



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA EN  
LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR UTILIZANDO  
DATOS ESTIMADOS POR SENSORES REMOTOS**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA**

PRESENTA:

**Ing. Luis E. Balcázar Ordóñez**

DIRECTOR:

**Dr. Khalidou M. Bâ**

**Toluca-México, noviembre de 2017**

## **Agradecimientos**

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – México (CONACYT) por la beca otorgada durante los estudios. Al proyecto 248553 “Modelación de eventos hidrológicos extremos a partir de precipitación estimada por percepción remota”. Al Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) por el desarrollo del posgrado. Mi sincero agradecimiento al Dr. Khalidou Bâ por la asesoría en la investigación. A la Dra. Emmanuelle Quentin por compartir sus conocimientos en SIG y por ser el vínculo hacia el CIRA. A mi colega Gabriel Gaona por compartir sus conocimientos en SIG/programación y revisar los borradores de tesis. Al Dr. Rütger Rollenbeck por los datos del radar y estaciones climáticas. Al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador y Secretaria Nacional del Agua (Ex PREDESUR) por los datos hidrometeorológicos. A las agencias NASA-JAXA, NOAA, CHRS y ECMWF por los datos de satélite. Al comité de síndicos: Dr. Carlos Díaz, Dra. Emmanuelle Quentin, Dr. Carlos Fonseca, Dra. Aleida Vilchis, Dr. Miguel Gómez y Dr. Carlos Mastachi por la revisión y los consejos para mejorar este manuscrito.*

## **Dedicatoria**

*A Dios, Esmeralda, Amilcar, Valentina, Mateo, Gina, mis abuelitos y a mi querida Saula. Al resto de mis familiares, amigos en Ecuador y México. A mis compañeros del CIRA y al equipo TFC.*

*Luis Balcázar  
Toluca, México, noviembre de 2017*

## ABSTRACT

The aim of this research was a daily runoff modeling using remote sensing data (*RS*) with *CEQUEAU* hydrological model at 0.05°/~5 km, 0.125°/~13.5 km and 0.25°/~27.5 km of spatial resolutions. The Catamayo river basin is located in Southern Ecuador (4.094°S / 79.569°W). The upper Catamayo river basin is characterized for continuous rainfall (orographic precipitation), influenced by the trade winds, humidity of the Amazon basin and irregularity of the Andes mountain range. While in the lower basin, rainfall is seasonal between December-May and is affected both El Niño Southern Oscillation (*ENSO*) and droughts (La Niña). Rainfall data was obtained from satellite precipitation products (*SPP*): *CMORPH*, *PERSIANN-CDR* and *TRMM-3B42*, additionally from weather meteorological radar (*LAWR*) and rain gauges. The temperature was used of the *ERA-Interim* project and weather stations. The *ERA-Interim* product was used with the *SPP*, and the temperature observed with the rain gauges and the combination [*LAWR* + rain gauges]. The *SR*'s were compared and validated with the observed data, and then *BIAS* corrections were performed. The *CEQUEAU* model was implemented in three stream gauging stations of the Catamayo river basin, the calibration was performed first by trial and error method, and then by optimization. The *NSE*, *PBIAS* and  $r^2$  was used as the evaluation criterion of the simulations. The results of the modeling were satisfactory in two sub basins using *PPES/ERA-Interim*, combination [*LAWR* + rain gauges] and rain gauges. In conclusion, *CMORPH*, *PERSIANN-CDR* and *TRMM-3B42* products can be implemented in hydrological models over Andean watersheds, with similar climatic conditions to the Catamayo basin. Moreover, these products can be useful in places with low density of meteorological stations and aid in early warning systems when time of concentrations basins are around one day.

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue modelar los escurrimientos diarios en una cuenca hidrográfica utilizando datos de sensores remotos (*SR*) en el modelo *CEQUEAU* a  $0.05^\circ/\sim 5$  km,  $0.125^\circ/\sim 13.5$  km y  $0.25^\circ/\sim 27.5$  km de resolución espacial. El área de estudio comprende la cuenca del río Catamayo, ubicada en el sur del Ecuador ( $4.094^\circ\text{S}$  /  $79.569^\circ\text{W}$ ). La parte alta de la cuenca se caracteriza por recibir aportes frecuentes de lluvia, influenciada por los vientos alisios, humedad de la cuenca amazónica y orografía irregular de la cordillera de los Andes. Mientras que en la parte baja, las lluvias son estacionales entre diciembre y mayo, y es afectada por eventos climáticos como El Niño y La Niña. Los datos de lluvia se obtuvieron de los productos de precipitación estimados por satélite (*PPES*): *CMORPH*, *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* por un lado, y radar meteorológico (*LAWR*) y pluviómetros por otro lado. La variable temperatura fue tomada del proyecto *ERA-Interim* y temperatura observada de estaciones meteorológicas. El producto *ERA-Interim* se utilizó con los *PPES* y la temperatura observada con los pluviómetros y la combinación [*LAWR* + pluviómetros]. Los *SR* se validaron con los datos observados, y posteriormente se realizaron correcciones de sesgo (*BIAS*). El modelo *CEQUEAU* se implementó en tres estaciones hidrométricas del río Catamayo, la calibración se realizó primero por prueba y error, y luego por optimización. Las funciones objetivo: *NSE*, *PBIAS* y  $r^2$  se utilizaron como criterios de evaluación de los modelos. Los resultados de las modelaciones en los periodos de calibración y validación fueron satisfactorios en dos de las tres subcuencas del río Catamayo, usando *PPES/ERA-Interim*, [*LAWR* + pluviómetros] y pluviómetros. En conclusión, *CMORPH*, *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* se pueden implementar en modelos hidrológicos sobre cuencas andinas con similares condiciones climáticas de la cuenca Catamayo. Además, estos productos pueden ser útiles en lugares con baja densidad de estaciones meteorológicas y de ayuda en los sistemas de alerta temprana cuando los tiempos de concentración de las cuencas son alrededor de un día.

# CONTENIDO

ABSTRACT.....	III
RESUMEN .....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VIII
SIGLAS Y NOMENCLATURA .....	IX
SÍMBOLOS Y UNIDADES .....	XI
GLOSARIO.....	XII
<b>1</b> <b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1       Antecedentes.....	14
1.1.1     Los SIG en la gestión de los recursos hídricos .....	14
1.1.2     Modelación hidrológica .....	14
1.1.3     Modelos hidrológicos distribuidos.....	15
1.1.4     Modelaciones hidrológicas con <i>CEQUEAU</i> .....	16
1.1.5     Modelaciones hidrológicas utilizando datos de sensores remotos .....	17
1.1.6     Modelaciones hidrológicas realizadas en el sur del Ecuador .....	19
1.1.7     Actividades en la cuenca Catamayo .....	19
1.2       Justificación .....	20
1.3       Hipótesis .....	22
1.4       Objetivos .....	22
<b>2</b> <b>MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>23</b>
2.1       Procesos del ciclo del agua.....	23
2.2       Sensores remotos .....	24
2.2.1     Radar meteorológico .....	24
2.2.2     Precipitación estimada por productos de satélite.....	25
2.2.2.1 <i>CMORPH</i> .....	25
2.2.2.2 <i>TRMM-3B42_Daily (TMPA)</i> .....	26
2.2.2.3 <i>PERSIANN-CDR</i> .....	26
2.2.3     Temperatura estimada por satélite .....	27
2.3       Lenguaje R .....	27
2.4       SIG Idrisi/Terrset .....	28
2.5       Modelo hidrológico <i>CEQUEAU</i> .....	28
2.5.1     Discretización del área del área de estudio .....	29
2.5.2     Estructura de los datos requeridos por el modelo <i>CEQUEAU</i> .....	30
2.5.3     Extracción de datos fisiográficos .....	31
2.5.4     Parámetros de cantidad .....	31
<b>3</b> <b>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>33</b>
3.1       Área de estudio .....	33
3.1.1     Cobertura del suelo .....	36
3.1.2     Cobertura del suelo reclasificada en formato Cequeau.....	37
3.2       Parámetros fisiográficos de cuenca.....	38
3.3       Datos hidrometeorológicos.....	39
3.3.1     Disponibilidad de datos.....	41
3.3.2     Análisis estadístico de los datos observados .....	43
3.4       Datos de sensores remotos .....	45
3.4.1     Extracción de datos de productos de satélite .....	48
3.4.2     Datos de radar <i>LAWR</i> .....	50
3.4.3     Corrección de sesgo de los <i>PPES</i> .....	51

3.5	Datos meteorológicos en el modelo <i>CEQUEAU</i> .....	53
3.6	Calibración y validación del modelo <i>CEQUEAU</i> .....	55
3.6.1	Modelaciones en el río Catamayo .....	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
4.1	Parámetros fisiográficos de las subcuencas del río Catamayo .....	64
4.2	Datos hidrometeorológicos.....	65
4.2.1	Calidad de datos de caudales .....	65
4.2.2	Calidad de los datos de Precipitación .....	68
4.2.3	Datos de satélite y radar .....	71
4.2.3.1	Datos de <i>PPES-correctos</i> .....	71
4.2.3.2	Precipitación de la cuenca Catamayo estimada por satélite .....	72
4.2.3.3	Validación de los datos de <i>PPES</i> .....	74
4.2.3.4	Comparaciones LAWR y pluviómetros .....	75
4.2.3.5	Comparaciones de temperatura <i>PTES</i> y termómetros .....	77
4.3	Modelación del río Catamayo .....	79
4.3.1	Modelación de los caudales del río Catamayo en Boquerón.....	80
4.3.2	Modelación de los caudales del río Catamayo en Guayabal .....	82
4.3.3	Modelación de los caudales del río Catamayo en Vicin .....	83
4.4	Árbol de decisiones .....	92
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>94</b>
5.1	Distribución de la lluvia en el área de estudio.....	94
5.2	Análisis de la lluvia estimada .....	95
5.3	Análisis de caudales simulados .....	97
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>111</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Ciclo de agua («Climántica», s. f.) .....	23
Figura 2-2. Espectro electromagnético, fuente: (Contributors, 2017) . .....	24
Figura 2-3. Interfaz gráfica del programa Rstudio. ....	28
Figura 2-4. Esquema del modelo <i>CEQUEAU</i> : A) función de producción en la fase líquida y B) función de transferencia, modificado de Morin (2009). ....	29
Figura 2-5. Discretización de la cuenca en celdas $n \times n$ y sentidos de flujo, modificado de Morin (2009). ....	29
Figura 2-6. Estructura general del modelo <i>Cequreau</i> , adaptado de Morin (2009).....	30
Figura 3-1. Diagrama de flujo para el desarrollo de la método de investigación. ....	33
Figura 3-2. Localización del área de estudio: A) ubicación de la cuenca Catamayo, Coord. Geográficas, datum WGS84 (Fuente MNA: Jarvis et al., 2008), B) depresión de los Andes (Fuente: Richter et al. 2016).....	34
Figura 3-3. Climas del sur del Ecuador. Coord. UTM 17S, datum WGS84, fecha 2006. ....	35
Figura 3-4. Mapa de cobertura y uso del suelo (MAE y MAGAP, 2013). Coord. UTM 17S, datum WGS84. ....	37
Figura 3-5. Mapa de suelos en formato <i>CEQUEAU</i> . Coord. UTM 17S, datum WGS84.....	38
Figura 3-6. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas, MNA de la cuenca Catamayo, celdas de los SR ( <i>PPES</i> y <i>PTES</i> a 0.25 grados) y cobertura del radar LAWR. Coord. Geográficas, datum WGS84. ....	40
Figura 3-7. Clasificación de los datos hidrometeorológicos utilizados en las modelaciones hidrológicas. ....	41
Figura 3-8. Caudales diarios disponibles por mes/estación. ....	42
Figura 3-9. Precipitación diaria de pluviómetros disponibles por mes. ....	42

Figura 3-10. Temperatura media diaria de estaciones meteorológicas disponibles por mes. ....	43
Figura 3-11. Datos diarios de sensores remotos disponibles por mes. ....	46
Figura 3-12. Algoritmo para obtener los datos de productos de satélite: CMORPH, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42 y ERA-Interim. ....	49
Figura 3-13. Algoritmo para obtener los datos del radar LAWR. ....	50
Figura 3-14. Radar LAWR: (izq.) perfil vertical de la ubicación del radar en el cerro El Consuelo (3200 msnm), adaptado de Rollenbeck et al. (2011), (der.) ubicación del pluviómetro y pixeles vecinos. .....	51
Figura 3-15. Discretización del área a 0.25° de resolución: (izq.) parte baja, (der.) parte alta. ....	52
Figura 3-16. Precipitación mensual (Parte alta): A) datos originales B) datos corregidos BIAS. ....	53
Figura 3-17. Precipitación mensual (Parte baja) del periodo 2005-2015: A) datos originales B) datos corregidos BIAS. ....	53
Figura 3-18. Esquema de las áreas de drenaje de las subcuencas del río Catamayo hasta la estación Vicin. ...	58
Figura 3-19. Diagrama de flujo para las modelaciones en la subcuenca Boquerón. ....	60
Figura 3-20. Diagrama de flujo para las modelaciones en la subcuenca Guayabal. ....	61
Figura 3-21. Diagrama de flujo para las modelaciones en la cuenca Vicin. ....	63
Figura 4-1. Hidrogramas de las estaciones hidrométricas: A) Vicin, B), Boquerón y C) Guayabal. ....	65
Figura 4-2. Caudales de las estaciones Guayabal y Boquerón, valores diarios 1984: A) dispersión, B) rango intercuartílico y valores extremos. ....	68
Figura 4-3. Caudales de las estaciones Vicin y Boquerón en el periodo 2014-2015: A) dispersión, B) rangos intercuartílico y valores extremos. ....	68
Figura 4-4. Diagramas de caja que representan la precipitación mensual de 4 estaciones meteorológicas, en el periodo 2005-2015. ....	69
Figura 4-5. Precipitación media diaria de la cuenca Catamayo, pluviómetros y PPES. ....	73
Figura 4-6. Precipitación media diaria corregida de la cuenca Catamayo. ....	74
Figura 4-7. Correlación de precipitación pluviómetros ~ PPES la celda 1212: (izq.) PPES originales (der.) PPES-correctos, en el periodo 2005-2015. ....	74
Figura 4-8. Correlación de precipitación pluviómetros ~ PPES la celda 1312: (izq.) PPES-originales (der.) PPES-correctos, en el periodo 2005-2015. ....	75
Figura 4-9. Precipitación diaria LAWR versus pluviómetros. ....	76
Figura 4-10. Precipitación LAWR del día 30-03-2002: A) Resolución original 0.5 km, B) 5 km, C) 13.5 km, cuenca alta del río Catamayo, Coord. UTM 17S, datum WGS84. ....	76
Figura 4-11. Temperatura de la cuenca Catamayo, en el periodo 2005-2015. ....	77
Figura 4-12. Comparación pixel/término en la cuenca Catamayo, 2005-2015. ....	78
Figura 4-13. Temperatura de 4 estaciones meteorológicas, 2005-2015. ....	78
Figura 4-14. Modelación de los caudales diarios en la estación Boquerón utilizando pluviómetros: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	80
Figura 4-15. Modelación de los caudales diarios en la estación Boquerón utilizando [LAWR + pluviómetros]: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	81
Figura 4-16. Modelación de los caudales diarios en la estación Boquerón utilizando TRMM-3B42: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	81
Figura 4-17. Modelación de los caudales diarios en la estación Guayabal utilizando pluviómetros: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	83
Figura 4-18. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando pluviómetros: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	84
Figura 4-19. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando CMORPH: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	85
Figura 4-20. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando PERSIANN-CDR: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	85
Figura 4-21. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando TRMM-3B42: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	86
Figura 4-22. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando CMORPH-correcto: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	89
Figura 4-23. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando PERSIANN-CDR-correcto: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	89

Figura 4-24. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando TRMM-3B42-correcto: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados. ....	90
Figura 4-25. Modelación de caudales diarios interanuales utilizando TRMM-3B42 y TRMM-3B42-correcto, en el periodo 2005-2011. ....	90
Figura 4-26. Caudales modelados con CMORPH y CMORPH-correcto, en el periodo 2005-2011. ....	91
Figura 4-27. Modelación de caudales diarios interanuales utilizando PERSIANN-CDR y PERSIANN-CDR- correcto, en el periodo 2005-2011. ....	91
Figura 4-28. Árbol de decisiones para la extracción de archivos fisiográficos. ....	92
Figura 4-29. Árbol de decisiones para elegir los datos meteorológicos. ....	93
Figura 8-1. Diagrama de flujo para obtener un archivo meteorológico para el modelo CEQUEAU. ....	113
Figura 8-2. Diagrama de flujo para obtener un archivo de caudal para el modelo CEQUEAU. ....	115
Figura 8-3. PPES TRMM-3B42 (mm día <sup>-1</sup> ) del 08-01-2005, sobrepuesto las celdas del modelo a 0.25° y la cuenca Catamayo. ....	118
Figura 8-4. Pluviómetros utilizados en las modelaciones, discretización del área a 0.25°. ....	118
Figura 8-5. Correlación CMORPH y CMORPH-correcto versus pluviómetros. ....	119
Figura 8-6. Correlación PERSIANN-CDR y PERSIANN-CDR-correcto versus pluviómetros. ....	119
Figura 8-7. Correlación TRMM-3B42 y TRMM-3B42-correcto versus pluviómetros. ....	120
Comparación de ERA-Interim versus los datos observados en estaciones meteorológicas. ....	126

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1. Modelos distribuidos (Singh y Woolhiser, 2002), citado en Guerra Cobián (2007). ....	15
Tabla 1-1. Modelos distribuidos (Continuación). ....	16
Tabla 2-1. Parámetros y coeficientes del modelo CEQUEAU, modificado de Morin (2009). ....	32
Tabla 3-1. Cobertura de la cuenca Catamayo, (MAE y MAGAP, 2013). ....	37
Tabla 3-2. Estaciones hidrométricas en el río Catamayo. ....	41
Tabla 3-3. Características de los productos meteorológicos utilizados. ....	47
Tabla 3-4. Eficiencia recomendada para pasos de tiempo diario, tomado de Moriasi et al. (2015). ....	57
Tabla 3-5. Datos utilizados en las modelaciones hidrológicas. ....	59
Tabla 4-1. Parámetros fisiográficos de las subcuencas. ....	64
Tabla 4-2. Caudales medios anuales. ....	67
Tabla 4-3. Resumen de la lluvia mensual de 4 estaciones meteorológicas (2005-2015). ....	69
Tabla 4-4. Pruebas estadísticas. ....	71
Tabla 4-5. Coeficientes de corrección BIAS (parte alta). ....	71
Tabla 4-6. Coeficientes de corrección BIAS (parte baja). ....	72
Tabla 4-7. Resumen estadístico de temperatura en el periodo 2005-2015. ....	77
Tabla 4-8. Eficiencia de las modelaciones diarias interanuales en el río Catamayo. ....	79
Tabla 4-9. Eficiencia de la modelación en la estación Boquerón, utilizando pluviómetros y SR. ....	82
Tabla 4-10. Eficiencia de la modelación en la estación Guayabal. ....	83
Tabla 4-11. Eficiencia de la modelación en la estación Vicin, utilizando PPES y pluviómetros. ....	87
Tabla 4-12. Eficiencia de la modelación en la estación Vicin, utilizando PPES-correctos. ....	88
Tabla 5-1. Precipitación observada en el periodo 2005-2015. ....	95
Tabla 5-2. Precipitación media de la cuenca Catamayo, medida con los pluviómetros y estimada por PPES. ....	96
Tabla 8-1. Metadatos del programa. ....	113

## ANEXOS

<b>ANEXO A. IMPLEMENTACIÓN INFORMÁTICA</b> .....	<b>112</b>
<b>ANEXO B. EXTRACCIÓN DE DATOS DE UN RASTER</b> .....	<b>117</b>
<b>ANEXO C. MAPAS DE DATOS OBSERVADO Y ESTIMADOS</b> .....	<b>118</b>



## SIGLAS Y NOMENCLATURA

<i>AMSR-E</i>	<i>Advanced microwave scanning radiometer-EOS.</i>
<i>ATOVS</i>	<i>Advanced TIROS operational vertical sounder.</i>
<i>BM</i>	<i>Técnica del mejor ajuste (best match).</i>
<i>Bv</i>	<i>Archivo de cuenca (modelo CEQUEAU).</i>
<i>CCS</i>	<i>Coficiente de correlación de Spearman.</i>
<i>CIN</i>	<i>Coficiente de infiltración suelo-acuífero (modelo CEQUEAU).</i>
<i>CGIAR/CSI</i>	<i>Consortium for spatial information.</i>
<i>CHRS</i>	<i>Center for hydrometeorology and remote sensing.</i>
<i>CMORPH</i>	<i>CPC morphing technique.</i>
<i>Cnc</i>	<i>Cuenca hidrográfica.</i>
<i>COEP</i>	<i>Factor de corrección de la lluvia/altitud (<math>\text{mm m}^{-1} \text{año}^{-1}</math>, modelo CEQUEAU).</i>
<i>COET</i>	<i>Factor de corrección de la temperatura/altitud (<math>^{\circ}\text{C } 1000 \text{ m}^{-1}</math>, modelo CEQUEAU).</i>
<i>Coord.</i>	<i>Coordenada.</i>
<i>CVMAR</i>	<i>Coficiente de vaciado de lagos y ciénegas.</i>
<i>CVNB</i>	<i>Coficiente de vaciado del acuífero (orificio inferior, modelo CEQUEAU).</i>
<i>CVNH</i>	<i>Coficiente de vaciado del acuífero (orificio superior, modelo CEQUEAU).</i>
<i>CVSB</i>	<i>Coficiente de vaciado del suelo (orificio inferior, modelo CEQUEAU).</i>
<i>CVSI</i>	<i>Coficiente de vaciado del suelo (orificio superior, modelo CEQUEAU).</i>
<i>DFG</i>	<i>Fundación Alemana para la Investigación.</i>
<i>Dhm</i>	<i>Archivo de parámetros (modelo CEQUEAU).</i>
<i>DMSP</i>	<i>Defense meteorological satellite program (EUA).</i>
<i>ECSF</i>	<i>Estación Científica San Francisco.</i>
<i>ENSO</i>	<i>El Niño Oscilación del sur (southern oscillation).</i>
<i>EUA</i>	<i>Estados Unidos de América.</i>
<i>ERA-Interim</i>	<i>European centre for medium-rangeweather forecasts (ECMWF) re-analysis.</i>
<i>Est</i>	<i>Estación.</i>
<i>ET</i>	<i>Evapotranspiración.</i>
<i>EVNAP</i>	<i>Fracción de acuífero para evapotranspiración (ET, modelo CEQUEAU).</i>
<i>EXXKT</i>	<i>Parámetro de ajuste del coeficiente de transferencia (modelo CEQUEAU).</i>
<i>GNU/GPL</i>	<i>General public license.</i>
<i>GOES</i>	<i>Global online enrollment system.</i>
<i>GWP</i>	<i>Global water partnership.</i>
<i>Ha</i>	<i>Hipótesis alterna.</i>
<i>Ho</i>	<i>Hipótesis nula.</i>
<i>HDF</i>	<i>Hierarchical data format.</i>
<i>HINF</i>	<i>Umbral de infiltración suelo-acuífero (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>HINT</i>	<i>Umbral de vaciado del suelo, orificio superior (mm, modelo CEQUEAU).</i>

<i>HMAR</i>	<i>Umbral de vaciado de lagos y ciénegas (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>HMINI</i>	<i>Nivel inicial de agua en lago y ciénegas (modelo CEQUEAU).</i>
<i>HN</i>	<i>Nivel inicial de agua en el acuífero (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>HNAP</i>	<i>Umbral de vaciado del acuífero, orificio superior (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>HPOT</i>	<i>Umbral de extracción para ET (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>HRIMP</i>	<i>Altura de la lámina de agua para el escurrimiento (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>HS</i>	<i>Nivel inicial de agua en el suelo (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>HSOL</i>	<i>Profundidad del recipiente suelo (mm, modelo CEQUEAU).</i>
<i>INAMHI</i>	<i>Instituto nacional de meteorología e hidrología (Ecuador).</i>
<i>IR</i>	<i>Banda infrarrojo (Infrared).</i>
<i>JOEVA</i>	<i>Parámetro que desplaza la fecha de insolación (modelo CEQUEAU).</i>
<i>KODTRAN</i>	<i>Código que indica la ecuación de transferencia (modelo CEQUEAU).</i>
<i>KS</i>	<i>Prueba estadística Kolmogorov Smirnov.</i>
<i>LAWR</i>	<i>Radar meteorológico Loja (LOXX) ó (Local area weather radar).</i>
<i>LEO</i>	<i>Low earth orbit.</i>
<i>LST</i>	<i>Temperatura de la superficie del suelo (Land superficial temperature).</i>
<i>MAE</i>	<i>Ministerio del Ambiente del Ecuador.</i>
<i>MAGAP</i>	<i>Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (Ecuador).</i>
<i>MH</i>	<i>Modelo hidrológico.</i>
<i>MHD</i>	<i>Modelo hidrológico distribuido.</i>
<i>MNA</i>	<i>Modelo numérico de altitud (msnm).</i>
<i>MPEG</i>	<i>Multi-sensor precipitation estimate–geostationary.</i>
<i>MW</i>	<i>Banda microonda (Microwave).</i>
<i>NA</i>	<i>Dato no disponible (not available).</i>
<i>NaN</i>	<i>No es un número (Not a number).</i>
<i>NetCDF</i>	<i>Network common data format.</i>
<i>NEXRAD</i>	<i>Next generation weather radar (EUA).</i>
<i>Ncol/Nrow</i>	<i>Número de columnas/renglones de un raster.</i>
<i>NIR</i>	<i>Banda Infrarrojo cercano (Near infrared).</i>
<i>NOAA</i>	<i>National oceanic and atmospheric administration (EUA).</i>
<i>NSE</i>	<i>Criterio de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe efficiency).</i>
<i>OPERA</i>	<i>The European weather radar network.</i>
<i>Pah</i>	<i>Archivos hidrometeorológicos (modelo CEQUEAU).</i>
<i>PPES</i>	<i>Producto de precipitación estimado por satélite.</i>
<i>PTES</i>	<i>Producto de temperatura estimada por satélite.</i>
<i>PERSIANN</i>	<i>Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks.</i>
<i>PC</i>	<i>Computador personal (Personal computer).</i>
<i>Phy</i>	<i>Archivo fisiográfico (modelo CEQUEAU).</i>
<i>PMW</i>	<i>Banda microonda pasivo (Passive microwave).</i>
<i>P, Prc</i>	<i>Precipitación.</i>
<i>PR</i>	<i>Precipitación de radar (Precipitation radar).</i>
<i>Q, Qdl.</i>	<i>Caudal.</i>

<i>Qc</i>	<i>Caudal calculado (modelación).</i>
<i>Qo</i>	<i>Caudal observado (modelación).</i>
<i>QO</i>	<i>Caudal inicial (modelo CEQUEAU).</i>
<i>Res</i>	<i>Resolución (espacial o temporal).</i>
<i>RIC</i>	<i>Rango intercuartílico.</i>
<i>RIDRENSUR</i>	<i>Empresa Pública de Riego y Drenaje del Sur (Ecuador).</i>
<i>SIG</i>	<i>Sistemas de información geográfica.</i>
<i>SR</i>	<i>Sensores remotos.</i>
<i>SRTM</i>	<i>Shuttle radar topography mission.</i>
<i>SSM/I</i>	<i>Special sensor microwave/imager.</i>
<i>ST</i>	<i>Prueba estadística Siegel-Tukey.</i>
<i>TDWR</i>	<i>Terminal doppler weather radar.</i>
<i>Tiff</i>	<i>Tagged Image File Format.</i>
<i>TMI</i>	<i>TRMM Microwave Imager.</i>
<i>Tmd</i>	<i>Temperatura media.</i>
<i>Tmn</i>	<i>Temperatura mínima.</i>
<i>Tmx</i>	<i>Temperatura máxima.</i>
<i>TMPA</i>	<i>TRMM multi-satellite precipitation analysis.</i>
<i>TRMM</i>	<i>Tropical rainfall measuring mission.</i>
<i>TRI</i>	<i>Fracción de superficie impermeable.</i>
<i>XAA</i>	<i>Exponente de la ecuación de Thornthwaite (modelo CEQUEU).</i>
<i>X-band</i>	<i>Banda X (radar).</i>
<i>XINFMA</i>	<i>Infiltración máxima por día (mm día<sup>-1</sup>, modelo CEQUEU).</i>
<i>XIT</i>	<i>Índice térmico de Thornthwaite(modelo CEQUEU).</i>
<i>XLA</i>	<i>Latitud media de la cuenca (grados, modelo CEQUEU).</i>
<i>UML</i>	<i>Unified modeling language.</i>
<i>UMW</i>	<i>Prueba estadística U Mann-Whitney.</i>
<i>UTM</i>	<i>Sistemas de coordenadas: universal transversal de Mercator.</i>
<i>VIRS</i>	<i>Visible infrared scanner.</i>
<i>VT</i>	<i>Variable temporal.</i>
<i>VTPR</i>	<i>Vertical temperatura profile radiometer.</i>
<i>ZN</i>	<i>Tiempo de concentración de la cuenca (horas, modelo CEQUEU).</i>
<i>ZCIT</i>	<i>Zona de convergencia intertropical.</i>

## **SÍMBOLOS Y UNIDADES**

<i>a</i>	<i>Exponente de la ecuación para calibración de PR.</i>
<i>b</i>	<i>Coficiente para la calibración de PR.</i>
<i>F<sub>k</sub></i>	<i>k-ésimo factor de ponderación.</i>
<i>h</i>	<i>Tiempo en horas.</i>
<i>I</i>	<i>Coordenadas de las celdas CEQUEAU (abscisas).</i>
<i>J</i>	<i>Coordenadas de las celdas CEQUEAU (abscisas).</i>

<i>Km</i>	<i>Kilómetros.</i>
<i>m</i>	<i>Metros.</i>
<i>M</i>	<i>Millones.</i>
<i>msnm</i>	<i>Altitud en metros sobre el nivel medio del mar.</i>
<i>n</i>	<i>Número.</i>
<i>r</i>	<i>Coefficiente de correlación de Pearson.</i>
<i>R</i>	<i>Intensidad de precipitación.</i>
<i>r<sup>2</sup></i>	<i>Coefficiente de determinación.</i>
<i>s</i>	<i>Tiempo en segundos.</i>
<i>sd</i>	<i>Desviación estándar.</i>
$\bar{X}$	<i>Valor promedio.</i>
<i>X<sub>max</sub></i>	<i>Coordenada máxima en X (Longitud).</i>
<i>X<sub>min</sub></i>	<i>Coordenada mínima en X (Longitud).</i>
<i>Y<sub>max</sub></i>	<i>Coordenada máxima en Y (Latitud).</i>
<i>Y<sub>min</sub></i>	<i>Coordenada mínima en Y (Latitud).</i>
°	<i>Grados Latitud (N-S)/Longitud (E-W).</i>
°C	<i>Temperatura en grados Celsius.</i>
°K	<i>Temperatura en grados Kelvin.</i>
~	<i>Aproximadamente.</i>
$\alpha$	<i>Valor de significancia.</i>
$\rho$	<i>Coefficiente de correlación de Spearman.</i>

## **GLOSARIO**

<i>Bias</i>	<i>Error o sesgo en la media.</i>
<i>Calibración</i>	<i>Método indirecto para equiparar las mediciones reales.</i>
<i>Cuenca hidrográfica</i>	<i>Área delimitada por la divisoria de aguas (línea de montañas).</i>
<i>Dato calculado</i>	<i>valores de una variable estimado por algún algoritmo de satélite.</i>
<i>Dato observado</i>	<i>Valor pluviométrico o temperatura medido en estaciones meteorológicas.</i>
<i>Modelo</i>	<i>Representación simplificada de un sistema complejo.</i>
<i>Módulo geomático</i>	<i>Conjunto de procesos que forman una nueva función.</i>
<i>Pbias</i>	<i>Porcentaje se sesgo en la media.</i>
<i>Pixel</i>	<i>Unidad básica de imagen raster (sinónimos: celda, cuadro).</i>
<i>Raster</i>	<i>Matriz de celdas que almacenan información de variables.</i>
<i>Script</i>	<i>Archivos de órdenes.</i>
<i>Tiempo real</i>	<i>Obtención por telemetría del dato de una variable en el instante que es observado.</i>
<i>Validación</i>	<i>Comprobar los resultados obtenidos con otros.</i>

# 1 INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos (*MH*) son herramientas útiles para desarrollar proyectos relacionados con la planeación, el análisis de cantidad y calidad del agua escurrida, el pronóstico hidrológico, la evaluación de los procesos a varias escalas, la evaluación del cambio de uso del suelo, la reconstrucción y generación de series de datos y en general para el apoyo en la gestión de los recursos hídricos. Además, pueden explicar los problemas relacionados con el dimensionamiento de obras hidráulicas, y la reconstrucción y generación de largas series de datos (Bâ et al., 2013; Llanos y Bâ, 2011; Plesca et al., 2012; Refsgaard, 1997; Vázquez, 2010). En la actualidad, se ha generalizado el uso de modelos hidrológicos distribuidos (*MHD*), debido a que toman en cuenta la variabilidad espacio-temporal de las variables climáticas y las características físicas de la cuenca. Por otro lado, los *MHD* facilitan la integración de datos de sensores remotos (*SR*), puesto que requieren de datos matriciales.

Los productos estimados por satélite (*PPES* y *PTES*, precipitación y temperatura, respectivamente) son datos meteorológicos globales que se adquieren vía internet casi en tiempo real, siendo más eficaces que las estaciones convencionales, de las cuales se tiene la información después de un prolongado tiempo. Por otro lado, los radares meteorológicos ubicados en algunas regiones del mundo son a escala espacial y temporal más fina que los *PPES*. En el sur del Ecuador existe un radar banda X, radar *LAWR* (*local area weather radar*) para el monitoreo de la precipitación, «datos disponibles a ~500 m de resolución espacial y frecuencia diaria» (Rollenbeck y Bendix, 2006b).

Por otro lado, el sur del Ecuador es uno de los lugares más biodiversos del mundo (Bendix y Beck, 2016; Brehm et al., 2008; Lozano, 2002; Peters et al., 2013; Richter et al., 2016; Tapia-Armijos et al., 2015). En este lugar han sido pocos los *MH* utilizados para evaluar los recursos hídricos. Los modelos desarrollados a nivel de cuenca hidrográfica han sido poco satisfactorios en la calibración y/o validación debido a la falta de registros climáticos (Oñate y Aguilar, 2003; Oñate Valdivieso, 2009). Sin embargo existen mejores resultados en estudios a nivel de microcuenca, sitios experimentales donde utilizan datos hidrometeorológicos obtenidos por proyectos de investigación (Céleri y Feyen, 2009; Crespo et al., 2011; Plesca et al., 2012).

## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 Los SIG en la gestión de los recursos hídricos

De acuerdo con la asociación mundial para el agua (GWP, 2009), en la *gestión integrada del agua a nivel de cuenca*, se evalúan los recursos hídricos a nivel del sistema (toda la cuenca). En estos términos el estudio se enfoca territorialmente en el área delimitada aguas arriba del punto de interés, sin tomar en cuenta límites político-administrativos. Si bien las políticas de uso y protección de los recursos hídricos se pueden realizar en varias escalas, es más eficaz cuando se ejecutan a nivel de cuenca hidrográfica.

Los sistemas de información geográfica (*SIG*) son herramientas de gran importancia en la gestión de los recursos hídricos, ayudan a recolectar, organizar, procesar y validar los datos. Permiten evaluar el estado de los recursos de la cuenca usando métodos con un enfoque espacial y monitorean sus cambios en función del tiempo (GWP, 2009; Quentin et al., 2007). Además, ayudan a la implementación de nuevas herramientas para la gestión de los recursos hídricos (Franco-Plata, 2008).

Quentin et al. (2007), proponen una metodología de base geomática de cuatro etapas para la gestión integrada del agua: (i) *modelación conceptual*, los mejores modelos conceptuales deben representar no solamente la naturaleza del fenómeno, sino que además incorporarse en un *SIG*, considerando cierta variabilidad espacial del modelo; (ii) *modelación geomática*, convertir los modelos conceptuales en modelos geomáticos, considerando estructuras y operaciones en cualquier *SIG*; (iii) *implementación*, de estos modelos geomáticos por medio de módulos geomáticos en un *SIG* específico y (iv) *aplicación*, se requiere una fase de pruebas considerando aplicaciones para calibrar, validar o retroalimentar el desarrollo.

### 1.1.2 Modelación hidrológica

En términos generales, un modelo es la representación simplificada, bajo una forma física o matemática, de un sistema complejo en el cual las respuestas producidas por una serie de solicitudes externas son difícilmente previsibles a causa del gran número de factores que entran en juego (Llamas, 1993). De acuerdo con la conceptualización de los procesos básicos, los *MH* pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos; con base en la naturaleza de los algoritmos pueden ser determinísticos y estocásticos; y de acuerdo con la representación espacial pueden ser agrupados (globales) y distribuidos.

### 1.1.3 Modelos hidrológicos distribuidos

Los *MHD* tienen varios enfoques según el propósito para el cual hayan sido desarrollados (Tabla 1-1).

**Tabla 1-1. Modelos distribuidos (Singh y Woolhiser, 2002), citado en Guerra Cobián (2007).**

Nombre	Nombre corto	Referencia	Enfoque
<i>Agricultural Non-Point Source Model</i>	<i>AGNPS</i>	Young et al. (1989, 1995)	Parámetros distribuidos, basado en eventos, modelo de simulación de calidad y cantidad de agua.
<i>Hydrological Modeling System Cascade</i>	<i>ARC/EGMO</i>	Becker and Pfutzner (1987), Lamer et al. (1999)	Orientado a procesos, distribuido, sistema de simulación continua.
<i>Cascade two dimensional Mode</i>	<i>CASC2D</i>	Julien and Saghafian (1991), Ogden (1998).	Base física, distribuido, basado en eventos, modelo de simulación de escurrimientos.
<i>Cequeau</i>	<i>CEQUEAU</i>	Morin et al. (1995, 2007)	Distribuido, orientado a procesos, modelo de simulación de escurrimientos continuos.
<i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i>	<i>DHSVM</i>	Wigmosta et al. (1994)	Distribuido, base física, modelo de simulación hidrológica continua.
<i>Geomorphology-Based Hydrology Simulation Model</i>	<i>GBHM</i>	Yang et al. (1998)	Base física, distribuido, modelo de simulación hidrológica continua.
<i>Hydrologic Model System Table</i>	<i>HMS</i>	Yu (1996), Yu and Schwartz (1998), Yu et al. (1999)	Base física, parámetros distribuidos, sistema de simulación hidrológica continua.
<i>Distributed Hydrological Mode</i>	<i>HYDROTEL</i>	Fortin et al. (2001 a, b).	Base física, distribuido, modelo de simulación hidrológica continua.
<i>Institute of Hydrology Distributed Model</i>	<i>IHDM</i>	Beven et al. (1987), Calver and Word (1995)	Base física, distribuido, sistema continuo de modelado lluvia-escurrimiento.
<i>Integrated Hydrometeorological Forecasting System</i>	<i>IHFS</i>	Georgakakos et al. (1999)	Orientado a procesos, distribuido, sistema de pronóstico de lluvia y flujos.
<i>Generalized River Modeling Package-System Hydrologique Europeen</i>	<i>MIKE-SHE</i>	Refsgaard and Storm (1995)	Base física, distribuido, modelo de simulación continua hidráulica e hidrológica.
<i>Macroscale Hydrological Model-Land Surface Scheme</i>	<i>MODCOU-ISBA</i>	Ledoux et al. (1989), Noilhan and Mahfouf (1996)	Macroescala, base física, distribuido, modelo de simulación continua.
<i>Système Hydrologique Européen/Système Hydrologique Européen Sediment</i>	<i>SHE/SHESED</i>	Abott et al. (1986 a, b), Bathurst et al. (1995)	Base física, distribuido, simulación continua de escurrimientos y sedimentos.
<i>Système Hydrologique Européen Transport</i>	<i>SHETRAN</i>	Ewen et al. (2000)	Base física, distribuido, modelo de simulación de calidad y cantidad de agua.

Tabla 1-1. Modelos distribuidos (Continuación).

Nombre	Nombre corto	Referencia	Enfoque
<i>Simple Lumped Reservoir Parametric Model</i>	<i>SLURP</i>	Kite (1995)	Orientado a procesos, distribuido, modelo de simulación continua.
<i>Soil Water Assessment Tool</i>	<i>SWAT</i>	Arnold et al. (1998)	Distribuido, conceptual, modelo de simulación continua.
<i>Thales</i>	<i>THALES</i>	Grayson et al. (1995)	Orientado a procesos, parámetros distribuidos, basado en análisis del terreno, basado en eventos, modelo de simulación de escurrimiento.
<i>Physically Based Runoff Production Model</i>	<i>TOPMODEL</i>	Beven and Kirby (1976, 1979), Beven (1995)	Base física, distribuido, modelo de simulación hidrológica continua.
<i>Variable Infiltration Capacity Model</i>	<i>VIC</i>	Liang et al. (1994, 1996)	Semidistribuido, modelos de simulación hidrológica para grandes cuencas.

#### 1.1.4 Modelaciones hidrológicas con *CEQUEAU*

El modelo *CEQUEAU* es un *MHD* y ha sido utilizado para modelar los caudales en varias cuencas alrededor del mundo, por ejemplo en España (Llanos y Bâ, 2011), África (Bâ et al., 2013), México (Díaz-Mercado et al., 2015; Guerra-Cobián et al., 2013), Canadá (Morin, 2009) y en comparación con otros modelos en Estados Unidos, Canadá y Francia (Askew, 1989), por citar algunos ejemplos.

Guerra-Cobián (2007), implementó un módulo geomático en el *SIG* Idrisi para la discretización espacial de cuencas hidrográficas. El módulo genera los archivos fisiográficos requeridos por el modelo *CEQUEAU*, a partir de un modelo numérico de altitud (*MNA*), un mapa de cobertura del suelo reclasificado y la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas. La finalidad de la herramienta es evitar errores en la extracción manual de la información desde mapas temáticos.

Díaz-Mercado (2010), reprogramó el modelo *CEQUEAU* en el *SIG* Idrisi con el fin de mejorar algunas limitaciones del modelo original. Con esta versión se puede discretizar la cuenca en más de 1000 celdas, utilizar más de 100 estaciones meteorológicas y considera varios métodos de cálculo de evapotranspiración. Utilizando esta nueva versión, Díaz-Mercado et al. (2015) simulaban los caudales del río La Sierra (sur de México, ~4800 km<sup>2</sup>). Las comparaciones entre los caudales interanuales simulados y observados fueron satisfactorias. Los resultados mostraron coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.83 y 0.88, para la calibración y validación, respectivamente.



### 1.1.5 Modelaciones hidrológicas utilizando datos de sensores remotos

Estudios recientes en hidrología utilizan datos de *SR* en las modelaciones hidrológicas. Los *SR* más usados son los *PPES* que son de cobertura global y están disponibles casi en tiempo real, y en otros casos los datos de radar meteorológico que son de cobertura regional y de resolución más fina que los *PPES*.

A continuación se citan algunos estudios de modelación hidrológica que utilizan lluvia estimada por *PPES* y radar:

Worqlul et al. (2017), utilizando datos del satélite *MPEG* sobre dos subcuencas del río Nilo (Gilgel Abay  $\sim 1650 \text{ km}^2$  y Gumara  $\sim 1284 \text{ km}^2$ ), calcularon los escurrimientos diarios con el modelo semidistribuido *HBV*. Los datos del producto de satélite se han corregido mediante *BIAS*. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios con los datos corregidos, en la subcuenca Gilgel Abay el  $\text{NSE} = 0.80$  y  $0.81$  y en la subcuenca Gumara el  $\text{NSE} = 0.79$  y  $0.80$ , respectivamente en los periodos de calibración y validación.

Valdés-Pineda et al. (2016), utilizaron la lluvia de los productos *CMORPH*, *PERSIANN* y *TRMM-3B42* en el modelo *HYMOD\_DS*, sobre la cuenca Zambezi ubicada en el sur de África ( $\sim 339500 \text{ km}^2$ ). Primero realizaron correcciones de sesgo mediante *BIAS* y luego calcularon los caudales diarios. Los valores de *NSE* asociados con los datos corregidos fueron los siguientes: *CMORPH* = 0.6, *PERSIANN* = 0.36 y *TRMM-3B42* = 0.70.

Gonzalez-Leiva et al. (2016), evaluaron los modelos *HM* y *ARX-DKF* utilizando la lluvia estimada por *CMORPH*, *PERSIANN* y *TRMM (TMPA)* sobre la cuenca del río Cazonen en el golfo de México ( $\sim 1600 \text{ km}^2$ ). Los autores reportan únicamente los valores de *NSE* en la validación de 0.75 y 0.81 para *HM* y *ARX-DKF*, respectivamente.

Behrangi et al. (2014), utilizaron *VIC* para modelar los caudales diarios de 22 cuencas con áreas mayores a  $10000 \text{ km}^2$  en el oeste de EUA. Utilizaron cinco productos de satélite: *TRMM-3B42*, *TRMM-3B42RT*, *CMORPH*, *PERSIANN* y *PERSIANN-CSC*, obteniendo respectivamente los siguientes coeficientes de correlación: 0.55, 0.44, 0.41 y 0.50, 0.49.

Magaña-Hernández et al. (2013), estimaron los picos de crecida en la cuenca del río Escondido ( $\sim 3240 \text{ km}^2$ ) ubicada en el norte de México. En la modelación utilizaron datos del radar *NEXRAD* en el modelo *HEC-HMS*. Los resultados muestran valores de *NSE* de 0.96 y 0.97 en dos eventos de lluvia registrados en junio 2003 y septiembre 2006, respectivamente.

Zulkafli et al. (2014), utilizaron el *TRMM-3B42* versiones 6 y 7 en regiones de los Andes-Amazonía de Ecuador y Perú. Observaron que la versión 7 tiene menor sesgo y una mejor representación de la distribución de la lluvia observada. Utilizaron el modelo JULE sobre nueve subcuencas del río Amazonas. Los resultados de las modelaciones no fueron satisfactorios, en tres subcuencas obtuvieron valores positivos con la versión 7, mientras que con la versión 6, los NSE fueron negativos en todas las subcuencas.

Bâ y Serrat-Capdevila (2012), utilizaron la precipitación diaria de los productos *CMORPH* y *PERSIANN* sobre la cuenca del río La Sierra (~4800 km<sup>2</sup>) ubicada en el sur de México. La comparación de la lluvia estimada por los *PPES* y los pluviómetros dio buenos ajustes. Con los datos validados modelaron los caudales diarios en el modelo *CEQUEAU*. El valor más alto de NSE es de 0.72 en el año 2006 utilizando *CMORPH*. Los coeficientes más bajos corresponden al año 2005, NSE = -0.2 con *CMORPH* y NSE = 0.33 con *PERSIANN*.

Stisen et al. (2008), utilizaron datos del satélite *METEOSAT-7* sobre la cuenca del río Senegal (África occidental) de aproximadamente 350000 km<sup>2</sup> de superficie. Con estos datos modelaron los escurrimientos de 9 subcuencas utilizando el modelo distribuido *MIKE-SHE*. Los resultados mostraron coeficientes de determinación de 0.55 y 0.98 en la calibración y 0.37 y 0.97 en la validación.

Posteriormente Stisen y Sandholt (2010), modelaron los escurrimientos en la cuenca del río Senegal utilizando *TRMM*, *CMORPH*, *CPC-FEWS*, *PERSIANN* y *TAMSAT* en *MIK-SHE*. Los *PPES* han sido corregidos mediante BIAS antes de utilizarse en las modelaciones. El NSE mínimo y máximo en el periodo 1987 - 1996 son los siguientes: subcuenca Oualia NSE = 0.63 (*TRMM*) y NSE = 0.83 (*CPC-FEWS*); subcuenca Makana NSE = 0.67 (*TRMM*) y NSE = 0.87 (*CPC-FEWS*); y subcuenca Gourbassi NSE = 0.74 (*CMORPH*) y 0.84 (*CPC-FEWS*).

Lavado et al. (2009), utilizaron *TRMM-3B43* en el modelo *GR2M* sobre la cuenca alta del río Amazonas para modelar los escurrimientos mensuales en las subcuencas Maldonadillo de 60300 km<sup>2</sup> y Tambo de 135250 km<sup>2</sup> de superficie. Los resultados reportados son los siguientes: en Maldonadillo NSE = 0.84 y 0.81 y en Tambo NSE = 0.57 y 0.40, en los periodos de calibración y validación, respectivamente.

Knebl et al. (2005), utilizando *NEXRAD* en *HEC-HMS/RAS* modelaron los flujos diarios en 12 subcuencas de ~10000 km<sup>2</sup> del río San Antonio (Texas, EUA). Reportaron coeficientes de correlación en la calibración de 0.35 y 0.92 y en la validación de 0.23 y 0.93.

### 1.1.6 Modelaciones hidrológicas realizadas en el sur del Ecuador

Estudios realizados en microcuencas del río San Francisco ( $\sim 75 \text{ km}^2$ ), ubicadas en el sur del Ecuador, Plesca et al. (2012) compararon cuatro modelos semidistribuidos: (i) *HEC-HMS*, (ii) *CHIMP*, (iii) *SWAT* y (iv) *LASCAM*; un modelo agregado: (v) *HBV-light* y un modelo distribuido: (vi) *HBV-N-D*, con el propósito de modelar los escurrimientos diarios. En las simulaciones obtuvieron resultados satisfactorios, valores de NSE de 0.60, 0.78, 0.79, 0.55, 0.73 y 0.73, respectivamente según la enumeración anterior.

Por otro lado, Oñate-Valdivieso y Aguilar (2003) implementaron el modelo *SWAT* para calcular los caudales medios diarios y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación Boquerón ( $\sim 1125 \text{ km}^2$ ). El modelo no simuló adecuadamente los caudales, debido a la falta de datos meteorológicos, sin embargo tuvieron mejores resultados en el modelado de sedimentos.

Posteriormente, Oñate-Valdivieso (2009) utilizando el modelo *SWAT*, simuló los caudales mensuales en la cuenca Catamayo-Chira hasta la estación Ardilla ( $\sim 17200 \text{ km}^2$ ). Encontró que el modelo tiene cierta eficacia para reproducir los caudales mensuales en temporada seca y poco efectivo en la simulación de los caudales pico en época lluviosa. Los resultados poco satisfactorios se atribuyen a la falta de información específica requerida por el modelo.

Crespo et al. (2008), utilizaron el modelo *SWAT2000* en 3 microcuencas de la provincia del Azuay en el sur del Ecuador (área aproximada, 1.0, 5.5 y 3.1  $\text{km}^2$ ). Tuvieron dificultad para simular el comportamiento hidrológico de las microcuencas forestadas y con cobertura mixta por el alto grado de incertidumbre en la calibración del modelo, obtuvieron coeficientes de NSE interanuales de 0.40 a 0.84.

Vázquez (2010), utilizando el modelo agregado *NAM* sobre una microcuenca alto-andina de 1.34  $\text{km}^2$ , obtuvo un NSE de 0.21. La poca eficiencia del modelo se atribuye a que existe equifinalidad, es decir no encontró un conjunto de parámetros óptimos para el modelo numérico.

### 1.1.7 Actividades en la cuenca Catamayo

La cuenca Catamayo forma parte del sistema binacional Catamayo-Chira (Ecuador-Perú), con una extensión  $\sim 17200 \text{ km}^2$ . Los dos países han ejecutado en conjunto proyectos de desarrollo y conservación desde los años 70: (i) Plan Binacional de Desarrollo de la Región

Fronteriza, (ii) proyecto de paz y (iii) Agua Sin Fronteras. Actualmente, del lado ecuatoriano se construyen albarradas, infraestructuras que almacenan el agua en la época húmeda y abastece en la época seca por diferentes medios. Además, existen pequeños canales de riego: La Palmira, Campana-Malacatos, Quinara, Vilcabamba, La Era, El Ingenio, Las Cochas - San Vicente, San Pedro de la Bendita, Macará y Zapotillo. Los caudales concedidos son menores a  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , excepto Zapotillo  $\sim 5.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Este último se ubica a  $\sim 2 \text{ km}$  aguas arriba de la estación Vicin y está en operación desde el año 2014 (INERHI-PREDESUR-CONADE, 1994; RIDRENSUR, 2016).

## 1.2 Justificación

En la actualidad existe un sinnúmero de herramientas informáticas que contribuyen al modelado hidrológico. Por ejemplo, los *SIG* interactúan con los *MH*, permitiendo extraer y retroalimentar las bases de geodatos (Franco-Plata, 2008; GWP, 2009; Quentin et al., 2007; Stuebe y Johnston, 1990). Los lenguajes de programación ayudan a crear módulos geomáticos para simplificar procesos. Además, las computadoras actuales procesan mayor cantidad de datos, requeridos en las modelaciones hidrológicas continuas.

Por otro lado, los productos de satélite y radar son a escala global y regional, respectivamente, permitiendo estudiar áreas remotas o con información meteorológica escasa. En la literatura especializada se exponen algunas investigaciones, cuyos resultados reportan buenos ajustes entre precipitación observada y estimada por los *SR* (Sorooshian et al., 2000; Huffman, 2015).

A nivel mundial se ha incrementado el uso de *SR* en los estudios hidrológicos, debido principalmente a la amplia cobertura espacial, la fina resolución temporal y el fácil acceso a dichos datos. Estudios recientes utilizan datos de algún tipo de *SR* en las modelaciones hidrológicas, teniendo buenos resultados en cuencas alrededor del mundo, citando algunos ejemplos se tiene: *NEXRAD* en *HEC-HMS/RAS* (Knebl et al., 2005); *NEXRAD*, *PERSIANN* e *Hydro-Estimator* en *HEC-HMS* (Magaña Hernández et al., 2014), *PERSIANN* y *CMORPPH* en *CEQUEAU* (Bâ y Serrat-Capdevila, 2012); *METEOSAT-7* en *MIKE SHE* (Stisen et al., 2008); *CMORPH*, *PERSIANN-CCD*, *TRMM-3B42 v6*, *CPC-FEWS* y *TAMSAT* en *MIKE SHE* (Stisen y Sandholt, 2010); *CMORPH*, *PERSIANN*, *PERSIANN-CDR*, *TRMM-3B42* y *TRMM-RT* en *VIC* (Behrangi et al., 2014); *TRMM-3B43* en *GR2M* (Lavado et al., 2009); Radar Cerro Catedral, *CMORPH* y *PERSIANN* en *CEQUEAU* (Vilchis-mata et al., 2015); *MPEG* en *HBV* (Worqlul et al., 2017); *TRMM-3B42 v7*,

*CMORPH* y *PERSIANN* en *MGB-IPH* (Zubieta et al., 2015); *TRMM-3B42 v6* y *v7* en *JULE* (Zulkafli et al., 2014); *TMPA TRMM-3B42 v6* en *HEC-HMS* (Arias-Hidalgo et al., 2013); *NCEP, DDS, SDS* en *PRMS* (Hay y Clark, 2003); *TRMM-3B42 v7, CMORPH, PERSIANN* en *HYMOD\_DS* (Valdés-Pineda et al., 2016).

Ecuador es uno de los diez países con mayor biodiversidad en el mundo y ocupa el primer lugar por unidad de superficie. En los mismos términos, el sur del Ecuador es una región muy diversa y es un punto crítico de biodiversidad, es decir la diversidad biológica tiene serias amenazas de su existencia. Las amenazas provienen, por un lado, de la explotación masiva de los recursos naturales, y por otro lado, el avance del desierto desde el sur. La degradación de los ecosistemas tiene un impacto en la cantidad y calidad de los recursos hídricos. Por ello es importante conocer la dinámica del agua en la región, para la toma de decisiones en los planes de manejo y conservación de los Recursos Naturales.

En los Andes del sur del Ecuador se han realizado pocos estudios de modelación hidrológica a nivel de cuenca hidrográfica. Los modelos desarrollados han tenido inconvenientes por la falta de registros climáticos y por requerimientos específicos de los modelos. Debido a esto, y para ampliar el uso de datos de satélite y radar en la hidrología, se propone utilizar los productos *CMORPH, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42, ERA-Interim* y *radar-LAWR* en el modelo *CEQUEAU* sobre la cuenca del río Catamayo.

El modelo *CEQUEAU* ha sido utilizado en algunas regiones del mundo con marcados periodos estacionales. La cuenca Catamayo tiene condiciones climáticas peculiares. Por un lado, la parte alta tiene aportes continuos de lluvia, influenciada por los vientos alisios, humedad de la cuenca amazónica y la orografía irregular de la cordillera de los Andes. Mientras que la parte baja de la cuenca es afectada por eventos extremos de lluvia (El Niño) y sequías (La Niña). Por tales razones se desea evaluar el modelo hidrológico *CEQUEAU* e identificar los parámetros óptimos que ayuden a modelar el escurrimiento en esas condiciones climáticas.

### 1.3 Hipótesis

Es posible modelar los caudales diarios de una cuenca con condiciones climáticas inusuales, utilizando datos meteorológicos de sensores remotos (precipitación y temperatura) en un modelo hidrológico distribuido.

### 1.4 Objetivos

#### *Objetivo General*

Modelar los caudales de una cuenca hidrográfica ubicada en los Andes del sur del Ecuador, utilizando un modelo hidrológico distribuido y datos meteorológicos estimados por sensores remotos.

#### *Objetivos específicos*

- Caracterizar la fisiografía de la cuenca de estudio a partir de un modelo numérico de altitud y una imagen de cobertura del suelo con la finalidad de discretizar los parámetros de cuenca.
- Procesar y validar los datos meteorológicos estimados por sensores remotos: radar *LAWR*, y los algoritmos de satélite: *CMORPH*, *PERSIANN-CDR*, *TRMM-3B42* y *ERA-Interim* con los datos observados en estaciones meteorológicas para su uso en el modelo distribuido *CEQUEAU*.
- Calibrar y validar el modelo *CEQUEAU* para la simulación de los caudales diarios en una cuenca con condiciones climáticas inusuales, utilizando datos meteorológicos observados y estimados por sensores remotos.
- Desarrollar herramientas informáticas que contribuyan al procesamiento de los datos estimados por los algoritmos de satélite y los datos observados en las estaciones hidrometeorológicas para el modelo *CEQUEAU*.

## 2 MARCO CONCEPTUAL

En este apartado se definen los conceptos básicos de las variables que intervienen en el modelamiento hidrológico, se describen las características de los sensores remotos y las herramientas informáticas utilizadas en la modelación y el modelo hidrológico *CEQUEAU*.

### 2.1 Procesos del ciclo del agua

El agua que entra en un ecosistema procede principalmente de la lluvia, parte de ella se evapora mientras llueve, otra parte intercepta en la vegetación donde puede evaporarse o precipitarse bajo el dosel, y el resto de la lluvia impacta directamente en la superficie del suelo o cuerpos de agua. Una vez que el agua llega al suelo se puede infiltrar hacia capas subyacentes, perderse por evaporación directa y evapotranspiración. El agua que no se absorbe escurre por la superficie hasta llegar a los cauces de los ríos (escurrimiento superficial). A este conjunto de procesos se le llama ciclo hidrológico (Figura 2-1). Las propiedades del suelo que intervienen en el movimiento del agua son la conductividad hidráulica, la textura, el contenido de materia orgánica, la humedad y los fragmentos del suelo. Además, la pendiente del terreno y el uso y cobertura del suelo son factores que influyen en la velocidad del escurrimiento superficial (Bonell, 1998; Bruijnzeel et al., 2011; Fleischbein et al., 2006).

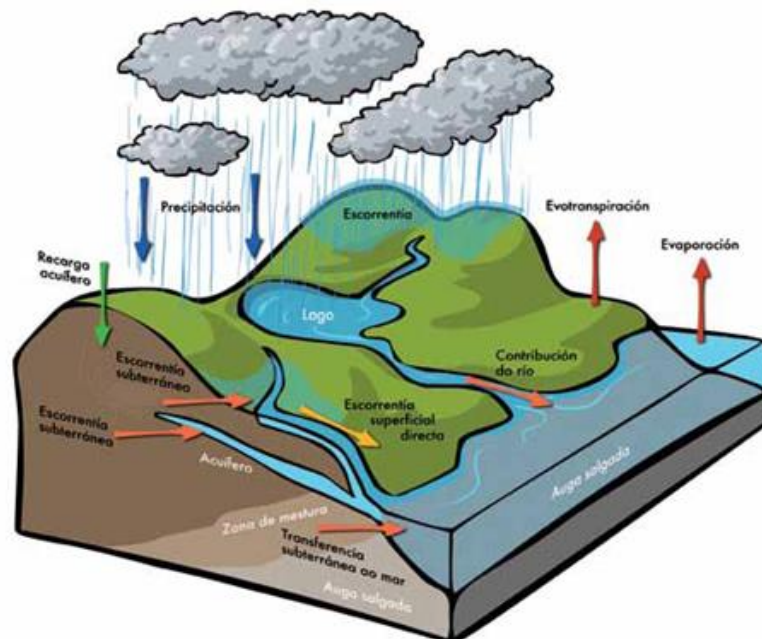


Figura 2-1. Ciclo de agua («Climántica», s. f.).

## 2.2 Sensores remotos

Los SR son herramientas para la captura de la radiación o reflectividad en bandas espectrales (Figura 2-2) en distintas escalas de tiempo y espacio. Los sensores capturan la reflectividad, por un lado, desde la atmósfera: satélites, aviones y globos, y por otro lado, desde la superficie de la Tierra: radares y sondas. El objeto de estudio debe estar físicamente alejado del sensor, por tal razón los satélites y radares cubren amplias regiones de la Tierra (Kapetsky y Aguilar-Manjarrez, 2009).

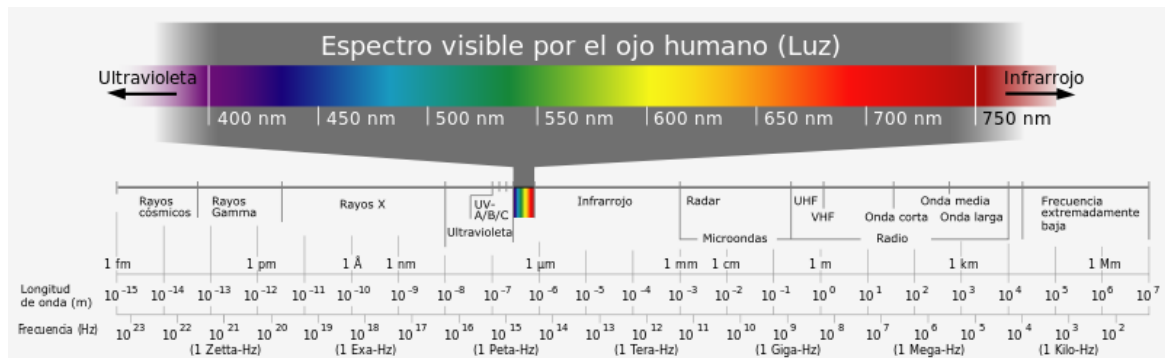


Figura 2-2. Espectro electromagnético (Contributors, 2017).

### 2.2.1 Radar meteorológico

El radar tuvo origen, con fines militares, antes de la II Guerra Mundial. En la postguerra, también ha sido utilizado en tareas civiles, incluyendo la meteorología. El principio del radar es el mismo que tuvo desde sus inicios, emite pulsos de energía electromagnética (radiación en las bandas C, L, S, X u otro) que son interceptados por el blanco, en el radar meteorológico: lluvia, nieve o granizo. Las ondas electromagnéticas son devueltas al radar en forma de ecos. Los radares miden el eco o reflectividad ( $Z$ ), la cual tiene relación con la intensidad de precipitación ( $R$ ) (Rosengaus M., 1995a,b). Las imágenes de radar se calibran con la precipitación observada en campo con la Ecuación (2-1), donde  $a$  y  $b$  dependen del tipo de la precipitación (Rosengaus M, 1995b).

$$Z = aR^b \quad (2-1)$$

A nivel mundial existen radares meteorológicos que se conocen ampliamente, por ejemplo la red de radares *Next Generation Radar (NEXRAD)* y *The Terminal Doppler Weather Radar (TDWR)* en Estados Unidos, *The European Weather Radar Network (OPERA)* en Europa, así como las marcas *SELEX-Gematronic* de Alemania. El *Local Area Weather Radar (LAWR)* es un radar meteorológico de origen danés utilizado en el sur del Ecuador.



El *LAWR* es un radar de banda X ubicado en el cerro El Consuelo a ~3200 msnm. La cobertura de *LAWR* es de 60 km de radio y provee imágenes a distintas resoluciones (disponibles a resolución espacial de 0.5 km, frecuencia de 1 día, en el periodo 2002-2007). Las imágenes *LAWR* han sido calibradas por Fries et al. (2014), Rollenbeck (2006) y Rollenbeck y Bendix (2006a) utilizando un enfoque semiempírico debido a que no es un radar meteorológico convencional, sino que se trata de un radar marino modificado (Nielsen et al., 2013; Thorndahl y Rasmussen, 2012).

## 2.2.2 Precipitación estimada por productos de satélite

Los algoritmos de satélite transforman la reflectividad de los *SR* en información climática, la cual posteriormente se calibra con observaciones de campo (Serrat-Capdevila et al., 2016). Los *PPES* difieren entre sí, en función de las bandas espectrales utilizadas en el algoritmo. Los *PPES* utilizan por lo general las bandas *IR*, infrarrojo termal (*TIR*), microonda (*MW*), microonda pasivo (*PMW*) y la combinación de radar meteorológico, *MW*, *IR* y radiación *VIRS*. Los *PPES* son a escala global (Longitud: 0° a 360°, Latitud: 50°N-S o mayor) y algunos de ellos están disponibles casi en tiempo real.

Con base en el campo electromagnético, los *PPES* se agrupan en **IR**: *hydro-Estimator*, *EURAINSAT/A* 1.0 y *CMA*; **combinación de bandas**: *TRMM-3B41RT*, *GOES* y *GPCP*; **microonda**: *TRMM-3B40RT*, *Sensor Microondas/Imager (SSM/I)*, *NOAA-NESDIS* y *MIRS*; **combinación MW-IR**: *CMORPH*, *EURAINSAT/B* 1.0, *PERSIANN* y *TRMM-3B42* (Huffman, 2015; Joyce et al., 2004; Simpson et al., 1988; Sorooshian et al., 2000).

### 2.2.2.1 CMORPH

El *CMORPH* (*CPC MORPHing technique*, Joyce et al., 2004) desarrollado por la *National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA)*, es un algoritmo de precipitación de escala global (60°N a 60°S) a 0.25° de resolución (~27.5 km en el Ecuador). Las imágenes *CMORPH* son estimadas de datos de satélite *MW-IR*. El producto *CMORPH* provee imágenes desde el año 2002 a la fecha presente. En la actualidad el producto es derivado de *PMW* a bordo del *Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)* 13, 14 y 15 (*SSM/I*), *NOAA-15*, 16, 17 y 18 (*Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR- E)*, *Advanced Microwave, AMSU-B*) y *Advanced microwave scanning radiometer-EOS (AMSR-E)* a bordo del *Aqua-NASA* y *TMI* a bordo del satélite *TRMM*. Este producto también está disponible a resolución de 8 km y frecuencia de 30 minutos.

### **2.2.2.2 TRMM-3B42\_Daily (TMPA)**

El *TRMM* (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, Huffman, 2015) es la misión para la investigación de la precipitación y el clima, desarrollado en colaboración de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). El *TRMM* es un satélite que contiene tres instrumentos [(i) *PR*, *Precipitation Radar*; (ii) *TMI*, *TRMM Microwave Imager* y (iii) *VIRS*, *Visible Infrared Scanner*] para el monitoreo de la distribución y variabilidad de precipitación a escala global. El producto *TRMM-3B42\_Daily versión 7* (*TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis, TMPA*) es derivado del producto original *TRMM-3B42\_3-hourly* generado por la NASA GES DISC. El *TRMM-3B42\_Daily* provee datos de lluvia diarios desde el año 1998 a la fecha actual a 0.25° de resoluciones espacial (~27.5 km en el Ecuador) y latitud: 50°N a 50°S (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2016).

El *TMPA* tiene dos productos que comparten parcialmente el algoritmo. El producto *3B42 versión 7* enfocado para la investigación y el *3B42RT* de aplicaciones en tiempo real. Ambos son usados ampliamente por la comunidad de usuarios. Los productos combinan las estimaciones de pluviometría de varios sensores de microondas pasivas (*PMW*) a bordo de los satélites *Low Earth Orbit (LEO)*, incluidos el *TRMM*, *Microwave Imager (TMI)*, (*SSM/I*), *AMSU-B* y sensores a bordo de plataformas del Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa de EUA (*DMSP*) y *NOAA* (Mantas et al., 2015). Adicionalmente, el *TRMM Combined Instrument (TCI)* es usado en la calibración del *3B42V7*, y no es usado en la versión *RT*.

### **2.2.2.3 PERSIANN-CDR**

El producto *PERSIANN-CDR* (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record*, Sorooshian et al., 2000; Ashouri et al., 2015), es un producto global, latitud: 60°N a 60°S, 0.25° de resolución, utiliza imágenes *IR* de satélites geoestacionarios y un sensor de microonda pasivo (*TMI*). El *PERSIANN-CDR* es desarrollado por el *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS)* de la Universidad de California y tiene un conjunto de datos, alrededor de 30 años, desde el año 1983 hasta la actualidad (presente retrasado). El *PERSIANN-CDR* se genera a partir del algoritmo *PERSIANN* utilizando los datos infrarrojos GridSat-B1 y se ajusta utilizando el producto mensual del *GPCP* (*Global Precipitation Climatology Project*).

### 2.2.3 Temperatura estimada por satélite

El *ERA-Interim* es un producto de temperatura del aire en °K a 2 m sobre el nivel del suelo, de 0.25° de resolución, frecuencia diaria y dominio global. El Centro Europeo *Interim European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis*, es un conjunto de productos de variables climáticas, entre ellos temperatura, basado en datos de la NOAA: *vertical temperatura profile radiometer (VTPR)*, sistemas *TOVS* y *ATOVS*, *DMSP: SSM/I*, *ERS/SCATTEROMETER* (Dee et al., 2011; Laury et al., 2014). Los instrumentos de los sistemas *TOVS* y *ATOVS* miden la radiancia de la atmósfera y de la Tierra, son parte de los satélites de órbita polar (*POES*) de la NOAA. Los sistemas captan la radiación en *IR-MW* y canales de alta y baja frecuencia (Hernandez et al., 2004).

## 2.3 Lenguaje R

El R es un lenguaje de computación, especializado en el análisis estadístico y procesamiento de datos, creado por Ihaka y Gentleman (1996) en el departamento de Estadística de *Auckland University*, en Nueva Zelanda. El predecesor del lenguaje R es S, comercializado como S-Plus. A diferencia de éste, el lenguaje R se distribuye con licencia libre (*General Public Licence*) en Unix, Ubuntu y Windows. Los paquetes base de R incluyen funciones para el análisis y tratamiento de datos vectorial, matricial y raster, y otros paquetes se instalan desde archivos binarios del sitio web <https://cran.r-project.org/> o desde Git en Github.

El lenguaje R es orientado a objetos, interpretado y no necesita de un compilador para ser ejecutado, tiene una interfaz sencilla que incluye la consola y un editor de texto donde se escribe el código. Existen editores para el lenguaje R que tienen interfaces gráficas más amigables que la tradicional, por ejemplo Tinn-R, Emacs y Rstudio. En la Figura 2-3 se muestra la interfaz de Rstudio. Éste programa divide el área de la pantalla en: editor, consola, área de gráficos, historial y los objetos creados por el usuario. Para mayor información sobre el lenguaje R revisar las notas de Kuhnert y Venables (2005), R Core Team (2016), Venables y Smith (2016) y Wickham y Chang (2016).

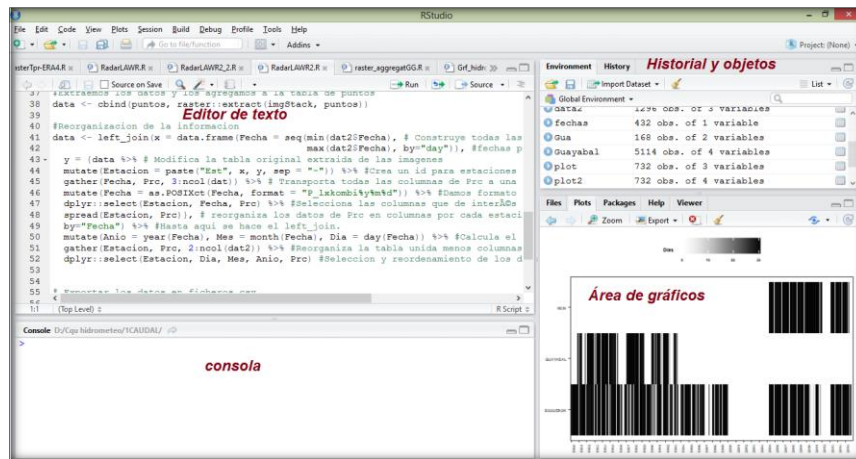


Figura 2-3. Interfaz gráfica del programa Rstudio.

## 2.4 SIG Idrisi/Terrset

Idrisi es un sistema de información geográfica con más de 300 módulos para el análisis y procesamiento de datos raster y vectoriales. La última versión (Terrset 18.2), incluye nuevas herramientas para el estudio de cambio climático y ha modificado su nombre con respecto a las versiones anteriores. Sin embargo conserva los módulos para el análisis espacial y la estructura de sus predecesores. El procesamiento de los datos se puede realizar desde macromodelos, línea de comandos o con la calculadora geomática. Los datos vectoriales se procesan desde la tabla “*database workshop*” y se pueden espacializar con la vinculación de un vector. Idrisi tiene su propia estructura de archivos, si bien puede leer otros formatos, una vez que se importan al SIG, se almacenan como raster (\*.rst) o vector (\*.vct). Cuando se vincula una base de datos a un vector se genera un archivo \*.vlx, que asocia la entidad espacial y tabular. Para mayor información sobre el funcionamiento de Idrisi/Terrset revisar las notas de Eastman (2016) y (2012).

## 2.5 Modelo hidrológico CEQUEAU

El modelo *CEQUEAU* (Morin, 2009) es un *MHD*, consta de dos funciones para el modelado de los caudales: (i) producción y (ii) transferencia. La primera función (Figura 2-4A) se refiere al modelado del flujo vertical del agua (precipitación, evapotranspiración e infiltración). El agua no abstraída es la lluvia efectiva en cada celda (producción unitaria). La segunda función (Figura 2-4B) modela el flujo lateral del agua, es decir la transferencia de la lluvia efectiva en la red de drenaje. La lluvia producida en cada celda se transfiere, por variación de potencial, desde la parte alta hacia el exutorio de la cuenca. Además, la

función de transferencia toma en cuenta la influencia de lagos, ciénagas e infraestructuras hidráulicas (Morin y Paquet, 2007).

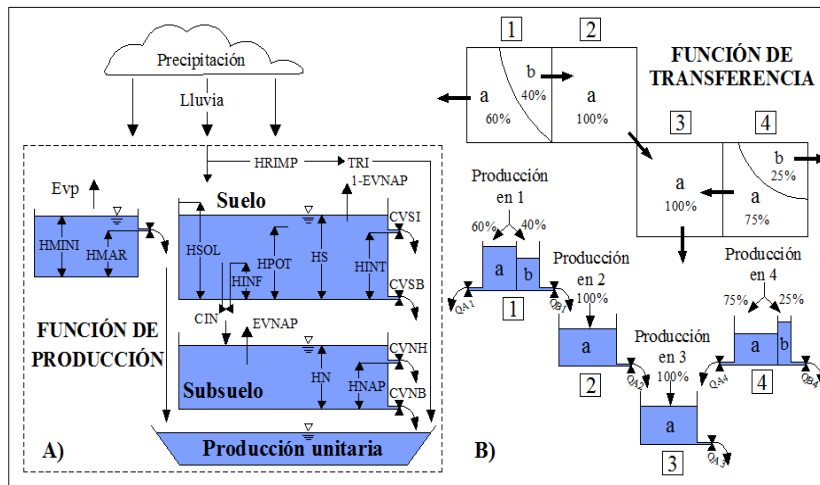


Figura 2-4. Esquema del modelo CEQUEAU: A) función de producción en la fase líquida y B) función de transferencia, modificado de Morin (2009).

### 2.5.1 Discretización del área del área de estudio

Los MHD discretizan la cuenca en áreas homogéneas. El modelo CEQUEAU divide la cuenca en una malla de celdas de dimensiones  $n \times n$  (coordenadas  $IJ$ ). Una celda se subdivide hasta máximo 4 subceldas (A, B, C y D). Una celda con una única dirección, el 100% del agua se transfiere hacia una celda receptora aguas abajo, una celda que se divide en dos por el parteaguas de la cuenca, un porcentaje se transfiere hacia dentro y el otro se vacía hacia afuera de la cuenca, y así sucesivamente para 3 o 4 divisiones (Figura 2-5).

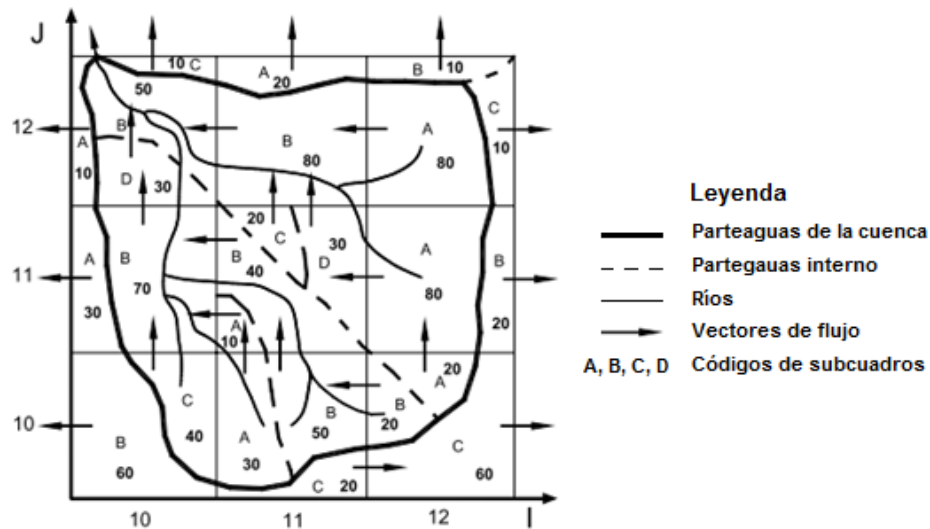


Figura 2-5. Discretización de la cuenca en celdas  $n \times n$  y sentidos de flujo, modificado de Morin (2009).

### 2.5.2 Estructura de los datos requeridos por el modelo CEQUEAU

De forma general, el modelo CEQUEAU requiere de dos tipos de datos: (i) fisiográficos (\*.Phy y \*.Bv) y (ii) datos hidrometeorológicos (\*.Dhm) (Figura 2-6).

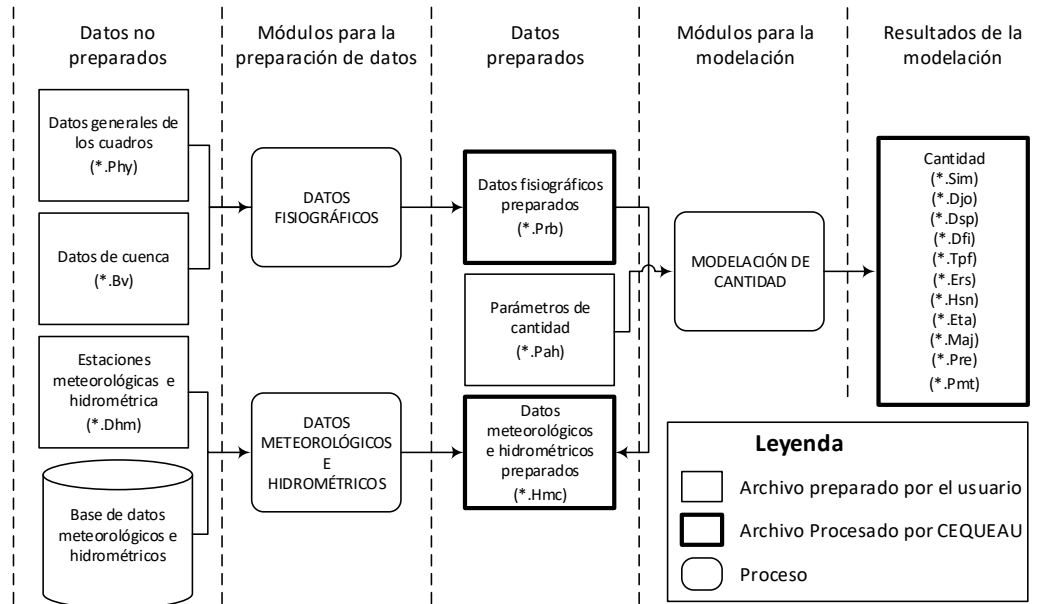


Figura 2-6. Estructura general del modelo CEQUEAU, adaptado de Morin (2009).

El archivo \*.Phy contiene en cada línea la ubicación IJ de las celdas que intersectan con la cuenca, las celdas receptores, el porcentaje de cobertura del suelo en la celda (“bosque”, “lagos”, “ciénegas” y “otros”) y la altitud media de la celda. El archivo de cuenca (\*.Bv) es más sencillo, contiene la ubicación de las estaciones hidrométricas en la celda correspondiente, el nombre de la estación y el área de la cuenca en km<sup>2</sup>.

El archivo \*.Dhm contiene en la primera línea el periodo de datos para la modelación, el número de estaciones, el paso del tiempo de modelación en horas. En la segunda y tercera línea se ingresa la dirección física de la PC donde se encuentran las bases de datos meteorológica e hidrométrica, respectivamente. Seguido, en las siguientes líneas, se listan los nombres de las estaciones meteorológicas e hidrométricas.

### **2.5.3 Extracción de datos fisiográficos**

La extracción de los datos fisiográficos se puede realizar manualmente desde mapas de isolíneas (cartas topográficas) o automática desde un *MNA* en un algún SIG.

En la forma manual, se delimita la cuenca hidrográfica sobre una carta topográfica, se divide el área en una malla de cuadros. Se trazan los vectores de flujo para la transferencia del agua desde la parte alta hacia el exutorio. Las celdas de la malla se enumeran desde la esquina inferior izquierda y se empieza en las coordenadas (I = 10, J = 10).

En la forma automática se utiliza un *MNA*, un mapa de cobertura del suelo y las ubicaciones de las estaciones meteorológicas e hidrométricas en un SIG. Se obtiene un vector del límite de la cuenca, se crea un vector con las ubicaciones geográficas de las estaciones hidrometeorológicas, se reclasifica el mapa de cobertura del suelo. Se obtienen las direcciones de flujo en relación a la pendiente del terreno y se divide el área en celdas de dimensiones  $n \times n$ , las cuales deben ser divisibles a las dimensiones del *MNA*.

### **2.5.4 Parámetros de cantidad**

En la Tabla 2-1 se observa los parámetros e índices que se calibran en el modelo *CEQUEAU*. En la primera sección se listan los coeficientes para el movimiento del agua en los recipientes suelo, subsuelo y cuerpos de agua, seguido de los niveles de agua en los recipientes, las condiciones iniciales de humedad del suelo y finalmente los parámetros de transferencia.

Tabla 2-1. Parámetros y coeficientes del modelo CEQUEAU, modificado de Morin (2009).

Tipo	Nombre	Descripción	Unidad
Suelo / coeficientes	<b>CIN</b>	Coeficiente de infiltración suelo-acuífero.	-
	<b>CVMAR</b>	Coeficiente de vaciado de lagos y ciénegas.	-
	<b>CVNB</b>	Coeficiente de vaciado del acuífero (orificio inferior).	-
	<b>CVNH</b>	Coeficiente de vaciado del acuífero (orificio superior).	-
	<b>CVSB</b>	Coeficiente de vaciado del suelo (orificio inferior).	-
	<b>CVSI</b>	Coeficiente de vaciado del suelo (orificio superior).	-
	<b>XINFMA</b>	Infiltración máxima por día.	mm día <sup>-1</sup>
Suelo / niveles	<b>HINF</b>	Umbral de infiltración suelo-acuífero.	mm
	<b>HINT</b>	Umbral de vaciado del suelo (orificio superior).	mm
	<b>HMAR</b>	Umbral de vaciado de lagos y ciénegas.	mm
	<b>HNAP</b>	Umbral de vaciado del acuífero (orificio superior).	mm
	<b>HPOT</b>	Umbral de extracción para ET.	mm
	<b>HSOL</b>	Profundidad del recipiente suelo.	mm
	<b>HRIMP</b>	Altura de la lámina de agua para el escurrimiento.	mm
Suelo / otros	<b>COEP</b>	Factor de corrección de la lluvia/altitud.	mm m <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
	<b>EVNAP</b>	Fracción de acuífero para ET.	-
	<b>TRI</b>	Fracción de superficie impermeable.	-
	<b>XAA</b>	Exponente de la ecuación de Thornthwaite.	-
	<b>XIT</b>	Índice térmico de Thornthwaite.	-
	<b>XLA</b>	Latitud media de la cuenca.	Grd Sex
	<b>COET</b>	Factor de corrección de la temperatura/altitud.	-
Condiciones iniciales	<b>HSINI</b>	Nivel inicial de agua en el suelo.	mm
	<b>HNINI</b>	Nivel inicial de agua en el acuífero.	mm
	<b>HMINI</b>	Nivel inicial de agua en lago y ciénegas.	mm
	<b>QO</b>	Caudal inicial en el exutorio de la cuenca.	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Transferencia	<b>EXXKT</b>	Parámetro de ajuste del coeficiente de transferencia.	-
	<b>ZN</b>	Tiempo de concentración de la cuenca.	días
	<b>KODTRAN</b>	Código que indica la ecuación de transferencia.	-



### 3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El procedimiento desarrollado en esta investigación se dividió en cinco etapas: (i) selección y descripción del área de estudio; (ii) obtención de parámetros fisiográficos de cuenca; (iii) generación de bases de datos hidrometeorológicas; (iv) generación de bases de datos de precipitación y temperatura estimados por *SR* y (v) calibración y validación del modelo *CEQUEAU* con los diferentes tipos de datos (Figura 3-1).

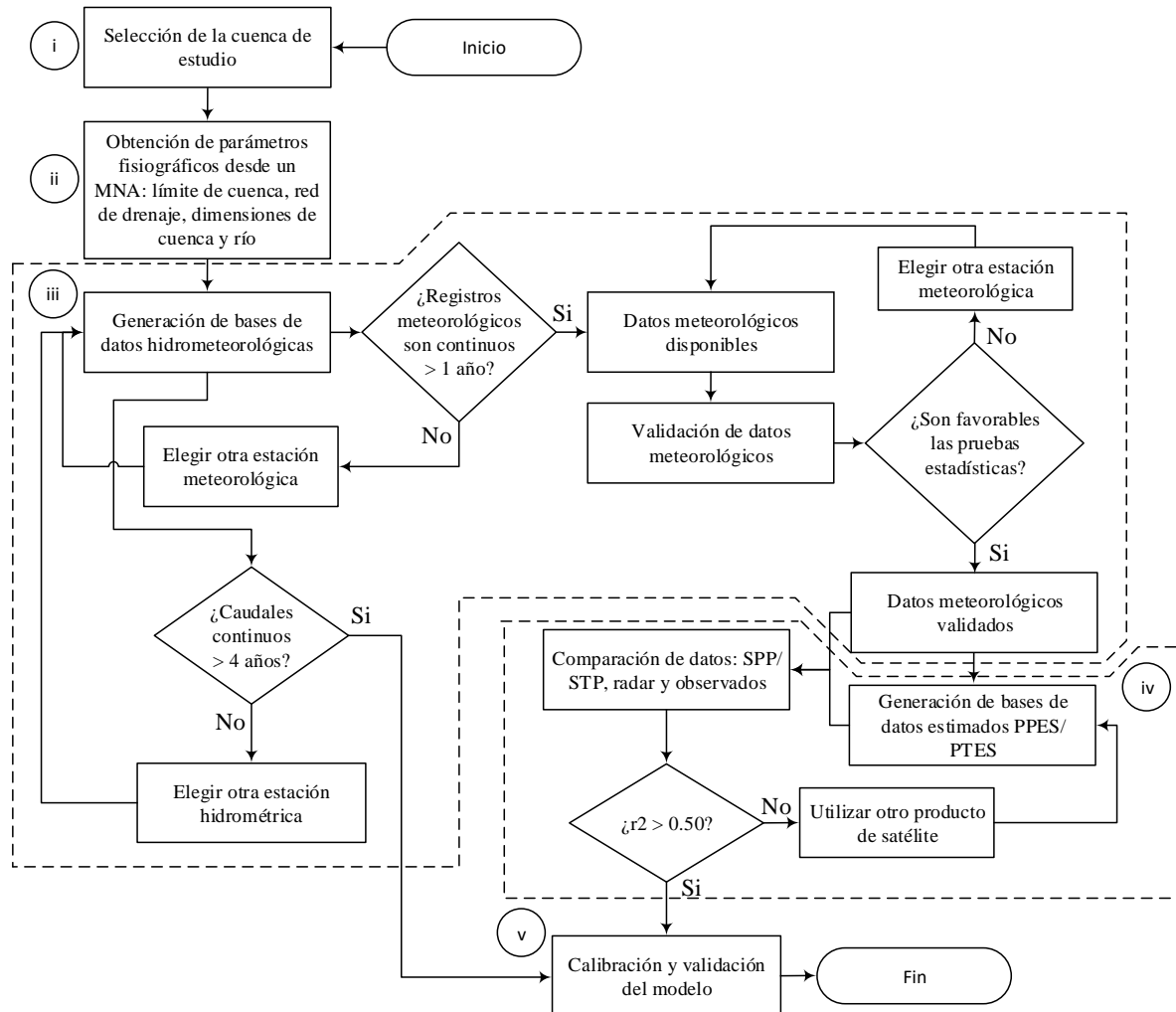


Figura 3-1. Diagrama de flujo para el desarrollo del método de investigación.

#### 3.1 Área de estudio

La cuenca Catamayo (centro de gravedad:  $-4.094^{\circ}$  /  $-79.569^{\circ}$ ; área:  $\sim 4160$  km<sup>2</sup> y altitud entre 257 y 3770 msnm) se ubica en la provincia de Loja, en los Andes del sur del Ecuador (Figura 3-2A), región considerada entre los sitios más biodiversos del mundo (Brehm et al., 2008; Lozano, 2002; Richter et al., 2016; Tapia-Armijos et al., 2015). En este lugar la

elevación de los Andes disminuye con relación a los Andes del norte y del sur, conocida como depresión de Huancabamba, que se extiende entre el sur del Ecuador y el norte del Perú, Latitud  $-2^{\circ}$  a  $-7^{\circ}$  (Figura 3-2B). La cuenca del río Catamayo se trazó desde la estación hidrométrica Vicin y se consideraron otras dos estaciones aguas arriba: Boquerón y Guayabal (Figura 3-2A) que forman las subcuencas del mismo nombre. El agua del río Catamayo se dirige en dirección este-oeste y aguas abajo de la estación Vicin recibe aportes de otros afluentes y toma el nombre de río Catamayo-Chira (Perú) hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

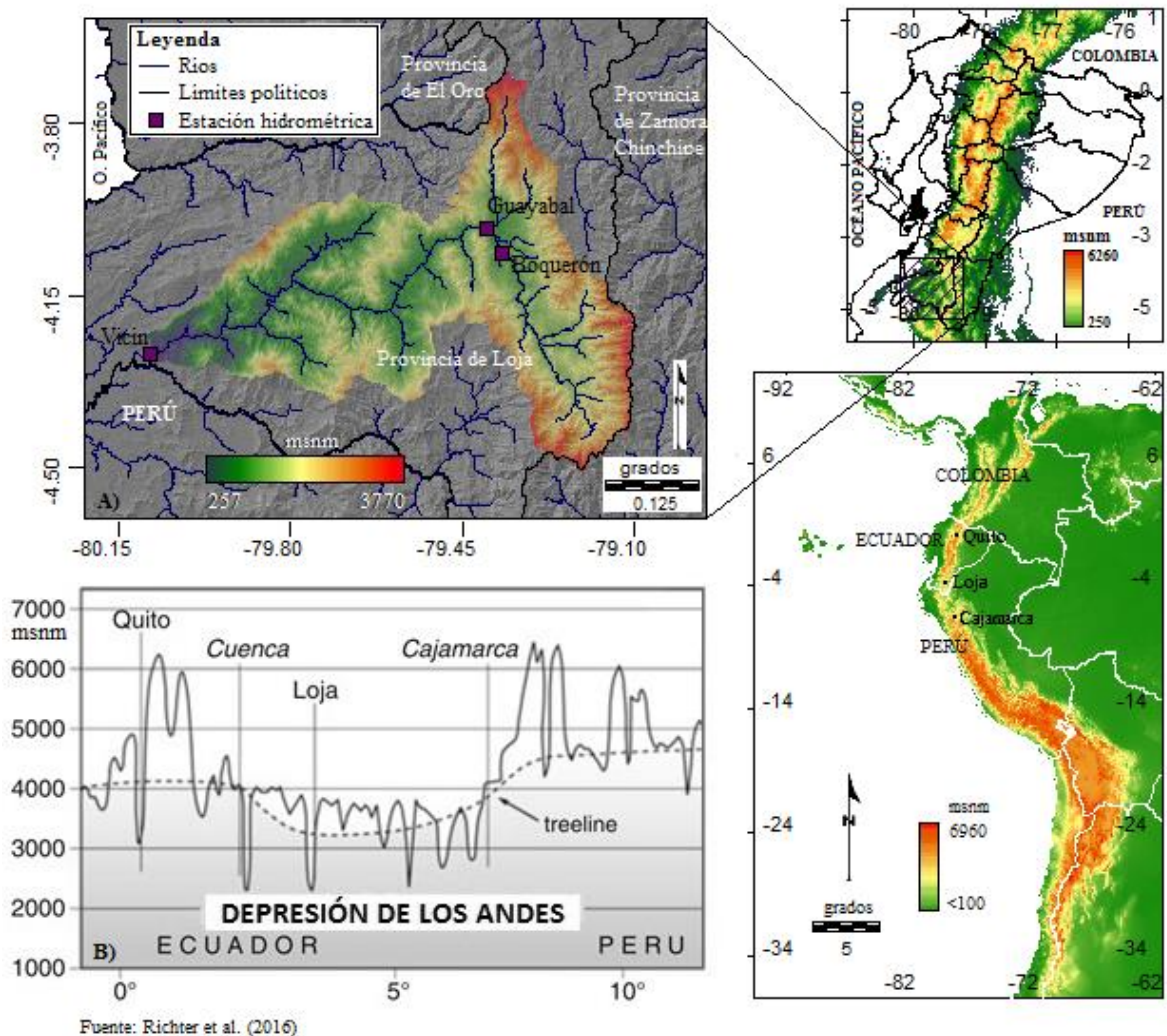


Figura 3-2. Localización del área de estudio: A) ubicación de la cuenca Catamayo, Coord. Geográficas, datum WGS84 (Fuente MNA: Jarvis et al., 2008), B) depresión de los Andes (Fuente: Richter et al. 2016).

La depresión de la cordillera en el sur del Ecuador forma diversos pisos altitudinales y genera una serie de microclimas y ecosistemas, diferentes al resto de la región andina.

Hacia el este se forman cadenas montañosas transversales a los Andes, las cuales se ramifican desde los nudos de Cajanuma, Sabanilla y Guagrahuma, debido a esto la orografía de la provincia de Loja es muy irregular. El valle de Catamayo [entre las estaciones Boquerón y Guayabal (Figura 3-2A)] es el único lugar plano de la cuenca Catamayo.

En un mapa de clima (método de Thornthwaite, escala 1:50000) realizado por el servicio meteorológico del Ecuador - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI (2006), clasifican el área de estudio en 16 tipos de climas (Figura 3-3). El clima subhúmedo con pequeño déficit de agua predomina en el área. El lugar más húmedo es la parte este, en la cordillera de los Andes, recibe precipitaciones durante la mayor parte del año. Los valles interandinos y los lugares ubicados al oeste del área de estudio tienen climas secos, donde se presentan lluvias estacionales en el periodo diciembre-mayo.

En la zona ecuatorial, la temperatura no varía en gran medida durante el año. Sin embargo, disminuye en ascenso altitudinal (gradiente térmico  $- 0.5$  a  $- 0.6$  °C  $100$  m<sup>-1</sup>). En el cinturón tropical convergen los vientos alisios, conocido como zona de convergencia intertropical (ZCIT), responsables de transportar humedad desde la cuenca amazónica en forma de lluvia, nubes y neblina. La parte baja de la cuenca Catamayo es influenciada por masas de aire secas derivadas desde el Pacífico por la corriente de Humboldt y por lo tanto son mucho más secas, excepto durante El Niño (Buytaert et al., 2006).

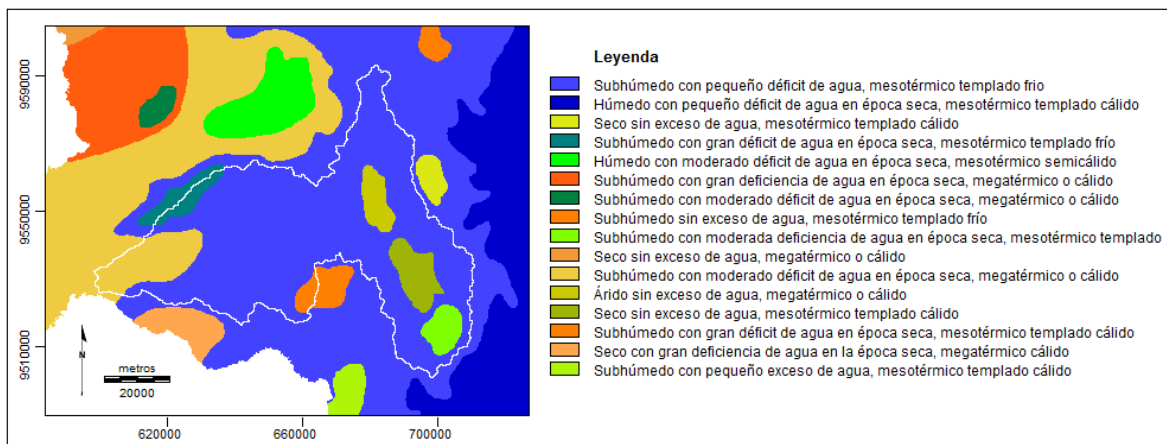


Figura 3-3. Climas del sur del Ecuador. Coord. UTM 17S, datum WGS84, fecha 2006.

### **3.1.1 Cobertura del suelo**

En el sur del Ecuador se conocen 17 tipos de vegetación que están relacionados con el clima, tipo de suelo, geografía y factores locales (Lozano, 2002). Los tipos de vegetación más representativos en la cuenca Catamayo son los bosques nativos: secos y montanos, los pastos, la vegetación arbustiva y los páramos. Un mapa de cobertura de suelo realizado por los Ministerios de Ambiente y Agricultura del Ecuador, correspondiente a los años 2013-2014, se utilizó para obtener los parámetros de cuenca (MAE y MAGAP, 2013). En la Figura 3-4 se muestra el mapa de cobertura y uso del suelo de la cuenca Catamayo.

- **Bosque montano**

Se caracterizan por tener vegetación siempreverde, se localizan en áreas de montaña y lacustres. Los bosques pueden ser montano bajo, pie montano, montano alto, pluviales, húmedo montano, neblina montano y bosque siempreverde (Lozano, 2002).

- **Páramo**

Se nombra páramo a los ecosistemas cubiertos por arbustos achaparrados, gramíneas, almohadillas, turbas, musgos o humedales. Los suelos contienen una gruesa capa de materia orgánica. Además, se caracterizan por tener climas fríos, precipitaciones frecuentes y altos valores de humedad y radiación. La amplitud de la temperatura varía más de 20 °C, y la diferencia entre temporada seca y lluviosa prácticamente no existe. La lluvia frecuente mantiene saturada la gruesa capa de materia orgánica, regulando los escurrimientos superficial y subterráneo. Los páramos se localizan en las altas cumbres del cinturón tropical de Sudamérica, Centroamérica, África y Oceanía. En los Andes, se distribuyen en cuatro países: Venezuela, Colombia, Ecuador y norte del Perú. El páramo se encuentra a continuación del bosque andino, sobre los 3300 msnm, y en el sur del Ecuador, debido a la depresión de los Andes, se hallan sobre los 2800 msnm (Aguirre-Mendoza et al., 2016; Buytaert et al., 2006; Hofstede et al., 2003; Lauer, 1981).

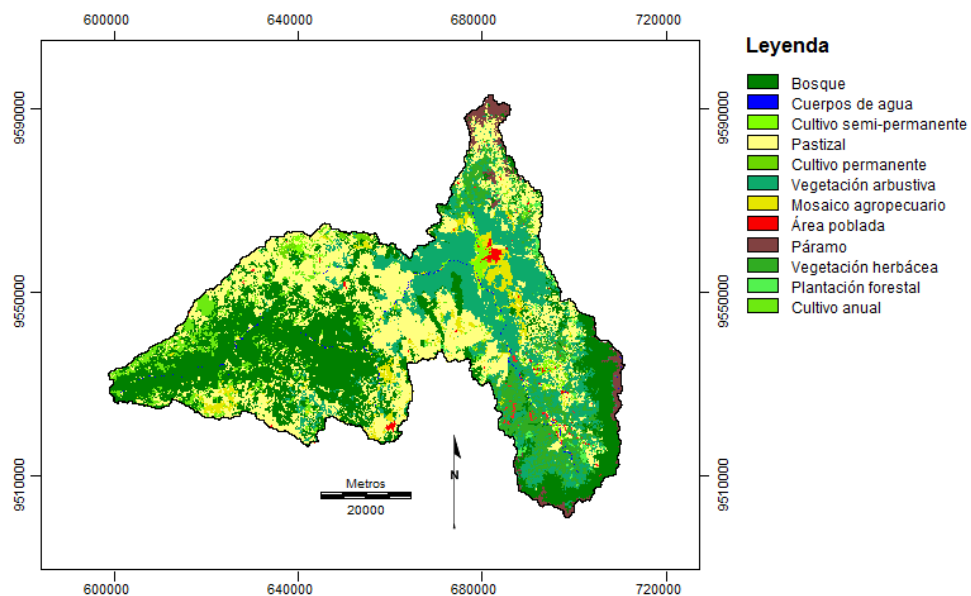


Figura 3-4. Mapa de cobertura y uso del suelo (MAE y MAGAP, 2013). Coord. UTM 17S, datum WGS84.

El área de la cuenca Catamayo está cubierta en mayor parte por Bosque (33%), pastizales (27%) y vegetación arbustiva (19%), como se observa en la Figura 3-4 y Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Cobertura de la cuenca Catamayo, (MAE y MAGAP, 2013).

Id	Área [km <sup>2</sup> ]	[%]	Cobertura
1	1374.46	33.05	Bosque
2	14.70	0.35	Cuerpos de agua
3	46.99	1.13	Cultivo semi-permanente
4	1140.94	27.43	Pastizal
5	23.27	0.56	Cultivo permanente
6	793.7	19.08	Vegetación arbustiva
7	135.45	3.26	Mosaico agropecuario
8	30.32	0.73	Área poblada
11	99.94	2.40	Páramo
12	267.56	6.43	Vegetación herbácea
13	46.14	1.11	Plantación forestal
14	186.05	4.47	Cultivo anual
<b>Total:</b>			<b>4160.0</b>

### 3.1.2 Cobertura del suelo reclasificada en formato CEQUEAU

El modelo CEQUEAU requiere de un mapa de cobertura del suelo clasificado en 4 tipos: (i) cuerpos de agua, (ii) bosques, (iii) ciénegas y (iv) otros. Los bosques, matorrales y cultivos perennes se agregaron en la categoría “bosques”; los páramos se clasificaron como

“ciénegas”; las áreas sin cobertura vegetal, los poblados o infraestructura se clasificaron con la categoría “otros” (Figura 3-5).

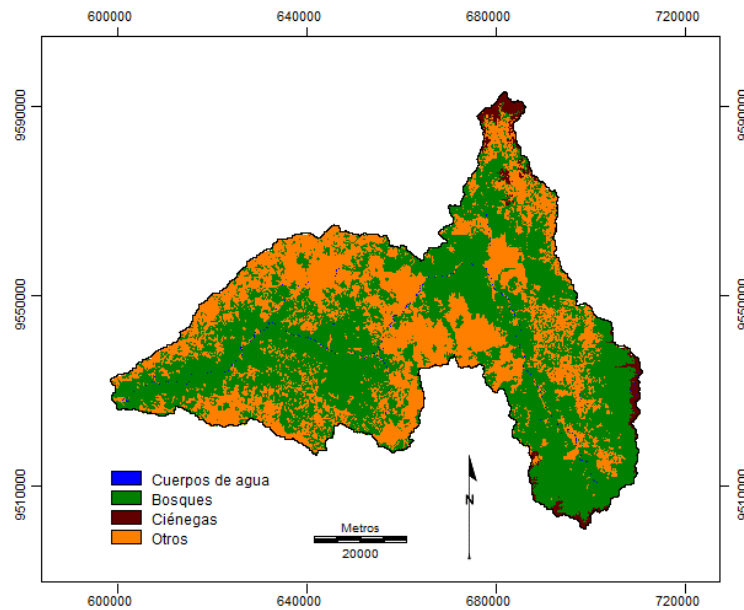


Figura 3-5. Mapa de suelos en formato CEQUEAU. Coord. UTM 17S, datum WGS84.

### 3.2 Parámetros fisiográficos de cuenca

Para obtener los parámetros fisiográficos de las subcuencas del río Catamayo se utilizó un *MNA* de ~90 m de resolución del *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, descargado del consorcio de información espacial CGIAR-CSI (Jarvis et al., 2008). El *MNA* fue corregido en Idrisi, utilizando el módulo *PIT REMOVAL* que restaura la altitud de los píxeles que no tienen continuidad en el escurrimiento, luego se re-escaló a 100 m para facilitar las operaciones en *SIG*, Ecuaciones (3-1 y 3-2).

$$Ncol = \frac{X_{max} - X_{min}}{100} \quad (3-1)$$

$$Nrow = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{100} \quad (3-2)$$

Donde *Ncol* y *Nrow* son, respectivamente, el número de columnas y renglones del nuevo *MNA*;  $X_{max}$  y  $X_{min}$  son, respectivamente, las coordenadas en *X* máxima y *X* mínima (Longitud);  $Y_{max}$  y  $Y_{min}$  son, respectivamente, las coordenadas en *Y* máxima y *Y* mínima (Latitud).

Los archivos fisiográficos para el modelo *CEQUEAU* se obtuvieron con la herramienta elaborada por Guerra-Cobián (2007) en el entorno de Idrisi, que requiere de un *MNA*, un mapa de suelos reclasificado, la cuenca hidrográfica y la ubicación de estaciones hidrometeorológicas. La herramienta, además genera las celdas a la resolución deseada por el usuario y un mapa de vectores de flujo. Las dimensiones de las celdas de la cuenca Catamayo fueron de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (~27.5 km), la subcuenca Guayabal de  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  (~13.5 km) y la subcuenca Boquerón de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (~5 km) y  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ .

El modelo *CEQUEAU* requiere de datos hidrometeorológicos, los cuales deben estar en bases de datos estructurados en un formato legible por el modelo. En el Anexo A se presenta los algoritmos y rutinas para el arreglo de datos en formatos aceptados por el modelo *CEQUEAU*. El modelo *CEQUEAU* prepara internamente los datos hidrometeorológicos y los almacena en un archivo \*.Hmc y los archivos fisiográficos preparados en el archivo (\*.Prb). El archivo (\*.Pah) contiene el conjunto de parámetros que tiene en cuenta el modelo para modelar los caudales.

Se utilizó la herramienta elaborada por Franco-Plata (2008) en el entorno de Idrisi, para obtener algunos parámetros de cuenca. Esta herramienta utiliza un *MNA* y obtiene los siguientes parámetros: área de la cuenca, radio de circularidad, tiempo de concentración, coeficiente de compacidad, pendiente media de la cuenca, longitud del río principal, elevación máxima y mínima del cauce y coeficiente de sinusidad.

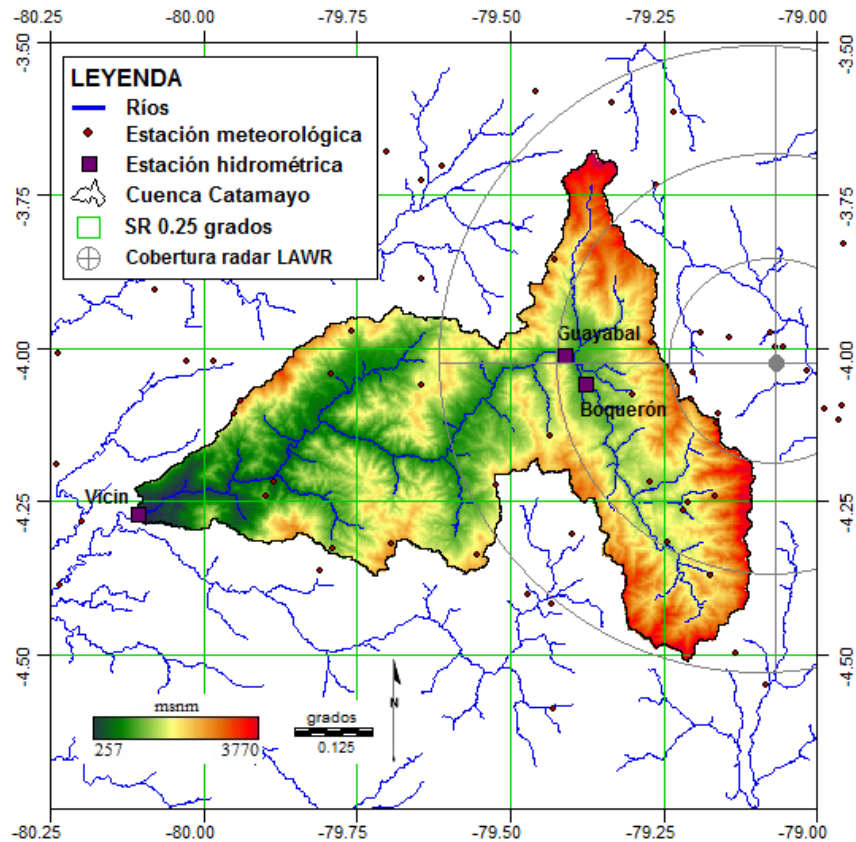
### 3.3 Datos hidrometeorológicos

En este estudio se utilizaron datos de precipitación y temperatura observados en estaciones meteorológicas y estimados por algoritmos de satélite (*PPES/PTES*), precipitación de radar *LAWR* y caudales de estaciones hidrométricas ubicadas en el río Catamayo (Figura 3-6). Se realizó un análisis exploratorio de calidad de datos sobre los registros hidrometeorológicos y luego se validaron los datos estimados por satélite y de radar utilizando el coeficiente de determinación  $r^2$ , Ecuación (3-3). Además, se realizó un análisis de cantidad de datos para elegir los periodos concomitantes en la calibración y validación de las modelaciones.

$$r^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (V_{O_i} - \bar{V}_O)(V_{C_i} - \bar{V}_C) \right]^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{O_i} - \bar{V}_O)^2 \sum_{i=1}^n (V_{C_i} - \bar{V}_C)^2}} \quad (3-3)$$

Donde  $V_{O_i}$  y  $V_{C_i}$  son, respectivamente, el valor observado y calculado de la variable meteorológica en el día  $i$ ,  $\bar{V}_O$  y  $\bar{V}_C$  son, respectivamente, los promedios de los valores observados y calculados.

El procesamiento y análisis de los datos se realizó en el lenguaje R (Ihaka y Gentleman, 1996; R Core Team, 2016) y en el SIG Idrisi (Eastman, 2016, 2012).



**Figura 3-6.** Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas, MNA de la cuenca Catamayo, celdas de los SR (PPES y PTES a 0.25 grados) y cobertura del radar LAWR. Coord. Geográficas, datum WGS84.

Los datos observados y los productos de SR utilizados en esta investigación se clasifican en función de su origen (Figura 3-7).



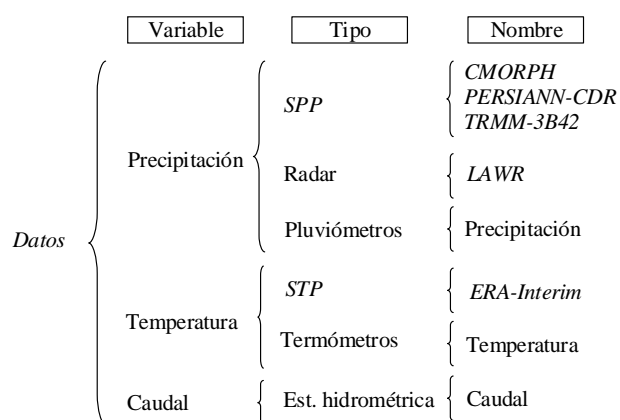


Figura 3-7. Clasificación de los datos hidrometeorológicos utilizados en las modelaciones hidrológicas.

En las modelaciones del río Catamayo, se utilizó la temperatura de *ERA-Interim* con la precipitación de los *PPEs*. La temperatura de los termómetros se utilizó con la precipitación de los pluviómetros y la combinación [*LAWR* + pluviómetros].

### 3.3.1 Disponibilidad de datos

En el río Catamayo se consideraron tres estaciones hidrométricas que cuentan con caudales diarios en al menos 4 años continuos (Tabla 3-2 y Figura 3-8). Los periodos elegidos para la calibración y validación de los modelos están en función de la disponibilidad de los caudales y las fechas concomitantes de los datos meteorológicos. En la estación Vicin se eligió el periodo 2005-2011, en la estación Boquerón 2005-2008 y en la estación Guayabal el periodo 1982-1989.

Tabla 3-2. Estaciones hidrométricas en el río Catamayo.

N	Estación hidrométrica	Río	Nombre de cuenca	Área [msnm]
1	Arenal en puente Boquerón (Boquerón)	Catamayo	Subcuenca Boquerón	1125
2	Catamayo en DJ Guayabal (Guayabal)	Catamayo	Subcuenca Guayabal	1810
3	Catamayo en puente Vicin (Vicin)	Catamayo	Cuenca Catamayo	4160

Los gráficos de disponibilidad de los datos meteorológicos y caudales se presentan en imágenes raster (datos continuos en escala de grises). Una celda de color negro corresponde a un mes con ~30 observaciones y el color blanco significa ausencia de la variable.

En el área de estudio se encontraron 125 estaciones meteorológicas, de las cuales 103 son de propiedad del INAMHI y 22 pertenecen a la Estación Científica San Francisco (ECSF), ubicada al este de la cuenca Catamayo, en la parte alta de la cuenca amazónica. Se realizaron gráficos de disponibilidad de datos de precipitación y temperatura, se tomaron en

cuenta las estaciones que tienen al menos un año de observaciones diarias en el periodo 1980-2015. Esto es viable, puesto que el modelo *CEQUEAU* espacializa las variables meteorológicas, rellena las celdas vacías interpolando los datos de las estaciones meteorológicas vecinas (ver apartado 3.5).

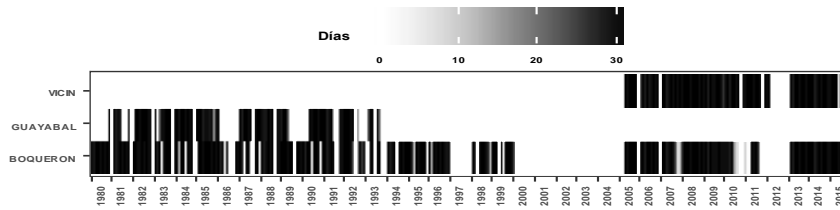


Figura 3-8. Caudales diarios disponibles por mes/estación.

El 50% de las estaciones meteorológicas no cumplieron con las especificaciones del análisis de cantidad. Se comprobó que 62 estaciones tienen al menos un año continuo de datos pluviométricos (Figura 3-9) y 28 tienen datos de temperatura (Figura 3-10).

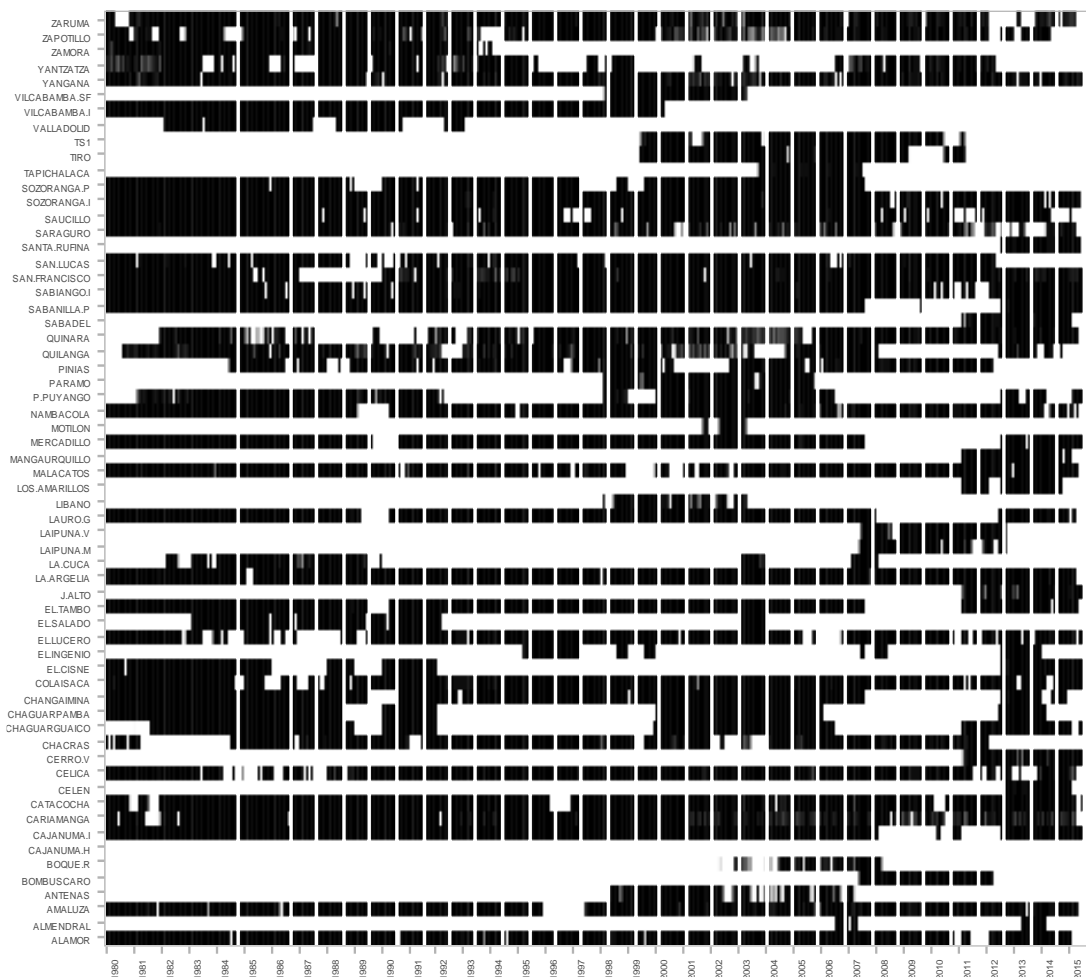


Figura 3-9. Precipitación diaria de pluviómetros disponibles por mes.

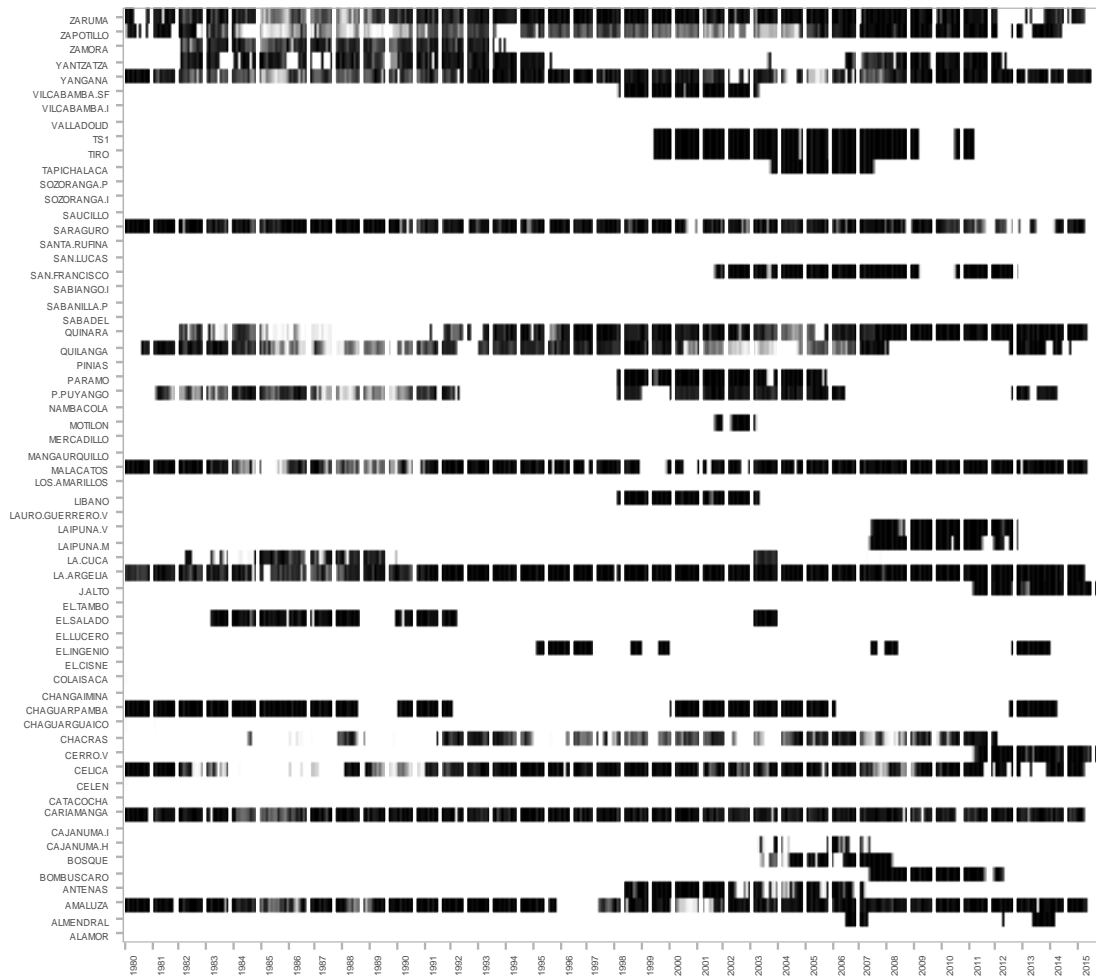


Figura 3-10. Temperatura media diaria de estaciones meteorológicas disponibles por mes.

### 3.3.2 Análisis estadístico de los datos observados

En primer lugar, se realizó un análisis exploratorio de calidad de datos. Este análisis previo consistió en la construcción de hidrogramas, hietogramas y diagramas de caja y bigote, con el objetivo de detectar valores atípicos en las series de datos. Se construyeron hidrogramas o gráficos de series de tiempo, en las ordenadas se presentan los caudales ordenados cronológicamente y el tiempo en las abscisas. Análogamente a los caudales, se construyeron los hietogramas utilizando los datos de precipitación. Los diagramas de caja permiten interpretar la distribución de los datos, el 50% de los mismos se agrupan en el rango intercuartílico (RIC) representados por el primer cuartil, la mediana y el tercer cuartil y el resto de los datos representan los valores máximos y mínimos y los valores atípicos. Los bigotes de los diagramas se delimitaron a 1.5 del RIC. Sin embargo, en este paso no se eliminaron los valores extremos, pero sirvió para visualizar aquellos valores “sospechosos”.

Se consideran valores anómalos aquellos que se separan 3 desviaciones estándar (Ecuación (3-4)) del valor esperado a partir de los datos vecinos. Antes remover los valores sospechosos, primero se realizaron las pruebas confirmatorias, para detectar la homogeneidad de las series meteorológicas. (OMM-N°100, 2011).

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3-4)$$

Donde  $n$  es el total de observaciones,  $x_i$  es la observación en el día  $i$  y  $\bar{x}$  es el promedio del conjunto de los datos.

Posteriormente, se realizaron análisis estadísticos confirmatorios de normalidad, estacionariedad, estabilidad de la media y la varianza. Para determinar la normalidad se utilizó el test de Kolmogorov-Smirnov. Para detectar la estacionariedad de las series se utilizó el test Coeficiente de Correlación de Spearman. Para determinar la estabilidad de la varianza y la media se utilizó, respectivamente, el Test Siegel-Tukey y la U Mann-Whitney (Castro y Carvajal, 2010). El valor de significancia utilizado en las pruebas fue de  $\alpha = 0.05$ , es decir un nivel de confianza de 95%.

El test de Kolmogorov-Smirnov calcula la discrepancia máxima entre la distribución de los valores y una serie con distribución Normal. La hipótesis nula ( $H_0$ ) supone que los datos provienen de una distribución **Normal** con una discrepancia mínima y la hipótesis alterna ( $H_a$ ) supone que los datos provienen de una distribución **no Normal** con mayor discrepancia.

Para comprobar la **estacionariedad** en la serie, es decir que no existan incrementos o decrementos en magnitud de los datos, se usó el método de rango de correlación de Spearman, método no paramétrico para medir la correlación entre los dos periodos de la serie, de la estación  $x$ . El coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) se define como:

$$\rho = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (R_i - i)^2 \quad (3-5)$$

Donde  $n$  es el número de pares de datos de la serie,  $i$  es el número de orden de la variable en orden cronológico,  $R_i$  es el número de orden de la observación de la serie cronológica original que ocupa la variable ordenada en forma ascendente o descendente. Para rechazar o

no la hipótesis nula,  $H_0$ : no existe tendencia o es estacionaria, hipótesis alterna  $H_a$ : hay tendencia o no es estacionaria, se usa el siguiente estadístico, Ecuación (3-6):

$$t = \rho \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho^2}} \quad (3-6)$$

Donde  $t$  tiene una distribución  $t$  de Student con dos grados de libertad, para el nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , la hipótesis nula se rechaza si  $t$  se encuentra en la siguiente zona:

$$\left\{-\infty, t((n-2), \frac{\alpha}{2})\right\} \cup \left\{t((n-2), (1-\frac{\alpha}{2})), +\infty\right\} \quad (3-7)$$

Una manera de determinar la **homogeneidad** o no de la serie de datos es detectado cambios en la media y la varianza. La inestabilidad de la varianza implica que la serie cronológica no es estacionaria y por lo tanto no se puede utilizar en análisis posteriores, además, la estabilidad en la varianza es requerida en las pruebas de estabilidad de la media (Castro y Carvajal, 2010).

Para establecer la **estabilidad en la varianza** se utilizó el test Siegel–Tukey, prueba no paramétrica, que determina si una parte de la serie tiende a tener más valores extremos que el otro grupo de la serie, o si uno de los grupos presenta mayor dispersión que el otro con respecto a la media. La  $H_0$  supone que las dos muestras independientes han sido extraídas de poblaciones con igual varianza y la  $H_a$  supone que las muestras provienen de poblaciones con varianzas diferentes.

Para establecer la **estabilidad en la media** se utilizó la prueba no paramétrica U Mann – Whitney. La hipótesis  $H_0$  supone que las muestras provienen de la misma población y la hipótesis  $H_a$  supone que la tendencia central de una serie difiere de la otra.

### 3.4 Datos de sensores remotos

En la Tabla 3-3 se presenta un resumen de las principales características de los *SR*. Las resoluciones espaciales y temporales de *PPES/ERA-Interim* son, respectivamente,  $0.25^\circ$  y 1 día y *LAWR* a 0.5 km y 1 día. Los productos de precipitación con pasos de tiempo en horas se acumularon a nivel diario. Las otras características varían con el producto. En la Figura 3-11 se muestra el gráfico de disponibilidad de los datos de *SR*. La fecha de inicio de los

productos de satélite varía entre los años ~1980 y ~2000 hasta el presente. Siendo concomitantes con los caudales de la estación Vicin en los años 2005-2015.

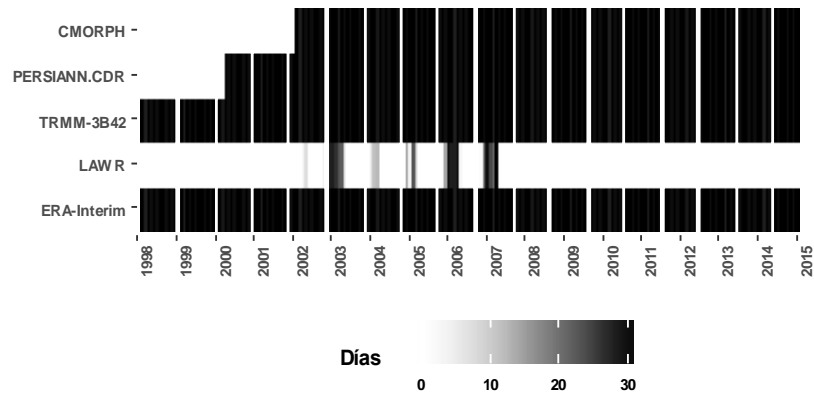


Figura 3-11. Datos diarios de sensores remotos disponibles por mes.

Tabla 3-3. Características de los productos meteorológicos utilizados.

Producto	Resolución espacial	Resolución temporal	Cobertura espacial (Latitud)	Cobertura temporal	Latencia	Banda/sensor	Autor	Extensión	Formato	Acceso
<i>CMORPH</i>	0.25°	3 horas	60°N, 60°S	2002-presente	18 horas	IR, MW	Joyce et al. (2004)	.nc	NetCDF	<a href="http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/global_CMORPH/daily_025deg/">http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/global_CMORPH/daily_025deg/</a>
<i>PERSIANN-CDR</i>	0.25°	1 día	60°N, 60°S	1983-presente	2 días	IR, TMI	Sorooshian et al. (2000)	.tiff	Tiff	<a href="http://chrsdata.eng.uci.edu/">http://chrsdata.eng.uci.edu/</a>
<i>TRMM -3B42 (TMPA)</i>	0.25°	1 día	50°N, 50°S	1997-presente	1-2 meses	IR, MW, MI, PR, MHS, SSMIS, VIRS,	Huffman et al. (2010)	.tiff	Tiff	<a href="ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/trmndata/">ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/trmndata/</a>
<i>ERA-Interim</i>	0.25°	1 día	80°N, 80°S	1979-presente	1-2 meses	IR, MW	Dee et al. (2011)	.nc	NetCDF	<a href="http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/">http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/</a>
<i>LAWR</i>	0.5 km	1 día	Local	2002-2007	-	X	Rollenbeck & Bendix, (2006a)	.grd	Gridded	-

### 3.4.1 Extracción de datos de productos de satélite

Los procedimientos para extraer los datos de las imágenes de satélite son similares entre sí, existiendo pequeñas variaciones de un producto a otro, por el tipo de dato, resolución espacial y temporal o por la forma de acceso/descarga de los datos (cuadrante o global).

Los datos de PPES y PTES se obtuvieron de los servidores oficiales de la *NASA*, *NOAA*, *CHRS* y *ECMWF*, en formatos comunes Bin, NetCDF y Tiff. El acceso a estos datos es vía internet desde las direcciones de acceso que se muestran en la Tabla 3-3. Los datos de productos de satélite se descargaron a  $0.25^\circ$  (27.5 km en el Ecuador) de resolución espacial. A excepción de *CMORPH*, la escala temporal de los productos de satélite es de 1 día. El *CMORPH* a 3 horas se acumuló a nivel diario, con el fin de homogenizar la resolución espacial y temporal de los productos de satélite. En vista que el área de estudio está en GMT-5, la diferencia de los pluviómetros (lectura 7 am, hora local) con los PPES es de 2 h.

En la literatura especializada, la precipitación de *PPES* menor a  $1 \text{ mm día}^{-1}$  se denomina "efecto llovizna". Piani et al. (2010) y Valdés-Pineda et al. (2016) recomiendan remover el efecto llovizna, reemplazando la lluvia  $< 1 \text{ mm día}^{-1}$  con valor cero. Este procedimiento se aplicó a los tres *PPES*.

Las imágenes *CMORPH* y *TRMM-3B42* tienen Longitud de  $0$  a  $360^\circ$  y se rotaron, de tal manera que todos los productos queden de  $-180$  a  $180^\circ$ . Luego, las imágenes de los *PPES* se recortan en las dimensiones del área de estudio y se extraen los datos de cada pixel a  $0.25^\circ$  de resolución (Figura 3-12). En este caso se hacen coincidir en la esquina inferior izquierda las coordenadas de los *PPES* y las celdas del modelo *CEQUEAU* ( $0.25^\circ$ ). Este procedimiento evita interpolar las áreas de las celdas del modelo y los pixeles de lluvia.

Por otro lado, la temperatura de *ERA-Interim* se transforma de grados Kelvin a Celsius ( $^\circ\text{C} = ^\circ\text{K} - 273.15$ ). Luego, las imágenes se recortan a la dimensión de los *PPES* (resolución  $0.25^\circ$ ) y se extraen los datos de temperatura de cada pixel (Figura 3-12).

Los datos de precipitación y temperatura se unen por fecha y nombre y se guardan en un archivo de texto formato \*.csv y luego se exportan en archivos separados por cada celda del modelo. Un archivo contiene las columnas: día, mes, año, precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Después, en otro procedimiento se lee cada archivo y se convierte en un archivo meteorológico, que tiene una estructura requerida por el modelo *CEQUEAU* (Anexo A).



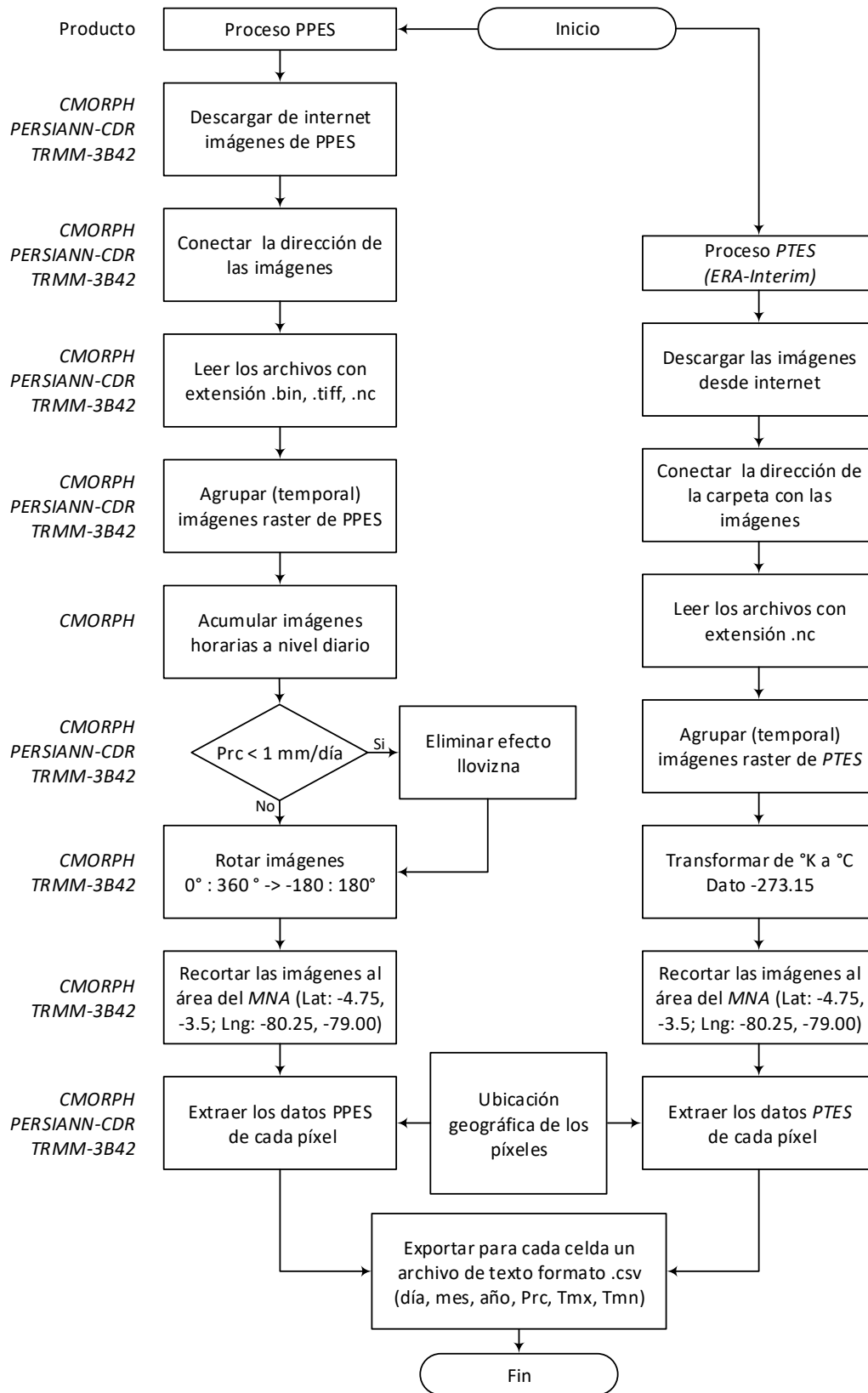


Figura 3-12. Algoritmo para obtener los datos de productos de satélite: CMORPH, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42 y ERA-Interim.

### 3.4.2 Datos de radar *LAWR*

Los píxeles de las imágenes *LAWR* (0.5 km x 0.5 km) se agregaron a 5 km (0.05° x 0.05°) y 13.5 km (0.125° x 0.125°), utilizando, respectivamente los factores 10 (5000/500) y 27 (13500/500) y se obtuvieron los promedios de lluvia. Luego se extraen los datos de los píxeles y se adjuntan las temperaturas de estaciones meteorológicas, y finalmente se exportan a un archivo de texto, en el formato \*.csv (Figura 3-13).

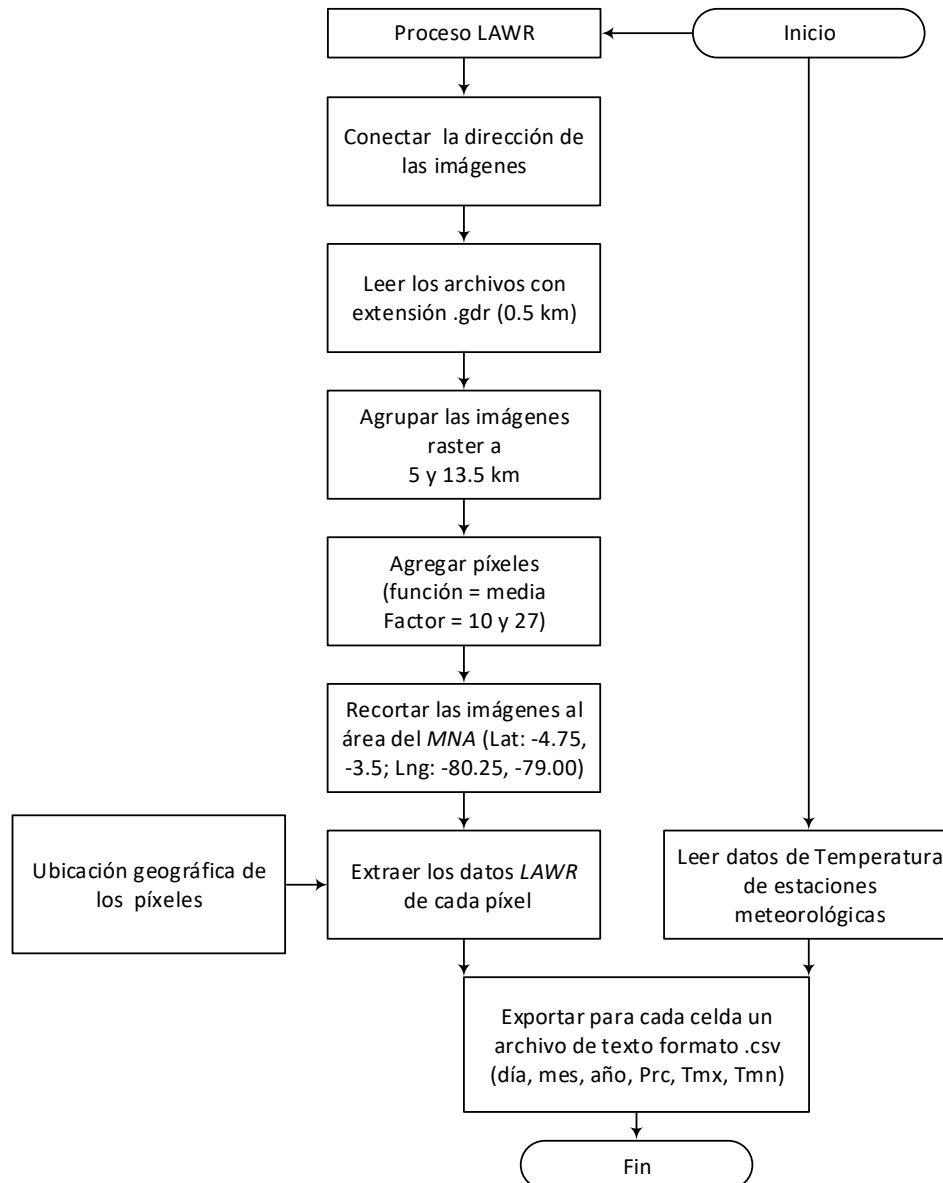


Figura 3-13. Algoritmo para obtener los datos del radar *LAWR*.

Para validar los datos diarios *LAWR* se utilizó la técnica *best match*, que consiste en comprobar el mejor ajuste de los datos pluviométricos con el píxel donde se encuentra el

pluviómetro y los pixeles que lo rodean (Paduan et al., 2006). La lluvia capturada por el radar (a  $n$  metros de la superficie) no siempre es la misma en la vertical del pluviómetro, como se observa en la Figura 3-14, existe un desplazamiento angular  $\theta$  de la lluvia debido a factores como la escala espacial, orografía, dirección y velocidad del viento y la resolución del pixel (Rollenbeck, comunicación personal).

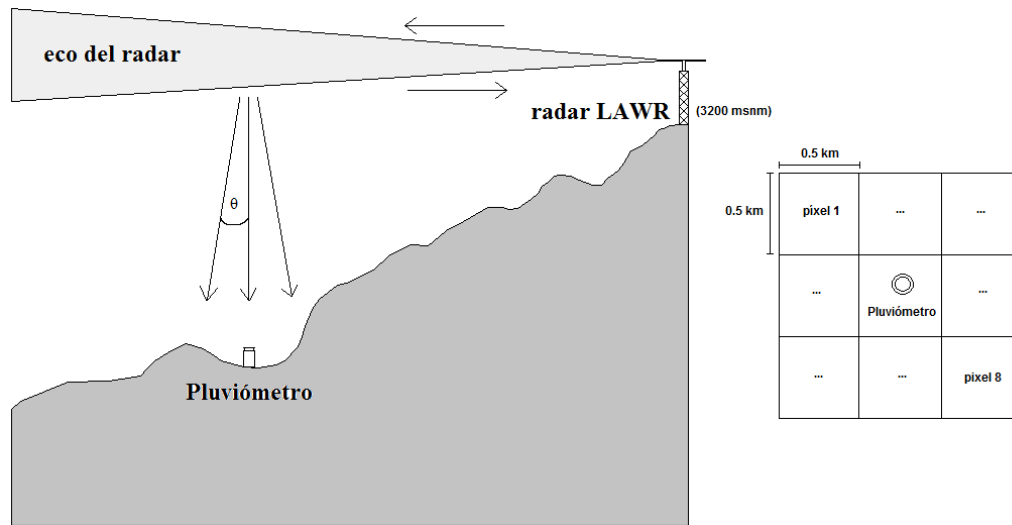


Figura 3-14. Radar LAW R: (izq.) perfil vertical de la ubicación del radar en el cerro El Consuelo (3200 msnm), adaptado de Rollenbeck et al. (2011), (der.) ubicación del pluviómetro y píxeles vecinos.

### 3.4.3 Corrección de sesgo de los PPES

Un proceso adicional se realizó a los datos de *PPES*, se corrigieron los sesgos mediante *BIAS* ( $PPES_{BIAS_d}$ ), utilizando los promedios mensuales observados y estimados. En la literatura especializada se exponen algunas ecuaciones de corrección *BIAS* (ver el numeral 1.1.5). La Ecuación (3-8), es la propuesta por Worqlul et al. (2017).

$$PPES_{BIAS_d} = PPES_{(d)} \frac{\overline{Pobs}_m}{\overline{PPES}_m} \quad (3-8)$$

Donde  $PPES_{(d)}$  es el valor diario estimado del *PPES*,  $\overline{Pobs}_m$  es el promedio mensual de la precipitación observada y  $\overline{PPES}_m$  es el promedio mensual estimado de *PPES*.

En vista de que los regímenes de lluvia en el área de estudio varían con la altitud, para obtener los coeficientes de corrección. Se dividió el área de la cuenca Catamayo en dos partes (Figura 3-15). La parte baja de la cuenca comprende las celdas 1010-1214 y la parte alta las celdas 1310-1414. Valdés-Pineda et al. (2016), mencionan que los sesgos dependen

significativamente de la elevación, latitud, clima y los mecanismos de predicción de la lluvia. Por otro lado, estudios de validación indican que los *PPES* tienen mayor precisión en áreas planas y con poca cobertura vegetal, que en áreas boscosas en latitudes septentrionales (Demaría y Serrat-Capdevila, 2016).

Los coeficientes mensuales se multiplicaron para cada valor diario de los *PPES* correspondiente a cada mes y se obtuvo una nueva base datos.

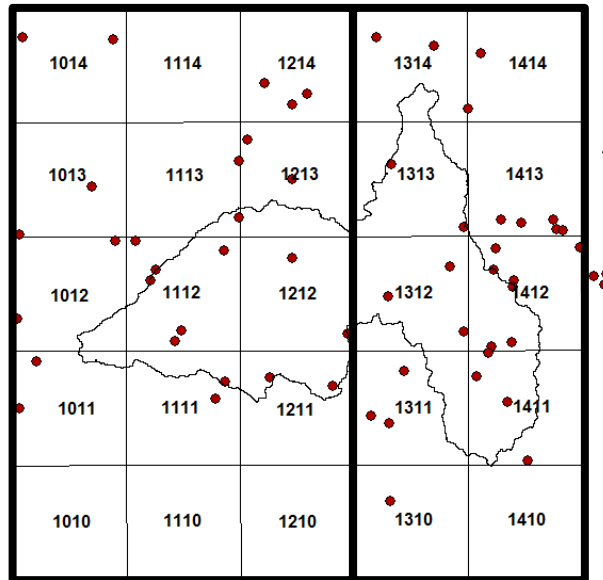


Figura 3-15. Discretización del área a 0.25° de resolución: (izq.) parte baja, (der.) parte alta.

En las Figuras 3-16 y 3-17 se muestra la precipitación mensual de la parte alta y baja, respectivamente. La lluvia promedio mensual interanual de los *PPES* originales se presenta en las figuras de la izquierda y la lluvia corregida a las figuras de la derecha.

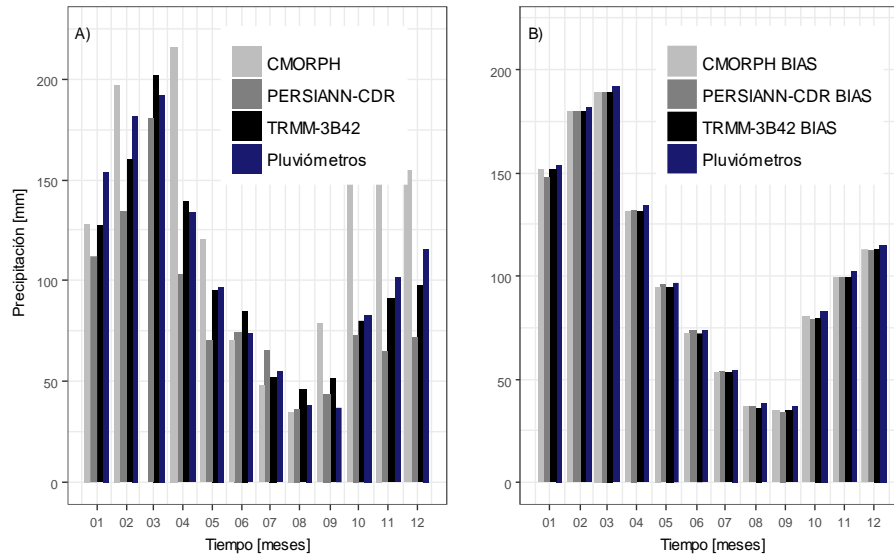


Figura 3-16. Precipitación mensual (Parte alta): A) datos originales B) datos corregidos BIAS.

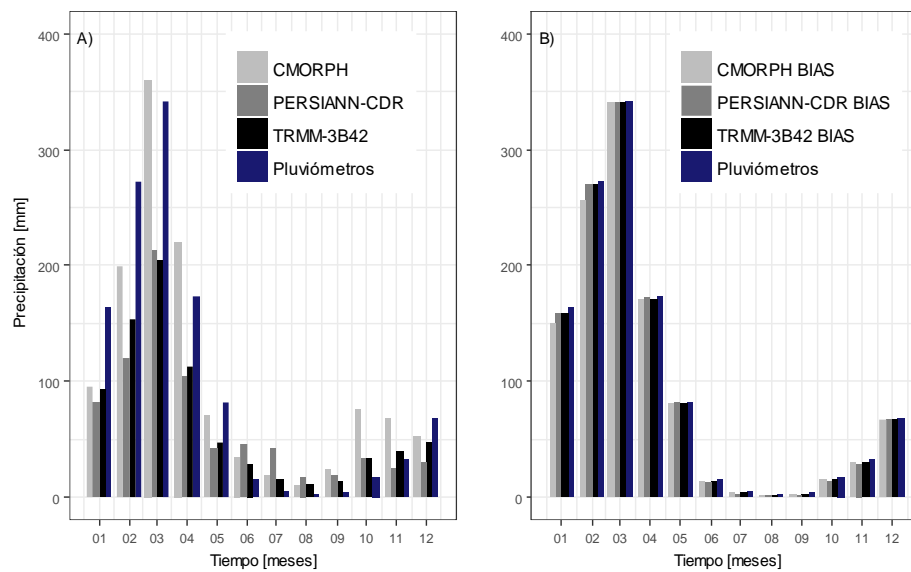


Figura 3-17. Precipitación mensual (Parte baja) del periodo 2005-2015: A) datos originales B) datos corregidos BIAS.

En los coeficientes de corrección obtenidos, se considera aceptable el 20% del error absoluto, entre el valor medio observado y calculado. Los valores que sobreestiman o subestiman el valor medio observado son aquellos que se alejan del valor  $\pm 0.2$ .

### 3.5 Datos meteorológicos en el modelo CEQUEAU

El modelo CEQUEAU prepara internamente los datos hidrometeorológicos (\*.Hmc) a partir del archivo \*.Dhm y las bases de datos meteorológica y caudales. Un archivo

hidrometeorológico preparado contiene, para cada estación, los valores diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y caudal.

En este caso, es preciso mencionar que una estación es lo mismo que una celda del modelo. A una celda le corresponde un solo valor de la variable meteorológica. Por ejemplo en la cuenca Catamayo (malla de 5 x 5 y resolución de 0.25°), utilizando los datos observados se tiene 20 estaciones con datos de las variables meteorológicas. Utilizando los datos de *PPES* se tiene 25 estaciones, ya que las imágenes de satélite cubren toda el área de estudio.

La precipitación y temperatura, al igual que los parámetros se discretizan en las dimensiones de la celda del modelo. Cuando existe más de una estación meteorológica en una celda, los datos se promedian para mejorar su representación en el área del cuadro. Además, el modelo *CEQUEAU* no permite más de un valor por celda, es decir, debe existir una estación meteorológica por cuadro del modelo.

Las celdas que no tienen observaciones de precipitación/temperatura, el modelo las rellena por el método de Thiessen o por interpolación de la distancia inversa. En este caso se eligió el segundo método, que toma en cuenta las estaciones vecinas (Ecuación (3-9)).

$$VT = \frac{1}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}} \quad (3-9)$$

$$F1 = \frac{VT}{d_1} ; F2 = \frac{VT}{d_2} ; F3 = \frac{VT}{d_3}$$

Donde *VT* es la variable temporal (precipitación/temperatura), *F1-F3* son los factores de peso de las tres estaciones más cercanas, *d* es la distancia entre la estación analizada y las tres estaciones meteorológicas más cercanas.

La suma de los factores de peso (*F1*, *F2* y *F3*) es igual a la unidad (3-10).

$$\sum_{k=1}^3 F_k = 1 \quad (3-10)$$

Donde  $F_k$  es el k-ésimo factor de ponderación.

El modelo *CEQUEAU* estima la evapotranspiración (ET) utilizando la ecuación de Thornthwaite modificada por (Morin y Paquet, 2007). Para ello, se requiere de la

temperatura media diaria, obtenida de la temperatura máxima y mínima, Ecuación (3-11). La ecuación utiliza la insolación potencial en función de la Latitud media de la cuenca y el día del año (proceso interno por medio de valores tabulados).

$$ET = \frac{10}{30.4} \times 1.62 \left( \frac{10 \times Tmd}{XIT} \right)^{XAA} \left( \frac{2}{\pi} \omega_s \right) \quad (3-11)$$

$$XIT = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{TMed_i}{5} \right)^{1.51} \quad (3-12)$$

$$XAA = 67.5 \times 10^8 XIT^3 - 77.1 \times 10^{-6} XIT^2 + 0.0179 XIT + 0.492 \quad (3-13)$$

$$\omega_s = \cos^{-1} \left( -\tan \left( \sin^{-1} \left( \frac{23.45\pi}{180} \sin \left( \frac{2\pi}{365} (J - JOEVA) \right) \right) \right) \tan(XLA) \right) \quad (3-14)$$

Donde  $TMed_i$  es la temperatura media mensual en el mes  $i$ ,  $Tmd$  es la temperatura en el paso del tiempo considerado en la modelación ( $^{\circ}C$ ),  $XAA$  es el exponente de la fórmula de Thornthwaite, el  $XIT$  es el índice térmico de Thornthwaite,  $\omega_s$  es el factor de insolación potencial,  $J$  es el día del año,  $JOEVA$  es el parámetro que desplaza la fecha de insolación.

### 3.6 Calibración y validación del modelo CEQUEAU

Los parámetros del modelo *CEQUEAU* se encuentran en el archivo \*.Pah y se ajustan de forma manual por prueba y error, y optimización utilizando el método de Powell (1964) que viene incorporado en el modelo. No todos los parámetros se calibran, las condiciones iniciales se fijan previamente, otros se calculan por ejemplo los coeficientes para la evapotranspiración ( $XAA$ ,  $XIT$ ), utilizando la temperatura mensual, y los coeficientes de corrección de lluvia/temperatura con la altitud ( $COEP$  y  $COET$ , respectivamente).

La calibración de los parámetros se realizó primero por prueba y error y luego por optimización. En ambos casos se definieron los periodos de calibración y validación, en las estaciones Vicin y Guayabal se utilizó 2/3 de los datos para la calibración y 1/3 para la

validación, en la estación Boquerón se utilizó arbitrariamente 1/2 y 1/2, debido a la poca cantidad de datos concomitantes de precipitación y caudal.

En los primeros ensayos se utilizaron los parámetros de la subcuenca Boquerón (Balcázar et al., 2016). Luego se modificaron los parámetros manualmente, este proceso es iterativo y se repite  $n$  veces hasta tener el mejor ajuste entre caudales observados y calculados. Luego se eligió un juego de parámetros y se realizó la calibración por optimización, utilizando el método de Powell (Powell, 1964) que viene incorporado en el modelo *CEQUEAU*. En esta fase es útil el conocimiento previo del área de estudio para elegir los parámetros más sensibles que den respuesta a los caudales modelados.

Existen otros parámetros del modelo *CEQUEAU* que se calculan indirectamente, por ejemplo el índice y exponente de temperatura utilizados por el método de Thornthwaite (modificado), para estimar la evapotranspiración diaria. Los coeficientes de precipitación y temperatura con relación a la altitud. Y las condiciones iniciales de la cuenca, que se fijaron previamente: humedad del suelo, el caudal inicial y la altura de los reservorios suelo y subsuelo y cuerpos de agua.

En los procesos de calibración/validación (manual y automático) se utilizaron criterios gráficos y numéricos para evaluar la eficiencia de las modelaciones. Se compararon visualmente los hidrogramas observados y calculados, y la relación de éstos con los hietogramas. Los criterios numéricos (funciones objetivo): NSE, PBIAS y  $r^2$  fueron aplicados para evaluar la eficiencia de las modelaciones del caudal, Ecuaciones (3-15, 3-16 y 3-17), respectivamente. Los procedimientos de calibración se realizan con el objetivo de maximizar el NSE y  $r^2$  y minimizar el PBIAS.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{C_i} - Q_{O_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (3-15)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - Q_{C_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i})} \times 100 \quad (3-16)$$



$$r^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)(Q_{C_i} - \bar{Q}_C)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{C_i} - \bar{Q}_C)^2}} \right]^2 \quad (3-17)$$

Donde  $Q_{O_i}$  y  $Q_{C_i}$  son, respectivamente, el caudal observado y calculado en el día  $i$ ;  $\bar{Q}_O$  y  $\bar{Q}_C$  son el caudal medio observado y el caudal medio calculado, respectivamente.

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) es un criterio numérico robusto, eficaz para medir la eficiencia en la modelaciones continuas a largo plazo, en diferentes escalas temporales. El rango de NSE es entre  $-\infty$  y 1, siendo 1 el valor óptimo.

El bias porcentual mide la desviación promedio de los datos simulados en relación con los datos observados (Gupta et al., 1999, citado en Moriasi et al., 2007). El rango de PBIAS es entre  $-\infty$  y  $+\infty$ , siendo 0 el valor óptimo, los valores positivos indican que el modelo subestima el sesgo y los valores negativos sobrestiman el sesgo.

El coeficiente de determinación, describe el grado de correlación de los datos observados y calculados. El rango de  $r^2$  es entre 0 y 1, si  $r^2$  es igual a 1, la correlación es perfecta, si  $r^2$  es igual a 0, no existe una relación lineal entre las variables.

En la Tabla 3-4 se categoriza la eficiencia según los valores de NSE, PBIAS y  $r^2$ , estos rangos se tomaron como referencia para la clasificar el grado de eficiencia de los modelos en los periodos de calibración y validación (Moriasi et al., 2015).

**Tabla 3-4. Eficiencia recomendada para pasos de tiempo diario, tomado de Moriasi et al. (2015).**

Eficiencia	NSE	PBIAS	$r^2$
Muy bueno	$NSE > 0.80$	$PBIAS < \pm 5$	$r^2 > 0.85$
Bueno	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$0.75 < r^2 \leq 0.85$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.60 < r^2 \leq 0.75$
No satisfactorio	$NSE < 0.50$	$PBIAS > \pm 15$	$r^2 < 0.60$

Además, se consideró el error en el caudal máximo PQ, Ecuación (3-18) y la diferencia en días del caudal máximo observado y calculado.

$$PQ = \frac{Q_{max_o} - Q_{max_c}}{Q_{max_o}} \times 100 \quad (3-18)$$

Donde  $Q_{max_o}$  y  $Q_{max_c}$  son, respectivamente, el caudal máximo observado y caudal máximo calculado.

### 3.6.1 Modelaciones en el río Catamayo

El esquema de la Figura 3-18 representa las áreas de escurrimiento hacia cada estación hidrométrica. La estación Boquerón recibe el agua de la parte sur-este de la cuenca Catamayo. La estación Guayabal receipta los escurrimientos de la subcuenca Boquerón y del área norte-este de la cuenca Catamayo. La estación Vicin recibe el agua de toda el área (cuenca Catamayo). Los datos meteorológicos utilizados en las modelaciones, de cada una de las subcuencas, se muestran en la Tabla 3-5.

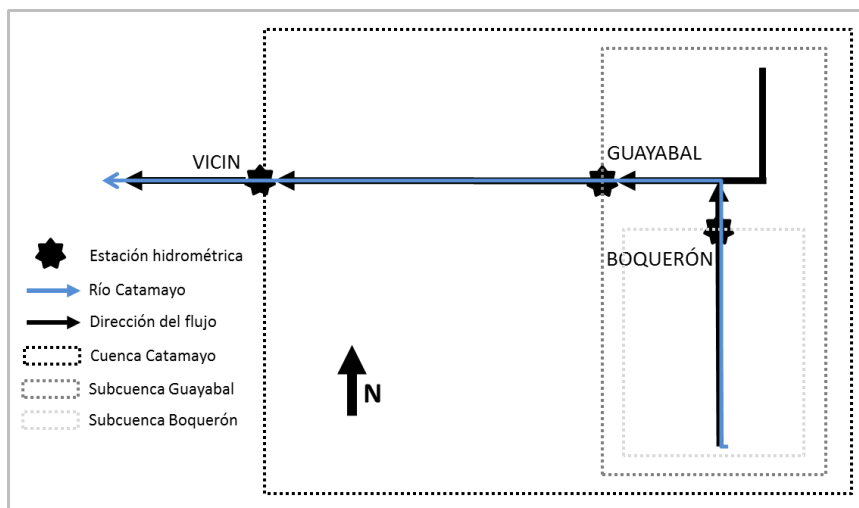





Figura 3-18. Esquema de las áreas de drenaje de las subcuencas del río Catamayo hasta la estación Vicin.

Los modelos realizados con *CEQUEAU* sobre el río Catamayo se dividen en tres proyectos: (i) Boquerón, (ii) Guayabal y (iii) Vicin. La resolución de las modelaciones se fijaron tomando en cuenta la resolución de los datos *PPES/ERA-Interim*, el área de las subcuencas y las fechas concomitantes con los caudales (ver Figura 3-5).

Tabla 3-5. Datos utilizados en las modelaciones hidrológicas.

Cuenca	Precipitación	Temperatura	Periodo	Resolución
Subcuenca Boquerón  1125 km <sup>2</sup>	Pluviómetros	Termómetros		0.05°/~5 km
	[LAWR + pluviómetros]	Termómetros	2005-2008	0.05°/~5 km
	<i>TRMM-3B42</i>	<i>ERA- Interim</i>		0.125°/~13.5 km
Subcuenca Guayabal  1810 km <sup>2</sup>	Pluviómetros	Termómetros	1982-1989	0.125°/~13.5 km
Cuenca Catamayo  4160 km <sup>2</sup>	Pluviómetros	Termómetros		
	<i>CMORPH</i>	<i>ERA- Interim</i>	2006-2011	0.25°/~27.5 km
	<i>PERSIANN-CDR</i>	<i>ERA- Interim</i>		
	<i>TRMM-3B42</i>	<i>ERA- Interim</i>		

En la estación Boquerón se utilizaron tres conjuntos de datos: (i) precipitación y temperatura observados por pluviómetros/termómetros, (ii) lluvia combinada [LAWR + pluviómetros]/termómetros, y los productos *TRMM-3B42/ERA-Interim* a 0.125° (Figura 3-19).

La resolución de los productos *TRMM-3B42/ERA-Interim* se aumentó de 0.25° a 0.125°, por el método bilineal. El radar *LAWR* tiene datos únicamente en los primeros meses de los años 2003, 2006 y 2007 (ver Figura 3-11), por lo que resultó útil combinarlos con los pluviómetros.

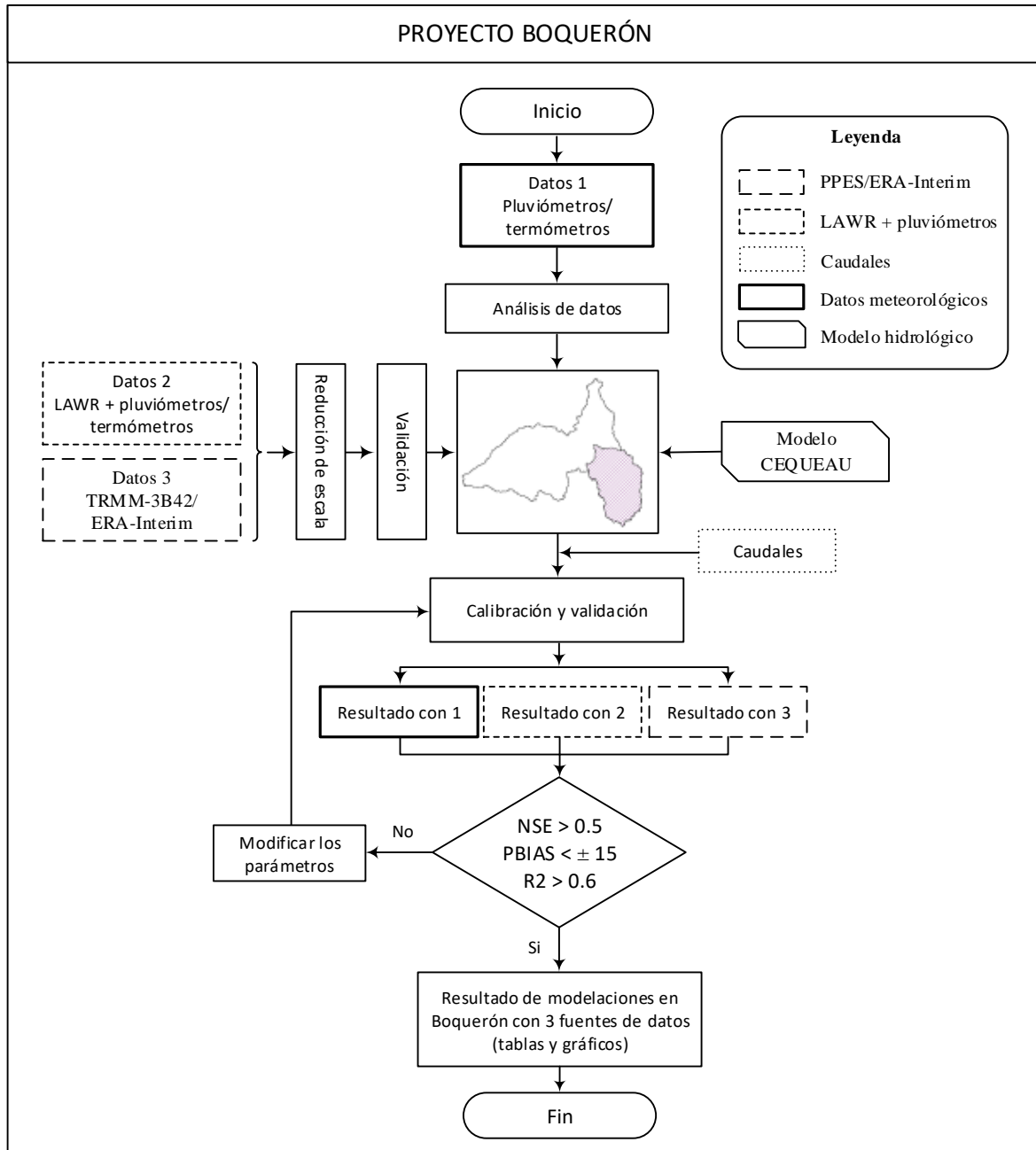


Figura 3-19. Diagrama de flujo para las modelaciones en la subcuenca Boquerón.

En la subcuenca Guayabal se modelaron los escurrimientos utilizando únicamente datos observados de precipitación y temperatura, puesto que los caudales no son concomitantes con los datos estimados de satélite. El diagrama de flujo presentado en la Figura 3-20 muestra los pasos que se siguieron para modelar los caudales en el río Catamayo hasta la estación Guayabal.

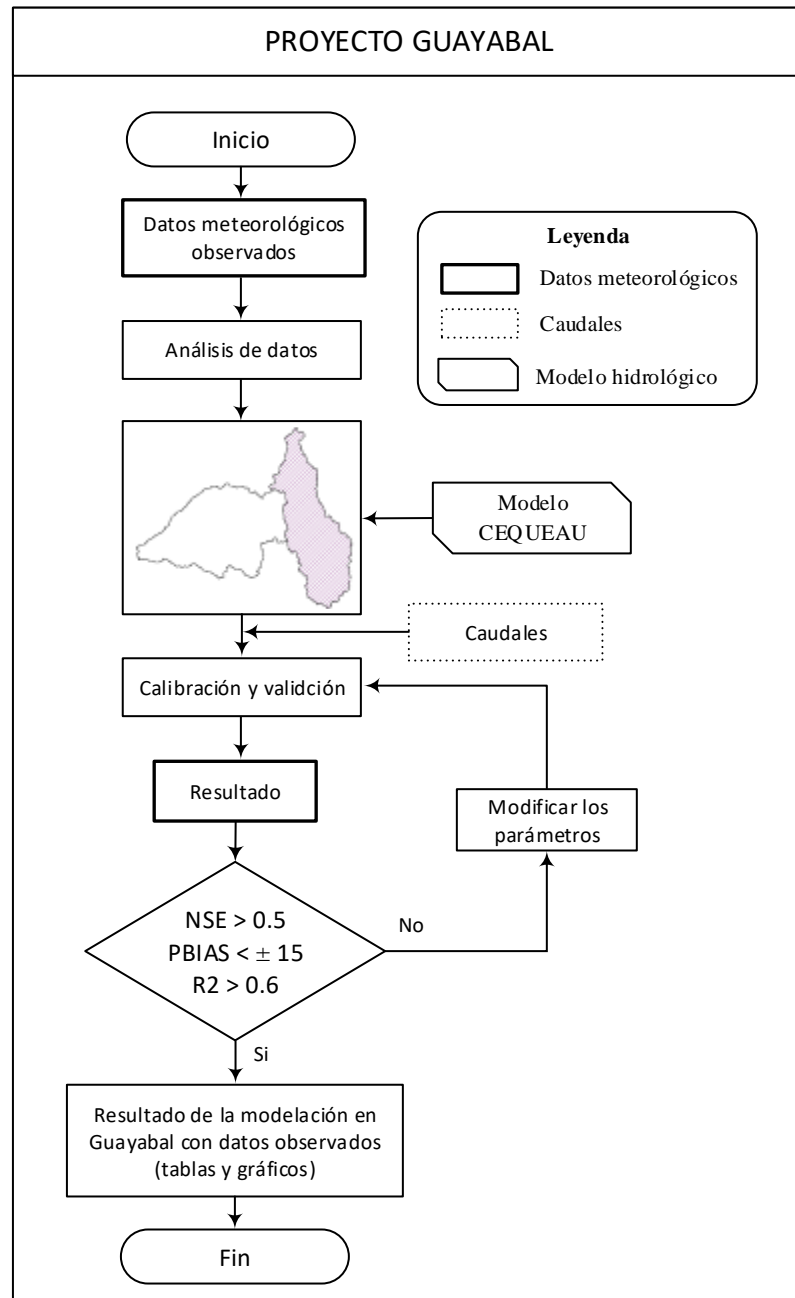


Figura 3-20. Diagrama de flujo para las modelaciones en la subcuenca Guayabal.

En la estación Vicin se realizaron 7 ensayos de modelaciones con cuatro tipos de datos (Figura 3-21). En un ensayo se utilizaron los datos meteorológicos observados, luego se realizaron 3 ensayos con *PPES/ERA-Interim* y finalmente 3 ensayos con los *PPES-correctos*. El periodo concomitante de los caudales en la estación Vicin y *PPES/ERA-Interim* empieza en el año 2005 hasta el 2011. Además, se compararon los resultados de *PPES* y *PPES-correcto*.

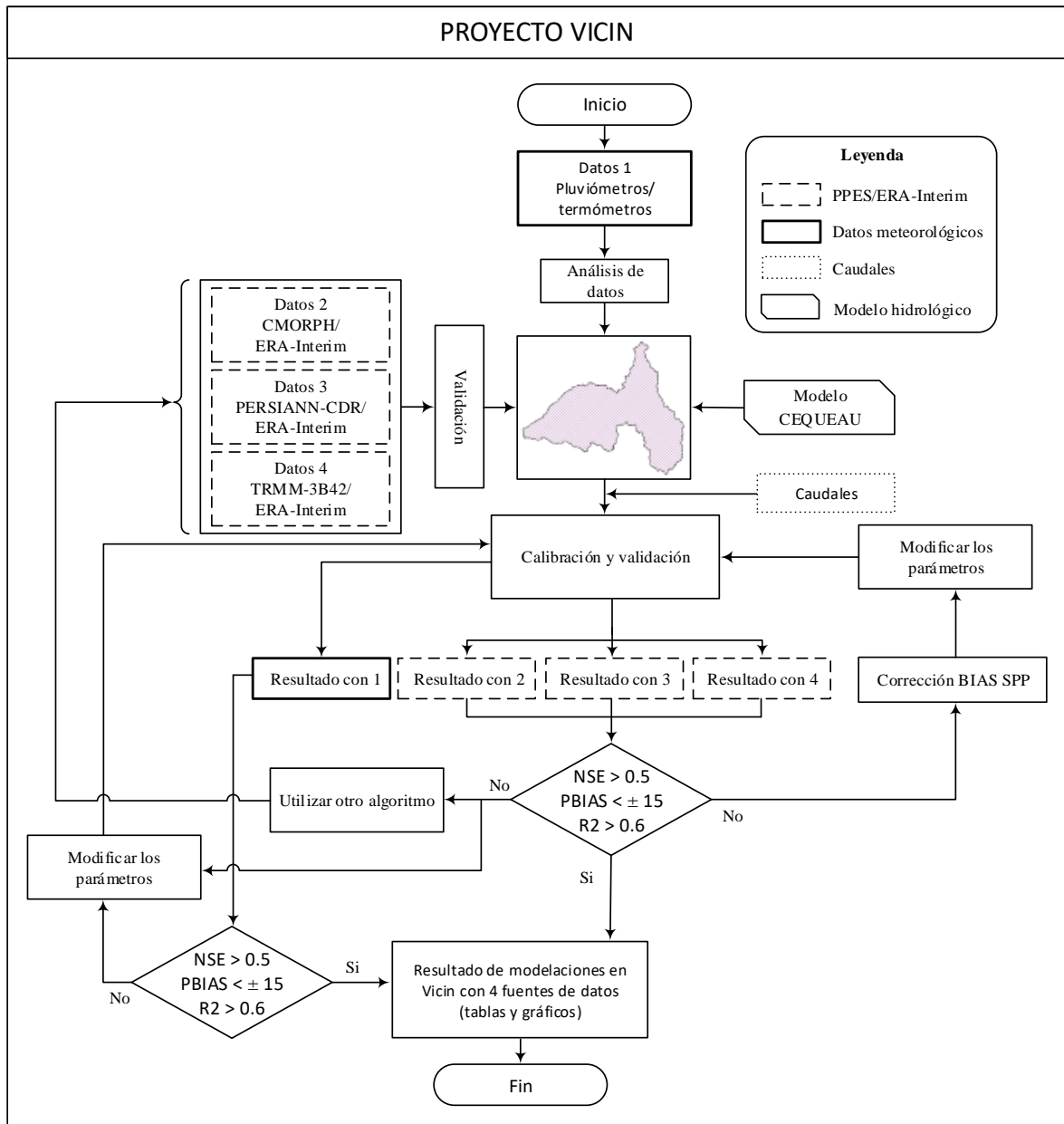


Figura 3-21. Diagrama de flujo para las modelaciones en la cuenca Vicin.

## 4 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los análisis de datos hidrometeorológicos, los parámetros fisiográficos de las subcuencas y las modelaciones hidrológicas en el río Catamayo, utilizando los distintos tipos de datos.

### 4.1 Parámetros fisiográficos de las subcuencas del río Catamayo

El coeficiente de compacidad mayor a 1 y el radio de circularidad menor a 1 indican que las tres subcuencas son alargadas. Las cuencas alargadas son menos propensas a inundaciones, puesto que la energía disminuye con el paso del tiempo. Por otro, la pendiente media de las subcuencas del río Catamayo varía entre 20% y 45%, lo que conduce a escurrimientos rápidos, los cuales aceleran la erosión de los suelos sin cobertura vegetal. El tiempo de concentración, que está en función del área, la pendiente y la longitud del río, es mayor en la cuenca Catamayo, seguido de las subcuencas Guayabal y Boquerón, tal como se observa en la Tabla 4-1.

El área de la cuenca (en km<sup>2</sup>), la Latitud media de la cuenca (en grados sexagesimales) y el tiempo de concentración (en horas) son parámetros requeridos por el modelo *CEQUEAU*.

*Tabla 4-1. Parámetros fisiográficos de las subcuencas.*

Atributo	Parámetro	Unidad	Cuenca/subcuenca			Utilizado en <i>CEQUEAU</i>
			Boquerón	Guayabal	Catamayo	
Cuenca	Área	km <sup>2</sup>	1125	1810	4160	*
	Perímetro	km	208	334	574	
	Pendiente media	%	42.4	41.4	20.9	
	Elevación media	msnm	2215	2183	1758	
	Tiempo de concentración	horas	6.98	8.11	21.03	*
	Coeficiente de compacidad	-	1.75	2.22	2.51	
	Radio de circularidad	-	0.33	0.2	0.16	
			Estaciones hidrométricas			
			Boquerón	Guayabal	Vicin	
Río	Longitud del cauce	km	70.3	78.8	195.1	
	Longitud directa del cauce	km	47.7	54.2	99.2	
	Elevación mínima del cauce	msnm	1170	1126	257	
	Elevación máxima del cauce	msnm	3087	2951	3087	
	Coeficiente de sinuosidad hidráulico	-	1.47	1.45	1.97	



## 4.2 Datos hidrometeorológicos

A continuación se presentan los resultados del análisis de calidad de datos y las pruebas estadísticas confirmatorias de los datos hidrométricos y meteorológicos observados en las estaciones ubicadas en el área de estudio.

### 4.2.1 Calidad de datos de caudales

En la Figura 4-1A se presenta los hidrogramas en las estaciones hidrométricas ubicadas en el río Catamayo. A simple vista se observa que el hidrograma de la estación Vicin representa mejor la dinámica estacional (Figura 4-1A), si bien presenta unos caudales pico en los primeros años de la serie, éstos ocurren únicamente en los meses húmedos. Los caudales de la estación Boquerón representan la dinámica estacional al inicio y al final de la serie, sin embargo en el periodo 2005-2011 (Figura 4-1B) se observan caudales de  $370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  inclusive superando los caudales de la estación Vicin en aquellos días. La estación Vicin se ubica a 125 km agua abajo de la estación Boquerón, y tiene aportes de otros tributarios de la parte alta. El área de la cuenca Catamayo con respecto a la subcuenca Boquerón es  $\sim 3.5$  veces mayor. La estación Guayabal presenta un caudal pico en el año 1988 de más de  $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , el cual no es reflejado en la estación Boquerón (año concomitante).

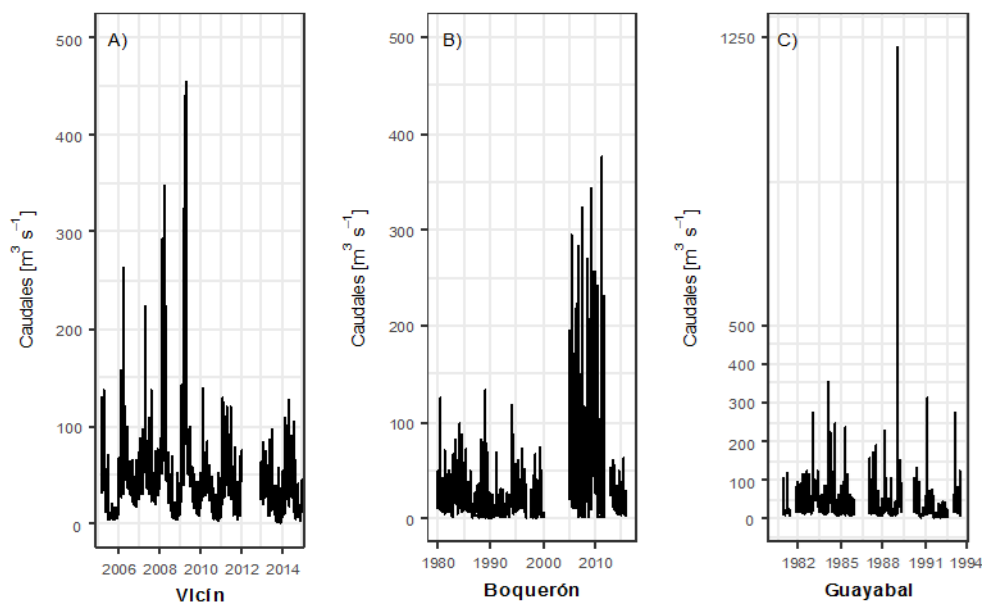


Figura 4-1. Hidrogramas de las estaciones hidrométricas: A) Vicin, B), Boquerón y C) Guayabal.

Para corroborar los valores de los caudales “sospechosos” en las estaciones Boquerón y Guayabal se obtuvieron los caudales medios anuales (Tabla 4-2). En los años 2005, 2009:2011 los caudales de la estación Boquerón son mayores a los observados en la estación Vicin. Esto puede deberse a una equivocación en la lectura de los datos, la aplicación de la ecuación o en la curva de aforo. Sin embargo, no ocurre con todos los caudales del periodo sospechoso, esto condujo a realizar las primeras modelaciones con los caudales originales.

Los resultados de las primeras modelaciones mostraron que los caudales extremos en las estaciones Boquerón y Guayabal no tienen explicación con las lluvias en los periodos considerados como “sospechosos”.

No existe una técnica matemática para mejorar los caudales de una estación hidrométrica con relación a otras estaciones ubicadas en el mismo río. Una vez comprobado que ciertos caudales de la estación Boquerón son inconsistentes, éstos se filtraron con los caudales observados de la estación Vicin. Es decir, si el caudal en el día  $i$  de la estación Boquerón es mayor al caudal en el día  $i$  de la estación Vicin, se considera como valor inconsistente. De esta manera, existe coherencia entre el caudal observado y el área de drenaje.

Una manera de restaurar los caudales, en el periodo “sospechoso”, de la estación Boquerón sería transitando el caudal modelado de la estación Vicin, pero esto no forma parte de los objetivos en este estudio y queda fuera de los alcances de la presente investigación.

Tabla 4-2. Caudales medios anuales.

Año	Boquerón [1125 km <sup>2</sup> ]	Guayabal [1811 km <sup>2</sup> ]	Vicin [4160 km <sup>2</sup> ]	Año	Boquerón [1125 km <sup>2</sup> ]	Guayabal [1811 km <sup>2</sup> ]	Vicin [4160 km <sup>2</sup> ]
1980	23.8	28.2	-	1998	3.8	-	-
1981	15.2	20.7	-	1999	19.4	-	-
1982	18.5	36.9	-	2000	-	-	-
1983	26.9	36.5	-	2001	-	-	-
1984	20.2	36.3	-	2002	-	-	-
1985	17.2	23.3	-	2003	-	-	-
1986	12.2	-	-	2004	-	-	-
1987	15.8	21.6	-	2005	50.3	-	24.0
1988	18.9	24.1	-	2006	45.4	-	49.4
1989	14.1	67.0	-	2007	40.1	-	46.0
1990	4.4	19.4	-	2008	47.8	-	52.3
1991	6.2	16.2	-	2009	98.5	-	52.2
1992	6.2	8.6	-	2010	86.2	-	27.5
1993	11.1	36.3	-	2011	42.9	-	39.9
1994	39.1	-	-	2012	-	-	-
1995	27.3	-	-	2013	17.3	-	23.4
1996	18.8	-	-	2014	11.6	-	27.9
1997	5.6	-	-	2015	13.1	-	48.8

La correlación de los caudales diarios de las estaciones Boquerón y Guayabal, antes y después del periodo considerado como “sospechoso” (2005-2011), tiene una buena relación, el coeficiente de determinación en el año 1984 (año concomitante) fue de  $r^2 = 0.86$  (Figura 4-2) y la correlación entre Boquerón y Vicin en los años 2014-2015 (periodo concomitante) fue de  $r^2 = 0.51$  (Figura 4-3). Esto respalda la técnica de remover los caudales “inconsistentes” en las estaciones Boquerón y Guayabal.

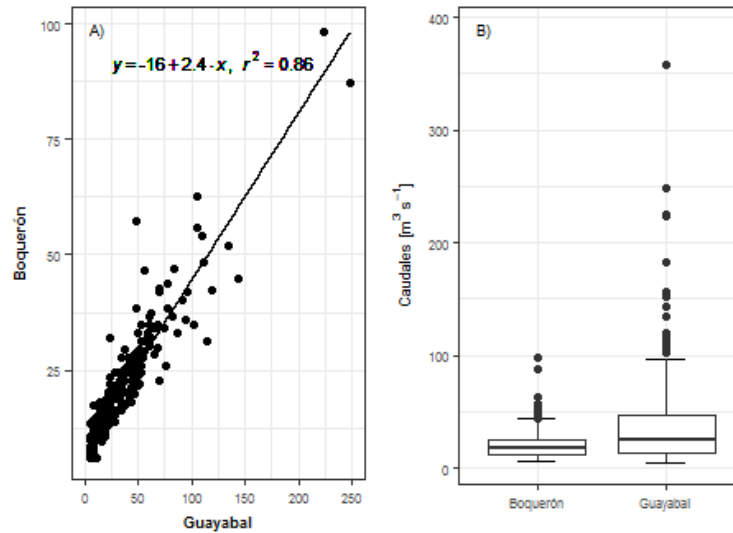


Figura 4-2. Caudales de las estaciones Guayabal y Boquerón, valores diarios 1984: A) dispersión, B) rango intercuartílico y valores extremos.

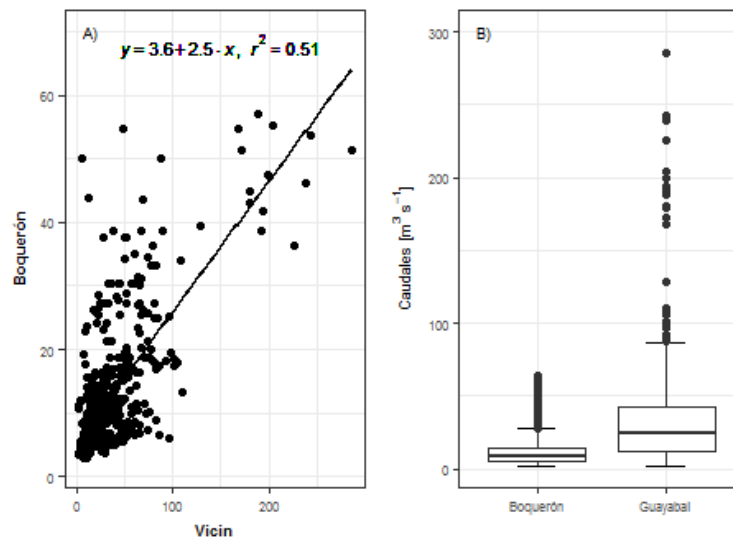


Figura 4-3. Caudales de las estaciones Vicin y Boquerón en el periodo 2014-2015: A) dispersión, B) rangos intercuartílico y valores extremos.

#### 4.2.2 Calidad de los datos de Precipitación

Los análisis de precipitación media observada de las estaciones ubicadas en el área de estudio, se muestran a continuación (ejemplos de cuatro estaciones meteorológicas).

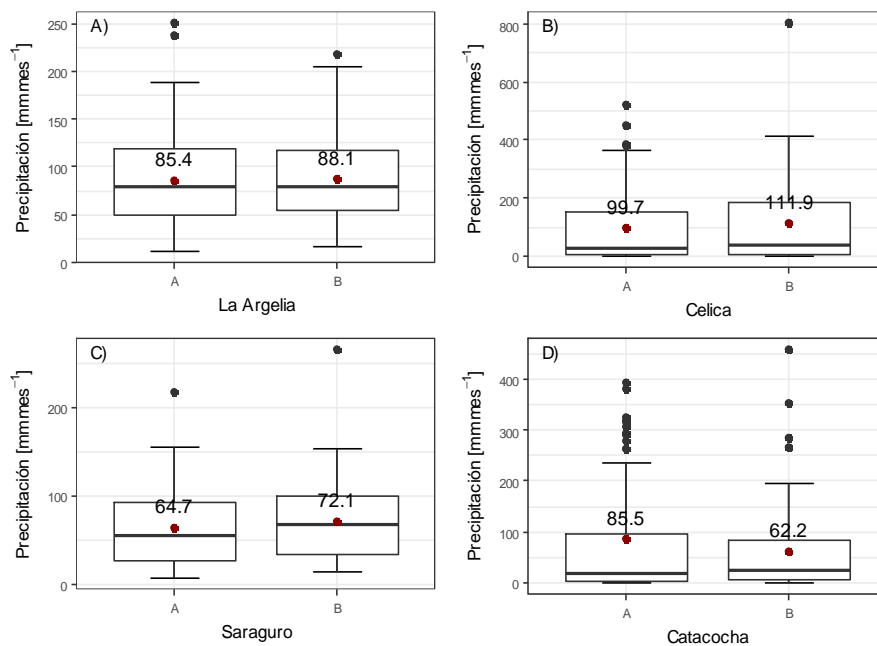
Las estaciones La Argelia y Saraguro se ubican en la parte alta, la estación Catacocha en el centro de gravedad de la cuenca, y la estación Celica en la parte baja. Se observa que los valores mínimos de las estaciones de la parte media y baja tienen valores cero, lo que no se

observa en la parte alta, donde la lluvia es continua durante el año. En la parte baja también son comunes los valores máximos en los meses húmedos, diciembre-mayo (Tabla 4-3).

**Tabla 4-3. Resumen de la lluvia mensual de 4 estaciones meteorológicas (2005-2015).**

Estadístico	La Argelia [2160 msnm]	Celica [1905]	Saraguro [2525]	Catacocha [1810 msnm]
Mínimo	11.30	0.00	6.80	0.00
1er Cuartil	51.00	2.95	30.32	3.85
Mediana	79.85	28.60	62.85	20.80
Media	86.73	104.80	68.79	74.49
3er Cuartil	117.60	170.60	100.20	91.92
Máximo	251.00	804.50	265.00	458.00
Datos ausentes	6.00	17.00	28.00	6.00

En la Figura 4-4 se observan ligeros cambios en los valores medios (puntos rojos), por lo que realizaron pruebas estadísticas para confirmar si los cambios son significativos o no.



**Figura 4-4. Diagramas de caja que representan la precipitación mensual de 4 estaciones meteorológicas, en el periodo 2005-2015.**

En los hietogramas de las series diarias se observaron valores extremos en ciertas estaciones, estos valores se compararon visualmente con los valores observados en las estaciones vecinas.

A *priori* se conoce que la lluvia diaria sigue una distribución diferente a la *Normal*, usualmente una distribución de extremos (Gamma, Log-Normal de tres parámetros, Pearson tipo III, distribución de valores extremos) (Díaz-Delgado et al., 1999; Serrat-Capdevila et al., 2016; Valdés-Pineda et al., 2016).

En la Tabla 4-4 se presenta las pruebas estadísticas confirmatorias de Normalidad, tendencia, estabilidad de la varianza y la media. El valor de significancia utilizado en las pruebas es  $\alpha = 0.05$ , es decir un nivel de confianza de 95%.

El p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov es menor a 0.05, por lo que se rechaza la  $H_0$  y se acepta la hipótesis  $H_a$ , la distribución es *no Normal*, esto conduce a utilizar pruebas no paramétricas en las pruebas estadísticas confirmatorias.

En los ejemplos de la Tabla 4-4, el p-valor es menor a 0.05 (se rechaza la  $H_0$ ) en las estaciones Celica y Catacocha, esto puede deberse a los valores extremos y a la falta de registros en las observaciones. Para continuar con los análisis se removieron los valores extremos que están fuera del rango de la Ecuación (3-4). Por otro lado, el p-valor es mayor a 0.05 en las estaciones Argelia y Saraguro, esto acepta la  $H_0$ , es decir existe estacionariedad en las series de datos. Si bien en las otras estaciones ubicadas en la cuenca Catamayo, las series son estacionarias, se realizaron análisis de homogeneidad para observar los cambios en los valores medios y la varianza.

Las estaciones que se detectaron como no homogéneas son: Santa Rufina, Mangaurquillo, Cajanuna Horst y Páramo. En el caso de las estaciones Cajanuma y Páramo, éstas se ubican en la misma celda (*CEQUEAU*) de la estación Cajanuma Inamhi, por lo que se decidió utilizar los datos únicamente de ésta última. Las estaciones Celica y Catacocha se encuentran dentro de la cuenca Catamayo, y se removieron los valores extremos utilizando la Ecuación (3-4).

La estabilidad de la varianza y la media. Los p-valor de ST y UMW son mayores a 0.05, por lo que se acepta la  $H_0$ , de que la varianzas en ambos periodos pertenecen a la misma población y que los valores de las medias de no varían (Tabla 4-4).

Tabla 4-4. Pruebas estadísticas.

Test	La Argelia	Celica	Saraguro	Catacocha
Normalidad: KS	p-valor = 0.0012	p-valor = 2.2e-16	p-valor < 2.2e-16	p-valor < 2.2e-16
Estacionariedad: CCS	p-valor = 0.24	p-valor = 1.7e-6	p-valor = 0.057	p-valor = 5.6e-3
Estabilidad de la varianza: ST	p-valor = 0.86	p-valor = 0.12	p-valor = 0.053	p-valor = 0.83
Estabilidad de la media: UMW	p-valor = 0.75	p-valor = 0.056	p-valor = 0.053	p-valor = 0.28

KS = Kolmogorov-Smirnov; CCS = Coeficiente de correlación de Spearman; ST = Siegel-Tukey; UMW = U Mann-Whitney.

### 4.2.3 Datos de satélite y radar

A continuación se presentan los resultados de los análisis de los datos *PPES*, *PTES* y radar. En la cuenca Catamayo los datos de satélite se utilizaron a la resolución original  $0.25^\circ$  y en la subcuenca Boquerón a  $0.125^\circ$  y  $0.05^\circ$ . Finalmente los *PPES* se corrigieron con las lluvias observadas por los pluviómetros.

#### 4.2.3.1 Datos de *PPES*-corregidos

En las Tablas 4-5 y 4-6 se presentan los coeficientes interanuales de corrección *PPES*-*corregidos* de la parte alta y baja, respectivamente. Los coeficientes con valores a  $1 \pm 0.2$  corresponden a los meses con mejor ajuste, los coeficientes mayores a 1.2 indican que el *PPES* subestima la lluvia y los coeficientes menores a 0.8 indican que sobreestima la lluvia observada.

Tabla 4-5. Coeficientes de corrección *BIAS* (parte alta).

MES	CMORPH	PERSIANN-CDR	TRMM-3B42
1	* 1.20	- 1.36	- 1.23
2	* 0.92	- 1.35	* 1.13
3	+ 0.58	* 1.06	* 0.95
4	+ 0.62	- 1.30	* 0.96
5	* 0.80	- 1.37	* 1.02
6	* 1.04	* 0.99	* 0.87
7	* 1.13	* 0.85	* 1.04
8	* 1.09	* 1.05	* 0.80
9	+ 0.47	* 0.84	+ 0.69
10	+ 0.42	* 1.13	* 0.98
11	+ 0.60	- 1.60	* 1.08
12	+ 0.75	- 1.62	- 1.21

+ sobrestima < 0.8; - subestima > 1.2; \* satisfactorio a  $1 \pm 0.20$

Tabla 4-6. Coeficientes de corrección BIAS (parte baja).

MES	CMORPH	PERSIANN-CDR	TRMM-3B42
1	- 1.70	- 2.01	- 1.75
2	- 1.36	- 2.25	- 1.76
3	* 0.95	- 1.61	- 1.68
4	+ 7.35	- 1.66	- 1.53
5	+ 0.78	- 1.97	- 1.72
6	* 1.16	+ 0.32	+ 0.51
7	+ 0.43	+ 0.11	+ 0.34
8	+ 0.28	+ 0.16	+ 0.26
9	+ 0.18	+ 0.23	+ 0.29
10	+ 0.23	+ 0.51	+ 0.49
11	+ 0.48	- 1.30	+ 0.78
12	- 1.32	- 2.29	- 1.43

+ sobrestima < 0.8; - subestima > 1.2; \* satisfactorio  $1 \pm 0.20$

En la parte alta los coeficientes del producto *CMORPH* son satisfactorios en seis meses y sobreestima los meses marzo-abril y de septiembre a diciembre, es decir sobreestima los meses más húmedos de la parte alta (marzo-abril) y noviembre a diciembre, mientras que en la parte baja sobreestima los meses relativamente secos.

El producto *PERSIANN-CDR* en la parte alta es satisfactorio en seis meses y subestima ligeramente los meses más húmedos. En la parte baja, el comportamiento de *PERSIANN-CDR* sobreestima los meses secos y subestima la temporada húmeda.

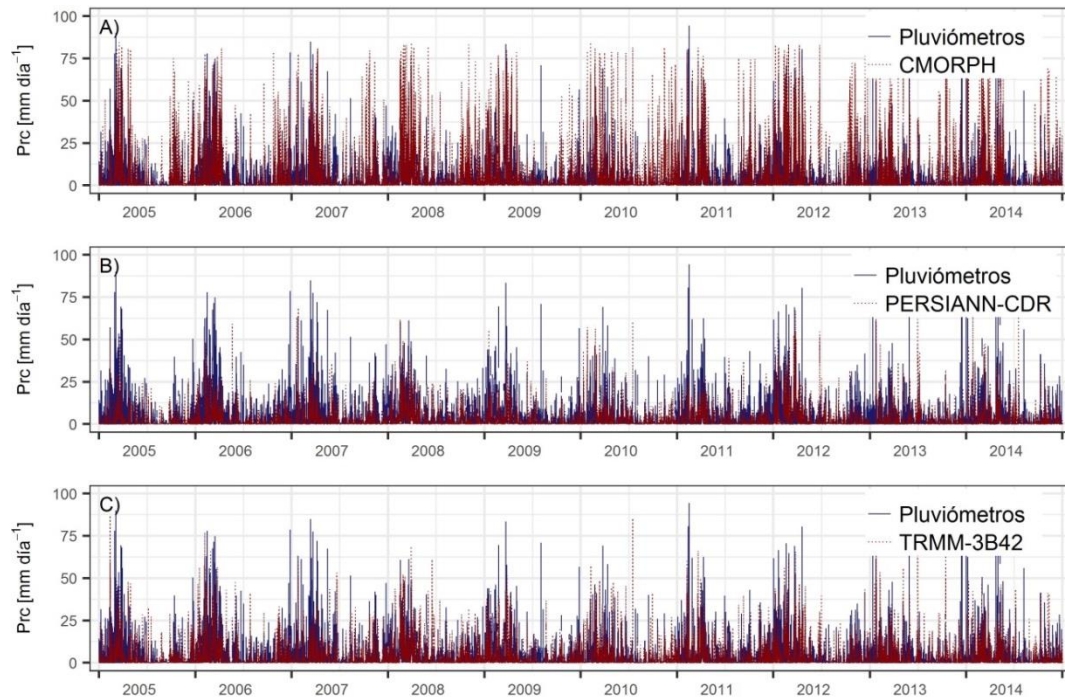
El algoritmo *TRMM-3B42* en la parte alta presenta coeficientes de corrección cercanos a 1, excepto septiembre que sobreestima la lluvia observada y subestima los meses húmedos (diciembre-enero). En la parte baja, similar a *PERSIANN-CDR*, el producto *TRMM-3B42* sobreestima los meses secos y subestima la temporada húmeda.

#### 4.2.3.2 Precipitación de la cuenca Catamayo estimada por satélite

En la Figura 4-5 se muestran los hietogramas de la precipitación media diaria de la cuenca Catamayo medida por los pluviómetros y estimada por los *PPES*. De manera general los productos *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* parecen representar mejor la precipitación observada sobre la cuenca. Se observa una buena relación con la dinámica estacional de la lluvia, no obstante, en algunos días parecen subestimar ligeramente los picos de la época húmeda y sobreestimar en otros pocos. Esto puede deberse a que no existe una buena distribución de las estaciones meteorológicas en ciertos pixeles de las imágenes de los



*PPES* (por ejemplo las celdas 1213, 1413, 1414). El producto *CMORPH* también parece tener una buena relación con la dinámica estacional, sin embargo sobreestima la lluvia en los meses relativamente secos.



**Figura 4-5. Precipitación media diaria de la cuenca Catamayo, pluviómetros y *PPES*.**

La precipitación de *PPES-correctado* a nivel diario se presenta en la Figura 4-6. En el caso de *CMORPH* se observa que las lluvias en los meses secos se ajustan adecuadamente en la mayoría de los años, y los valores pico de los meses húmedos se representan de una mejor manera (Figura 4-6A). La precipitación corregida de los productos *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* también mejora, sin embargo se aprecia que algunos picos se sobreestiman, (Figuras 4-6B y 4-6C).

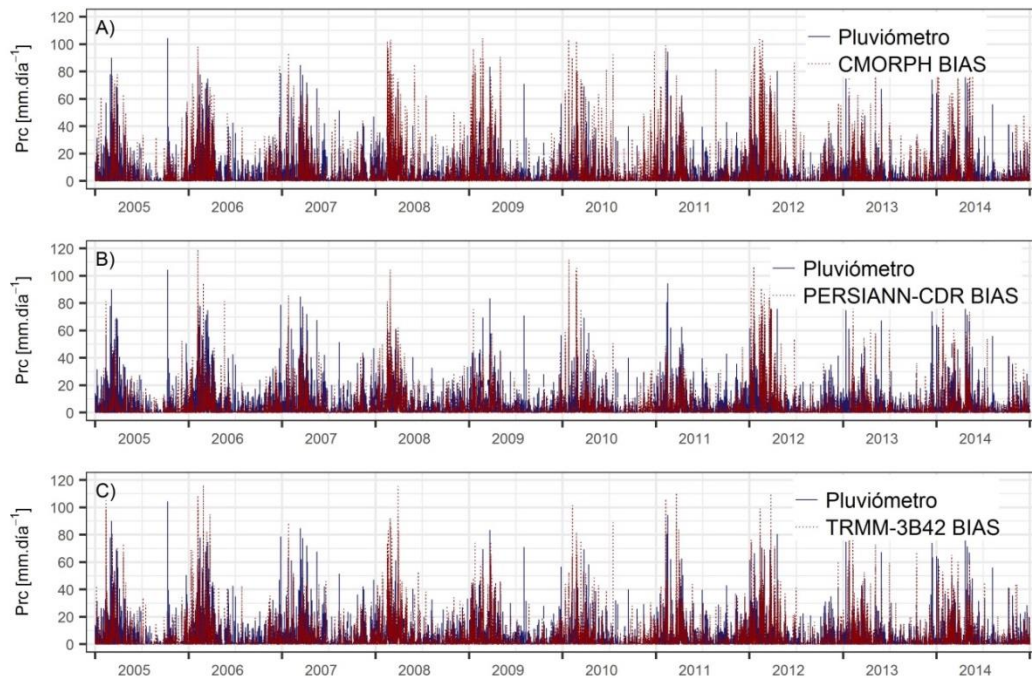


Figura 4-6. Precipitación media diaria corregida de la cuenca Catamayo.

#### 4.2.3.3 Validación de los datos de *PPES*

A continuación se muestra los resultados de la validación de los datos estimados por los *PPES* con los datos pluviométricos. Los coeficientes de determinación revelan una buena correlación a nivel mensual. Las Figuras 4-7 y 4-8 corresponden a la validación de dos celdas ubicadas en el centro de gravedad de la cuenca Catamayo, con los datos *PPES* y *PPES-correctos*. La recta de las gráficas corresponde a la relación 1:1 de los datos observados (pluviómetros versus pluviómetros). Los resultados de las comparaciones de las otras celdas se muestran en el Anexo D.

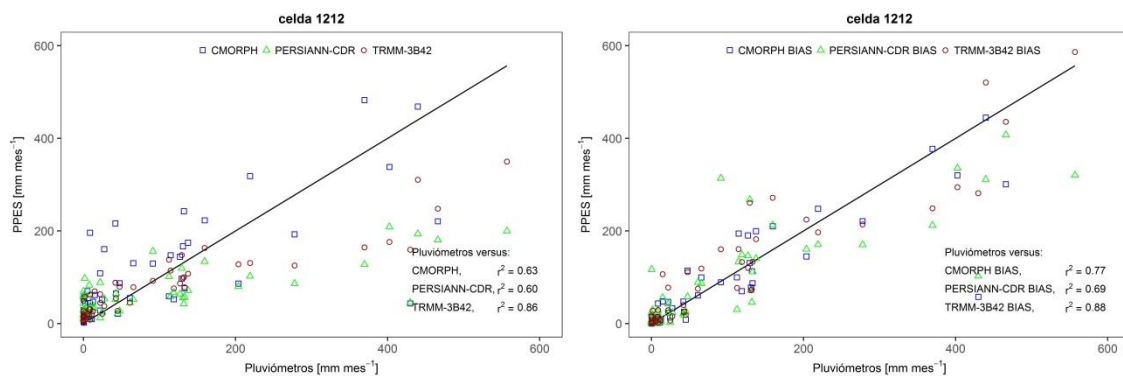
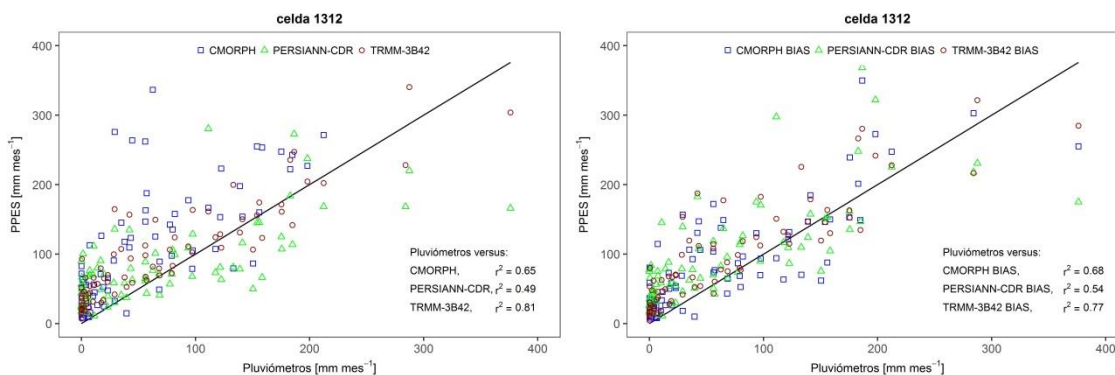


Figura 4-7. Correlación de precipitación pluviómetros ~ *PPES* la celda 1212: (izq.) *PPES* originales (der.) *PPES-correctos*, en el periodo 2005-2015.

Los datos originales *CMORPH* sobreestiman la lluvia observada en casi todas las celdas, éstos se observan por encima de la recta. Mientras que *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* se ajustan mejor a los datos pluviométricos, aunque en algunas celdas se puede apreciar que subestiman ligeramente los datos observados. Resultados preliminares usando los mismos *PPES* en cuencas africanas se observa la misma relación con los datos observados, *CMORPH* sobreestima, mientras que *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* se ajustan adecuadamente a los datos observados (Bâ et al., en preparación).

En la Figura 4-8 se puede observar que los *PPES-correctados* se ajustan mejor a los datos observados y los coeficientes de determinación aumentaron en todos los productos, siendo más eficaces *CMORPH-correctado* y *PERSIANN-CDR-correctado*. En este caso, el  $r^2$  de *TRMM-3B42-correctado* disminuye, pero en las otras celdas se mantiene o aumenta levemente.



**Figura 4-8.** Correlación de precipitación pluviómetros ~ PPES la celda 1312: (izq.) PPES-originales (der.) PPES-correctados, en el periodo 2005-2015.

#### 4.2.3.4 Comparaciones LAWR y pluviómetros

Los resultados de las comparaciones de precipitación *LAWR* y pluviómetros se presentan en este apartado. El coeficiente de correlación es satisfactorio ( $r^2 = 0.52$ ). Los pluviómetros, con datos concomitantes, ubicados en el área que cubre el *LAWR* son las estaciones: Argelia, El Tiro, TS1, Páramo, Malcatos y Yangana. La comparación entre *LAWR* y los pluviómetros corresponden a los tres primeros meses de los años 2003, 2006 y 2007 (Figura 4-9).

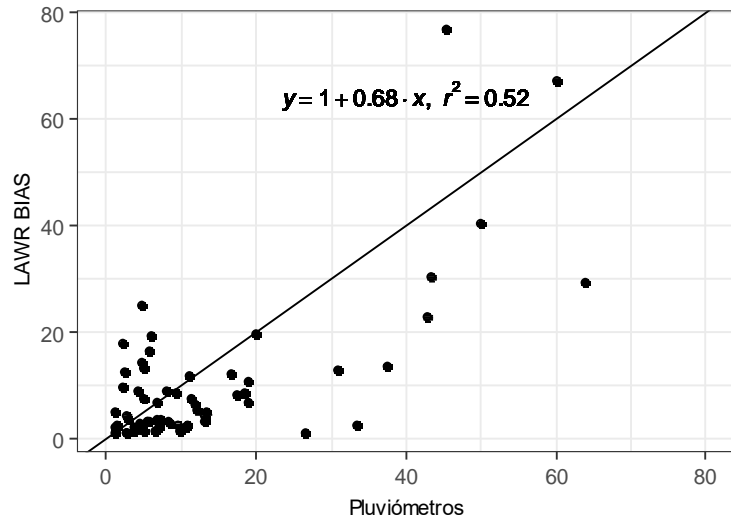


Figura 4-9. Precipitación diaria *LAWR* versus pluviómetros.

En la Figura 4-10 se observa tres imágenes *LAWR*, a la izquierda los datos calibrados a 0.5 km de resolución, en el medio los agregados y promediados a 5 km (0.05°) y a la derecha a 13.5 km (0.125°) de resolución.

Las imágenes *LAWR* cubren parcialmente la parte alta de la cuenca Catamayo (Figura 4-10). Los datos de este radar son escasos como se muestra en la gráfica de disponibilidad de datos de *SR* (ver Figura 3-11), debido a eso en este estudio, los datos *LAWR* se combinan con los pluviómetros en la escala espacial, es decir, en las celdas del modelo en donde no existen pluviómetros se usaron los datos del radar [*LAWR* + pluviómetros]. En otros estudios combinan datos de radar y pluviómetros en las escalas temporal y espacial utilizando métodos de interpolación bilineal y Kriging (Jatho et al., 2010; Sinclair y Pegram, 2005).

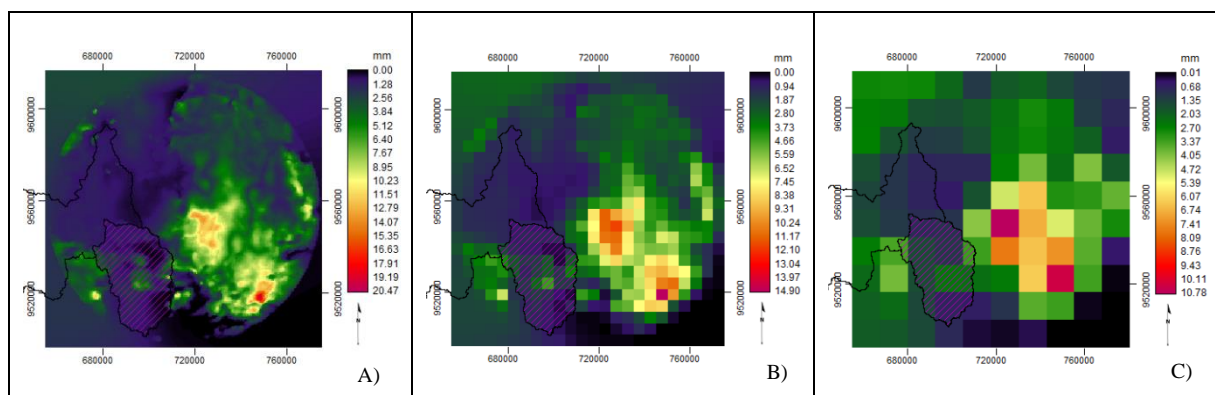


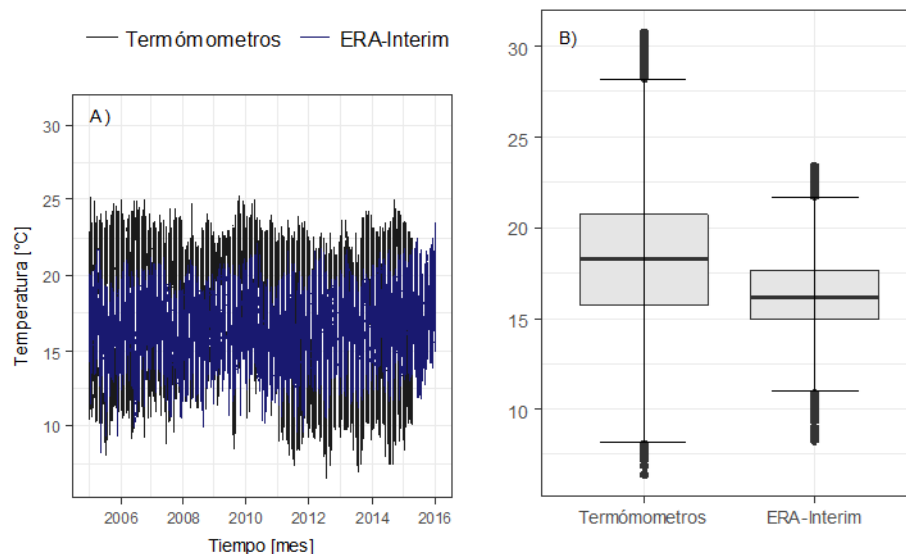
Figura 4-10. Precipitación *LAWR* del día 30-03-2002: A) Resolución original 0.5 km, B) 5 km, C) 13.5 km, cuenca alta del río Catamayo, Coord. UTM 17S, datum WGS84.

#### 4.2.3.5 Comparaciones de temperatura *PTES* y termómetros

La temperatura media de la cuenca Catamayo medida con los termómetros es de 18.3 °C y la estimada con *ERA-Interim* es de 16.3 °C. La temperatura estimada por *ERA-Interim* subestima en ~2° C los valores medios observados (Figura 4-11). Las temperaturas observadas de los termómetros tienen un amplio rango, esto puede deberse a que las estaciones por lo general se ubican en los valles que tienen temperaturas altas, y en otros casos en las cimas de las montañas (Tabla 4-7).

**Tabla 4-7. Resumen estadístico de temperatura en el periodo 2005-2015.**

Termómetros	ERA-Interim
Min. : 6.40	Min. : 8.25
1er Q.: 15.70	1er Q.: 14.95
Mediana : 18.30	Mediana : 16.15
Media : 18.27	Media : 16.32
3er Q.: 20.70	3er Q.: 17.65
Max. : 30.80	Max. : 23.45



**Figura 4-11. Temperatura de la cuenca Catamayo, en el periodo 2005-2015.**

Los coeficientes de determinación de las comparaciones entre datos observados y *ERA-Interim* a nivel de celda (termómetro/celda) no fueron satisfactorios, los valores de  $r^2$  son menores a 0.5 (Figura 4-12). Esto puede deberse a que existe poca densidad de termómetros y la ubicación de la estación puede que no sea representativa para el área del pixel de *ERA-Interim* (~256 km<sup>2</sup>).

La temperatura promedio de la cuenca Catamayo con *ERA-Interim* y termómetros, está dentro de los límites para la región. Además, el modelo *CEQUEAU* requiere datos de temperatura promedio, el cual los obtiene de los máximos y mínimos diarios. Por lo que es factible utilizar la precipitación de *ERA-Interim* en las modelaciones del río Catamayo.

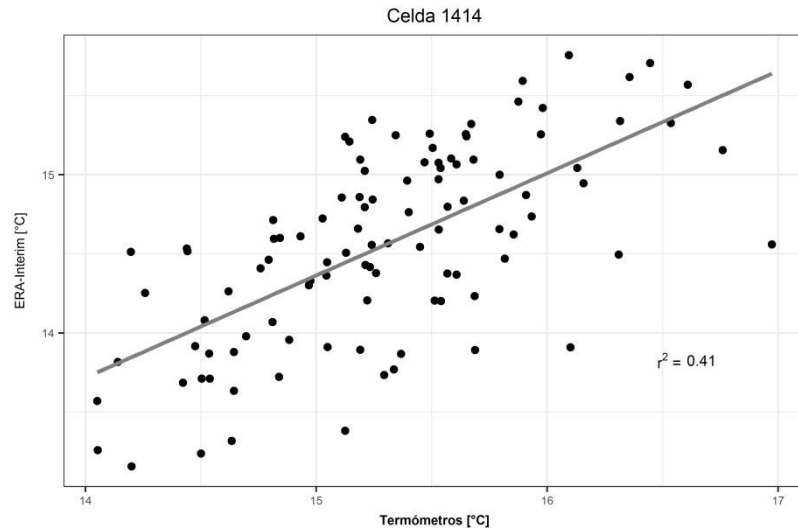


Figura 4-12. Comparación pixel/termómetro en la cuenca Catamayo, 2005-2015

Los análisis de homogeneidad corroboraron que los valores medios y la varianza de las temperaturas se mantienen estables en las series de datos (Figura 4-13). Todas las series de datos de temperatura observada por los termómetros se utilizaron en las modelaciones.

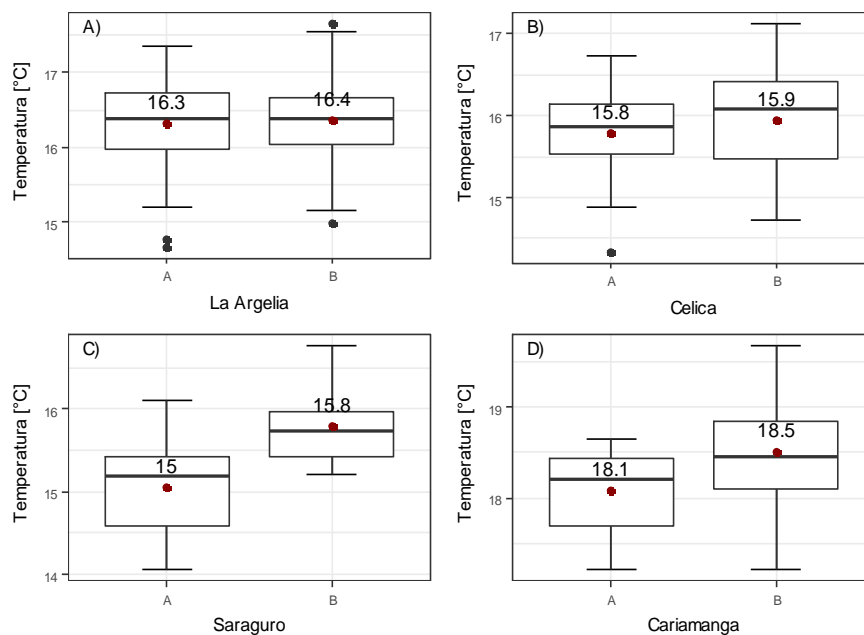


Figura 4-13. Temperatura de 4 estaciones meteorológicas, 2005-2015.

### 4.3 Modelación del río Catamayo

La eficiencia de las modelaciones en el río Catamayo se presentan a continuación, un resumen de los modelos en los periodos de calibración y validación se observa en la Tabla 4-8.

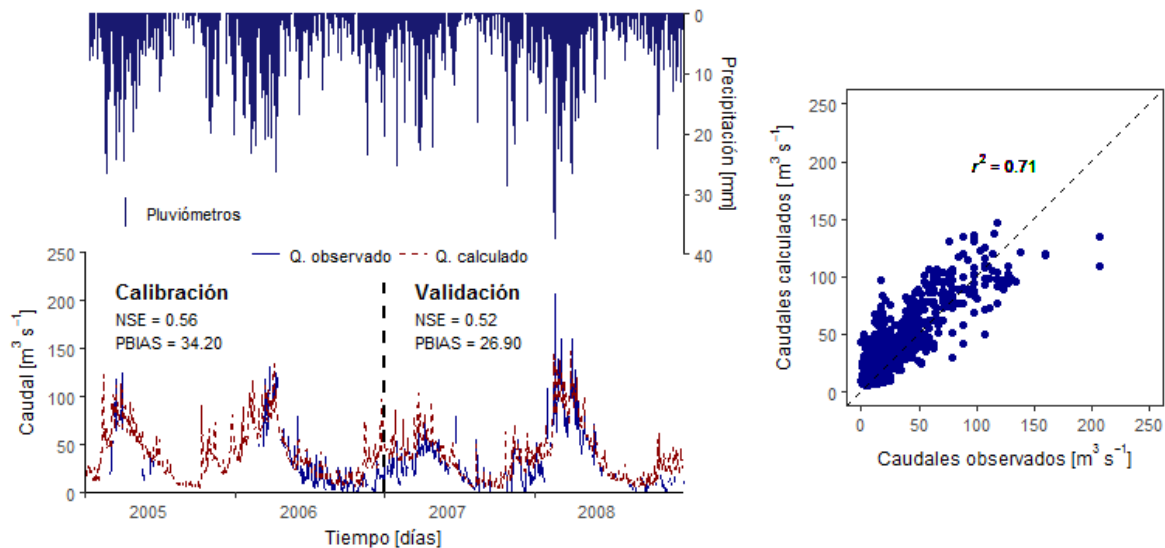
*Tabla 4-8. Eficiencia de las modelaciones diarias interanuales en el río Catamayo.*

Estación	Resolución	Datos meteorológicos	Calibración				Validación					
			Periodo	Qo	Qc	NSE	Eficiencia	Periodo	Qo	Qc	NSE	Eficiencia
Boquerón	0.055°	Pluviómetro Balcázar et al.	2005-2006	50.94	44.41	0.43	No satisfactorio	2007-2008	42.05	42.40	0.41	Satisfactorio
	0.05°	Pluviómetro		28.29	40.10	0.56	Satisfactorio		31.95	37.06	0.52	Satisfactorio
	0.125°	[LAWR + Pluvio]	2009-2010	28.29	39.96	0.63	Satisfactorio	2007-2008	31.95	34.81	0.64	Satisfactorio
	0.125°	TRMM-3B42		28.29	35.40	0.68	Satisfactorio		31.95	36.20	0.62	Bueno
Guayabal	0.125°	Pluviómetro	1982-1985	36.93	41.33	0.47	No satisfactorio	1987-1989	33.84	41.51	0.57	Satisfactorio
		Pluviómetro		44.64	54.40	0.80	Bueno		39.66	29.00	0.72	Bueno
Vicin	0.25°	CMORPH		44.64	41.67	0.70	Satisfactorio		39.66	34.09	0.64	Satisfactorio
		PERSIANN-CDR		44.64	42.00	0.80	Bueno		39.66	87.64	0.66	Satisfactorio
		TRMM-3B42	2006-2008	44.64	43.80	0.85	Muy bueno	2009-2011	39.66	36.44	0.79	Bueno
		CMORPH BIAS		44.64	32.00	0.77	Bueno		39.66	32.15	0.66	Satisfactorio
		PERSIANN-CDR BIAS		44.64	44.16	0.83	Muy bueno		39.66	27.28	0.66	Satisfactorio
		TRMM-3B42 BIAS		44.64	36.23	0.64	Satisfactorio		39.66	30.23	0.60	Satisfactorio

### 4.3.1 Modelación de los caudales del río Catamayo en Boquerón

En la estación Boquerón se realizaron 3 modelaciones utilizando datos observados por pluviómetros, y estimados por *TRMM-3B42* y la combinación [*LAWR* + pluviómetros]. En Balcázar et al. (2016) se presentan los resultados de la primera modelación del río Catamayo en Boquerón con el modelo *CEQUEAU* a 6 km ( $\sim 0.055^\circ$ ) de resolución. Se obtuvieron coeficientes de Nash de 0.43 y 0.41, respectivamente para la calibración y validación.

En las Figuras 4-14 a 4-16 se muestran los hidrogramas calculados en Boquerón con los distintos tipos de datos. Los tres modelos realizados sobre esta subcuenca dieron resultados satisfactorios en los periodos de calibración y validación. Si bien, los caudales de ciertos periodos son sospechosos, en algunos años los caudales calculados pico responden mejor a las lluvias en la temporada húmeda, por ejemplo en los años 2006 y 2008 se observa una buena respuesta del modelo (Tabla 4-9). Sin embargo, algunos picos en la época relativamente seca no tienen relación con las lluvias.



**Figura 4-14.** Modelación de los caudales diarios en la estación Boquerón utilizando pluviómetros: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

En la figura 4-14 (Der.) se observa que los caudales  $120 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  se modelan adecuadamente. Sin embargo se observan dos picos en el año 2008, los cuales son subestimados por el modelo.



El modelo de la estación Boquerón utilizando la lluvia combinada de [LAWR + pluviómetros] mejora con, se puede observar los coeficientes de NSE y  $r^2$  que son superiores que el modelado con pluviómetros. Esto indica que la lluvia es escasa en el periodo modelado es escaso, puesto que las celdas con usencia de pluviómetros se complementan con los datos del radar (Figura 4-15).

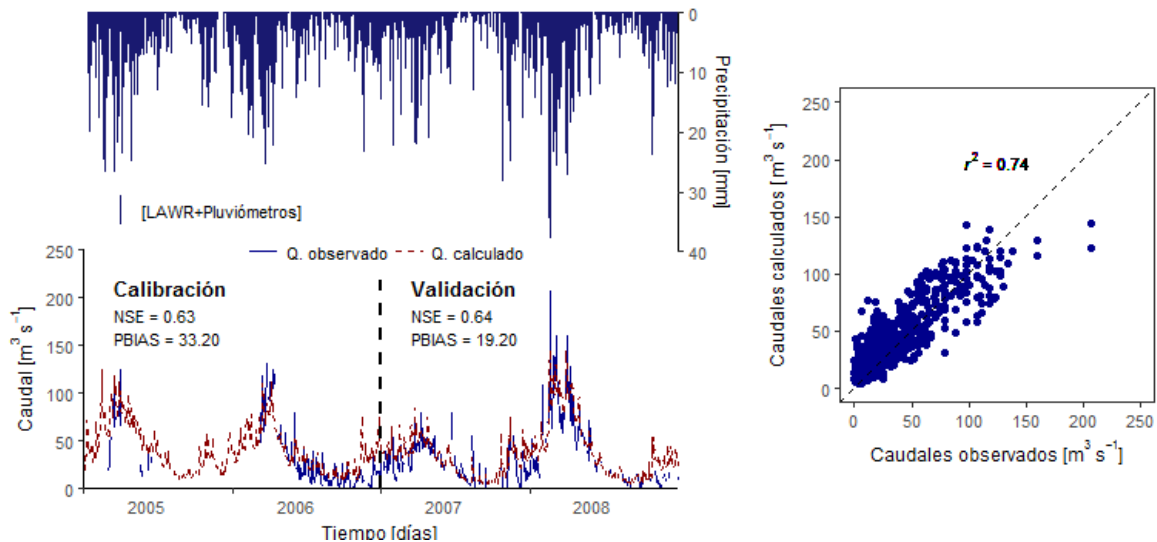


Figura 4-15. Modelación de los caudales diarios en la estación Boquerón utilizando [LAWR + pluviómetros]: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

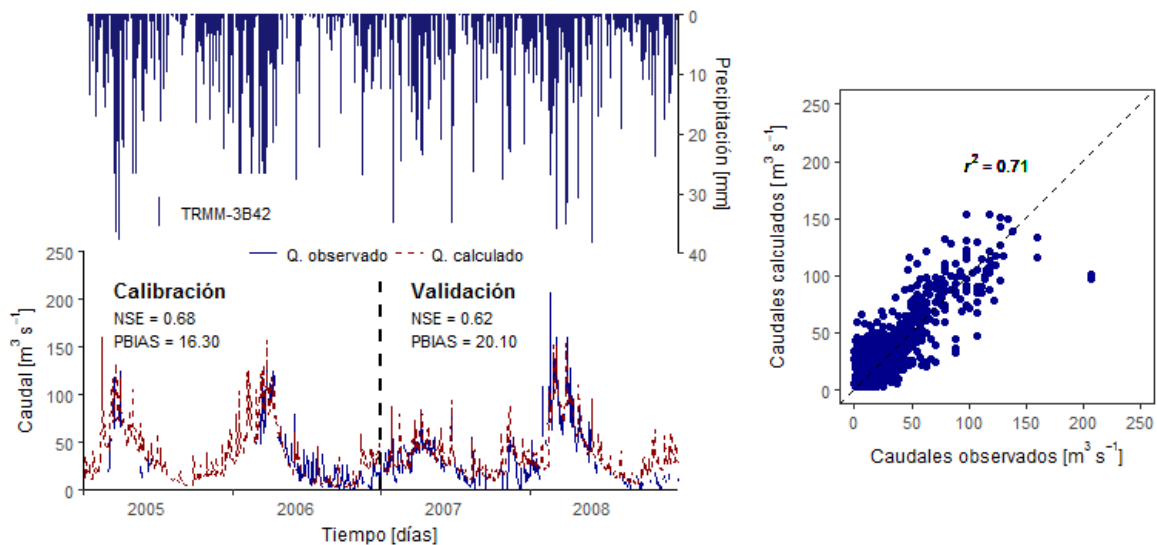


Figura 4-16. Modelación de los caudales diarios en la estación Boquerón utilizando TRMM-3B42: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

La modelación con el producto *TRMM-3B42* también mejora los resultados de la subcuenca Boquerón. Los criterios numéricos mejoran. A pesar de que no se puede modelar los picos en el 2008, se observa una buena relación con los caudales mínimos y medios.

Si bien los modelos de la subcuenca Boquerón, presenta valores no satisfactorios en el criterio NSE, los otros criterios numéricos demuestran que existe cierta eficiencia en los años 2005, 2006 y 2008.

**Tabla 4-9. Eficiencia de la modelación en la estación Boquerón, utilizando pluviómetros y SR.**

Lluvia	Año	NSE [-]	PBIAS [%]	r <sup>2</sup> [-]	Error PQ [%]	Dif_PQ [días]	N [días]	Satisfactorio
Pluviómetros	2005 <sup>o</sup>	0.09	42.5	0.56	0.88	47	34	
	2006 <sup>o</sup>	0.41	27	0.68	3.31	11	252	%
	2007*	0.08	33.5	0.40	30.65	17	243	
	2008*	0.54	16.1	0.75	29.27	39	207	%
[LAWR + pluviómetros]	2005 <sup>o</sup>	-0.05	54.6	0.59	0.84	46	34	
	2006 <sup>o</sup>	0.44	19.1	0.61	14.41	12	252	%
	2007*	0.25	20.9	0.46	5.48	16	243	
	2008*	0.59	14.4	0.82	30.41	1	207	%
<i>TRMM-3B42</i>	2005 <sup>o</sup>	0.12	43.5	0.56	29.45	46	34	%
	2006 <sup>o</sup>	0.45	9.1	0.70	20.21	1	252	\$ %
	2007*	0.22	25.6	0.44	17.57	2	243	
	2008*	0.55	9.1	0.67	25.81	39	207	# \$ %

<sup>o</sup> Periodo de calibración; \* periodo de validación; # satisfactorio en NSE  $\geq 0.5$ ; \$ satisfactorio en PBIAS  $< \pm 15$ ; % satisfactorio en r<sup>2</sup>  $\geq 0.6$ ; Dif\_PQ = diferencia en días del pico máximo observado y calculado; N = número.

### 4.3.2 Modelación de los caudales del río Catamayo en Guayabal

En la estación Guayabal, el NSE obtenidos en la calibración y validación no fueron satisfactorios (Figura 4-17). Existen algunos picos que no son simulados correctamente y que no se explican con las lluvias. Los otros criterios numéricos (Tabla 4-10) indican que existe cierta eficacia del modelado con PBIAS en los años 1982:1985 y 1987. Los caudales calculados en los meses octubre-mayo parecen representar mejor los caudales observados. Este modelo representa los picos de crecida en la época húmeda, sin embargo los subestima en dimensión.

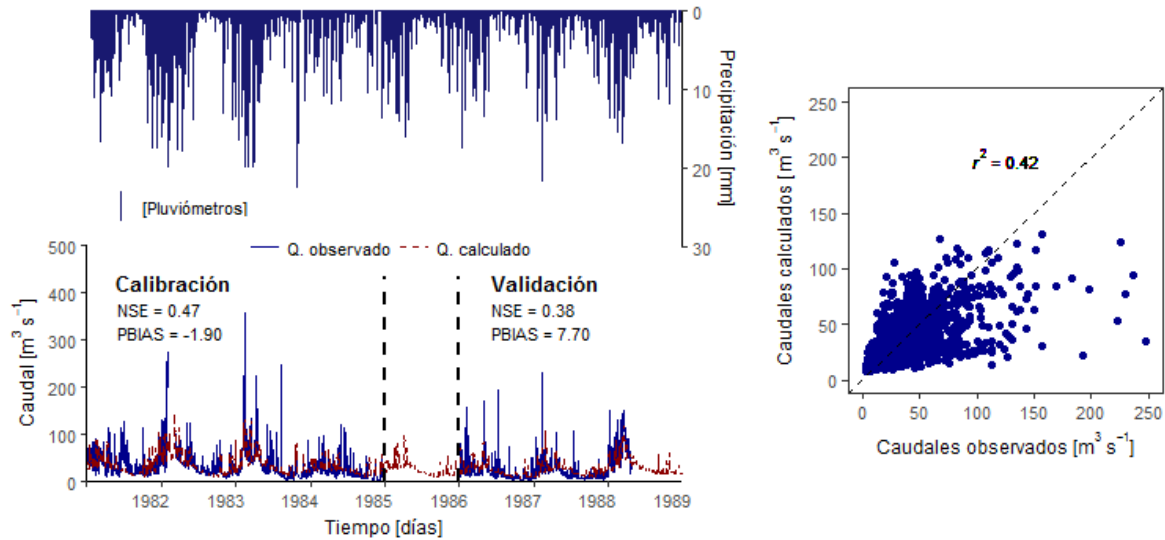


Figura 4-17. Modelación de los caudales diarios en la estación Guayabal utilizando pluviómetros: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

Tabla 4-10. Eficiencia de la modelación en la estación Guayabal.

Lluvia	Año	NSE [-]	PBIAS [%]	$r^2$ [-]	Error PQ [%]	Dif_PQ [días]	N [días]	Satisfactorio
Pluviómetros	1982°	-0.03	-17.5	0.05	17	170	365	
	1983°	0.29	-6.6	0.31	47	36	327	\$
	1984°	0.42	1.1	0.38	63	1	365	\$
	1985°	0.15	8.8	0.17	41	78	341	\$
	1987*	0.22	-0.1	0.17	56	73	364	\$
	1988*	0.16	16.0	0.27	52	16	361	
	1989*	0.22	-21.3	0.33	23	4	113	

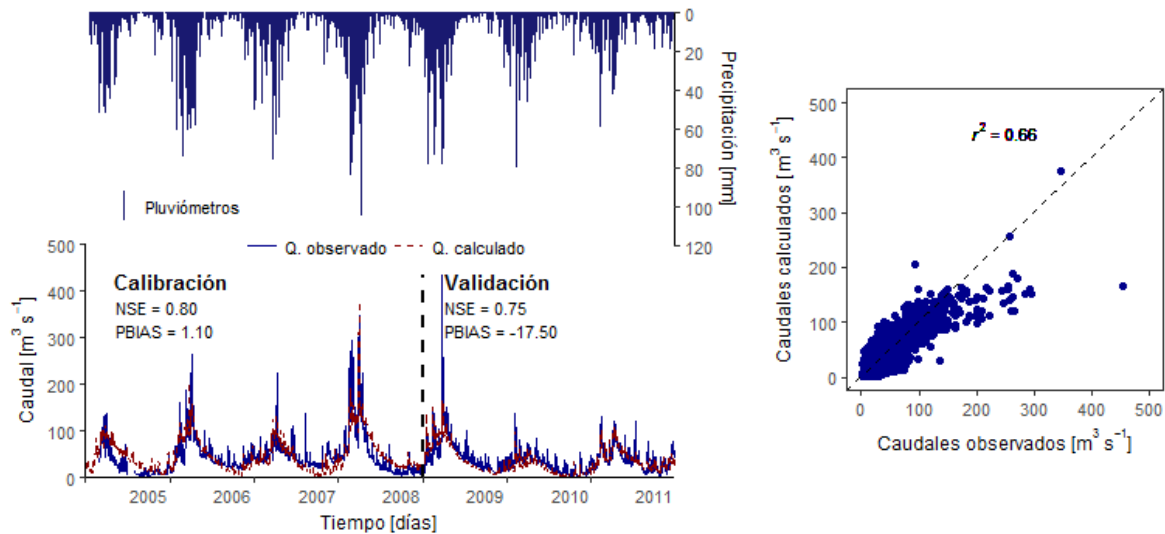
° Periodo de calibración; \* periodo de validación; # satisfactorio en  $\text{NSE} \geq 0.5$ ; \$ satisfactorio en  $\text{PBIAS} < \pm 15$ ; % satisfactorio en  $r^2 \geq 0.6$ ; Dif\_PQ = diferencia en días del pico máximo observado y calculado; N = número.

### 4.3.3 Modelación de los caudales del río Catamayo en Vicin

Los resultados de las modelaciones en la estación Vicin fueron satisfactorios utilizando la lluvia de los pluviómetros, *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42*.

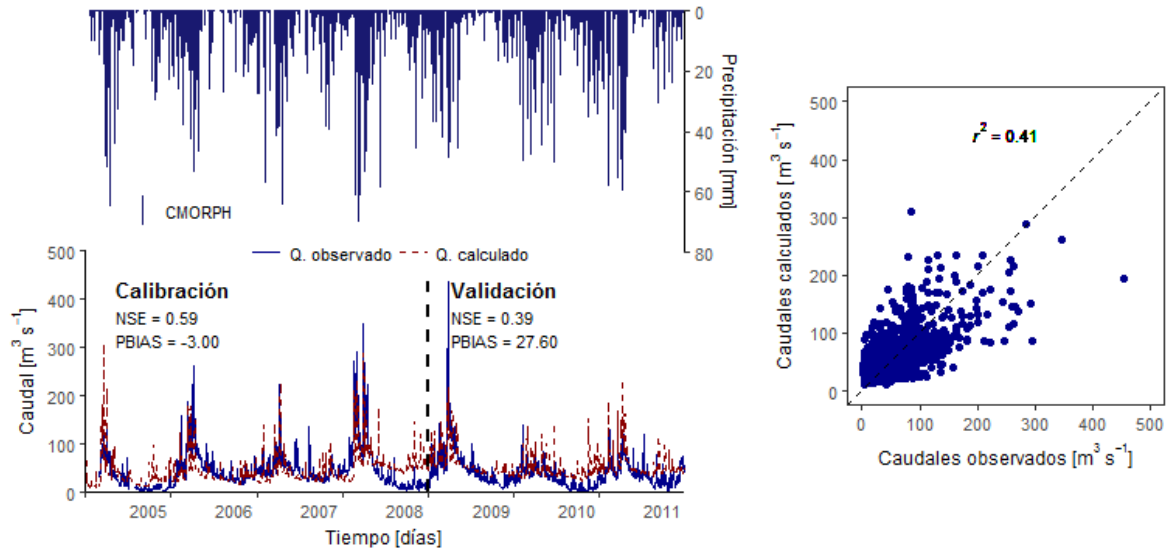
Los resultados de las modelaciones utilizando los pluviómetros fueron aceptables en los periodos de calibración y validación. En ciertos años, considerando los criterios:  $r^2$  y PBIAS se obtuvieron resultados satisfactorios en los años 2008-2011 (Tabla 4-11). Los NSE no fueron satisfactorios, inclusive se obtuvo un valor negativo en el año 2007. Por otro lado, se observa que los caudales pico en la temporada relativamente seca del año 2007 no son modelados adecuadamente, esto puede deberse a que éstos caudales no tienen

explicación con la lluvia en dicho periodo (Figura 4-18). Los caudales mínimos y medios se modelan mejor que los picos, sin embargo se puede observar en Figura 4-18 (Der.) que existen dos picos entre 200 y 400  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  que se modelan casi perfectamente.



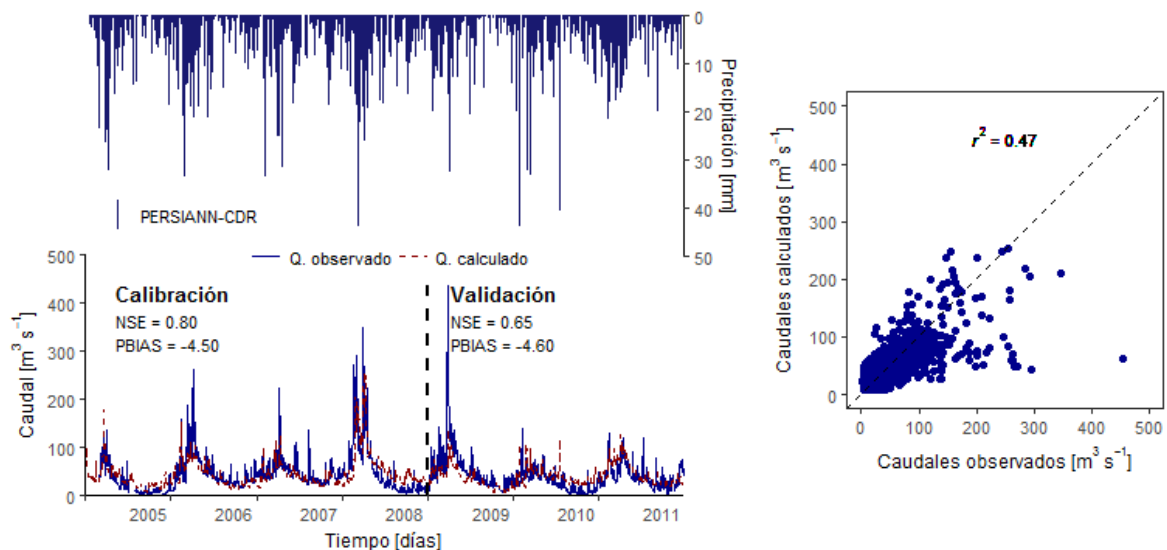
**Figura 4-18. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando pluviómetros: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.**

Los caudales modelados utilizando *CMORPH* no son satisfactorios en los periodos de calibración y validación (Figura 4-19). Los caudales en los meses octubre-noviembre son sobreestimados, y en enero-febrero son subestimados. En las comparaciones de *CMORPH* y pluviómetros se observó que el producto sobreestima la lluvia hasta un 40% los datos diarios, en todos los años. En este modelo se obtuvieron valores negativos de NSE en los años 2007 y 2010. En el hietograma de la Figura 4-19 se puede observar que los caudales mínimos se modelan mejor en los años 2005 y 2006. La Figura 4-19 Der. se puede ver que los puntos están dispersos a lo largo de la recta.



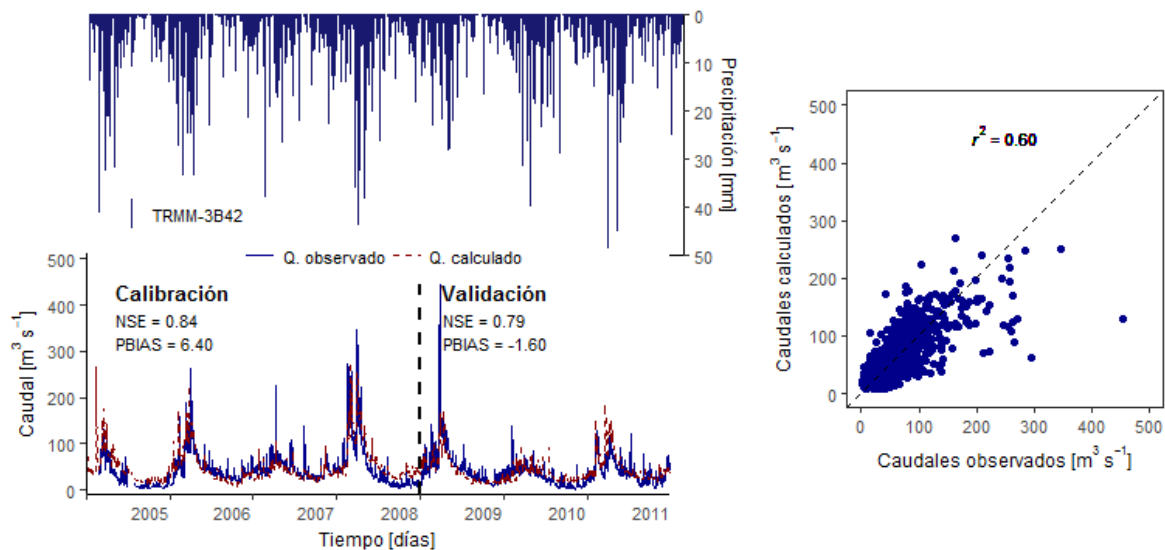
**Figura 4-19.** Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando *CMORPH*: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

Las modelaciones con *PERSIANN-CDR* resultan satisfactorias en los periodos de calibración y validación tomando en cuenta el criterio NSE, sin embargo, el PBIAS en el periodo de validación es muy alto (Figura 4-20). Esto puede deberse a que el modelo no simuló adecuadamente los caudales pico en los meses febrero-abril de los años 2007 y 2009. Con este producto, únicamente los años 2008 y 2011 son satisfactorios en uno de los criterios numéricos. Hay unos picos que se modelan bien hasta  $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , existen picos subestimados, por ejemplo en los años 2008 y 2009.



**Figura 4-20.** Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando *PERSIANN-CDR*: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

Los caudales calculados con *TRMM-3B42* se ajustan a los caudales observados en los caudales pico en los meses febrero-abril, así como los caudales de la temporada seca. Los caudales reflejan la dinámica estacional. Sin embargo, en los meses húmedos, se observan algunos picos que subestiman y otros sobreestiman ligeramente a los caudales observados (Figura 4-21). En algunos años se observan resultados satisfactorios en algunos de los criterios numéricos (Tabla 4-11). Los picos de hasta  $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  se modelan, pero se observa que regularmente subestima los caudales, se puede ver los puntos con mayor frecuencia bajo la recta.



**Figura 4-21.** Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando *TRMM-3B42*: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

La eficiencia de los modelos con los *PPES-correctados* mejora en algunos años de los tres productos de satélite utilizados. En algunos años *TRMM-3B42* parece mantenerse igual, pero en otros años mejora. Los Coeficientes mensuales interanuales tienen un aporte más significativo en *PERSIANN-CDR* y *CMORPH* (Tabla 4-12).

Tabla 4-11. Eficiencia de la modelación en la estación Vicin, utilizando PPES y pluviómetros.

Lluvia	Año	NSE [-]	PBIAS [%]	r <sup>2</sup> [-]	Error PQ [%]	Dif_PQ [días]	N [días]	Satisfactorio
Pluviómetros	2005°	0.16	63	0.60	18	3	268	%
	2006°	0.40	-4.8	0.66	21	7	363	\$ %
	2007°	-0.09	-23.2	0.42	42	1	365	
	2008°	0.48	14.6	0.70	8	0	366	\$ %
	2009*	0.42	-16.9	0.47	63	0	360	
	2010*	0.28	-36.5	0.47	31	0	365	
	2011*	0.46	-5.1	0.63	17	51	364	\$ %
CMORPH	2005°	0.04	50.9	0.42	125	13	268	
	2006°	0.30	-20.6	0.38	30	21	363	
	2007°	-0.01	-16.3	0.28	10	1	365	
	2008°	0.16	21.0	0.41	16	1	366	
	2009*	0.32	7.20	0.45	52	1	360	\$
	2010*	-0.32	56.9	0.14	10	282	365	
	2011*	0.07	33.2	0.28	78	54	363	
PERSIANN-CDR	2005°	0.32	22.8	0.51	30	10	268	
	2006°	0.31	-16.7	0.33	41	52	363	
	2007°	0.19	-17.2	0.33	44	1	365	
	2008°	0.37	14.5	0.53	26	2	366	\$
	2009*	0.29	-36	0.24	69	4	360	
	2010*	-0.05	33.6	0.21	15	60	365	
	2011*	0.16	9.5	0.42	2	49	364	\$
TRMM-3B42	2005°	0.20	57.7	0.60	94	45	268	%
	2006°	0.35	-3.6	0.56	14	9	363	
	2007°	0.24	-21.5	0.36	53	1	365	
	2008°	0.60	24.0	0.74	22	30	365	# %
	2009*	0.43	-24.8	0.39	62	19	360	
	2010*	0.24	13.3	0.37	30	35	365	\$
	2011*	0.17	18.0	0.51	42	34	364	

° Periodo de calibración; \* periodo de validación; # satisfactorio en  $NSE \geq 0.5$ ; \$ satisfactorio en  $PBIAS < \pm 15$ ; % satisfactorio en  $r^2 \geq 0.6$ ; Dif\_PQ = diferencia en días del pico máximo observado y calculado; N = número.

Tabla 4-12. Eficiencia de la modelación en la estación Vicin, utilizando PPES-correctos.

Lluvia	Año	NSE [-]	PBIAS [%]	r <sup>2</sup> [-]	Error PQ [%]	Dif_PQ [días]	N [días]	Satisfactorio
<i>CMORPH BIAS</i>	2005 <sup>o</sup>	0.26	47.1	0.64	127	13	268	%
	2006 <sup>o</sup>	0.35	-14.2	0.45	29	56	363	\$
	2007 <sup>o</sup>	-0.07	-30.8	0.32	28	72	365	
	2008 <sup>o</sup>	0.19	24.9	0.60	47	40	366	%
	2009*	0.39	-1.9	0.37	39	68	360	\$
	2010*	0.07	20.0	0.29	60	21	365	
	2011*	0.13	14.8	0.46	78	75	363	
<i>PERSIANN-CDR BIAS</i>	2005 <sup>o</sup>	0.39	-0.7	0.37	14	10	268	\$
	2006 <sup>o</sup>	0.30	-14.8	0.28	31	53	363	\$
	2007 <sup>o</sup>	-0.01	-24.0	0.27	33	72	365	
	2008 <sup>o</sup>	0.17	14.6	0.31	18	31	366	\$
	2009*	0.35	-29.4	0.27	71	4	360	
	2010*	0.18	17.3	0.30	34	18	365	
	2011*	0.21	9.5	0.43	14	49	364	\$
<i>TRMM-3B42 BIAS</i>	2005 <sup>o</sup>	0.48	50.7	0.63	6	5	268	%
	2006 <sup>o</sup>	0.31	-3.6	0.47	10	57	363	\$
	2007 <sup>o</sup>	0.00	-28.9	0.33	41	72	365	
	2008 <sup>o</sup>	0.56	23.9	0.69	12	3	366	# %
	2009*	0.37	-27.0	0.37	67	19	360	
	2010*	0.34	5.6	0.45	22	35	365	\$
	2011*	0.27	10.7	0.55	41	34	364	\$

<sup>o</sup> Periodo de calibración; \* periodo de validación; # satisfactorio en NSE  $\geq 0.5$ ; \$ satisfactorio en PBIAS  $< \pm 15$ ; % satisfactorio en r<sup>2</sup>  $\geq 0.6$ ; Dif\_PQ = diferencia en días del pico máximo observado y calculado; N = número.

Las modelaciones con los datos corregidos mejoraron en los resultados en el producto *CMORPH*, los caudales se ajustan mejor en los meses octubre-noviembre, pero parece sobreestimar en los meses enero-febrero. Similar ocurre con los productos *TRMM-3B42* y *PERSIANN-CDR*, aunque algunos años parecen no mejoran, en otros tienen el efecto contrario. Los hidrogramas simulados con los datos corregidos se muestran en las Figuras 4-22 a 4-24 y los resultados utilizando los caudales diarios interanuales con los *PPES* originales y *PPES-correctos* se observan en las Figuras 4-25 a 4-27.



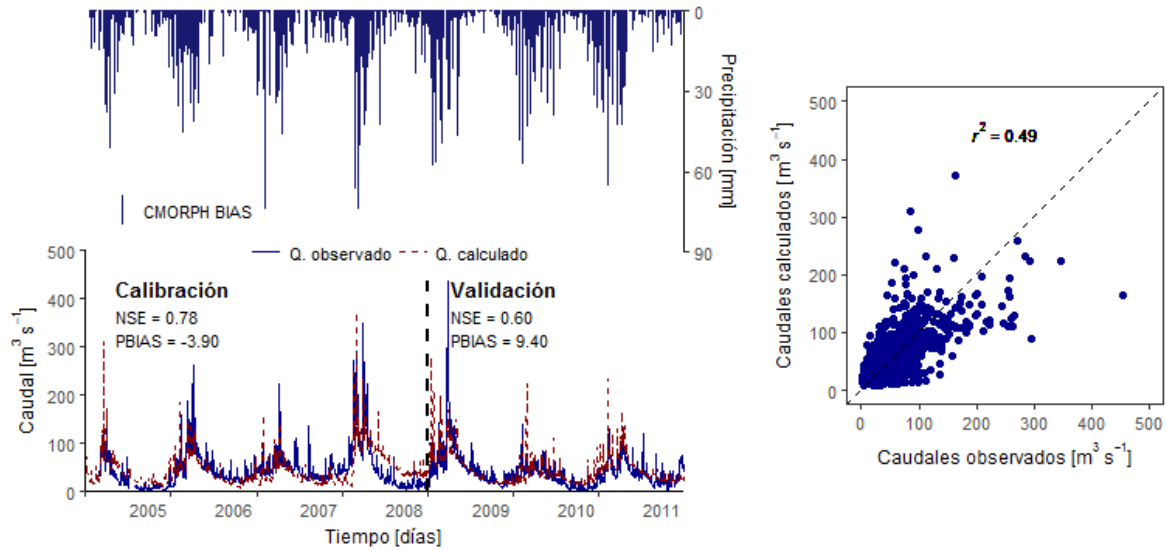


Figura 4-22. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando CMORPH-correctado: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

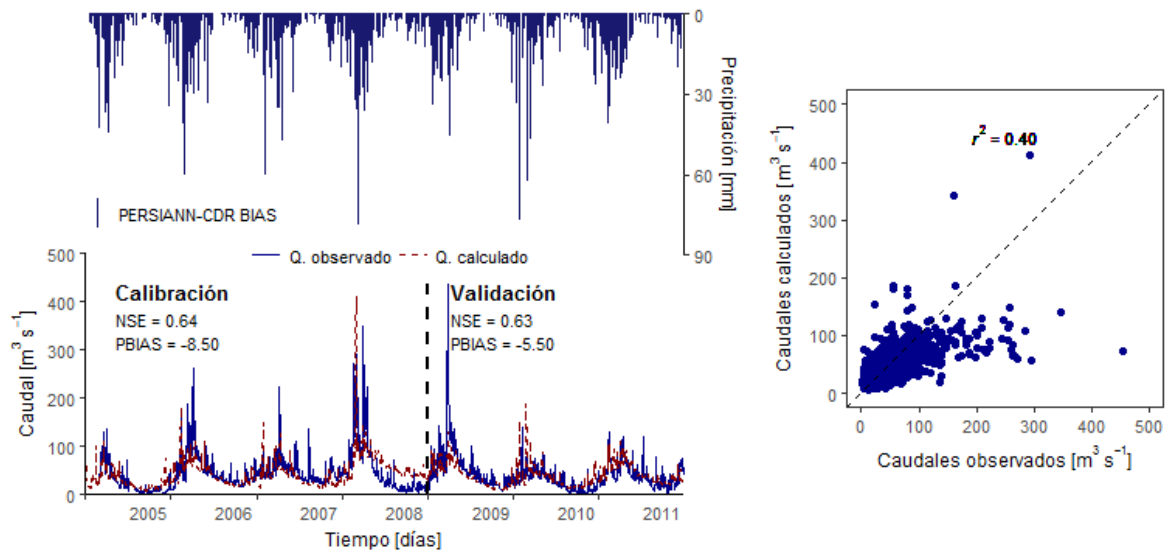


Figura 4-23. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando PERSIANN-CDR-correctado: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

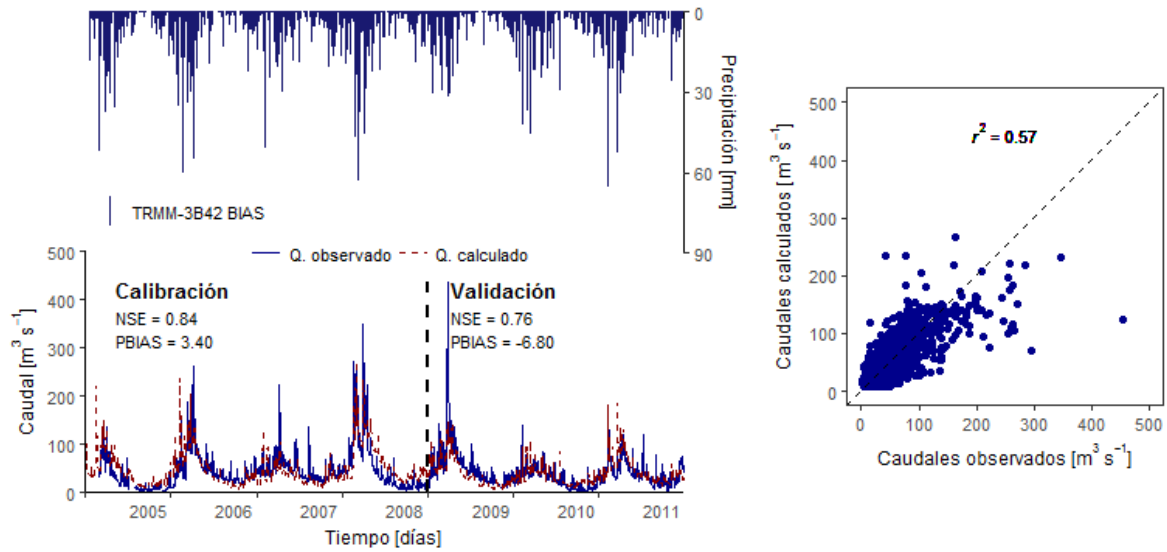


Figura 4-24. Modelación de los caudales diarios en la estación Vicin utilizando TRMM-3B42-correctido: (Izq.) hietograma e hidrograma, (Der.) correlación de caudales observados y calculados.

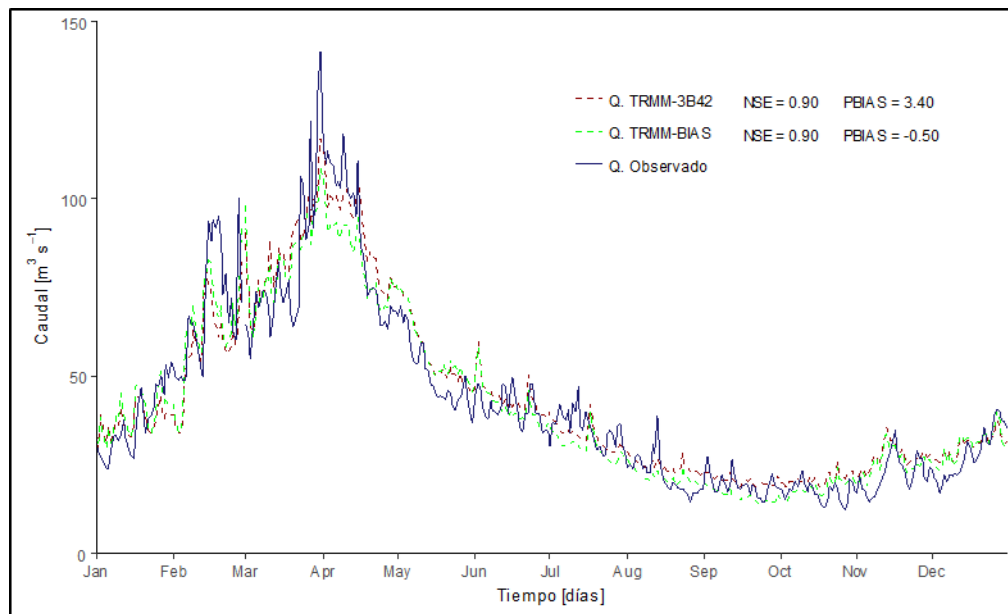


Figura 4-25. Modelación de caudales diarios interanuales utilizando TRMM-3B42 y TRMM-3B42-correctido, en el periodo 2005-2011.

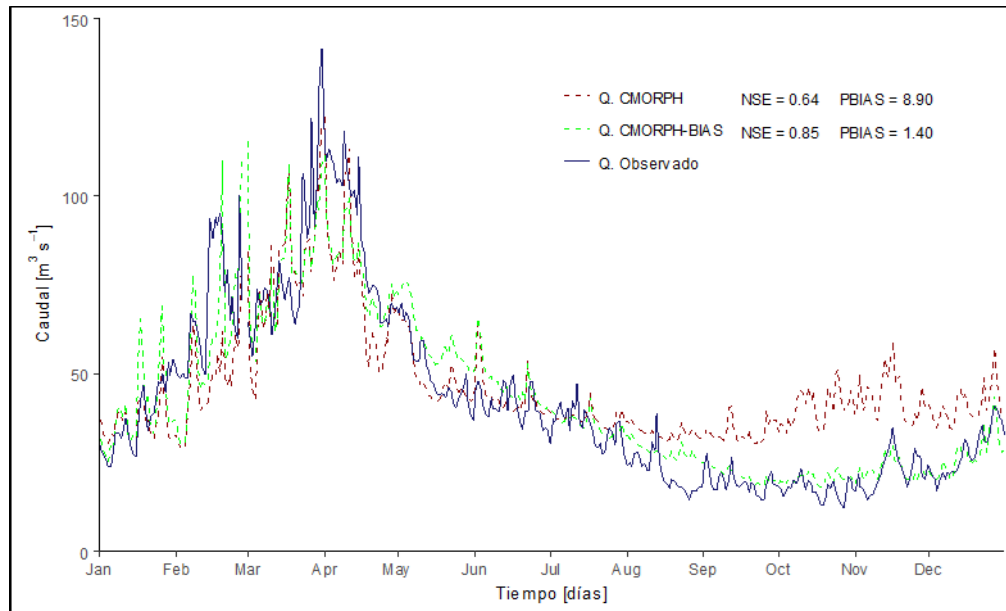


Figura 4-26. Caudales modelados con CMORPH y CMORPH-correctado, en el periodo 2005-2011.

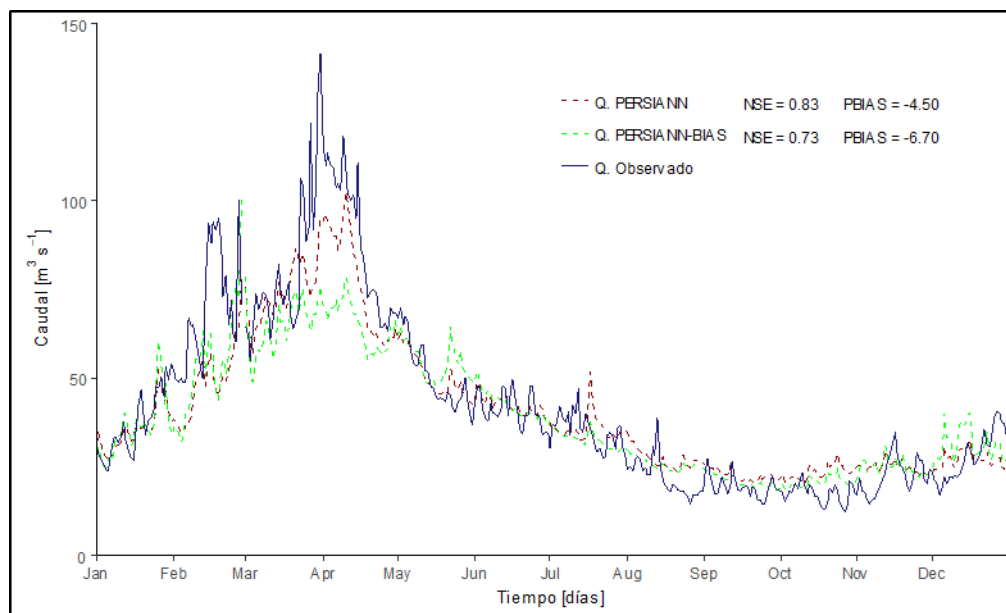


Figura 4-27. Modelación de caudales diarios interanuales utilizando PERSIANN-CDR y PERSIANN-CDR-correctado, en el periodo 2005-2011.

### 4.4 Árbol de decisiones

Para la toma de decisiones en la elección de los datos utilizados en este estudio se construyó un diagrama o “árbol de decisión” dividido en dos partes.

El primero representa el diagrama para extraer los archivos fisiográficos requeridos por el modelo *CEQUEAU*. Se exponen dos maneras: de forma manual desde cartas topográficas y automático desde un *MNA*, un mapa de suelos reclasificado y la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas (Figura 4-28).

El segundo presenta el diagrama para elegir los datos meteorológicos utilizados en el modelo *CEQUEAU*. Los datos pueden ser, los observados en estaciones meteorológicas o datos estimados por productos de satélite y radar. Se deja en claro que el usuario es quien decide si utilizar uno u otro producto de acuerdo a las necesidades y disponibilidad de las herramientas (Figura 4-29).

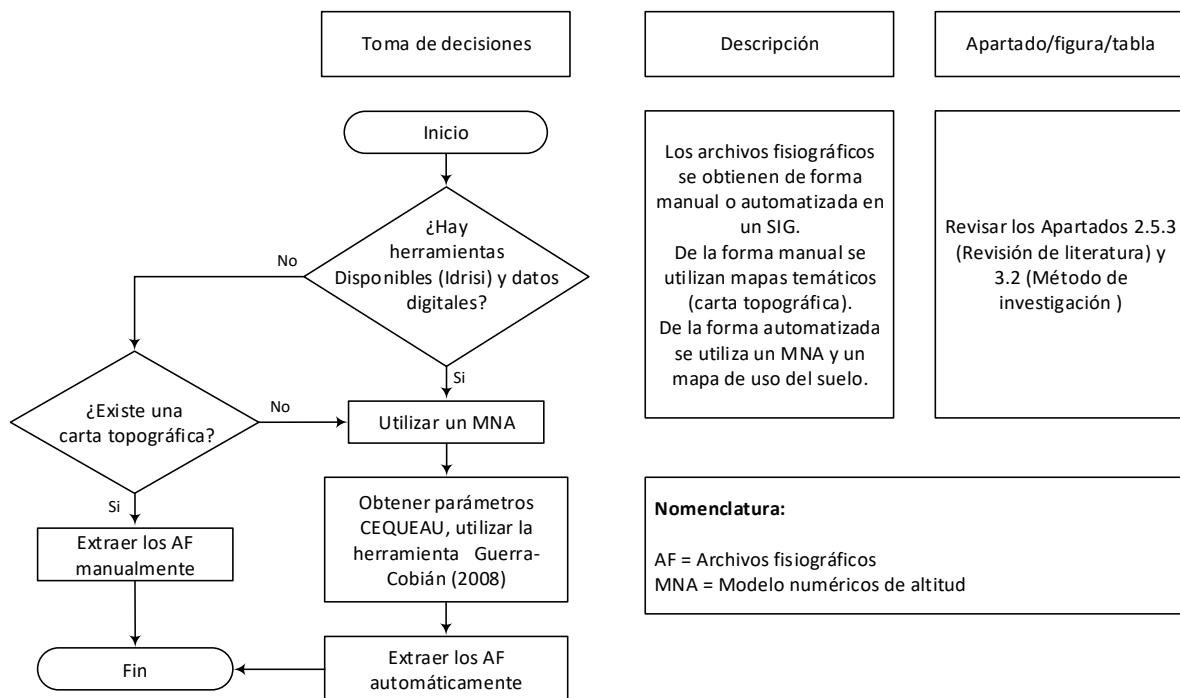


Figura 4-28. Árbol de decisiones para la extracción de archivos fisiográficos.

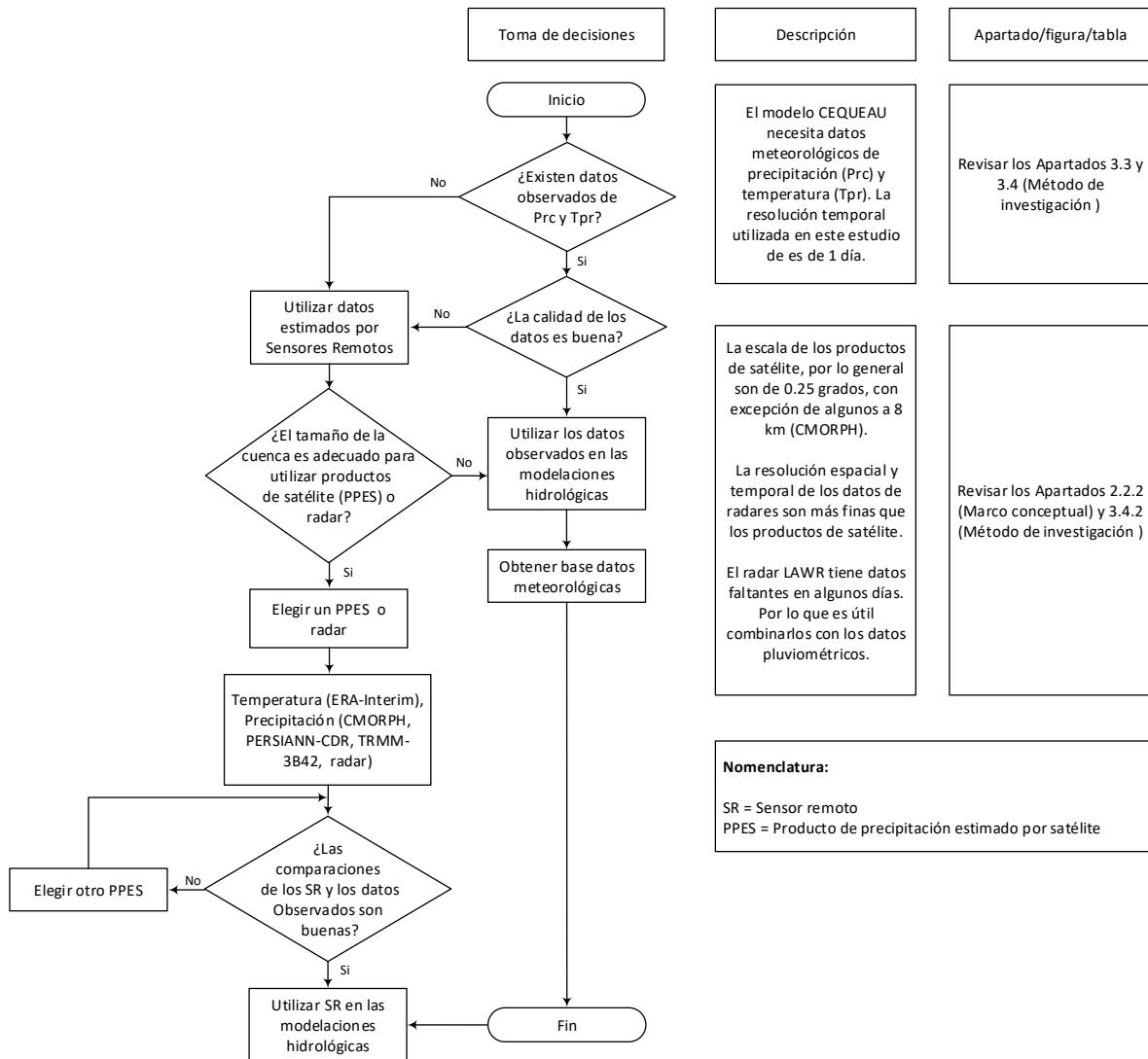


Figura 4-29. Árbol de decisiones para elegir los datos meteorológicos.

## **5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se contrastan los resultados obtenidos en la investigación con los resultados de estudios previos. Se hace hincapié en los datos de precipitación, por ser la variable de mayor relevancia en la modelación hidrológica.

### **5.1 Distribución de la lluvia en el área de estudio**

La lluvia observada en la cuenca Catamayo varía en función de la altitud. En la parte alta el aporte de lluvia es continuo a lo largo del año, en promedio los días con registros de lluvia son entre 136 y 248 (Tabla 5-1). Peters et al. (2013), en una área ubicada al este del área de estudio, Estación Científica San Francisco (ECSF), encontraron que el número de días secos continuos es menor a 4 y 7 días, y algunos años menor a 14 días entre el 1998 y 2010. En este mismo lugar se conoce que la intensidad de la lluvia es baja,  $< 5 \text{ mm h}^{-1}$  (Rollenbeck y Bendix, 2011).

Rollenbeck (2006), menciona que la precipitación máxima en las estribaciones de la cordillera oriental de los Andes del sur del Ecuador es alrededor de 4000 mm anuales. En un estudio posterior, Rollenbeck y Bendix (2011) compararon la precipitación registrada por los pluviómetros del INAMHI frente a la precipitación estimada por el radar *LAWR*. En dicho estudio se menciona que la interpolación de la lluvia (INAMHI) subestima las altas precipitaciones que ocurren en la cordillera. El mapa oficial registra precipitaciones de 1500 mm en lugares donde se conoce que la precipitación es alrededor de  $\sim 4000$  mm. Las modelaciones utilizando este mismo radar son satisfactorias cuando se combinan con pluviómetros, a pesar de que los datos disponibles son escasos.

En la cuenca baja las láminas de lluvias son altas en corto tiempo, durante dos y tres meses al inicio del año y las precipitaciones máximas, en algunas estaciones, superan los  $150 \text{ mm día}^{-1}$  (Tabla 5-1).

**Tabla 5-1. Precipitación observada en el periodo 2005-2015.**

Lugar	Estación	Altitud [msnm]	Promedio de días con lluvia/año	Promedio anual [mm]	Precipitación máxima [mm]	Año de Precipitación máxima	Mes de Precipitación máxima	Institución
Cuenca alta	San Francisco	1900	248	2218	103.5	2015	3	ECSF
	Tapichalaca	2488	227	3187	81.9	2005	6	ECSF
	Yangana	1917	136	1256	119.6	2006	2	INAMHI
	El Tiro	2825	235	1395	56.6	2009	7	ECSF
Cuenca baja	Catacocha	1810	79	834	165.4	2009	3	INAMHI
	Laipuna	590	52	465	71.1	2008	2	ECSF
	Saucillo	328	43	656	131.7	2006	3	INAMHI
	Zapotillo	182	40	713	112.6	2010	3	INAMHI

## 5.2 Análisis de la lluvia estimada

La precipitación media anual de la cuenca Catamayo observada por los pluviómetros, en el periodo 2005-2015, es de ~1130 mm; y la lluvia estimada por los *PPES*, en el mismo periodo es: *CMORPH* = 1520 mm, *PERSIANN-CDR* = 918 mm y *TRMM-3B42* = 1020 mm (Tabla 5-2). El producto *CMORPH* sobreestima la lluvia hasta en 47% y los productos *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* subestiman la lluvia observada en 12% y 2%, respectivamente.

Los *PPES-correctados* dieron los siguientes resultados *CMORPH-correctado* = 1218 mm, *PERSIANN-CDR-correctado* = 1225 mm y *TRMM-3B42-correctado* = 1192 mm. Estos datos sobrestiman la lluvia observada en 18%, 18% y 15%, respectivamente. Se observó que los datos correctados de *CMORPH* y *PERSIANN-CDR* se aproximan más a los valores promedios observados, y por el contrario *TRMM-3B42-correctado* se aleja del valor promedio observado (Tabla 5-2).

Tabla 5-2. Precipitación media de la cuenca Catamayo, medida con los pluviómetros y estimada por PPES.

Año	Pluvio	N	Datos Originales			Datos corregidos		
			Cmr	Prs	Trm	Cmr	Prs	Trm
2005	1055	274	1492	675	951	1089	867	1133
2006	1347	247	1571	934	1112	1291	1327	1337
2007	1124	242	1484	856	958	1100	1122	1070
2008	1743	184	2078	1144	1329	1630	1559	1599
2009	1351	189	1383	734	929	1303	985	1135
2010	928	164	1637	911	925	1340	1203	1057
2011	995	255	1551	854	1067	1192	1154	1229
2012	1148	310	2019	1284	1183	1714	1777	1463
2013	806	344	1123	766	935	840	882	1027
2014	944	302	1167	943	879	905	1229	1027
2015	1003	129	1211	992	945	990	1369	1034
$\bar{x}$	1032		1520	918	1020	1218	1225	1192

N = número de datos promedio en un año; Pluvio = pluviómetros;  $\bar{x}$  = precipitación media anual; Cmr = *CMORPH*; Prs = *PERSIANN-CDR*; Trm = *TRMM-3B42*.

La validación de la precipitación estimada por los *PPES* se realizó con los pluviómetros que se ubican en las celdas correspondientes. Los datos de los *PPES* se agregaron a nivel mensual y luego se compararon con las precipitaciones acumuladas de los pluviómetros. Los datos de los pluviómetros ubicados en una misma celda se promediaron para tener una mejor representación de la lluvia en el espacio. Las comparaciones arrojaron una buena correlación de los datos observados con *TRMM-3B42*, *PERSIANN-CDR* y *CMORPH-corregido*. Se observó que el ajuste es mejor en donde existe mayor densidad de pluviómetros y cuando éstos están bien distribuidos en el pixel de los *PPES*. Resultados preliminares usando los mismos *PPES* en cuencas de África occidental se observó un comportamiento similar, *CMORPH* sobreestima, mientras que *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* se ajustan adecuadamente a los datos observados (Bâ et al., en preparación).

Los productos *TRMM-3B42* y *PERSIANN-CDR* subestiman los picos en la época húmeda y sobrestiman los valores bajos del periodo relativamente seco. La subestimación del producto *TRMM*, también ha sido observado por Chen et al. (2013) en regiones húmedas de China, el producto subestima la lluvia en un 20%.

La subestimación de la lluvia de *TRMM-3B42* en las celdas de la parte alta puede deberse a la corrección del *PR*, la reflectancia alta asociada a la orografía y a las partículas de hielo (>5000 msnm) que se están derritiendo a medida que están precipitando desde lo alto



(llamado banda brillante). El *PR* tiene dificultad para estimar con exactitud las precipitaciones en regiones altas debido a la contaminación de la banda brillante (Chen et al., 2013; Fu y Liu, 2007).

El producto *CMORPH* sobreestima los picos en los meses húmedos, especialmente en febrero y abril, que son los meses más lluviosos en la parte baja de cuenca. A pesar de que este producto sobreestima las precipitaciones observadas, las lluvias estimadas mantienen la dinámica estacional en todo el año. Esto también es reportado por (Habib et al., 2012) en un estudio sobre el río Nilo, mencionan que el producto *CMORPH* sobreestima las lluvias observadas, especialmente en agosto, que es el mes más húmedo en esa región.

El producto *PERSIANN-CDR* subestima la lluvia en la parte alta, y en la parte baja subestima los picos y sobreestima la corta lámina de lluvia en la temporada seca. Stisen & Sandholt (2010) encontraron en los productos *CMORPH* y *PERSIANN* sobre la cuenca del río Senegal sobreestiman considerablemente las precipitaciones. En un estudio sobre África, Serrat-Capdevila et al. (2016) reportaron que los productos *CMORPH* y *PERSIANN* en la zona ecuatorial sobreestiman la lluvia anual entre 30 y 40%, respectivamente.

### **5.3 Análisis de caudales simulados**

En las primeras modelaciones del río Catamayo en la estación Boquerón, los datos eran limitados (Balcázar et al., 2016). Posteriormente se detectaron caudales “sospechosos” en el periodo 2005-2011 de esta estación. Los caudales “sospechosos” se removieron después de realizar las primeras modelaciones y verificar con los caudales en de la estación Vicin, ubicada aguas abajo del río Catamayo. En esta estación, los caudales modelados con la lluvia estimada por *TRMM-3B42* y la combinación [*LAWR* + pluviómetros] dieron resultados satisfactorios con *BIAS* y  $r^2$ .

Los caudales modelados en la estación Guayabal no fueron satisfactorios, los caudales minios y parecen calcularse mejor que los caudales picos. La estación Guayabal no existen registros actuales y parece estar abandonada. Debido a esto, en esta subcuenca se utilizaron únicamente datos meteorológicos observados.

De manera general, los resultados de los modelos utilizados en la cuenca del río Catamayo fueron satisfactorios utilizando los datos meteorológicos observados y estimados por satélite. La eficiencia de los modelos con los criterios utilizados fue satisfactoria en el río Catamayo hasta la estación Vicin, utilizando *TRMM-3B42/ERA-Interim* y

pluviómetros/termómetros. La lluvia observada en la parte alta parece estar mejor representada que en la parte baja, puesto que en el periodo 2006-2011 se utilizaron datos de estaciones climáticas ubicadas en la parte alta, aledañas a la cuenca a ~3000 msnm (Páramo, TS1, Antenas y Cajanuma).

Un *PPES* puede variar su eficacia de un lugar a otro, debido al tipo de lluvia, la cobertura de nubes, la orografía del terreno, entre otros aspectos. Varios estudios recientes reportan la eficiencia de uno u otro algoritmo en diferentes partes del mundo. Stisen y Sandholt (2010) en la cuenca del río Senegal, obtuvieron mejores resultados en la modelación de caudales con *PERSIANN* y *CMORPH* que con *TRMM*. Lavado et al. (2009), en un modelo empleado en la parte alta del río Amazonas, registraron valores de NSE más altos con datos observados que con *TRMM*. Sin embargo, los resultados de los modelos en ambos casos son buenos.

Bâ y Serrat-Capdevila (2012), utilizaron *CMORPH* y *PERSIANN* en la cuenca del río La Sierra en el sur de México, con *PERSIANN* obtuvieron resultados poco satisfactorios y con *CMORPH* satisfactorios. En este estudio se utilizó *PERSIANN-CDR*, que a diferencia de su predecesor, utiliza los datos infrarrojos GridSat-B1 y se ajusta con el producto mensual del *GPCP*. Bâ et al. (en preparación), utilizan el producto *PERSIANN* sobre las cuencas de los ríos Senegal y Nigeria. Observaron que los resultados de las modelaciones mejoran cuando se utiliza la versión *CDR*.

Zubieta et al. (2015), utilizaron *CMORPH*, *PERSIANN* y *TRMM* en la cuenca alta del río Amazonas (Ecuador y Perú) para modelar los escurrimientos diarios en 18 estaciones hidrométricas, obteniendo mejores coeficientes de NSE con *TRMM*, (Estación Santa Rosa = 0.87, Pucallpa y Requena = 0.83).

En la literatura especializada se exponen algunas metodologías para corregir los datos estimados por satélite con datos de campo. En esta investigación se corrigieron los *PPES* mediante *BIAS* utilizando una ecuación presentada por Worqlul et al. (2017). Utilizando esta ecuación los resultados de las modelaciones con *CMORPH-correctado* mejoraron significativamente. Los productos *PERSIANN-CDR* y *TRMM-3B42* que en algunos años se mantuvieron igual reportaron una leve mejoría.

## 6 CONCLUSIONES

En el transcurso de la investigación la hipótesis fue verificada, se modelaron los caudales diarios en una cuenca que recibe aportes continuos de lluvia en la parte alta, mientras que en la parte baja es seca y afectada regularmente por eventos de El Niño y La Niña. Por esta razón, los *PPES-correctos* se obtuvieron por separado para la parte alta y baja de la cuenca. Por otro lado, los objetivos planteados en la investigación se cumplieron a cabalidad. La eficiencia de los modelos varió en las tres subcuencas evaluadas, los mejores resultados se obtuvieron en las estaciones Vicin y Boquerón. La limitación en las modelaciones fue la poca cantidad de registros hidrométricos y los periodos concomitantes con *PPES* y *LAWR*.

Se obtuvieron los parámetros fisiográficos de las subcuencas del río Catamayo. Se utilizaron herramientas *SIG* y lenguajes de programación para procesar los mapas y datos requeridos por el modelo hidrológico *CEQUEAU* (área, latitud media y tiempo de concentración). Se caracterizaron las subcuencas por separado, la pendiente media de las subcuencas varía entre 20% y 40% (moderadamente escarpado - escarpado), esto indica que son cuencas vulnerables a erosionarse. Las tres subcuencas son alargadas, por lo tanto son poco susceptibles a inundaciones. Además, los cauces son bien pronunciados y el riesgo de inundación en el río Catamayo aguas arriba de la estación Vicin es leve.

Los datos meteorológicos utilizados en el modelo *CEQUEAU* provienen de estaciones meteorológicas y *SR*: (i) productos de precipitación y temperatura estimados por los algoritmos de satélite y (ii) radar meteorológico. Las comparaciones de la lluvia de los pluviómetros y los *SR* arrojaron buenos resultados con los productos *TRMM-3B42*, *PERSIANN-CDR*, y *LAWR*. Las correcciones *BIAS* de los *PPES*, mejoraron los coeficientes de determinación, especialmente con *CMORPH-correcto* y *PERSIANN-CDR-correcto*.

Las comparaciones de los termómetros con el producto *ERA-Interim* no fueron satisfactorios. Esto se debe, por un lado, a que existen pocas estaciones con datos de temperatura y los píxeles del producto pueden no estar bien representados espacialmente. Por otro lado, la orografía irregular permite que haya mayor variabilidad de temperatura en cortas distancias. Además, las estaciones meteorológicas, por lo general se encuentran en los valles, por tal razón la temperatura media de la cuenca es  $\sim 2$  °C más alta con los termómetros que con *ERA-Interim*.

La eficiencia de las modelaciones en los periodos de calibración y validación, en las tres subcuencas evaluadas, se midieron con los criterios numéricos: NSE, PBIAS y  $r^2$ . Los rangos de eficiencia se obtuvieron de la literatura especializada. Además, se utilizaron criterios gráficos [hietogramas y gráficos de relación 1:1 (calculados versus observados)] para identificar los mejores ajustes de los caudales calculados y observados.

En la estación Vicin, los caudales calculados fueron satisfactorios utilizando datos de precipitación y temperatura observados y estimados: *CMORPH/ERA-Interim*, *TRMM-3B42/ERA-Interim* y *PERSIANN-CDR/ERA-Interim*. Los modelos mejoraron con los productos de lluvia corregidos con BIAS, especialmente el producto *CMORPH* y *PERSIANN-CDR*. Aunque se pudo observar en algunos años, los valores de los criterios numéricos se mejoraron con *TRMM-correcto*. Si bien, en todos los productos, algunos años los valores de los criterios numéricos no fueron satisfactorios, en otros casos los caudales máximos y mínimos se ajustaron adecuadamente.

Los caudales simulados en la subcuenca Boquerón también resultaron satisfactorios tomando en cuenta los criterios numéricos, especialmente con los datos corregidos de *TRMM-3B42/ERA-Interim* y la combinación de [LAWR + pluviómetros]/termómetros. Además, se observó que los caudales pico se modelan adecuadamente. Se observó que esta estación, en cierto periodo presenta caudales extremos, considerados como “sospechosos”. Los caudales “sospechosos” se compararon con los de una estación ubicada en el mismo río aguas abajo (estación Vicin). Posteriormente se removieron aquellos caudales que fueron mayores a los observados en el mismo día en la estación Vicin.

Las modelaciones en la estación Guayabal fueron poco satisfactorias. Los caudales máximos no se modelan adecuadamente, sin embargo, se observó que los caudales mínimos y medios se ajustan apropiadamente. Tomando en cuenta el  $r^2$ , algunos años se observaron resultados satisfactorios. En esta estación también se observaron caudales sospechosos, sin embargo, no se pudieron comparar y/o remover, con los caudales de otras estaciones, puesto que no son concomitantes.

El modelo *CEQUEAU* permitió detectar errores en los datos pluviométricos e hidrométricos (estación Boquerón y Guayabal). Los valores extremos en las lluvias fueron comparados con las estaciones cercanas y luego revisadas en los hidrogramas del modelo, y análogamente los caudales pico se compararon con las lluvias. Los periodos “sospechosos” se modelaron por separado para observar la relación lluvia-caudal.

En el caso de las lluvias consideradas como “sospechosas” se eliminaron después del análisis estadístico confirmatorio y se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones: (i) que la estación ubicada en una celda fuera de la cuenca y (ii) que en la celda del modelo existiese dos o más estaciones, se removieran todos los datos de la estación. (iii) La estación con datos “sospechosos” ubicada dentro de la cuenca, se removieran únicamente aquellos los valores “sospechosos”.

En la cordillera de los Andes del sur del Ecuador, el aporte continuo de agua (nubes, neblina y lluvia) mantienen húmedos los suelos. El agua de las nubes se condensa en la superficie de las plantas, el viento y la humedad de la Amazonía juegan un rol importante en este fenómeno. El agua que es ingresa de esta manera no se cuantifica por los medidores de lluvia convencionales ni por el radar, sino que se estima con sensores y mallas verticales, que simulan el área de las plantas. Sin embargo, esta agua no se puede ingresar al modelo, y por lo tanto son los parámetros de evaporación que se modifican para compensar el agua de lluvia horizontal que escurre hacia los cauces.

En un ensayo se cerraron los orificios del reservorio acuífero y se observó que son muy sensibles al cambio. Los caudales pico disminuyeron en un 30%. Se desconoce el aporte del acuífero, pero junto con la lluvia en la parte alta de la cuenca, tienen un aporte significativo en el caudal del río Catamayo.

En el transcurso de la investigación se desarrollaron archivos de comandos (*scripts*) desarrollados en lenguaje R con el fin de acelerar el tratamiento de la información. En los Anexo A y B se muestran tres programas para la extracción de información desde los conjuntos de imágenes raster (hipermatrices) y para el arreglo de los datos hidrometeorológicos en archivos de texto requeridos por el modelo *CEQUEAU*.

## 7 RECOMENDACIONES

Los *SIG* y los lenguajes de programación son herramientas útiles en el procesamiento de los datos. En las modelaciones continuas se utiliza una cantidad grande de datos, que están en función del periodo y el paso de tiempo utilizados. Se recomienda el uso de estas herramientas para reducir el tiempo en la extracción de datos. Actualmente existe un sinnúmero de ellas, algunas libres (Lenguaje R) y otras académicas como el Idrisi. El lenguaje R se utilizó en el procesamiento de datos e imágenes tipo raster. La ventaja de usar R es el suficiente soporte desde internet. Se puede usar en plataformas Unix, Linux y Windows. Además, tiene centenares de paquetes que ayudan a reducir las líneas de código que se haría normalmente en otro lenguaje de programación.

El modelo hidrológico *CEQUEAU* es recomendable, ya que una vez que se conoce su estructura y los datos que requiere, su uso es fácil y didáctico. Tiene un esquema dinámico en el cual se puede observar el modelo de producción. Además, tiene los criterios matemáticos y gráficos de manera que se puede ver el avance en la calibración después de cada corrida. En su estructura interna tiene integrado un algoritmo de optimización. El modelo realiza las interpolaciones de lluvia desde puntos (pluviómetros) por el método de la distancia inversa o por polígonos de Thiessen. Además, calcula los coeficientes para la evapotranspiración con los datos mensuales de temperatura.

De manera general se recomienda el uso de datos estimados por *PPES* en estudios hidrológicos, puesto que estos cubren grandes regiones y están disponibles casi en tiempo real. No se puede especificar cuál es mejor que otro, puesto que la eficiencia de los mismos varía según el lugar. En el área de estudio, se recomienda *TRMM-3B42* y *PERSIANN-CDR* los cuales se pueden aplicar en cuencas con similares características a la cuenca Catamayo. Sin embargo si se cuenta con datos observados, se puede corregir los datos de *CMORPH*. O de otra manera utilizar *CMORPH* 8 km, resolución más fina que la utilizada en esta investigación. El uso de *TRMM-RT* (tiempo real) en otros estudios sería un importante apoyo a los sistemas de alerta temprana en la cuenca Catamayo. Sin embargo se debería conocer su aplicación, puesto que la versión *3B42 v7* se calibra con *TCI*, el cual no es utilizado en la versión de tiempo real.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre-Mendoza, Z., Aguirre, N., Ochoa, I., & Merino, B. (2016). Los páramos del Parque Nacional Podocarpus: una aproximación a su diversidad ecosistémica y florística. En N. Aguirre, T. Ojeda-Luna, P. Eguiguren, & Z. Aguirre-Mendoza (Eds.), *Cambio climático y Biodiversidad: Estudio de caso de los páramos del Parque Nacional Podocarpus, Ecuador* (p. 272). Loja, Ecuador: Programa Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos.
- Arias-Hidalgo, A., Bhattacharya, B., Mynett, A. E., & van Griensven, A. (2013). Experiences in using the TMPA-3B42R satellite data to complement rain gauge measurements in the Ecuadorian coastal foothills. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2905-2915. <http://doi.org/10.5194/hess-17-2905-2013>
- Askew, A. (1989). Real-time intercomparison of hydrological models. *New Directions for Surface Water Modeling*, (181), 125-132.
- Bâ, K. M. (2007). Ceq4Data Program. Toluca, México.
- Bâ, K. M., Díaz-Delgado, C., Quentin, E., Guerra-Cobián, V. H., Ojeda-Chihuahua, J. I., Alin-Andrei, C., & Franco-Plata, R. (2013). Modelado hidrológico de grandes cuencas : caso de estudio del río Senegal, África Occidental. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(2), 129-136.
- Bâ, K. M., & Serrat-Capdevila, A. (2012). Modelación hidrológica con precipitación estimada por imágenes satelitales: El caso del río La Sierra (México). En E. González Sosa, C. Díaz-Delgado, V. H. Guerra-Cobián, A. A. Gutiérrez López, & N. M. Ramos Salinas (Eds.), *La Importancia de las Inundaciones en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México* (pp. 261-287). Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Balcázar, L., Bâ, K. M., Gaona, G., & Magaña-Hernández, F. (2016). Modelación lluvia–escurrimiento utilizando un modelo distribuido en una cuenca de los Andes del sur de Ecuador. En *IV Congreso Nacional de Manejo de Cuencas* (pp. 80-90). Veracruz, México. Recuperado a partir de [www.iv-congreso-cuencas.org](http://www.iv-congreso-cuencas.org)
- Behrangi, A., Andreadis, K., Fisher, J. B., Joseph Turk, F., Granger, S., Painter, T., & Das, N. (2014). Satellite-based precipitation estimation and its application for streamflow prediction over mountainous western U.S. basins. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(12), 2823-2842. <http://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0056.1>
- Bendix, J., & Beck, E. (2016). Environmental change and its impacts in a biodiversity hotspot of the south Ecuadorian Andes – monitoring and mitigation strategies. *Erdkunde*, 70(1), 1-4. <http://doi.org/10.3112/erdkunde.2016.01.01>
- Bonell, M. (1998). Possible impacts of climate variability and change on tropical forest hydrology. *Climatic Change*, 39(2), 215-272. <http://doi.org/10.1023/A:1005343820004>
- Brehm, G., Homeier, J., Fiedler, K., Kottke, I., Illig, J., Nöske, N. M., ... Breckle, S.-W. (2008). Mountain Rain Forests in Southern Ecuador as a Hotspot of Biodiversity - Limited Knowledge and Diverging Patterns. En E. Beck, J. Bendix, I. Kottke, F. Makeschin, & R. Mosandl (Eds.), *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of*

*Ecuador* (pp. 15-23).

- Bruijnzeel, L. A., Mulligan, M., & Scatena, F. N. (2011). Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns †. *Hydrological Processes*, 25, 465-498. <http://doi.org/10.1002/hyp.7974>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Castro, L. M., & Carvajal, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 15-25.
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350-355. <http://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Chen, S., Hong, Y., Cao, Q., Gourley, J. J., Kirstetter, P., Yong, B., ... Hardy, J. (2013). Similarity and difference of the two successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis performance over China. *Journal of Geophysical Research*, 118, 13060-13074. <http://doi.org/10.1002/2013JD019964>
- Climántica. (s. f.). Recuperado a partir de <http://es.contenidos.climantica.org/>
- Contributors, W. C. (2017). Electromagnetic spectrum-es.svg.
- Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Vaché, K. B., Frede, H., & Breuer, L. (2011). Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote montane cloud forest basin using Mixing Model Analysis and Mean Transit Time. *Hydrological Processes*, 14. <http://doi.org/10.1002/hyp>
- Crespo, P., Coello, C., Iñiguez, V., Cisneros, F., Cisneros, P., Ramírez, M., & Feyen, J. (2008). Evaluación de SWAT2000 como herramienta para el análisis de escenarios de cambio de uso del suelo en microcuencas de montaña del sur del Ecuador. En *XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo* (pp. 29-31). Quito, Ecuador.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Royal Meteorological Society*, 137, 553-597. <http://doi.org/10.1002/qj.828>
- Demaría, E., & Serrat-Capdevila, A. (2016). Validation of Remote Sensing-Estimated Hydrometeorological Variables. En L. García, M. Rodríguez, M. Wijnen, & I. Pakulski (Eds.), *Earth Observation for Water Resources Management* (pp. 167-192). Washington. <http://doi.org/10.1596/978-1-4648-0475-5>
- Díaz-Delgado, C., Bâ, K. M., & Trujillo, E. (1999). Las funciones Beta-Jacobi y Gamma-Laguerre como métodos de análisis de valores hidrológicos extremos. Caso de precipitaciones máximas anuales. *Ingeniería hidráulica en México*, XIV(2), 39-48.
- Díaz-Mercado, V. (2010). *Diseño geomático del modelo hidrológico CEQUEAU para cuencas no controladas*. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Díaz-Mercado, V., Bâ, K. M., Quentin, E., Ortiz Madrid, F. H., & Gama, L. (2015). Hydrological Model to Simulate Daily Flow in a Basin with the Help of a GIS. *Open*



- Journal of Modern Hydrology*, 5, 58-67. <http://doi.org/10.4236/ojmh.2015.53006>
- Eastman, R. (2012). *Idrisi Selva, Guia SIG y Procesamiento de Imágenes* (No. Version 17). Worcester, USA.
- Eastman, R. (2016). *TerrSet Manual*. Worcester, USA: clarklabs@clarku.edu.
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Valarezo, C., Zech, W., & Knoblich, K. (2006). Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador : experimental and modelling approach. *Hydrological Processes*, 20, 2491-2507. <http://doi.org/10.1002/hyp>
- Franco-Plata, R. (2008). *Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos*. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Bayer, F., Gonzalez, V., Oñate-Valivieso, F., Peters, T., & Bendix, J. (2014). Catchment precipitation processes in the San Francisco valley in southern Ecuador: combined approach using high-resolution radar images and in situ observations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1(26), 13-29. <http://doi.org/10.1007/s00703-014-0335-3>
- Fu, Y., & Liu, G. (2007). Possible Misidentification of Rain Type by TRMM PR over Tibetan Plateau. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 667-672. <http://doi.org/10.1175/JAM2484.1>
- Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. (2016). TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V7. Recuperado 8 de octubre de 2016, a partir de [https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/TRMM\\_3B42\\_Daily\\_7.html](https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/TRMM_3B42_Daily_7.html)
- Gonzalez-Leiva, F., Valdés-pineda, R., Valdes, J. B., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2016). Assessing the Performance of Two Hydrologic Models for Forecasting Daily Streamflows in the Cazonas River Basin (Mexico). *Open Journal of Modern Hydrology*, 6, 168-181. <http://doi.org/10.4236/ojmh.2016.63014>
- Guerra-Cobián, V. H. (2007). *Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU*. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Guerra-Cobián, V. H., Bâ, M. . K., Díaz-Delgado, C., & Quentin, E. (2013). Efecto de la discretización espacial sobre las simulaciones de caudal con el modelo distribuido CEQUEAU. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(5), 33-53.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- GWP. (2009). *Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas. Global Water Paternship and International Network of Basin Organizations, INBO*. Liberté, Francaise, Francia: Ministerio de Relaciones Exteriores de Francia. Recuperado a partir de [www.gwpforum.org](http://www.gwpforum.org)
- Habib, E., Elsaadani, M., & Haile, A. T. (2012). Climatology-Focused evaluation of

- CMORPH and TMPA satellite rainfall products over the Nile Basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(12), 2105-2121. <http://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0252.1>
- Hay, L. E., & Clark, M. P. (2003). Use of Statistically and Dynamically Downscaled Atmospheric Model Output for Hydrologic Simulations in Three Mountainous ... model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States. *Journal of Hydrology*, 282, 56-75. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00252-X](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00252-X)
- Hernandez, A., Graeme, K., & Uppala, S. (2004). *The TOVS/ATOVS observing system in ERA-40. ECMWF ERA-40 Project Report Series*. Shinfield, Reading, England. Recuperado a partir de <http://www.ecmwf.int/publications/>
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (Eds.). (2003). *Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/Ecociencia*. Quito, Ecuador.
- Huffman, G. J. (2015). README for Accessing Experimental Real-Time TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA-RT) Data Sets. NASA Goddard Space Flight Center, Mesoscale Atmospheric Processes Laboratory.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2010). Satellite rainfall applications for surface hydrology. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, 1-327. <http://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7>
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (1996). R: A Language for Data Analysis and Graphics. *Journal of Computational and Graphical Statics*, 5(3), 299-314.
- INAMHI. (2006). *Climas del Ecuador*. Quito, Ecu.: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Recuperado a partir de <http://186.42.174.231/gisweb/METEOROLOGIA>
- INERHI-PREDESUR-CONADE. (1994). *Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Loja*. Washington D.C. Recuperado a partir de <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea02s/begin.htm>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Recuperado 13 de enero de 2016, a partir de <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Jatho, N., Pluntke, T., Kurbjuhn, C., & Bernhofer, C. (2010). An approach to combine radar and gauge based rainfall data under consideration of their qualities in low mountain ranges of Saxony. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 429-446.
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 487-503.
- Kapetsky, J. M., & Aguilar-Manjarrez, J. (2009). *Sistemas de información geográfica, sensores remotos y mapeo para el desarrollo y la gestión de la acuicultura marina. FAO, Documento Tecnico de Pesca Nro. 458*. Roma, Italia. Recuperado a partir de <http://agris.fao.org/agris-search>
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the

- San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75, 325-336. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- Kuhnert, P., & Venables, W. N. (2005). An Introduction to R: Software for Statistical Modelling & Computing. *Information Sciences*, 1-364. Recuperado a partir de [papers2://publication/uuid/7F00565B-BCD6-47F7-8FE5-A407ED9B998C](https://publication/uuid/7F00565B-BCD6-47F7-8FE5-A407ED9B998C)
- Lauer, W. (1981). Ecoclimatological Conditions of the Paramo Belt in the Tropical High Mountains. *Mountain Research and Development*, 1(3-4), 209-221. <http://doi.org/10.2307/3673058>
- Laury, H., Räsänen, T. A., & Kummu, M. (2014). Using Reanalysis and Remotely Sensed Temperature and Precipitation Data for Hydrological Modeling in Monsoon Climate : Mekong River Case Study. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 1532-1545. <http://doi.org/10.1175/JHM-D-13-084.1>
- Lavado, W., Labat, D., Loup Guyot, J., Ronchail, J., & Ordóñez, J. J. (2009). TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon-Andes basin and its assimilation into a monthly water water balance model. En *Proc. of Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention* (pp. 245-252). Hyderabad, India: IAHS Publ.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología General*. Bilbao, España: Servicio editorial de la Universidad del País Vasco.
- Llanos, H., & Bâ, K. (2011). Simulación de caudales de los ríos Nervión e Ibaizabal. País Vasco. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 1(27), 13-23.
- Lozano, P. . (2002). Los tipos de bosque en el sur del Ecuador. En Z. Aguirre M., J. E. Madsen, E. Cotton, & H. Balslev (Eds.), *Los tipos de bosque en el sur de Ecuador* (Abya Yala, pp. 29-50). Quito, Ecu.: Botánica Autoecuatoriana.
- MAE, & MAGAP. (2013). *Procolo metodológico para a elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental 2013-2014, escala 1:100.000*.
- Magaña-Hernández, F., Bâ, K. M., & Guerra-cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 47, 739-752.
- Magaña Hernández, F., Bâ, K., & Guerra Cobián, V. (2014). Estimación de caudales máximos utilizando precipitación estimada por percepción remota. En *XXIII Congreso Nacional de Hidrología* (p. 4). Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Mantas, V. M., Liu, Z., Caro, C., & Pereira, A. J. S. C. (2015). Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis ( TMPA ) products in the Peruvian Andes. *Atmospheric Research*, 163, 132-145. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.012>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58(6), 1763-1785. <http://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

- Morin, G. (2009). *CEQUEAU hydrological model*. Québec, Canada.
- Morin, G., & Paquet, P. (2007). *Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE*.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology*, *10*, 282-290.
- Nielsen, J. E., Jensen, N. E., & Rasmussen, M. R. (2013). Calibrating LAWR weather radar using laser disdrometers. *Atmospheric Research*, *122*, 165-173. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.017>
- OMM-N°100. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*.
- Oñate-Valdivieso, F. (2009). *Modelamiento semidistribuido, con información escasa, de una cuenca hidrográfica para su planificación territorial*. Tesis de Doctorado. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Madrid, España.
- Oñate Valdivieso, F., & Aguilar Naranjo, G. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. En *III Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas* (p. 11). Arequipa, Perú. Recuperado a partir de <http://sig.utpl.edu.ec/sigutpl>
- Paduan, J. D., Kim, K. C., Cook, M. S., & Chavez, F. P. (2006). Calibration and Validation of Direction-Finding Current Observations. *IEEE Journal of Ocean Engineering*, *31*(4), 862-875.
- Peters, T., Drobnik, T., Meyer, H., Rankl, M., Richter, M., & Thies, B. (2013). Environmental Changes Affecting the Andes of Ecuador. En J. Bendix, W. Wilcke, A. Bräuning, S. Scheu, & R. Mosandl (Eds.), *Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador* (p. 221). Marburg, Germany: Ecological Studies 221,. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-38137-9>
- Piani, C., Harter, J. O., & Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in Regional Climate Models over Europe. *Theoretical and Appl Climatol*, *99*, 187-192. <http://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9>
- Plesca, I., Timbe, E., Exbrayat, J.-F., Windhorst, D., Kraft, P., Crespo, P., ... Breuer, L. (2012). Model intercomparison to explore catchment functioning: Results from a remote montane tropical rainforest. *Ecological Modelling*, *239*(1), 3-13. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.005>
- Pourrut, P. (Ed.). (1995). *El agua en el Ecuador: clima, precipitaciones, escorrentia* (7.<sup>a</sup> ed.). Quito, Ecuador: Institut francais de recherche scientifique pour le developpement en Coopéaion, Corporación Editora Nacional, Colegio de Geógrafos de Ecuador.
- Powell, M. J. (1964). An efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives. *ComputerJournal*, *7*(1), 155-162.
- Quentin, E., Díaz-Delgado, C., Gómez-Albores, M. A., Manzano-Solís, L. R., & Franco-Plata, R. (2007). Desarrollo geomático para la gestión integrada del agua. En *XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (XI CONFIBSIG)* (p. 21). Buenos Aires, Argentina: Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG).

- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado a partir de <https://www.r-project.org>
- Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198(1-4), 69-97. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03329-X](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03329-X)
- Richter, M., Beck, E., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2016). The Study Area. En *Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador* (pp. 1-16). <http://doi.org/10.1007/978-3-642-38137-9>
- RIDRENSUR. (2016). Canal de Riego Zapotillo. Loja, Ecu: Gobierno Provincial de Loja.
- Rollenbeck, R. (2006). Variability of precipitation in the Reserva Biológica San Francisco / Southern Ecuador. *Lyonia*, 9(1), 43-51.
- Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2006). Experimental calibration of a cost-effective X-band weather radar for climate ecological studies in southern Ecuador. *Atmospheric Research*, 79(3-4), 296-316. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.06.005>
- Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2011). Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research*, 99(2), 277-289. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.018>
- Rollenbeck, R., Bendix, J., & Fabian, P. (2011). Spatial and temporal dynamics of atmospheric water-and nutrient inputs in tropical mountain forests of southern Ecuador. En L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena, & L. S. Hamilton (Eds.), *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management* (pp. 367-377). Hawaii: University of Hawaii. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511778384.041>
- Rosengaus M., M. (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda de dos partes). *Ingeniería Hidráulica en México*, X(2), 59-78.
- Rosengaus M., M. (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos (primera de dos partes). *Ingeniería Hidráulica en México*, X(1), 55-74.
- Serrat-Capdevila, A., Merino, M., Valdes, J. B., & Durcik, M. (2016). Evaluation of the Performance of Three Satellite Precipitation Products over Africa. *Remote Sensing*, 8(10). <http://doi.org/10.3390/rs8100836>
- Simpson, J., Adler, R. F., & North, G. R. (1988). A Proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 69(3), 278-295. [http://doi.org/10.1175/1520-0477\(1988\)069](http://doi.org/10.1175/1520-0477(1988)069)
- Sinclair, S., & Pegram, G. (2005). Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, 6, 19-22. <http://doi.org/10.1002/asl.85>
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(7), 270-292.
- Sorooshian, S., Hsu, K. L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2035-2046.

[http://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)](http://doi.org/10.1175/1520-0477(2000))

- Stisen, S., Jensen, K. H., Sandholt, I., & Grimes, D. I. F. (2008). A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. *Journal of Hydrology*, 354(1-4), 131-148. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.006>
- Stisen, S., & Sandholt, I. (2010). Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modelling. *Hydrological Processes*, 24(7), 879-891. <http://doi.org/10.1002/hyp.7529>
- Stuebe, M. M., & Johnston, D. M. (1990). Runoff volume estimation using GIS techniques. *Water Research Bulletin*, 26(4), 611-620.
- Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C., & De la Cruz, M. (2015). Deforestation and Forest Fragmentation in South Ecuador since the 1970s – Losing a Hotspot of Biodiversity. *PLoS ONE*, 10(9), 1-18. <http://doi.org/10.5061/dryad.32451>
- Thorndahl, S., & Rasmussen, M. R. (2012). Marine X-band weather radar data calibration. *Atmospheric Research*, 103, 33-44. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.023>
- Valdés-Pineda, R., Demaría, E. M. C., Valdés, J. B., Wi, S., & Serrat-Capdevila, A. (2016). Bias correction of daily satellite-based rainfall estimates for hydrologic forecasting in the Upper Zambezi, Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 1:28. <http://doi.org/10.5194/hess-2016-473>
- Vázquez, R. F. (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *Maskana*, 1(1), 79-90.
- Venables, W. N., & Smith, D. M. (2016). *An Introduction to R* (Vol. 3.3.2).
- Vilchis-mata, I., M Bâ, K., Franco Plata, R., & Díaz-Delgado, C. (2015). Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(4), 45-60.
- Vilchis-Mata, I., Quentin, E., Bâ, K. M., & Díaz-Delgado, C. (2011). Estimación de precipitación diaria a través de un SIG con imágenes de radar meteorológico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(4), 167-174.
- Wickham, H., & Chang, W. (2016). Package ggplot2: An Implementation of the Grammar of Graphics.
- Worqlul, A. W., Ayana, E. K., Maathuis, B. H. P., MacAlister, C., Philpot, W. D., Leyton Osorio, J. M., & Tammo, S. S. (2017). Performance of bias corrected MPEG rainfall estimate for rainfall-runoff simulation in the Upper Blue Nile Basin. *Journal of Hydrology*. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.058>
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., & Lavado, W. (2015). Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall – runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *Journal of Hydrology*, 528, 599-612. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.064>
- Zulkafli, Z., Wouter, B., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., & Jean-Loup, G. (2014). A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 ( TMPA ) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean – Amazon River Basins. *Journal of Hydrology*, 15, 581-592. <http://doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>

# **ANEXOS**

## **Anexo A. Implementación informática**

Los programas de los 0 y 0 son una versión mejorada del programa Ceq4Data (Bâ, 2007), que hace el arreglo de los archivos hidrometeorológicos que requiere el modelo hidrológico *CEQUEAU*. El Ceq4data v1, ha sido programado en FORTRAN y la nueva versión en lenguaje R.

La nueva versión no necesita que los datos tengan 365 valores, o que en su reemplazo tenga por defecto, los números faltantes -99 y -1, para temperatura y precipitación, respectivamente. Los valores faltantes en la versión de R pueden contener NA, NaN, vacíos u otro carácter distinto a un número.

Por otro lado, el archivo con la base de datos, puede tener formato \*.csv, \*.txt o sin extensión. Tan solo con cambiar el formato en el programa, se puede leer los datos desde cualquier otro formato.

### **Arreglo de datos meteorológicos en formato *CEQUEAU***

Siguiendo con la misma lógica del Ceq4data v1, la nueva versión requiere que los datos meteorológicos tengan los datos en columnas de la siguiente manera: día, mes, año, precipitación, temperatura máxima y mínima. El modelo *CEQUEAU* requiere la precipitación media. Cuando el usuario ingresa las temperaturas máximas y mínimas, obtiene el promedio, por lo tanto, si se tiene la temperatura media, esta se debe repetir en las dos últimas columnas, para que el modelo no obtenga errores.

Para cada estación se obtiene un archivo meteorológico con extensión MET.

En la Figura 8-1 se muestra el diagrama de flujo para obtener los archivos MET, seguidos del programa en lenguaje R.

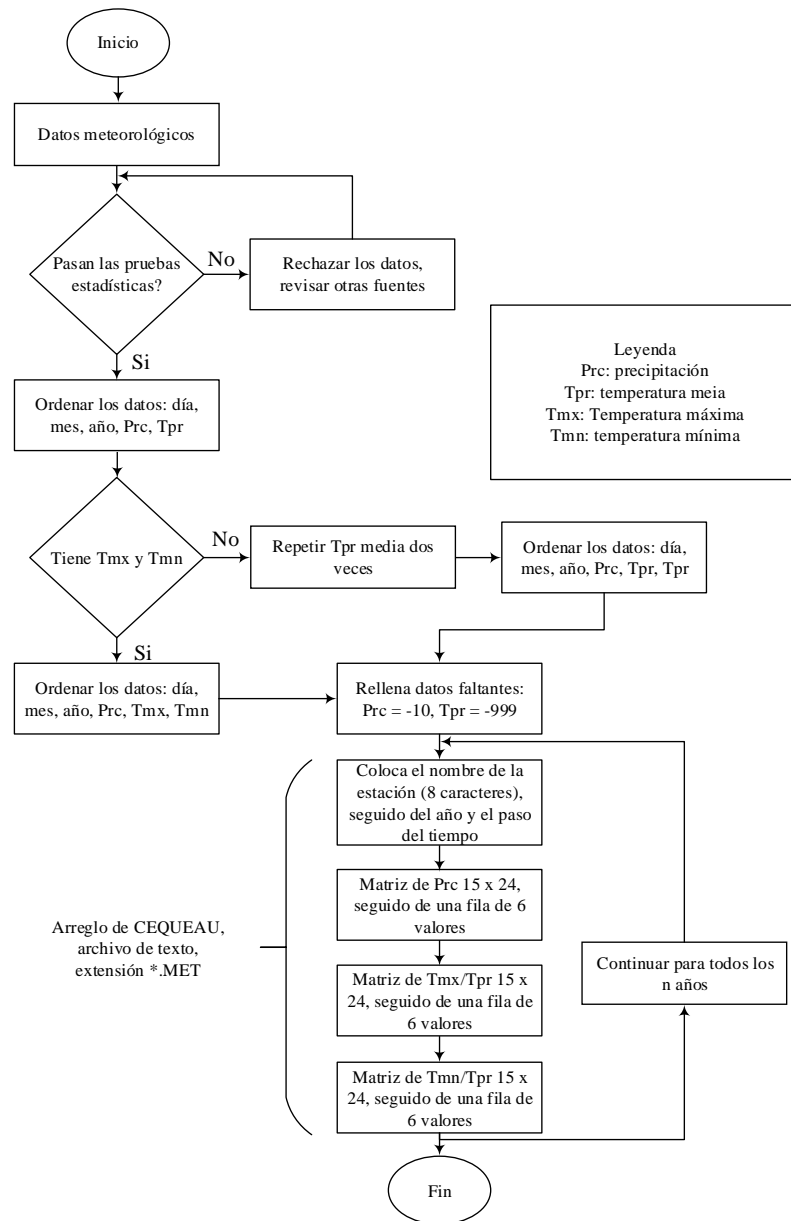
Los paquetes del lenguaje R utilizados en este trabajo son: base, magrittr, tidyr, dplyr, ggplot2, reshape2, lubridate, raster, stats, rgdal, grid, gridExtra y scales. Además, por su flexibilidad se utilizó el editor Rstudio, que tiene una interfaz gráfica más amigable y permite crear varios proyectos en una sola sesión.

Los metadatos del programa para obtener los archivos se listan en la Tabla 8-1.



**Tabla 8-1. Metadatos del programa.**

Metadato	Descripción
Versión	1
Nombre del programa	Ceq4Met
Lenguaje	R
Interfaz gráfica	No
Propósito	Archivos meteorológicos y caudales para el modelo <i>CEQUEAU</i>
Nombre	Luis Balcázar
Contacto	<a href="mailto:lebalcazar@gmail.com">lebalcazar@gmail.com</a>
Institución	Centro Interamericano de Recursos del Agua
Diagrama de flujo	Figura 8-1



**Figura 8-1. Diagrama de flujo para obtener un archivo meteorológico para el modelo CEQUEAU.**

```

1  #####
2  ## Precipitación y temperatura #####
3  ## Arreglo para datos METEO de Cequeau #####
4  ## No necesita tener datos completos #####
5  ## Puede leer datos faltantes (vacío), o -> #####
6  ## cualquier valor menor a 0 -> -> #####
7  ## entrada año,mes,día,Prc,Tmx,Tmn -> #####
8  ## Luis Balcázar, Junio de 2016 -> #####
9  ## CIRA -> #####
10 #####
11 ##### Inicio #####
12 # Ubicación de la ruta de los archivos
13 setwd("D:/Ubicación/de los/archivos/CSV")
14 # Requiere de las siguientes librerías:
15 library(lubridate)
16 library(dplyr)
17 library(gdata)
18 # Lectura de datos
19 # Ingersar el nombre del archivo con extensión *.csv formato: día, mes, año, Prc, Tmx, Tmn
20 data <- read.csv("Estacion.csv", header = F) #####
21 outputName <- "Estacion.met" #####
22 EstName <- "Estacion" #####
23 nc <- 24
24 posMH <- 1
25 cf <- 0
26 # Relleno de datos
27 fechas <- data.frame(datetime = seq(ISOdate(min(data$V3), -1, 1, 0),
28 ..... ISOdate(max(data$V3), -12, 31, 0),
29 ..... by = "day"))
30 data <- mutate(data, datetime = ISOdate(V3, V2, V1, 0))
31 data <- left_join(fechas, data, by = "datetime")
32 data <- data %>% mutate(
33   .. day = day(datetime),
34   .. month = month(datetime),
35   .. year = year(datetime),
36   .. tamax = ifelse(is.na(V5), -990, round(V5 * 10)),
37   .. tamin = ifelse(is.na(V6), -990, round(V6 * 10)),
38   .. pcpac = ifelse(is.na(V4), -10, round(V4 * 10))
39 ) %>%
40 .. select(day, month, year, tamax, tamin, pcpac)
41 # Construcción de matriz y escritura
42 for (year in unique(data$year)) {
43   .. mtx <- NULL
44   .. if (nrow(data[data$year == year, ]) == 365) {
45     ..... dtmp <- rbind(data[data$year == year, ] [1:59, ],
46     ..... c(29, 2, year, -990, -990, -10),
47     ..... data[data$year == year, ] [60:365, ])
48   } else {
49     ..... dtmp <- data[data$year == year, ]
50   }
51   .. for (var in 4:6) {
52     ..... tmp <- matrix(c(dtmp[, var], rep(NA, 384 - nrow(dtmp))),
53     ..... nrow = 16,
54     ..... ncol = 24,
55     ..... byrow = T)
56     ..... mtx <- rbind(mtx, tmp)
57   }
58   .. conn <- file(outputName, open = "a")
59   .. writeLines(paste(
60     ..... sprintf("%10s", EstName),
61     ..... sprintf("%5d", year),
62     ..... sprintf("%5d", nc),
63     ..... sprintf("%5d", posMH),
64     ..... sprintf("%5d", cf),
65     ..... sep = '\n',
66     ..... collapse = ''
67   ),
68   .. conn)
69   .. for (row in 1:nrow(mtx)) {
70     ..... writeLines(paste(sprintf("%5d", mtx[row, ][!is.na(mtx[row, ])]),
71     ..... collapse = ""), conn)
72   }
73   .. close(conn)
74 }
75 rm("tmp", "dtmp", "year", "var", "row")
76 ##### Fin #####

```

### Programa para arreglar los datos de caudales en formato *CEQUEAU*

El programa para los archivos de caudal tiene extensión CAU, y tiene la misma lógica. A diferencia de los MET, los CAU tiene un arreglo diferente. Sin embargo los archivos de entrada deben tener las mismas columnas: día, mes, año, caudal.

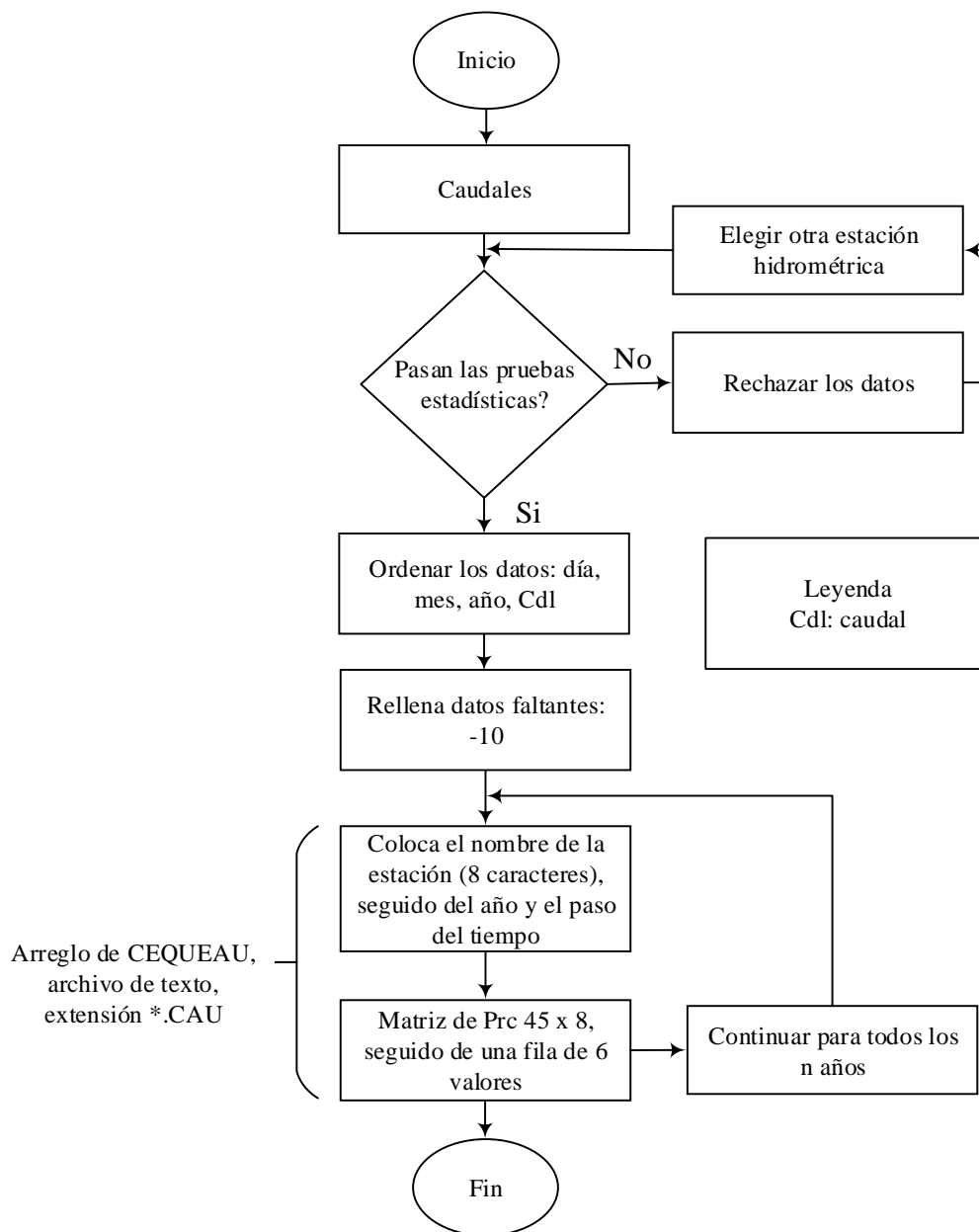


Figura 8-2. Diagrama de flujo para obtener un archivo de caudal para el modelo *CEQUEAU*.

```

1  ##=====
2  ## Caudales ----->----->----->
3  ## Arreglo para datos CAU de Cequeau ----->----->
4  ## No necesita tener datos completos ----->----->
5  ## Puede leer datos faltantes (vacío), no ----->----->
6  ## cualquier valor menor a 0 ----->----->
7  ## Luis Balcázar, Junio de 2016 ----->----->
8  ## CIRA ----->----->
9  ##=====
10 ##### Inicio #####
11 # Requiere de las siguientes librerías:
12 library(lubridate)
13 library(dplyr)
14 library(gdata)
15 #Lectura de datos
16 # Ingresar el nombre del archivo con extensión *.csv formato: día, mes, año, caudal
17 data <- read.csv("Guayabal.csv", header = F)
18 #Salida de datos
19 outputName <- "GUAYABAL.cau"
20 EstName <- "GUAYABAL"
21 # Paso del tiempo en horas
22 nc <- 24
23 posMH <- 1
24 #Relleno de datos
25 fechas <- data.frame(fechaTiempo = seq(ISOdate(min(data$anio), 1, 1, 0),
26 ..... ISOdate(max(data$anio), 12, 31, 0), #anio max: mes, dia, hora
27 ..... by = "day"))
28 data <- mutate(data, fechaTiempo = ISOdate(V3, V2, V1, 0))
29 data <- left_join(fechas, data, by = "fechaTiempo")
30 data <- data %>% mutate(
31 ..... dia = day(fechaTiempo),
32 ..... mes = month(fechaTiempo),
33 ..... anio = year(fechaTiempo),
34 ..... Q = ifelse(is.na(V4), -1, V4)
35 ..... ) %>%
36 ..... select(dia, mes, anio, Qd1)
37 # Construcción de matriz y escritura
38 for (anio in unique(data$anio)) {
39 ..... mtx <- NULL
40 ..... if (nrow(data[data$anio == anio, ]) == 365) {
41 ..... dtmp <- rbind(data[data$anio == anio, ][1:59, ],
42 ..... ..... c(29, 2, anio, -1),
43 ..... ..... data[data$anio == anio, ][60:365, ])
44 ..... } else{
45 ..... dtmp <- data[data$anio == anio, ]
46 ..... }
47 ..... for (var in 4){
48 ..... tmp <- matrix(c(dtmp[, var], rep(NA, 368 - nrow(dtmp))),
49 ..... ..... nrow = 46,
50 ..... ..... ncol = 8,
51 ..... ..... byrow = T)
52 ..... mtx <- rbind(mtx, tmp)
53 ..... }
54 ..... ArchivoSalida <- file(outputName, open = "a")
55 ..... writeLines(paste(
56 ..... ..... sprintf("%10s", EstName),
57 ..... ..... sprintf("%5d", anio),
58 ..... ..... sprintf("%5d", nc),
59 ..... ..... sprintf("%5d", posMH),
60 ..... ..... # sprintf("%5d", cf),
61 ..... ..... sep = ' ',
62 ..... ..... collapse = ' '),
63 ..... ArchivoSalida)
64 ..... for (row in 1:nrow(mtx)) {
65 ..... writeLines(paste(sprintf("%10.3f", mtx[row, ][!is.na(mtx[row, ])]),
66 ..... ..... collapse = ""), ArchivoSalida)
67 ..... }
68 ..... close(ArchivoSalida)
69 ..... }
70 rm("tmp", "dtmp", "anio", "var", "row")
71 ##### Fin #####

```

## Anexo B. Extracción de datos de un raster

```
1 #####
2 # SPP 0.125° x 0.125°, 1 día .....
3 # Nombre: Luis Balcázar .....
4 # Centro Interamericano de Recursos del Agua - CIRA .....
5 #####
6 library(raster)
7 library(lubridate)
8 library(rgdal)
9 library(dplyr)
10 library(tidyr)
11 library(grid) .....
12 ##### INICIO #####
13 wd <- setwd("D:/ubicacion/imagenes")
14 lf <- list.files(path = wd, pattern = ".rst$", full.names = T)
15 stk <- raster::stack(lf)
16 # Ubc coordenadas, X, Y, ...
17 coord <- read.table("Coordenadas",
18 ..... header = T,
19 ..... sep = ",",
20 ..... dec = ".")
21 coordenadas <- coord %>% filter(Cond == "si") %>%
22 ..... select(1:3)
23 ..... rm(coord)
24 # Extrae las celdas XiYi
25 valoresTrmm <- raster::extract(stk, coordenadas[, c(1:2)])
26 valoresTrmm2 <- cbind(coordenadas, valoresTrmm)
27 # Arrlega los datos extraidos
28 datosT <- valoresTrmm2 %>%
29 ..... gather(fecha, Prc, 4:ncol(valoresTrmm2)) %>%
30 ..... mutate(PrcTrmm = round(Prc, 2), date = as_date(as.POSIXct(fecha, format = "TrmDia%Y%md"))) %>%
31 ..... dplyr::select(Nom, date, PrcTrmm)
32 # Crear un vector de fechas por día: longitud especificado por usuario
33 date <- data.frame(date = as.Date(seq(ISOdate(YYYY,MM,DD,0),
34 ..... ISOdate(YYYY,MM,DD,0),
35 ..... by = "day")))
36 # Rellena los datos faltantes
37 Tmp <- datosT %>% spread(key=Nom, value=PrcTrmm) %>%
38 ..... right_join(date, by="date")
39 TmpTRMM <- Tmp %>% tidyr::gather(Nom, PRC, 2:ncol(Tmp)) %>%
40 ..... dplyr::mutate(SPP = "TRMM")
41 # Exportar los datos .csv con el sufijo trmm
42 # Extension y sufijo modificado por el usuario
43 OutputPath = ""
44 for(i in (TmpTRMM $Nom)){
45 ..... write.csv(x = TmpTRMM [TmpTRMM$Nom == i,],
46 ..... file = paste0(OutputPath, i, "trm", ".csv"),
47 ..... col.names = F,
48 ..... row.names = F)
49 }
50 ##### FIN #####
```

Anexo C. Mapas de datos observado y estimados

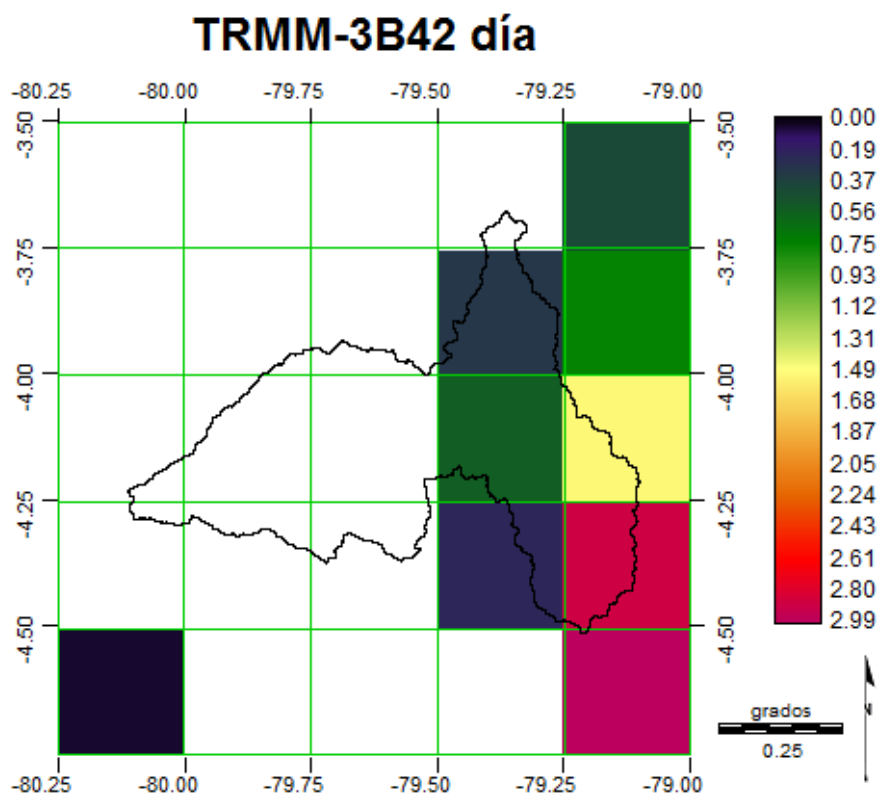


Figura 8-3. PPES TRMM-3B42 ( $\text{mm día}^{-1}$ ) del 08-01-2005, sobrepuesto las celdas del modelo a  $0.25^\circ$  y la cuenca Catamayo.

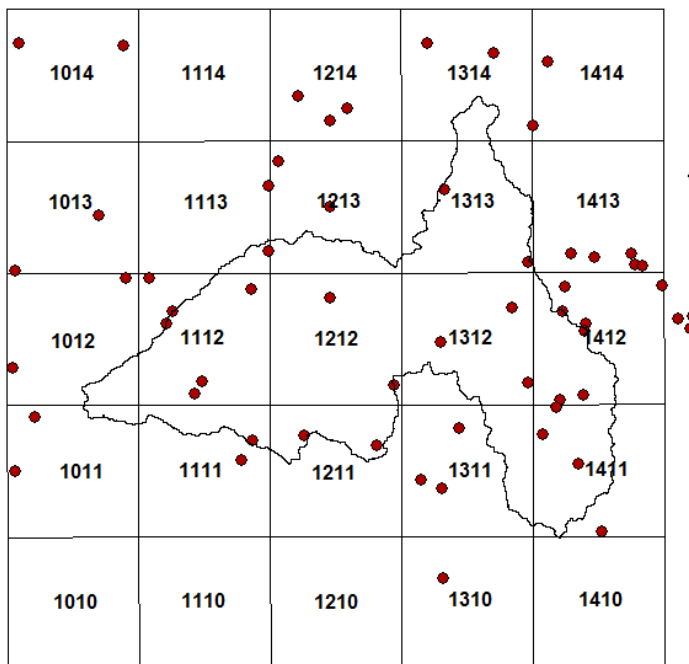


Figura 8-4. Pluviómetros utilizados en las modelaciones, discretización del área a  $0.25^\circ$ .

**Anexo D. Correlaciones de los PPES y datos observados.**

En las Figuras 8-5 a 8.7 se muestran los valores de  $r^2$  de *PPES* ~ pluviómetros y *PPES-correcto* ~ pluviómetros. Se separa con una barra vertical, a la izquierda los  $r^2$  con los *PPES-originales* y a la derecha con los *PPES-correctos*.

0.61   0.62	-	0.59   0.78	0.42   0.61	0.40   0.41
0.76   0.93	0.66   0.74	0.15   0.27	0.54   0.62	0.01   0.05
0.86   0.90	0.69   0.78	0.63   0.77	0.65   0.68	0.37   0.39
0.76   0.78	0.77   0.87	0.70   0.77	0.54   0.59	0.54   0.58
-	-	-	0.56   0.66	-

**Figura 8-5. Correlación CMORPH y CMORPH-correcto versus pluviómetros.**

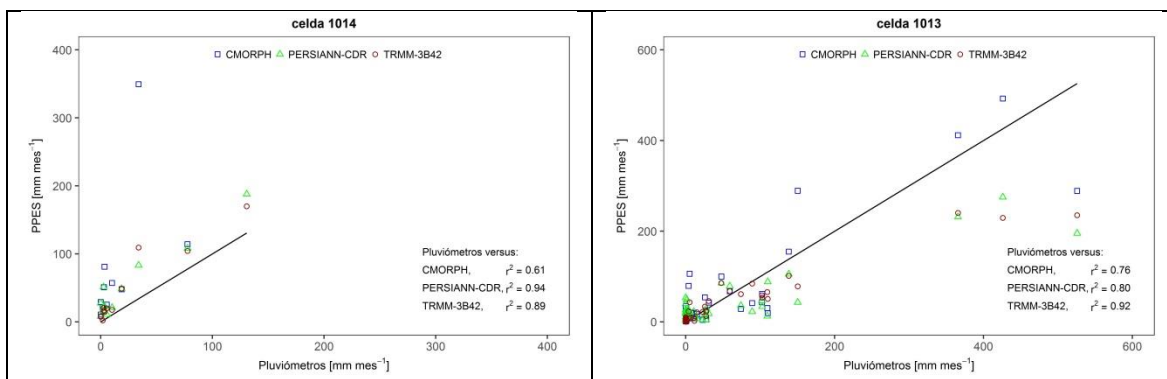
0.94   0.94	-	0.56   0.71	0.33   0.44	0.41   0.41
0.80   0.88	0.42   0.52	0.35   0.48	0.46   0.54	0.05   0.05
0.75   0.88	0.67   0.75	0.69   0.69	0.49   0.54	0.42   0.42
0.82   0.84	0.78   0.87	0.64   0.72	0.49   0.59	0.57   0.60
-	-	-	0.58   0.69	-

**Figura 8-6. Correlación PERSIANN-CDR y PERSIANN-CDR-correcto versus pluviómetros.**

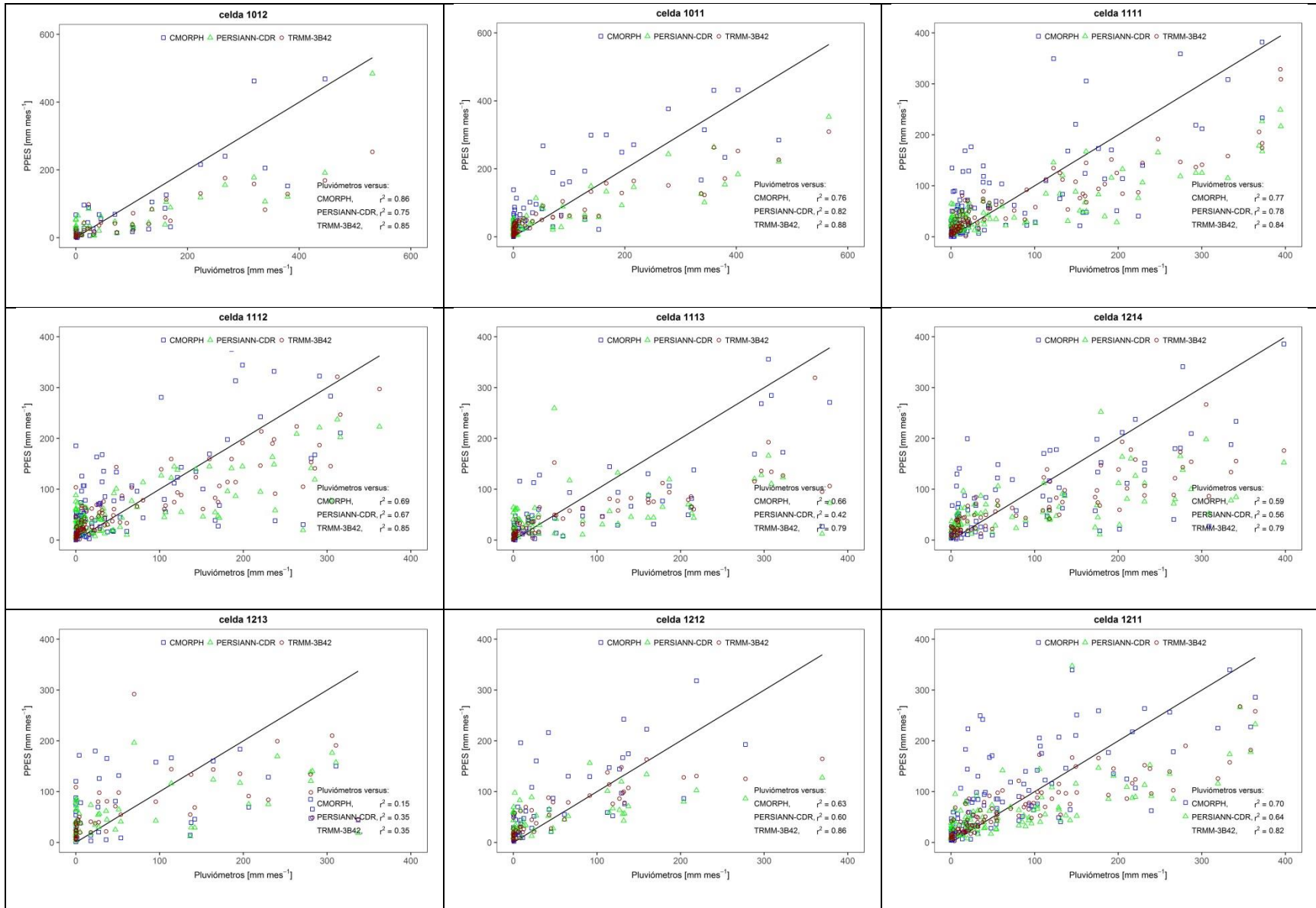
0.89   0.92	-	0.79   0.83	0.59   0.60	0.57   0.55
0.92   0.93	0.79   0.80	0.35   0.37	0.74   0.75	0.13   0.09
0.85   0.86	0.85   0.88	0.86   0.88	0.81   0.77	0.62   0.61
0.88   0.90	0.84   0.87	0.82   0.84	0.54   0.58	0.58   0.62
-	-	-	0.61   0.66	-

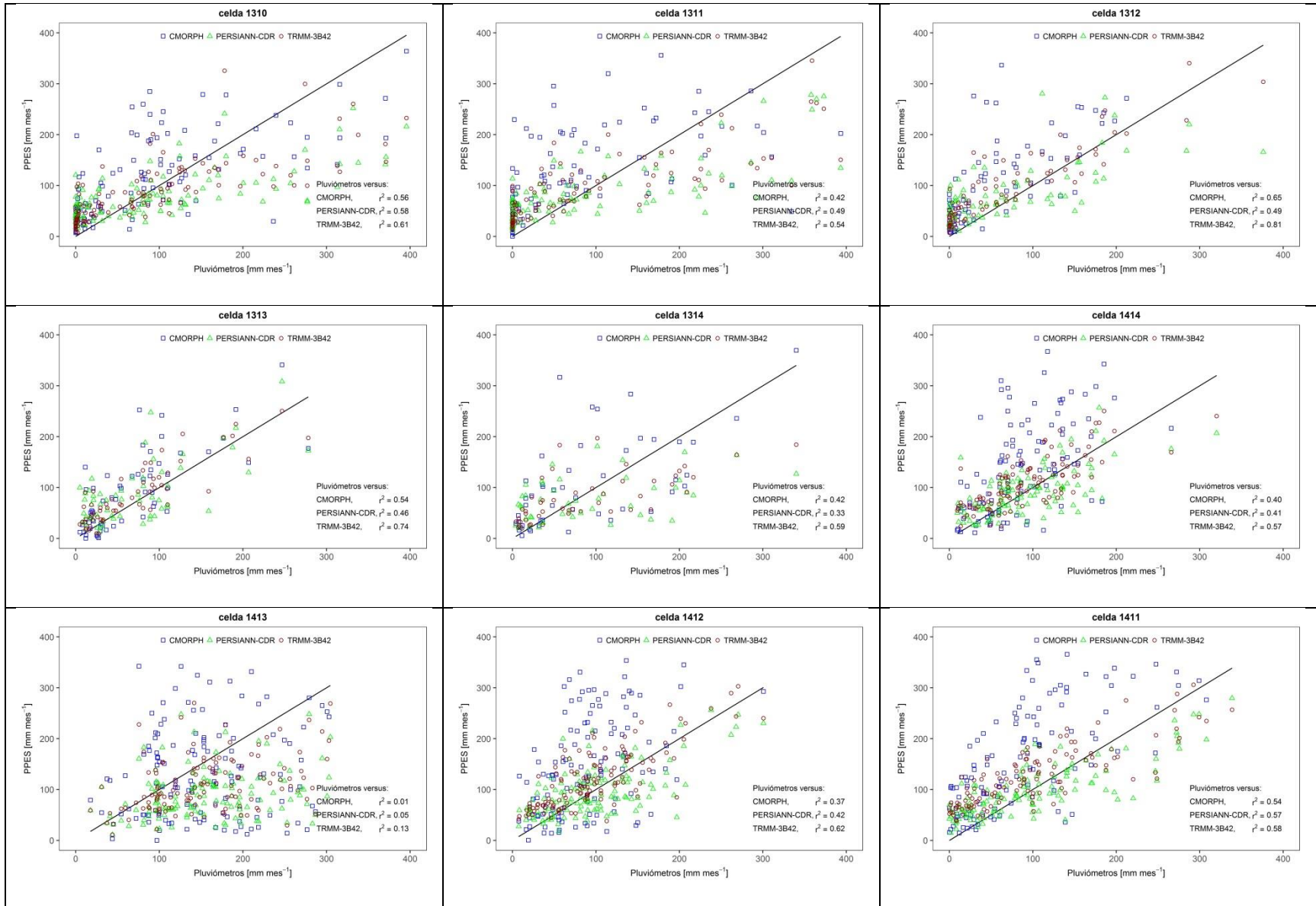
Figura 8-7. Correlación TRMM-3B42 y TRMM-3B42-correctado versus pluviómetros.

### Comparaciones de los pluviómetros con datos PPES

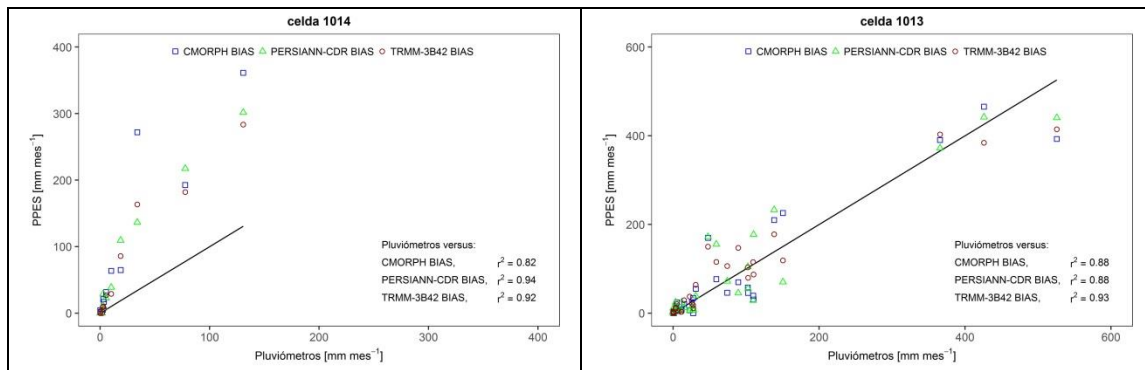


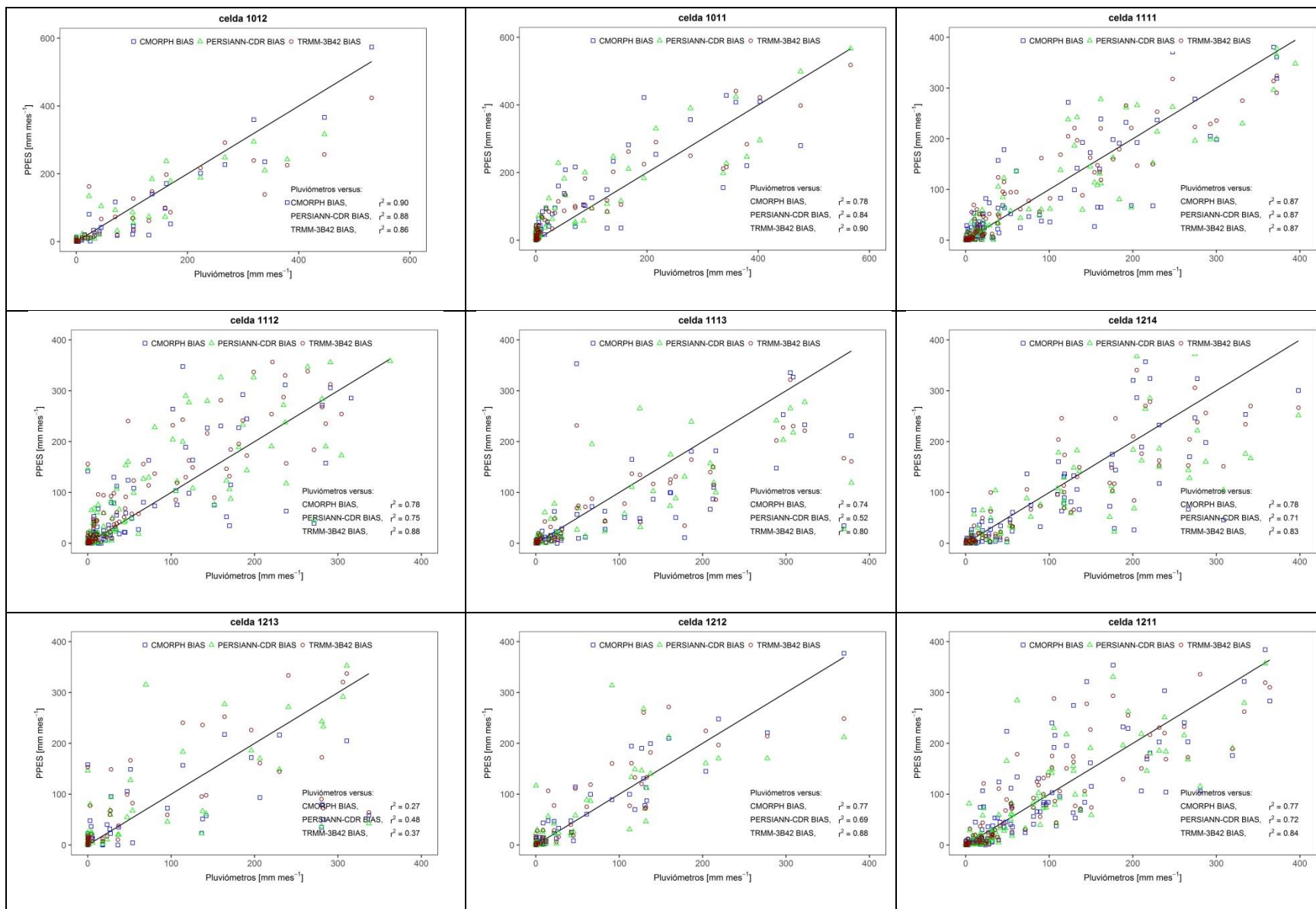


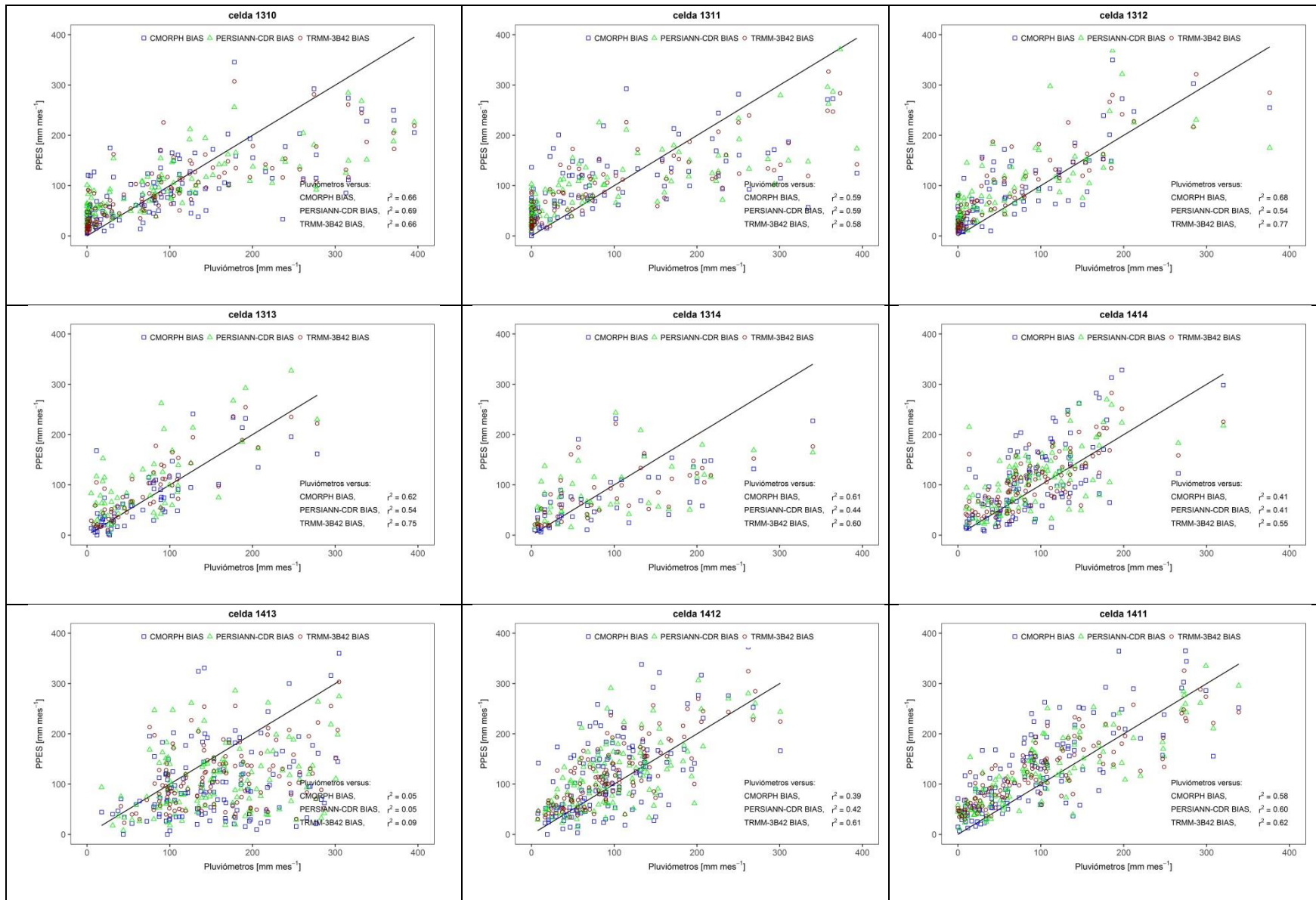




## Comparaciones de los pluviómetros con datos *PPES-corregidos*







# Comparación de ERA-Interim versus los datos observados en estaciones meteorológicas.

