60	1469.85	1436.38	1555.43	1103.21	996.28
2009	1440.09	1497.80	1501.64	1622.21	1280.04	1133.98
2010	1296.85	1325.66	1389.90	1488.26	1114.02	993.05
Q promedio anual (mm)	1291.55	1352.35	1372.88	1514.54	1195.35	1057.94

ANEXO 8. Comparación de la escorrentía anual simulada (línea punteada) con modelo GR1A y la escorrentía anual observada (línea sólida con asteriscos) para cinco estaciones de descarga de la cuenca andino-amazónica



ANEXO 9. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 2-p, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α BQ y α NBQ de cada cuenca.

Años	Escorrentía anual (mm/año)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	1231.05	-	-	-
1986	1385.35	-	-	-
1987	1175.70	-	-	-
1988	987.84	-	-	-
1989	1316.72	-	-	-
1990	1291.49	-	-	-
1991	1131.03	-	-	-
1992	1092.38	-	-	-
1993	1443.06	-	-	-
1994	1374.45	-	-	-
1995	1183.25	-	-	-
1996	1305.40	-	-	-
1997	1159.91	-	-	-
1998	1235.34	-	-	-
1999	1649.17	-	-	1315.40
2000	1347.96	1556.11	1310.69	1026.80
2001	1325.80	1484.24	1393.07	1088.32
2002	1396.36	1579.43	1483.08	1129.68
2003	1363.90	1477.83	1269.41	1074.81
2004	1345.82	1446.04	1294.87	1080.30
2005	1200.57	1428.27	900.19	783.86
2006	1303.20	1478.23	1376.94	1082.32
2007	1372.75	1560.66	1339.24	1095.68
2008	1349.63	1575.97	1135.60	1012.89
2009	1444.14	1641.48	1483.76	1211.42
2010	1222.29	1412.54	1066.49	910.14
Q promedio anual	1293.64	1512.80	1277.58	1067.63

ANEXO 10. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 2-p en la zona de BQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α BQ y α NBQ de cada cuenca.

Años	Escorrentía anual de bosque (mm/año)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	941.45	-	-	-
1986	1100.59	-	-	-
1987	884.57	-	-	-
1988	748.06	-	-	-
1989	1037.26	-	-	-
1990	1001.8	-	-	-
1991	840.97	-	-	-
1992	801.88	-	-	-
1993	1150.49	-	-	-
1994	1089.22	-	-	-
1995	887.22	-	-	-
1996	1011.81	-	-	-
1997	883.26	-	-	-
1998	956.40	-	-	-
1999	1268.15	-	-	1027.93
2000	1049.26	947.13	1138.45	820.69
2001	1042.98	927.48	1181.74	832.73
2002	1064.18	968.80	1250.72	859.84
2003	1053.98	948.09	1096.29	836.97
2004	1034.95	923.85	1115.12	837.89
2005	891.84	880.18	777.41	549.95
2006	1004.51	865.50	1166.77	822.73
2007	1065.88	987.52	1147.01	831.47
2008	1020.80	944.24	991.13	763.96
2009	1138.50	994.47	1274.34	942.51
2010	937.52	827.23	889.72	674.32
Q promedio anual	996.44	928.59	1093.52	816.75

ANEXO 11. Resultados de la escorrentía anual con el modelo Fu 2-p en la zona de NBQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, según el parámetro α_{BQ} y α_{NBQ} de cada cuenca.

Años	Escorrentía anual de no bosque (mm/año)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	289.60	-	-	-
1986	284.77	-	-	-
1987	291.13	-	-	-
1988	239.78	-	-	-
1989	279.46	-	-	-
1990	289.67	-	-	-
1991	290.07	-	-	-
1992	290.51	-	-	-
1993	292.56	-	-	-
1994	285.24	-	-	-
1995	296.03	-	-	-
1996	293.59	-	-	-
1997	276.65	-	-	-
1998	278.94	-	-	-
1999	381.01	-	-	287.47
2000	298.70	608.98	172.35	206.12
2001	282.82	556.76	211.61	255.59
2002	332.18	610.63	233.04	269.85
2003	309.92	529.74	177.38	237.84
2004	310.87	522.19	184.09	242.41
2005	308.72	548.09	131.72	233.91
2006	298.70	612.73	210.41	259.59
2007	306.87	573.14	193.72	264.22
2008	328.83	631.73	147.39	248.93
2009	305.64	647.02	210.91	268.91
2010	284.77	585.31	178.03	235.81
Q promedio anual	297.19	584.21	186.42	250.89

ANEXO 12. Resultados del índice de aridez (ETP/P), estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para las cuencas de la zona de estudio.

Años	Índice de aridez (IA)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1.15	-	-	-	-	-
1986	1.03	-	-	-	-	-
1987	1.16	-	-	-	-	-
1988	1.16	-	-	-	-	-
1989	1.04	-	-	-	-	-
1990	1.09	-	-	-	-	-
1991	1.22	-	-	-	-	-
1992	1.39	2.10	-	-	-	-
1993	0.92	1.28	-	-	-	-
1994	0.97	1.39	-	-	-	-
1995	1.16	1.63	-	-	-	-
1996	1.06	1.56	-	-	-	-
1997	1.13	1.67	-	-	-	-
1998	1.05	1.27	-	-	-	-
1999	0.90	1.12	-	-	-	0.93
2000	0.98	1.39	1.18	1.04	0.94	0.92
2001	0.99	1.46	1.16	1.06	0.94	0.92
2002	0.97	1.39	1.30	1.05	0.90	0.89
2003	1.00	1.58	1.21	1.07	1.01	0.95
2004	1.02	1.57	1.33	1.11	1.00	0.95
2005	1.08	1.46	1.23	1.06	1.17	1.12
2006	0.96	1.33	1.15	1.00	0.94	0.93
2007	0.97	1.39	1.13	1.00	1.00	0.96
2008	1.00	1.32	1.17	0.99	1.10	1.03
2009	0.93	1.28	1.09	0.96	0.95	0.91
2010	0.99	1.38	1.14	1.02	1.02	0.97
IA promedio anual	1.05	1.45	1.19	1.03	1.00	0.96

ANEXO 13. Resultados del índice de aridez (ETP/P), estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.

Años	Índice de aridez de bosque (IABQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	0.76	-	-	-	-	-
1986	0.68	-	-	-	-	-
1987	0.76	-	-	-	-	-
1988	0.84	-	-	-	-	-
1989	0.71	-	-	-	-	-
1990	0.70	-	-	-	-	-
1991	0.77	-	-	-	-	-
1992	0.83	0.94	-	-	-	-
1993	0.66	0.67	-	-	-	-
1994	0.69	0.68	-	-	-	-
1995	0.79	0.79	-	-	-	-
1996	0.72	0.73	-	-	-	-
1997	0.81	0.79	-	-	-	-
1998	0.76	0.65	-	-	-	-
1999	0.65	0.53	-	-	-	0.63
2000	0.72	0.62	1.07	0.75	0.52	0.67
2001	0.72	0.68	1.08	0.75	0.52	0.67
2002	0.72	0.61	1.28	0.77	0.50	0.67
2003	0.67	0.68	1.05	0.70	0.54	0.64
2004	0.71	0.69	1.24	0.76	0.53	0.66
2005	0.76	0.62	1.09	0.74	0.63	0.78
2006	0.72	0.66	1.08	0.74	0.52	0.69
2007	0.68	0.64	1.01	0.69	0.53	0.66
2008	0.70	0.61	1.02	0.71	0.56	0.67
2009	0.66	0.65	1.02	0.70	0.50	0.62
2010	0.72	0.71	1.05	0.75	0.59	0.69
IA promedio anual	0.73	0.68	1.09	0.73	0.54	0.67

ANEXO 14. Resultados del índice de aridez (ETP/P), estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.

Años	Índice de aridez de no bosque (IANBQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1.69	-	-	-	-	-
1986	1.50	-	-	-	-	-
1987	1.71	-	-	-	-	-
1988	1.58	-	-	-	-	-
1989	1.49	-	-	-	-	-
1990	1.62	-	-	-	-	-
1991	1.85	-	-	-	-	-
1992	2.15	2.45	-	-	-	-
1993	1.27	1.45	-	-	-	-
1994	1.34	1.60	-	-	-	-
1995	1.66	1.88	-	-	-	-
1996	1.52	1.80	-	-	-	-
1997	1.56	1.93	-	-	-	-
1998	1.45	1.46	-	-	-	-
1999	1.24	1.30	-	-	-	1.32
2000	1.33	1.62	1.29	1.44	1.25	1.24
2001	1.35	1.69	1.25	1.49	1.24	1.23
2002	1.30	1.62	1.33	1.44	1.19	1.18
2003	1.45	1.84	1.39	1.59	1.36	1.35
2004	1.45	1.83	1.43	1.60	1.35	1.33
2005	1.51	1.70	1.39	1.50	1.56	1.54
2006	1.29	1.52	1.22	1.35	1.25	1.24
2007	1.37	1.60	1.27	1.42	1.34	1.33
2008	1.42	1.53	1.34	1.38	1.49	1.47
2009	1.29	1.46	1.16	1.32	1.29	1.28
2010	1.34	1.57	1.23	1.38	1.34	1.32
IA promedio anual	1.49	1.68	1.30	1.45	1.33	1.32

ANEXO 15. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Budyko, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.

Años	Escorrentía anual de bosque (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	1587.07	-	-	-	-	-
1986	1791.61	-	-	-	-	-
1987	1520.59	-	-	-	-	-
1988	1334.91	-	-	-	-	-
1989	1704.00	-	-	-	-	-
1990	1659.04	-	-	-	-	-
1991	1449.93	-	-	-	-	-
1992	1402.96	1385.94	-	-	-	-
1993	1853.42	2237.98	-	-	-	-
1994	1771.68	2142.20	-	-	-	-
1995	1515.61	1819.33	-	-	-	-
1996	1670.89	2059.36	-	-	-	-
1997	1511.00	1922.89	-	-	-	-
1998	1610.17	2367.51	-	-	-	-
1999	2004.60	2995.10	-	-	-	1836.96
2000	1723.74	2621.52	1112.14	1899.35	1893.98	1576.70
2001	1711.73	2308.49	1124.43	1856.89	1952.70	1599.37
2002	1735.95	2645.42	971.75	1871.62	2029.27	1626.38
2003	1721.13	2216.49	1095.20	1865.87	1848.04	1603.03
2004	1700.40	2175.08	976.07	1820.15	1862.55	1600.27
2005	1512.92	2382.36	1042.78	1781.57	1475.98	1262.45
2006	1658.26	2175.92	1146.17	1770.47	1930.04	1576.52
2007	1733.31	2290.14	1153.06	1911.66	1904.27	1592.76
2008	1681.43	2444.85	1162.73	1880.78	1721.06	1514.55
2009	1840.83	2404.29	1208.81	1960.80	2056.88	1730.40
2010	1582.55	2038.55	1128.20	1757.65	1612.38	1424.65
Q promedio anual (mm)	1653.45	2243.86	1101.94	1852.44	1844.29	1578.67

ANEXO 16. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Budyko, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.

Años	Escorrentía anual de no bosque (mm/año)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	790.32	-	-	-	-	-
1986	850.42	-	-	-	-	-
1987	759.58	-	-	-	-	-
1988	745.83	-	-	-	-	-
1989	832.82	-	-	-	-	-
1990	786.08	-	-	-	-	-
1991	692.56	-	-	-	-	-
1992	640.75	638.78	-	-	-	-
1993	966.13	936.76	-	-	-	-
1994	885.30	832.29	-	-	-	-
1995	751.45	734.21	-	-	-	-
1996	828.90	787.54	-	-	-	-
1997	809.56	796.63	-	-	-	-
1998	842.96	894.54	-	-	-	-
1999	1053.26	1062.24	-	-	-	836.88
2000	906.14	886.22	811.87	1031.35	748.14	766.12
2001	903.32	828.87	866.00	969.46	807.63	822.12
2002	942.42	912.64	806.80	1038.45	817.34	833.12
2003	847.77	779.99	772.76	934.99	724.27	744.22
2004	840.38	784.66	748.87	931.22	713.38	730.68
2005	796.59	819.22	761.80	952.35	612.77	627.45
2006	926.71	878.79	908.17	1032.05	789.65	805.97
2007	876.60	829.03	845.14	978.77	741.68	759.46
2008	880.98	924.49	863.84	1063.14	665.79	685.58
2009	938.50	919.06	946.09	1070.71	768.47	789.72
2010	873.06	823.17	857.56	987.69	720.90	740.39
Q promedio anual (mm)	845.74	835.35	999.11	737.27	761.81	845.74

ANEXO 17. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Budyko, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para las cuencas de la zona de estudio.

Años	Coeficiente de escorrentía anual (CQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	0.81	-	-	-	-	-
1986	0.75	-	-	-	-	-
1987	0.71	-	-	-	-	-
1988	0.66	-	-	-	-	-
1989	0.71	-	-	-	-	-
1990	0.72	-	-	-	-	-
1991	0.70	-	-	-	-	-
1992	0.70	0.83	-	-	-	-
1993	0.73	0.82	-	-	-	-
1994	0.75	0.83	-	-	-	-
1995	0.70	0.85	-	-	-	-
1996	0.72	0.83	-	-	-	-
1997	0.71	0.82	-	-	-	-
1998	0.73	0.95	-	-	-	-
1999	0.73	0.87	-	-	-	0.71
2000	0.76	0.98	0.80	0.78	0.85	0.75
2001	0.82	1.20	0.93	0.86	0.90	0.80
2002	0.82	1.12	0.81	0.84	0.91	0.81
2003	0.76	1.07	0.79	0.77	0.88	0.77
2004	0.77	1.15	0.79	0.82	0.82	0.74
2005	0.74	1.13	0.85	0.82	0.77	0.69
2006	0.73	1.04	0.79	0.78	0.77	0.70
2007	0.77	1.17	0.82	0.83	0.82	0.74
2008	0.72	0.94	0.73	0.76	0.77	0.69
2009	0.80	1.01	0.90	0.80	0.91	0.80
2010	0.76	0.85	0.83	0.77	0.82	0.77
CQ promedio anual	0.73	0.97	0.82	0.80	0.84	0.75

ANEXO 18. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Budyko, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de bosque (CQBQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	0.81	-	-	-	-	-
1986	0.75	-	-	-	-	-
1987	0.71	-	-	-	-	-
1988	0.66	-	-	-	-	-
1989	0.71	-	-	-	-	-
1990	0.72	-	-	-	-	-
1991	0.70	-	-	-	-	-
1992	0.70	0.83	-	-	-	-
1993	0.73	0.82	-	-	-	-
1994	0.75	0.83	-	-	-	-
1995	0.70	0.85	-	-	-	-
1996	0.72	0.83	-	-	-	-
1997	0.71	0.82	-	-	-	-
1998	0.73	0.95	-	-	-	-
1999	0.73	0.87	-	-	-	0.71
2000	0.76	0.98	0.80	0.78	0.85	0.75
2001	0.82	1.20	0.93	0.86	0.90	0.80
2002	0.82	1.12	0.81	0.84	0.91	0.81
2003	0.76	1.07	0.79	0.77	0.88	0.77
2004	0.77	1.15	0.79	0.82	0.82	0.74
2005	0.74	1.13	0.85	0.82	0.77	0.69
2006	0.73	1.04	0.79	0.78	0.77	0.70
2007	0.77	1.17	0.82	0.83	0.82	0.74
2008	0.72	0.94	0.73	0.76	0.77	0.69
2009	0.80	1.01	0.90	0.80	0.91	0.80
2010	0.76	0.85	0.83	0.77	0.82	0.77
CQ promedio anual	0.73	0.97	0.82	0.80	0.84	0.75

ANEXO 19. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Budyko, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de bosque (CQNBQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	0.81	-	-	-	-	-
1986	0.75	-	-	-	-	-
1987	0.70	-	-	-	-	-
1988	0.64	-	-	-	-	-
1989	0.71	-	-	-	-	-
1990	0.72	-	-	-	-	-
1991	0.70	-	-	-	-	-
1992	0.71	0.81	-	-	-	-
1993	0.73	0.87	-	-	-	-
1994	0.75	0.86	-	-	-	-
1995	0.69	0.88	-	-	-	-
1996	0.71	0.86	-	-	-	-
1997	0.70	0.81	-	-	-	-
1998	0.72	1.05	-	-	-	-
1999	0.71	0.94	-	-	-	0.63
2000	0.74	1.02	0.79	0.75	0.90	0.68
2001	0.80	1.28	0.91	0.83	0.96	0.71
2002	0.80	1.22	0.78	0.81	0.97	0.71
2003	0.73	1.09	0.77	0.73	0.92	0.71
2004	0.74	1.22	0.76	0.79	0.84	0.65
2005	0.72	1.21	0.85	0.78	0.78	0.60
2006	0.71	1.07	0.77	0.74	0.82	0.60
2007	0.75	1.25	0.80	0.81	0.86	0.64
2008	0.70	0.99	0.72	0.74	0.79	0.61
2009	0.77	0.98	0.89	0.76	0.96	0.72
2010	0.75	0.84	0.83	0.75	0.85	0.69
CQ promedio anual	0.73	1.01	0.81	0.77	0.88	0.66

ANEXO 20. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-parámetro de acuerdo al Cuadro 2, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para las cuencas de la zona de estudio.

Años	Coeficiente de escorrentía anual (CQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	0.79	-	-	-	-	-
1986	0.73	-	-	-	-	-
1987	0.71	-	-	-	-	-
1988	0.67	-	-	-	-	-
1989	0.70	-	-	-	-	-
1990	0.70	-	-	-	-	-
1991	0.70	-	-	-	-	-
1992	0.69	0.95	-	-	-	-
1993	0.71	0.97	-	-	-	-
1994	0.73	0.97	-	-	-	-
1995	0.69	0.99	-	-	-	-
1996	0.70	0.96	-	-	-	-
1997	0.70	0.95	-	-	-	-
1998	0.73	1.12	-	-	-	-
1999	0.70	0.98	-	-	-	0.61
2000	0.75	1.11	1.11	0.78	0.85	0.66
2001	0.81	1.38	1.30	0.87	0.89	0.70
2002	0.80	1.26	1.16	0.84	0.90	0.71
2003	0.74	1.21	1.11	0.77	0.87	0.67
2004	0.75	1.32	1.12	0.82	0.81	0.64
2005	0.74	1.28	1.22	0.82	0.78	0.60
2006	0.72	1.22	1.10	0.79	0.77	0.61
2007	0.76	1.35	1.15	0.84	0.81	0.64
2008	0.71	1.08	1.02	0.77	0.77	0.60
2009	0.78	1.19	1.25	0.82	0.89	0.70
2010	0.77	1.01	1.15	0.79	0.84	0.68
CQ promedio anual	0.73	1.12	1.15	0.81	0.83	0.65

ANEXO 21. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-parámetro de acuerdo al Cuadro 2, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de bosque (CQBQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	0.80	-	-	-	-	-
1986	0.73	-	-	-	-	-
1987	0.70	-	-	-	-	-
1988	0.65	-	-	-	-	-
1989	0.69	-	-	-	-	-
1990	0.71	-	-	-	-	-
1991	0.71	-	-	-	-	-
1992	0.71	0.99	-	-	-	-
1993	0.70	0.96	-	-	-	-
1994	0.73	0.95	-	-	-	-
1995	0.69	1.01	-	-	-	-
1996	0.69	0.96	-	-	-	-
1997	0.69	0.93	-	-	-	-
1998	0.71	1.16	-	-	-	-
1999	0.68	0.98	-	-	-	0.54
2000	0.72	1.09	1.07	0.75	0.86	0.59
2001	0.78	1.39	1.25	0.83	0.92	0.62
2002	0.77	1.28	1.08	0.81	0.92	0.61
2003	0.71	1.19	1.07	0.73	0.89	0.62
2004	0.73	1.35	1.06	0.79	0.81	0.57
2005	0.71	1.29	1.20	0.79	0.78	0.53
2006	0.69	1.18	1.05	0.75	0.79	0.52
2007	0.73	1.36	1.10	0.80	0.82	0.56
2008	0.69	1.06	0.99	0.74	0.77	0.54
2009	0.75	1.07	1.19	0.77	0.91	0.63
2010	0.75	0.95	1.12	0.77	0.85	0.61
CQ promedio anual	0.72	1.11	1.11	0.78	0.85	0.58

ANEXO 22. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-parámetro de acuerdo al Cuadro 2, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de bosque (CQNBQ)					
	TAM	BOR	CHA	SRG	PUC	REQ
1985	0.77	-	-	-	-	-
1986	0.72	-	-	-	-	-
1987	0.73	-	-	-	-	-
1988	0.71	-	-	-	-	-
1989	0.71	-	-	-	-	-
1990	0.69	-	-	-	-	-
1991	0.67	-	-	-	-	-
1992	0.62	0.91	-	-	-	-
1993	0.74	0.97	-	-	-	-
1994	0.73	0.96	-	-	-	-
1995	0.71	0.95	-	-	-	-
1996	0.73	0.93	-	-	-	-
1997	0.74	0.95	-	-	-	-
1998	0.78	1.08	-	-	-	-
1999	0.76	0.97	-	-	-	0.49
2000	0.82	1.10	1.19	0.87	0.83	0.52
2001	0.89	1.35	1.38	0.99	0.85	0.53
2002	0.87	1.22	1.28	0.94	0.87	0.54
2003	0.84	1.20	1.20	0.89	0.86	0.52
2004	0.84	1.27	1.22	0.92	0.82	0.49
2005	0.82	1.24	1.25	0.92	0.78	0.44
2006	0.80	1.23	1.17	0.91	0.75	0.46
2007	0.84	1.32	1.23	0.94	0.81	0.48
2008	0.78	1.07	1.07	0.83	0.78	0.46
2009	0.88	1.25	1.33	0.94	0.87	0.53
2010	0.81	1.03	1.19	0.84	0.82	0.50
CQ promedio anual	0.77	1.11	1.23	0.91	0.82	0.50

ANEXO 23. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 1-p, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha = 1.31$

Años	Escorrentía anual (mm/año)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	1219.57	-	-	-
1986	1353.31	-	-	-
1987	1184.24	-	-	-
1988	1083.76	-	-	-
1989	1299.17	-	-	-
1990	1259.11	-	-	-
1991	1110.75	-	-	-
1992	1050.57	-	-	-
1993	1442.32	-	-	-
1994	1360.95	-	-	-
1995	1169.64	-	-	-
1996	1280.44	-	-	-
1997	1191.82	-	-	-
1998	1268.25	-	-	-
1999	1536.28	-	-	1331.78
2000	1346.40	1493.77	1195.26	1193.93
2001	1338.70	1448.74	1244.42	1225.46
2002	1359.86	1472.99	1272.42	1239.99
2003	1318.69	1433.84	1157.04	1196.07
2004	1301.88	1405.53	1155.27	1185.26
2005	1189.83	1394.72	958.01	977.42
2006	1322.87	1436.93	1224.93	1204.27
2007	1335.01	1479.03	1182.56	1190.28
2008	1313.11	1499.38	1075.64	1124.24
2009	1423.95	1560.80	1251.73	1269.78
2010	1274.31	1423.24	1078.30	1115.19
Q promedio anual	1282.11	1459.00	1163.23	1187.81

ANEXO 24. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-p con $\alpha = 1.31$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para cuatro cuencas de la zona de estudio.

Años	Coeficiente de escorrentía anual (CQ)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	0.79	-	-	-
1986	0.72	-	-	-
1987	0.70	-	-	-
1988	0.66	-	-	-
1989	0.69	-	-	-
1990	0.70	-	-	-
1991	0.69	-	-	-
1992	0.68	-	-	-
1993	0.71	-	-	-
1994	0.73	-	-	-
1995	0.69	-	-	-
1996	0.70	-	-	-
1997	0.70	-	-	-
1998	0.72	-	-	-
1999	0.70	-	-	0.68
2000	0.74	0.76	0.82	0.74
2001	0.80	0.84	0.86	0.78
2002	0.79	0.81	0.87	0.79
2003	0.74	0.75	0.84	0.75
2004	0.75	0.79	0.79	0.72
2005	0.73	0.79	0.75	0.68
2006	0.71	0.77	0.74	0.68
2007	0.75	0.81	0.79	0.72
2008	0.71	0.74	0.74	0.68
2009	0.78	0.79	0.86	0.78
2010	0.76	0.76	0.81	0.76
CQ promedio anual	0.73	0.78	0.81	0.73

ANEXO 25. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-p con $\alpha = 1.31$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de bosque (CQBQ)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	0.79	-	-	-
1986	0.73	-	-	-
1987	0.70	-	-	-
1988	0.65	-	-	-
1989	0.69	-	-	-
1990	0.71	-	-	-
1991	0.70	-	-	-
1992	0.71	-	-	-
1993	0.70	-	-	-
1994	0.73	-	-	-
1995	0.68	-	-	-
1996	0.69	-	-	-
1997	0.68	-	-	-
1998	0.71	-	-	-
1999	0.67	-	-	0.59
2000	0.71	0.73	0.84	0.65
2001	0.78	0.80	0.89	0.68
2002	0.77	0.78	0.89	0.68
2003	0.71	0.71	0.86	0.68
2004	0.72	0.76	0.79	0.63
2005	0.71	0.76	0.76	0.59
2006	0.69	0.72	0.77	0.58
2007	0.73	0.78	0.80	0.62
2008	0.68	0.72	0.75	0.60
2009	0.75	0.75	0.89	0.69
2010	0.74	0.74	0.82	0.68
CQ promedio anual	0.71	0.75	0.82	0.64

ANEXO 26. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 1-p con $\alpha = 1.31$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de no bosque (CQNBQ)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	0.76	-	-	-
1986	0.72	-	-	-
1987	0.72	-	-	-
1988	0.70	-	-	-
1989	0.71	-	-	-
1990	0.68	-	-	-
1991	0.66	-	-	-
1992	0.61	-	-	-
1993	0.74	-	-	-
1994	0.73	-	-	-
1995	0.71	-	-	-
1996	0.73	-	-	-
1997	0.73	-	-	-
1998	0.77	-	-	-
1999	0.76	-	-	0.57
2000	0.82	0.83	0.79	0.61
2001	0.88	0.95	0.82	0.62
2002	0.86	0.90	0.83	0.62
2003	0.83	0.85	0.82	0.61
2004	0.83	0.88	0.78	0.57
2005	0.81	0.87	0.74	0.53
2006	0.79	0.87	0.71	0.54
2007	0.83	0.90	0.77	0.56
2008	0.77	0.80	0.74	0.54
2009	0.87	0.90	0.83	0.61
2010	0.80	0.80	0.78	0.58
CQ promedio anual	0.76	0.87	0.78	0.58

ANEXO 27. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 2-p, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$

Años	Escorrentía anual (mm/año)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	1165.08	-	-	-
1986	1312.05	-	-	-
1987	1108.14	-	-	-
1988	919.78	-	-	-
1989	1261.37	-	-	-
1990	1232.00	-	-	-
1991	1064.13	-	-	-
1992	1019.13	-	-	-
1993	1364.99	-	-	-
1994	1304.79	-	-	-
1995	1132.16	-	-	-
1996	1250.19	-	-	-
1997	1100.66	-	-	-
1998	1174.55	-	-	-
1999	1585.67	-	-	1386.08
2000	1280.53	1528.31	1366.35	1099.29
2001	1254.08	1376.07	1462.04	1163.19
2002	1330.33	1506.92	1541.82	1201.79
2003	1291.63	1475.16	1357.60	1147.99
2004	1277.29	1442.94	1382.19	1152.56
2005	1150.84	1430.68	1061.56	873.79
2006	1233.08	1339.10	1449.07	1152.93
2007	1314.72	1496.58	1435.34	1172.03
2008	1296.05	1515.61	1266.91	1090.25
2009	1365.60	1444.61	1558.04	1281.62
2010	1146.71	1306.45	1161.83	997.45
Q promedio anual (mm)	1228.29	1442.04	1367.52	1143.25

ANEXO 28. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 2-p para la cobertura de BQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$

Años	Escorrentía anual de bosque(mm/año)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	839.53	-	-	-
1986	1001.81	-	-	-
1987	776.56	-	-	-
1988	643.25	-	-	-
1989	939.85	-	-	-
1990	901.17	-	-	-
1991	737.15	-	-	-
1992	700.90	-	-	-
1993	1052.26	-	-	-
1994	991.68	-	-	-
1995	786.02	-	-	-
1996	913.39	-	-	-
1997	784.54	-	-	-
1998	853.73	-	-	-
1999	1174.66	-	-	1095.36
2000	950.88	1036.74	1171.97	891.92
2001	945.27	1014.21	1215.01	906.65
2002	969.76	1032.91	1280.92	930.98
2003	955.56	1026.89	1132.81	908.67
2004	938.30	988.39	1148.35	907.88
2005	791.33	966.96	831.39	634.86
2006	907.08	950.89	1199.27	891.68
2007	969.51	1068.73	1180.50	904.60
2008	921.11	1033.93	1030.70	838.58
2009	1039.59	1079.72	1302.47	1011.01
2010	831.28	920.64	936.88	759.48
Q promedio anual (mm)	896.78	1010.91	1130.02	890.14

ANEXO 29. Resultados de la escorrentía anual simulada con el modelo Fu 2-p para la cobertura de NBQ, estimado a través de la información grillada de los datos de ETP del CRU y P del CHIRPS, determinado con un $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$

Años	Escorrentía anual de no bosque (mm/año)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	325.55	-	-	-
1986	310.24	-	-	-
1987	331.58	-	-	-
1988	276.53	-	-	-
1989	321.52	-	-	-
1990	330.83	-	-	-
1991	326.98	-	-	-
1992	318.23	-	-	-
1993	312.73	-	-	-
1994	313.11	-	-	-
1995	346.14	-	-	-
1996	336.80	-	-	-
1997	316.12	-	-	-
1998	320.82	-	-	-
1999	411.01	-	-	290.72
2000	329.65	491.57	194.38	207.37
2001	308.81	361.86	247.03	256.54
2002	360.57	474.01	260.90	270.81
2003	336.07	448.27	224.79	239.32
2004	338.99	454.55	233.84	244.68
2005	359.51	463.72	230.17	238.93
2006	326.00	388.21	249.80	261.25
2007	345.21	427.85	254.84	267.43
2008	374.94	481.68	236.21	251.67
2009	326.01	364.89	255.57	270.61
2010	315.43	385.81	224.95	237.97
Q promedio anual (mm)	331.51	431.13	237.50	253.11

ANEXO 30. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 2-p con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para cuatro cuencas de la zona de estudio.

Años	Coeficiente de escorrentía anual (CQ)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	0.75	-	-	-
1986	0.70	-	-	-
1987	0.66	-	-	-
1988	0.56	-	-	-
1989	0.67	-	-	-
1990	0.69	-	-	-
1991	0.66	-	-	-
1992	0.66	-	-	-
1993	0.67	-	-	-
1994	0.70	-	-	-
1995	0.67	-	-	-
1996	0.68	-	-	-
1997	0.64	-	-	-
1998	0.67	-	-	-
1999	0.72	-	-	0.71
2000	0.70	0.77	0.94	0.68
2001	0.75	0.80	1.01	0.74
2002	0.78	0.83	1.05	0.77
2003	0.72	0.77	0.99	0.72
2004	0.73	0.82	0.94	0.70
2005	0.71	0.81	0.83	0.61
2006	0.67	0.71	0.88	0.65
2007	0.74	0.82	0.96	0.71
2008	0.70	0.75	0.88	0.66
2009	0.75	0.73	1.08	0.78
2010	0.68	0.70	0.87	0.68
CQ promedio anual	0.69	0.77	0.95	0.70

ANEXO 31. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 2-p con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de bosque (BQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de bosque (CQBQ)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	0.43	-	-	-
1986	0.42	-	-	-
1987	0.36	-	-	-
1988	0.31	-	-	-
1989	0.39	-	-	-
1990	0.39	-	-	-
1991	0.36	-	-	-
1992	0.35	-	-	-
1993	0.41	-	-	-
1994	0.42	-	-	-
1995	0.36	-	-	-
1996	0.39	-	-	-
1997	0.36	-	-	-
1998	0.38	-	-	-
1999	0.42	-	-	0.38
2000	0.41	0.41	0.56	0.38
2001	0.44	0.45	0.60	0.40
2002	0.44	0.45	0.61	0.41
2003	0.40	0.40	0.56	0.40
2004	0.41	0.43	0.52	0.37
2005	0.37	0.43	0.44	0.30
2006	0.39	0.40	0.51	0.34
2007	0.42	0.45	0.53	0.36
2008	0.38	0.41	0.47	0.34
2009	0.44	0.42	0.61	0.42
2010	0.39	0.39	0.50	0.37
CQ promedio anual	0.39	0.42	0.54	0.37

ANEXO 32. Resultados del coeficiente de escorrentía (Q/P) para el modelo Fu 2-p con $\alpha_{BQ} = 4.30$ y $\alpha_{NBQ} = 25.90$, estimado entre la escorrentía simulada y los datos de precipitación del producto CHIRPS, para la cobertura de no bosque (NBQ) dentro de cada cuenca.

Años	Coeficiente de escorrentía anual de no bosque (CQNBQ)			
	TAM	SRG	PUC	REQ
1985	0.33	-	-	-
1986	0.27	-	-	-
1987	0.33	-	-	-
1988	0.27	-	-	-
1989	0.28	-	-	-
1990	0.30	-	-	-
1991	0.33	-	-	-
1992	0.33	-	-	-
1993	0.24	-	-	-
1994	0.26	-	-	-
1995	0.34	-	-	-
1996	0.30	-	-	-
1997	0.29	-	-	-
1998	0.29	-	-	-
1999	0.30	-	-	0.20
2000	0.30	0.41	0.20	0.16
2001	0.30	0.36	0.25	0.19
2002	0.33	0.42	0.26	0.20
2003	0.33	0.42	0.25	0.19
2004	0.34	0.44	0.25	0.19
2005	0.37	0.44	0.28	0.20
2006	0.28	0.33	0.22	0.17
2007	0.33	0.40	0.26	0.20
2008	0.33	0.37	0.26	0.20
2009	0.30	0.31	0.27	0.21
2010	0.29	0.32	0.24	0.18
CQ promedio anual	0.31	0.38	0.25	0.19